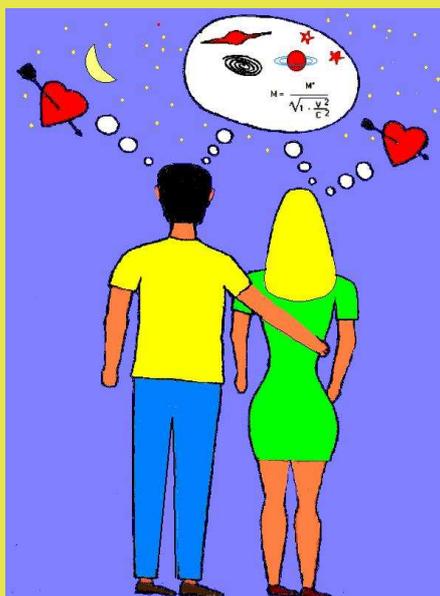


Antonino Cucinotta



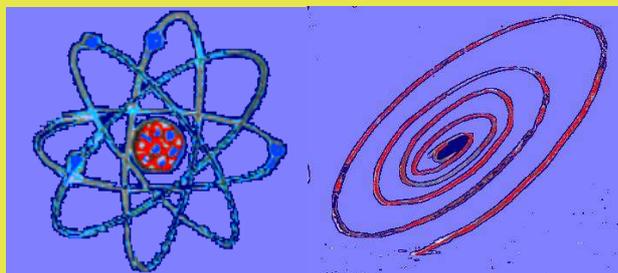
**GIANNI E GIULIA**

***INNAMORATI SPECIALI***

**AFFASCINATI DAI MISTERI DELL'UNIVERSO,  
CI AIUTANO A CAPIRE COM'E' FATTO  
E COME FUNZIONA IL MONDO FISICO**

***più***

***la versione testo del sito  
di cultura scientifica  
PEOPLEPHYSICS.COM***



***RERUM NATURAM AMBULANDO DISCERE***

MESSINA, LUGLIO 2003 - COPYRIGHT 2003-2008

TUTTI I DIRITTI RISERVATI

# INDICE

**Pag.**

**8....PREFAZIONE**

**9....I L'UNIVERSO SI ESPANDE**

*CONTINUERA' AD ESPANDERSI O IMPLODERA'?*

**13....II NASCITA, EVOLUZIONE E MORTE DI UNA STELLA**

*LA GRAVITA', FORZA MOTRICE DELL' UNIVERSO, AGGREGA  
E COMPRIME LA MATERIA CREANDO LE CONDIZIONI  
FISICHE FAVOREVOLI PER LA NASCITA DI UNA STELLA*

**19....III STELLE, PIANETI ED ESSERI VIVENTI**

*LA MATERIA DI CUI SONO FATTI CONTIENE GLI STESSI  
COMPONENTI FONDAMENTALI: QUARK ED ELETTRONI*

**24....IV "SAPORI" E "COLORI" DEL MICROCOSMO**

*INVENTATI DAI FISICI PER SPIEGARE LE FORZE  
SUBNUCLEARI DEBOLI E FORTI*

**31....V IL MISTERO DEL DUPLICE COMPORTAMENTO**

**DELLA MATERIA E DELLA  
RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA  
*ONDE O PARTICELLE?***

**36....VI BOSONI E FERMIONI**

*POSSIAMO ESISTERE PERCHE' SIAMO FATTI DI FERMIONI*

**38....VII LA CORRELAZIONE QUANTISTICA A DISTANZA**

**TRA COPPIE DI PARTICELLE IDENTICHE  
*CONSENTE DI TELETRASPORTARE STATI QUANTICI  
ATOMICI E FOTONICI***

**43...VIII LE QUATTRO FORZE FONDAMENTALI DELLA NATURA**

*(GRAVITAZIONALI, ELETTROMAGNETICHE, SUBNUCLEARI FORTI E SUBNUCLEARI DEBOLI)*

**46...IX IL MISTERO DELLA GRAVITA',  
UNA FORZA SUI GENERIS**

*CURVA LO SPAZIO E RALLENTA IL TEMPO*

**52...X IL MISTERO DELL'ANTIMATERIA**

*L'UNIVERSO FATTO DI MATERIA ESISTE PER UNA MISTERIOSA ASIMMETRIA INIZIALE TRA QUARK ED ANTIQUARK*

**56...XI LE ONDE**

*MECCANICHE, ELETTROMAGNETICHE E GRAVITAZIONALI,  
PERTURBANO I MEZZI IN CUI SI PROPAGANO TRASMETTENDO ENERGIA*

**59...XII NELL'UNIVERSO ENERGIA, QUANTITA' DI MOTO,  
MOMENTO ANGOLARE E CARICA ELETTRICA SI  
CONSERVANO**

*RIVELANDOCI CHE LO SPAZIO-TEMPO E' OMOGENEO ED ISOTROPO*

**66...XIII L'ENTROPIA DELL'UNIVERSO AUMENTA  
SEMPRE**

*RIVELANDOCI IL VERSO DELLA FRECCIA DEL TEMPO*

**68...APPENDICE-GLI APPUNTI DI GIANNI I  
LE FORMULE PIU' IMPORTANTI DELLA FISICA**

**89...PEOPLEPHYSICS.COM**

**SITO WEB DI CULTURA SCIENTIFICA (VERSIONE TESTO)**

**90...INTRODUZIONE**

## **92....LE DOMANDE PIU' FREQUENTI SUL MONDO FISICO**

### **108....SCIENZA E FEDE**

### **111....I PIONIERI DELLA FISICA DA ARCHIMEDE A CARLO RUBBIA**

**111....ARCHIMEDE**

**111....GALILEO GALILEO**

**112....ISACCO NEWTON**

**113....ALESSANDRO VOLTA**

**113....MICHAEL FARADAY**

**114....ANDRE'-MARIE AMPERE**

**114....GEORG SIMON OHM**

**115....GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF**

**115....JAMES CLERK MAXWELL**

**115....WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN)**

**116....HEINRICH RUDOLPH HERTZ**

**116....WILHELM CONRAD ROENTGEN**

**116....ANTOINE HENRI BECQUEREL**

**117....PIERRE CURIE**

**117....MARIE SKLODOWSKA CURIE**

**117....MAX PLANCK**

**118....ALBERT EINSTEIN**

**119....LORD ERNEST RUTHERFORD**

**120....NIELS BOHR**

**121....LOUIS-VICTOR PIERRE RAYMOND DE BROGLIE**

**121....WERNER HEISENBERG**

**121....ERWIN SCHROEDINGER**

**122....PAUL ANDRIEN MAURICE DIRAC**

**122....ENRICO FERMI**

**123....WOLFGANG PAULI**

**123....EUGENE PAUL WIGNER**

**124....SIN-ITIRO TOMONAGA**

**124....JULIEN SCHWINGER**

**124....RICHARD FEYNMAN**

- 125....MURRAY GELL-MANN
- 125....SHELDON LEE GLASHOW
- 125....ALVIN WEINBERG
- 125....ABDUS SALAM
- 126....CARLO RUBBIA
- 126....SIMON VAN DER MEER
- 127...L'ESPLORAZIONE DEL MICROCOSMO NEL XX SECOLO**
- DALLE RICERCHE SUI RAGGI CATODICI AL MODELLO STANDARD**
- 127....GLI ESPERIMENTI SUI RAGGI CATODICI
- 127....LA SCOPERTA DEI RAGGI X (1895)
- 128....LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITA' NATURALE (1896)
- 128....LA SCOPERTA DELL' ELETTRONE (1897)
- 129....L'IPOTESI DI MAX PLANCK SULLA QUANTIZZAZIONE DELL'ENERGIA RADIANTE DEL CORPO NERO (1900)
- 129....LA TEORIA DELLA RELATIVITA' SPECIALE (O RISTRETTA) DI A. EINSTEIN
- 130....L'IPOTESI EINSTEINIANA DEI FOTONI CONSENTE DI SPIEGARE L'EFFETTO FOTOELETTRICO (1905)
- 131....LA SCOPERTA DEL NUCLEO ATOMICO (1911)
- 132....GLI ESPERIMENTI DI DIFFRAZIONE CON I RAGGI X E LO STUDIO DEI RETICOLI CRISTALLINI (1912-13)
- 132....IL MODELLO ATOMICO DI BOHR-RUTHERFORD (1913)
- 133....L'IPOTESI ONDULATORIA DI DE BROGLIE (1924)
- 133....LA MECCANICA QUANTISTICA NON RELATIVISTICA DI SCHROEDINGER (1925)
- 133....IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG (1927)
- 134....LA SCOPERTA DELLO SPIN DELL'ELETTRONE (1927)
- 134....GLI ESPERIMENTI DI DIFFRAZIONE CON ELETTRONI (1927)
- 135....LA MECCANICA QUANTISTICA RELATIVISTICA DI DIRAC E L'IPOTESI DELL'ANTIMATERIA (1928)
- 136....L'IPOTESI DEL NEUTRINO DI WOLFGANG PAULI (1930)
- 136....LA SCOPERTA DEL NEUTRONE (1932)
- 137....GLI STUDI DI ENRICO FERMI SUI NEUTRONI(1934-1938)
- 137....LA SCOPERTA DELLA FISSIONE DELL'URANIO (1939)
- 138....DALLE RICERCHE SUI RAGGI COSMICI ALLA FISICA DELLE ALTE ENERGIE
- 139....LE PARTICELLE FONDAMENTALI DELLA MATERIA : QUARK E LEPTONI
- 140....LE TRE GENERAZIONI DI QUARK E LEPTONI DEL MODELLO STANDARD
- 142....LE FORZE FONDAMENTALI DELLA NATURA ED I VETTORI DI FORZA DEL MODELLO STANDARD
- 145....INTERAZIONI DI QUARK E LEPTONI

**145....DAL MODELLO STANDARD ALLE TEORIE DELLA GRANDE UNIFICAZIONE**

**147...IL MODELLO STANDARD**

**148...LEPTONI**

**154...QUARK**

**160...I VETTORI DEI CAMPI QUANTISTICI**

**160...GLUONI:I BOSONI VETTORIALI DELL'INTERAZIONE SUBNUCLEARE FORTE TRA QUARK**

**161...LE LEGGI DELLA SINTESI CROMATICA PER IL CAMPO GLUONICO**

**163...PIONI:I VETTORI DELLA FORZA SUBNUCLEARE FORTE (INTERAZIONE RESIDUA) TRA NUCLEONI (PROTONE E NEUTRONE)**

**165...FOTONE:IL VETTORE DELLA FORZA ELETTROMAGNETICA TRA PARTICELLE DOTATE DI CARICA ELETTRICA**

**168...I BOSONI VETTORI PESANTI: MEDIATORI DEL CAMPO QUANTISTICO ELETTRODEBOLE**

**171...LE PRINCIPALI COMBINAZIONI ADRONICHE DEL MODELLO STANDARD**

**172...I PRINCIPALI MESONI**

**178...I PRINCIPALI BARIONI**

**182...MEMORANDUM**

**186...LE LEGGI DEL MONDO FISICO**

**186...LA PRIMA LEGGE DELLA DINAMICA (PRINCIPIO D'INERZIA DI GALILEI-NEWTON)**

**187...L'IMPULSO DI UNA FORZA E LA QUANTITA' DI MOTO DI UN CORPO**

**187...LA SECONDA LEGGE DELLA DINAMICA (LEGGE DI GALILEI-NEWTON)**

**190...LA TERZA LEGGE DELLA DINAMICA (PRINCIPIO DI AZIONE E REAZIONE DI NEWTON)**

**191...LA LEGGE DI GRAVITAZIONE UNIVERSALE**

**192...LA LEGGE DI GALILEI SULLA CADUTA DEI GRAVI**

**193...IL PRINCIPIO DI RELATIVITA' DI GALILEO**

**194...IL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA DI EINSTEIN TRA MOTI ACCELERATI E CAMPI GRAVITAZIONALI)**

**194...IL TEOREMA DELLE FORZE VIVE (TEOREMA LAVORO-ENERGIA)**

**197...ILPRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA QUANTITA' DI MOTO**

**199...LA SECONDA LEGGE DELLA DINAMICA DEI SISTEMI MATERIALI IN MOTO ROTATORIO**

**203...IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE**

**207...L'ATTRITO**

**208...LA RESISTENZA IDRODINAMICA**

**208...LA RESISTENZA AERODINAMICA**

- 210....IL PRINCIPIO DI PASCAL**
- 212....IL PRINCIPI DI ARCHIMEDE E DI STEVINO**
- 213....IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA MASSA**
- 214...LA PROPAGAZIONE DEL CALORE**
- 216....IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA ED I PRINCIPI DELLA TERMODINAMICA**
- 221...TRASFORMAZIONI DI CALORE IN LAVORO MECCANICO**
- 223....I CAMPI ELETTRICI**
- 226....IL LAVORO DELLE FORZE ELETTRICHE**
- 229....LE LEGGI DI OHM E DI JOULE**
- 230....I CAMPI MAGNETICI**
- 234....LA LEGGE DI AMPERE (TEOREMA DELLA CIRCUITAZIONE MAGNETICA)**
- 235....LA LEGGE DI FARADAY-NEUMANN (LEGGE DI INDUZIONE ELETTROMAGNETICA)**
- 237...FORZE ELETTROMAGNETICHE (DI LORENTZ) AGENTI SU CARICHE ELETTRICHE IN MOTO IN CAMPI MAGNETICI**
- 239...FORZE ELETTROMAGNETICHE AGENTI SU CIRCUITI ELETTRICI SOGGETTI A CAMPI MAGNETICI**
- 241....FORZE ELETTROMAGNETICHE (ELETTRODINAMICHE) AGENTI TRA CIRCUITI ELETTRICI**
- 242...L'ELETTROMAGNETISMO DI MAXWELL**
- 244...I CAMPI ELETTROMAGNETICI E LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**
- 246...LE LEGGI DI RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**
- 248...LA POLARIZZAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**
- 249...L'INTERFERENZA DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**
- 251...LA DIFFRAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**
- 252...L'EFFETTO DOPPLER**

## PREFAZIONE

Ho scritto questo libro, ispirandomi alla massima virgiliana "omnia vincit amor", con l'intento di sperimentare un nuovo approccio, forse gradevole, lo spero, alla conoscenza delle leggi che governano la realtà fisica, dal microcosmo popolato di quark, fotoni, gluoni ed elettroni, al macrocosmo delle stelle, dei buchi neri e delle galassie.

Le leggi fisiche, di norma espresse attraverso rigidi e nel contempo eleganti formalismi matematici, che ci fanno intravedere, nonostante siano trascorsi poco più di quattro secoli da quando Galileo fondò la scienza moderna, soltanto evanescenti barlumi di verità sulla logica impressa da Dio nello spazio-tempo universale, possono spesso ingenerare chiusura mentale, o addirittura immediata rinuncia in chi si accosti per la prima volta allo studio dei fenomeni della natura.

E' questo uno dei principali motivi di frattura, non insanabile a mio modesto avviso, tra le cosiddette "due culture", quella umanistica e quella scientifica, che altro non sono che facce della stessa medaglia, la cultura senza aggettivi, quella che ci riporta alla Grecia classica, *alma mater* del sapere universale.

Perchè allora non ricorrere alla forza universale dell'amore per superare la barriera di incomunicabilità tra il mondo della scienza e quello del vivere quotidiano in questi primi anni del terzo millennio, anni pur così pregni di tecnologie avanzate, che non sono scienza, ma sono figlie delle sue innumerevoli applicazioni, buone o cattive che siano?

La ricerca scientifica fondamentale, quella che deve essere costantemente e comunque sviluppata, a prescindere da quelle che possano essere le sue applicazioni tecnologiche, è, a differenza della tecnologia, un insopprimibile anelito dell'uomo, la forza vitale dell'Ulisse che si dovrebbe risvegliare in tutti, soprattutto nei giovani, pena il regresso culturale, tecnologico, economico e sociale.

Mi auguro che i percorsi d'amore, di scienza e di fede di Gianni e Giulia, due innamorati speciali, affascinati dai misteri dell'universo, che passeggiando traggono spunto dall'osservazione della natura per parlare in modo semplice delle leggi e dei misteri del Creato e ricondurre tutto all'infinito amore di Dio per l'umanità, possano comunicare al lettore tante piccole ma significative spinte per l'ampliamento del suo orizzonte di conoscenze scientifiche.

# I

## L'UNIVERSO SI ESPANDE *CONTINUERA' AD ESPANDERSI O IMPLODERA'?*

Gianni e Giulia si conoscevano da pochi mesi. Si erano incontrati alla mensa universitaria ed era quasi subito nato un feeling particolare che dava loro la sensazione di stare bene insieme. Frequentavano, rispettivamente, i corsi del quarto anno di fisica e del secondo anno di scienze naturali e s'incontravano spesso durante gli intervalli tra le lezioni. Avevano scoperto di avere entrambi una non comune curiosità per i fenomeni naturali.



Una sera di giugno, sotto un meraviglioso cielo stellato, seduti sulla spiaggia si lasciavano cullare dal ritmo della risacca, mentre i lunghi capelli biondi di Giulia, scompigliati da una complice brezza carica di odori amari, sfioravano il viso di Gianni, come per predisporlo a sensazioni più intense ed avvincenti.

I loro sguardi spesso si rivolgevano alle stelle, che rendevano ancora più magico l'incontro dei due ragazzi, isolandoli dal resto del mondo.

"Gianni, vedi quel punto luminoso che solca rapidamente il cielo?"

"Sì, Giulia, è una stella cadente."

Giulia, quasi in estasi pensando all'immensità dell'universo, cominciò a manifestare alcune curiosità:

"Gianni, che sensazioni suscita in te la visione di questo meraviglioso cielo stellato?"

"Penso all'immensità ed alla complessità del cosmo."

"Non ti suggerisce nient'altro?", soggiunse Giulia, "non pensi al Creatore di questo meraviglioso, eterno spettacolo naturale che ci fa sentire così piccini e sperduti nell'universo?"

"Giulia, eterno non direi, l'universo ha soltanto quindici miliardi di anni, dal momento del grande scoppio, il cosiddetto big bang da cui ebbe origine il Creato."

"E prima che Dio creasse l'universo, che cosa c'era?"

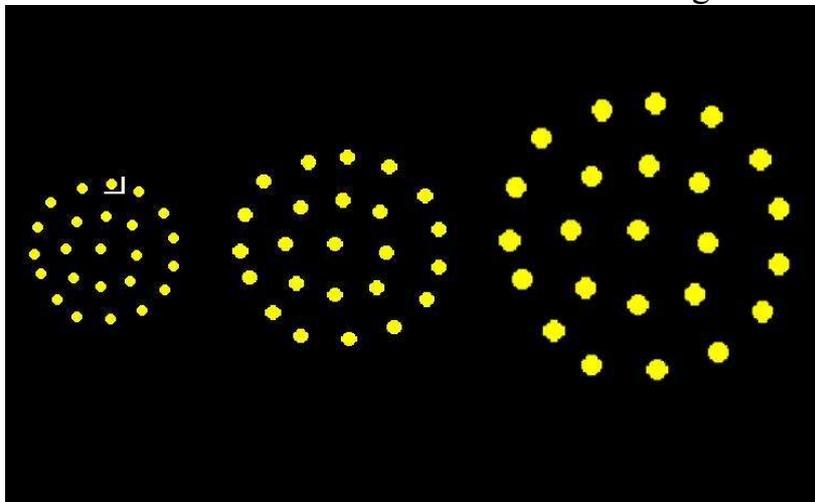
"Einstein ti avrebbe detto che prima del big bang non esistevano né lo spazio né il

tempo, non esisteva cioè il cosiddetto spazio-tempo, il *continuum* spazio-temporale che fa da substrato alle centinaia e centinaia di miliardi di galassie che oggi gli astronomi vedono allontanarsi da noi e dalla Via Lattea, la nostra galassia, a velocità straordinarie."

"Chi scoprì questo fenomeno?"

"L'espansione dell'universo, scoperta dall'astronomo americano Hubble nel 1929, diede lo spunto per la formulazione della teoria del big bang, la cui prima conferma sperimentale si ebbe nel 1965, quando Penzias e Wilson, due ricercatori della Bell Telephone Company, rivelarono l'esistenza della radiazione termica fossile, cioè di una radiazione cosmica residua del tipo di quella emessa da un corpo nero (assorbitore e radiatore ideale) alla temperatura di circa  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Questa radiazione è presente nell'universo attuale per effetto del continuo raffreddamento verificatosi a partire dal big bang, quando la temperatura, stimata dai cosmologi, era pari a 100000 miliardi di miliardi di miliardi di gradi".



**LA VELOCITA'DI ESPANSIONE DELL'UNIVERSO E'  
DIRETTAMENTE PROPORZIONALE ALLA DISTANZA  
TRA LE GALASSIE ( $V = H D$  - LEGGE DI HUBBLE)**

"Quindi, Gianni, l'universo continuerà ad espandersi e raffreddarsi sempre più?"

"Proprio così, fino a quando le galassie, allontanandosi l'una dall'altra con velocità direttamente proporzionali alle distanze, lo faranno diventare sempre meno luminoso e sempre meno denso".

Quella magica quiete fu interrotta dal sopraggiungere di alcuni ragazzi schiamazzanti, che si accingevano ad accendere un falò.

Gianni, prendendo teneramente Giulia per mano, le propose di fare una passeggiata sulla spiaggia, ansioso di ricreare quella magica atmosfera che li aveva indotti a parlare di galassie e di big bang.

"Gianni, quando finirà di espandersi l'universo?"

"Pensa al lancio verticale di un corpo: per effetto della forza di gravità, la sua velocità diminuirà, fino ad annullarsi. Subito dopo il moto si invertirà, e la velocità aumenterà continuamente, finché il corpo non avrà raggiunto il suolo.

Se invece il corpo venisse lanciato con una velocità pari a quella di fuga dal campo di

gravità terrestre (40000 km/h  $\sim$  11,11 km/s), la sua velocità non si annullerebbe mai ed esso sfuggirebbe per sempre all'attrazione terrestre.

Allo stesso modo, dopo il big bang, la bolla di massa-energia costituente l'universo iniziò ad espandersi, mentre l'attrazione gravitazionale, tendente ad aggregare la materia, rallentava maggiormente l'espansione degli strati più interni, soggetti ad un'attrazione maggiore per la minore distanza dal centro della bolla, rispetto a quella degli strati più esterni, facendo in modo che la loro velocità di fuga fosse direttamente proporzionale alla distanza dal punto in cui avvenne il big bang.

Secondo le attuali stime, lo stato finale dell'universo dipenderebbe unicamente dalla quantità totale di materia presente in esso: se ci fosse materia sufficiente per annullare la velocità di espansione, si dovrebbe verificare una fase di contrazione, tale da determinare il collasso dell'universo fino al cosiddetto big crunch (grande implosione), evento cui seguirebbe un successivo big bang, e poi un altro big crunch (universo ciclico). Se invece la quantità di materia non fosse sufficiente, se cioè la massa totale dell'universo fosse inferiore al valore critico necessario per fare implodere l'universo, questo si espanderebbe continuamente, diventando infinitamente grande e sempre più freddo. Purtroppo le misure della densità di materia universale non sono così precise da consentire l'elaborazione di previsioni molto attendibili, e pertanto non si può ancora dire, sulla base delle attuali conoscenze cosmologiche, quale tipo di evoluzione si potrà verificare, espansione continua o alternanze tra big bang e big crunch, cioè tra esplosione ed implosione".

"Che possibilità hanno i cosmologi di fare misure più precise della quantità totale di materia presente nell'universo?"

"Negli ultimi anni qualche importante risultato è stato ottenuto. Sistematiche osservazioni della velocità di rotazione dei bracci più esterni delle galassie a spirale, hanno indotto i cosmologi a ritenere che soltanto il 5% della materia dell'universo sia visibile o comunque rilevabile attraverso l'emissione di onde radio, raggi X o raggi gamma. La materia visibile, che è l'ordinaria materia barionica, costituita da protoni, neutroni ed elettroni, forma stelle, pianeti, satelliti, nubi di gas e di polvere cosmica. La massa mancante sarebbe costituita per il 25% da materia oscura (non barionica) e per il 70% da energia oscura. La materia oscura non emette alcun tipo di radiazione elettromagnetica, essendo priva di cariche elettriche.

L'ipotesi prevalente è che essa sia formata da neutrini o da particelle molto pesanti, ancora ignote, esotiche (WIMP: weak interacting massive particles), come le definiscono i fisici.

La presenza dell'energia oscura è stata dedotta da recenti misure (1998) della velocità di allontanamento (recessione) delle galassie. E' stata rilevata infatti una velocità di espansione dell'universo lievemente maggiore di quella calcolata tenendo conto dell'effetto rallentante della massa cosmica totale (sia visibile che oscura), come se agisse una misteriosa forza cosmica repulsiva tendente ad accelerare molto debolmente l'espansione."

"Quali potrebbero essere le conseguenze di questa debolissima accelerazione dell'espansione dell'universo?"

"E' semplice. L'universo si evolverebbe, sia pure molto lentamente, verso uno stato finale molto meno denso e luminoso di quello corrispondente ad una velocità di espansione costante."

"Quindi, Gianni, la temperatura dell'universo diminuirà più rapidamente per effetto dell'accelerazione dell'espansione?"

"Proprio così, Giulia, finché, fra parecchi miliardi di anni, il cosmo diventerà completamente buio e la radiazione termica fossile non sarà più rilevabile, in quanto la temperatura media in tutti i punti dello spazio-tempo avrà assunto valori prossimi allo zero assoluto, che corrisponde alla minima energia possibile (energia del punto zero)".

"Mi sembra molto strana la presenza dell'energia oscura. Come è possibile giustificarla fisicamente?"

"Hai ragione, Giulia. In effetti il problema dell'energia oscura può essere ricondotto alla costante cosmologica che Einstein aggiunse alle sue equazioni del campo gravitazionale, prima che Hubble nel 1929 scoprisse l'espansione dell'universo.

L'artificiosa introduzione della costante cosmologica, che equivale in effetti ad una forza repulsiva tendente a contrastare l'azione attrattiva della gravità, fu effettuata da Einstein per spiegare la stabilità dell'universo, che altrimenti si sarebbe evoluto verso il collasso gravitazionale.

Dopo la scoperta di Hubble, che implicava l'esistenza di una velocità di espansione derivante dal big bang, Einstein si pentì tanto amaramente dell'introduzione della costante cosmologica, che la giudicò il più grande errore della sua vita. Oggi, dopo tanti anni, il termine cosmologico repulsivo, espulso dalla porta, è rientrato dalla finestra attraverso l'energia oscura, che viene interpretata fisicamente come un'energia associata a tutte le coppie virtuali di particelle ed antiparticelle che incessantemente si generano e si distruggono nel vuoto dello spazio-tempo, rispettando il principio d'indeterminazione di Heisenberg.

Si tratterebbe in sostanza di un'ulteriore, lentissima espansione dello spazio-tempo, che si aggiunge a quella dovuta al big bang, ed è causata dalle fluttuazioni quantistiche del vuoto; essa tende a bilanciare, con una lievissima prevalenza della repulsione, la contrazione dello spazio-tempo dovuta alla gravità.

L'esiguo valore rilevato per l'accelerazione dell'espansione dell'universo conforta questa interpretazione."

Giulia, assorta nell'ascoltare Gianni che parlava accarezzandole teneramente i capelli, sentì le note della suoneria del suo cellulare.

Erano papà e mamma che stavano in ansia e la sollecitavano perché tornasse presto a casa.

Avevano ragione di essere ansiosi; erano le tre del mattino ed erano rimasti svegli tutta la notte aspettando lei. Giulia cercò di rassicurarli dicendo che sarebbe presto rincasata. I due ragazzi si diedero appuntamento per il tardo pomeriggio dell'indomani presso la biblioteca dell'Università, e salutandosi, si baciaron appassionatamente.

## II

### NASCITA, EVOLUZIONE E MORTE DI UNA STELLA

#### ***LA GRAVITA', FORZA MOTRICE DELL'UNIVERSO, AGGREGA E COMPRIME LA MATERIA CREANDO LE CONDIZIONI FISICHE FAVOREVOLI PER LA NASCITA DI UNA STELLA***

Gianni e Giulia si incontrarono in biblioteca alle 17. Mancava un'ora alla chiusura ed entrambi dovevano consultare il database delle riviste scientifiche.

Mentre Giulia trovò subito i riferimenti che le servivano, per Gianni la ricerca fu più laboriosa, poiché doveva leggere parecchi *abstract* e selezionare gli articoli più recenti da cui trarre riferimenti bibliografici per lo sviluppo della tesi, un lavoro molto impegnativo riguardante le teorie più avanzate sulla formazione, l'evoluzione e la morte delle stelle.

Era già tardi. Gianni decise di riprendere la ricerca il giorno dopo e propose a Giulia di andare a trovare alcuni amici astrofili, Roberto, Antonio e Daniela, che si riunivano spesso in una villetta isolata, in una zona collinare molto tranquilla e lontana dalle intense luci della città, per osservare comodamente gli astri.

Antonio e Daniela, entrambi grafici pubblicitari ventiseienni, si sarebbero dovuti sposare tra qualche mese, mentre Roberto, il proprietario della villetta, un brillante architetto trentenne, single, era più incline ad organizzare divertenti serate con gli amici, che a stabilire legami duraturi ed impegnativi con le donne; le sue storie sentimentali, non duravano infatti, in media, più di 5 mesi.

Gli amici astrofili, contattati in tempo utile da Gianni e Giulia, riuscirono comunque ad improvvisare una piacevole cenetta.

Dopo un breve scambio di battute su argomenti di vita quotidiana - lavoro, tasse, problemi di traffico ed amenità varie -, si trasferirono tutti in terrazza dove era stato sistemato un bel telescopio riflettore con focale di 1 metro, computerizzato.

Roberto e Daniela invitarono Gianni e Giulia ad avvicinarsi all'oculare per osservare i pianeti maggiori e qualche costellazione.

Giulia, leggermente miope, incontrava qualche difficoltà nel mettere a fuoco gli anelli di Saturno, ma con l'aiuto di Gianni riuscì a distinguerli e poté anche riconoscere facilmente alcune costellazioni; senonchè, tornando a sedersi sentì cadere a terra la collana e la medaglietta che le erano state regalate da una zia materna in occasione della Cresima.

"Ecco, Giulia, ho recuperato i tuoi frammenti di stelle", disse Gianni, alzandosi dal pavimento su cui si era chinato.

"Grazie Gianni ... ma, scusami, non ho capito il senso della tua frase !"

"E' semplice, Giulia, se pensi che l'oro, l'argento ed il rame di cui sono fatti i tuoi gioielli si formarono all'interno di stelle che conclusero la loro evoluzione collassando in supernovae, molto tempo prima che si formassero il Sole, la Terra ed i pianeti."

"Gianni, questa storia è davvero interessante", disse Roberto, "ci vuoi spiegare come sia potuto accadere ciò?"

"Se prestate un po' d'attenzione, cercherò di spiegarvi in sintesi come nasce, si evolve e muore una stella.



Una stella si forma a partire dall'idrogeno, che è l'elemento più semplice ed abbondante nello spazio cosmico. Una grande massa d'idrogeno gassoso tende ad addensarsi per effetto della forza di attrazione gravitazionale tra gli atomi, formando un'enorme sfera verso il cui centro gli atomi cadono, dando luogo ad un nucleo la cui densità, per effetto del peso degli strati sovrastanti, va aumentando continuamente.

Contemporaneamente gli atomi che si dirigono verso il nucleo, accelerati dalla forza di gravità, acquistano velocità, quindi un'energia cinetica sempre più grande che si trasforma in calore. In tal modo la temperatura del nucleo aumenta continuamente per i frequenti urti tra gli atomi, fino a raggiungere il valore necessario per l'innesco delle reazioni termonucleari (15 milioni di °C), che convertono la massa in energia, secondo la celebre equazione di Einstein  $E = mc^2$ , ed accendono la fornace termonucleare che fa nascere la stella e la alimenta".

"Scusami, Gianni, ci vuoi parlare delle reazioni termonucleari?" chiese Antonio.

"Ti porto l'esempio della bomba all'idrogeno, la bomba H. In una bomba H avvengono reazioni termonucleari simili a quelle che generano energia all'interno delle stelle. La differenza consiste nel fatto che l'energia, mentre in una bomba H si sprigiona sotto forma di esplosione, nelle stelle si libera con regolarità per milioni o miliardi di anni, secondo che la massa della stella sia, rispettivamente, grande o piccola.

Il Sole infatti si è formato circa 5 miliardi di anni fa e continuerà a bruciare idrogeno per altri 5 miliardi di anni. Inoltre, mentre in una bomba H l'elevatissima temperatura (decine di milioni di °C) necessaria per l'innesco delle reazioni termonucleari, si ottiene

facendo esplodere una bomba atomica convenzionale, ad uranio o plutonio, come quella di Hiroshima per intenderci, nelle stelle le reazioni vengono innescate in tempi lunghissimi, compresi tra decine di migliaia di anni, per stelle decine di volte più massicce del Sole, e centinaia di milioni di anni per stelle con massa minore o uguale a quella solare.

Per capire meglio come abbiano luogo le reazioni termonucleari, basta considerare che alle elevatissime temperature necessarie perchè esse si mantengano, decine di milioni di gradi, la materia si trova allo stato di plasma, il che significa che gli elettroni, con carica elettrica negativa, ed i nuclei, con carica elettrica positiva, non formano più atomi neutri, ma si muovono liberamente in tutte le direzioni con velocità tanto più elevate quanto più alta è la temperatura, urtandosi continuamente; i loro spostamenti a zig zag sono analoghi a quelli delle molecole di un gas.

Quando due protoni (nuclei d'idrogeno) si urtano frontalmente, con velocità così elevate da riuscire a vincere le intense forze elettriche repulsive cui sono soggetti, essendo entrambi dotati di carica positiva, entrano in gioco le forze nucleari attrattive, oltre 100 volte più intense di quelle elettromagnetiche, ed i due protoni, dopo essersi trasformati, per effetto delle forze di Fermi (subnucleari deboli), in un protone ed in un neutrone (particella priva di carica elettrica ed avente massa circa uguale a quella del protone), si fondono insieme in un deutone (nucleo di idrogeno pesante, con un neutrone ed un protone), liberando energia.

Sono tre, in effetti, le reazioni che fanno nascere una stella di media luminosità, come il Sole:

- nella prima, dalla fusione di due protoni si formano un deutone, un neutrino (particella neutra con massa quasi nulla) ed un elettrone positivo (positrone);
- nella seconda, dalla fusione tra un deutone ed un protone si formano un nucleo di elio-3 (composto da due protoni ed un neutrone) ed un fotone gamma;
- nella terza, dalla fusione di due nuclei di elio-3 si formano due protoni ed un nucleo di elio-4, composto da due protoni e due neutroni.

L'energia che si libera nelle tre reazioni comprende l'energia elettromagnetica dei raggi gamma e l'energia cinetica dei nuclei e delle particelle che si formano.

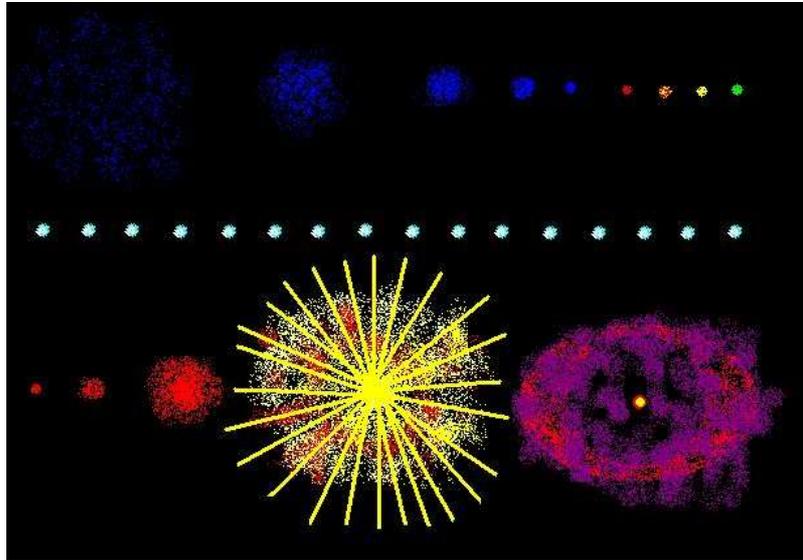
La maggior parte dell'energia accende ed alimenta la stella, mentre la parte rimanente è trasportata dalla radiazione elettromagnetica (a radiofrequenza, infra-rossa, visibile, ultravioletta, X e gamma) e dal flusso di neutrini che vengono emessi nello spazio.

Invece, nelle stelle molto luminose e dense, con temperature superiori ai quindici milioni di gradi, la fusione nucleare avviene secondo il ciclo di Bethe, noto come ciclo carbonio-azoto-ossigeno, che si basa su una catena di reazioni termonucleari che coinvolgono nuclei di carbonio come catalizzatori."

"Perchè muore una stella?" domandò Daniela.

"Vedi, Daniela", rispose Gianni, "cito l'esempio del Sole, che è una stella nana. Quando nel Sole, tra circa 5 miliardi di anni, si sarà esaurito tutto il combustibile nucleare, che è l'idrogeno, il suo nucleo, la cui temperatura è intorno ai 20 milioni di °C, tenderà a contrarsi ulteriormente liberando, per la conseguente diminuzione dell'energia potenziale gravitazionale, una quantità di calore che farà in modo che la fotosfera si

espanda notevolmente, raffreddandosi dagli attuali 5800 °C fino a 3000 °C. Pertanto il Sole si trasformerà in una stella gigante rossa, con un diametro qualche centinaio di volte maggiore di quello attuale (1400000 km), che si ingrandirà fino ad inglobare la maggior parte dei pianeti.



**FORMAZIONE ED EVOLUZIONE DI UNA STELLA CHE  
COLLASSA IN UNA SUPERNOVA PROIETTANDO NELLO  
SPAZIO GETTI DI MATERIA DI ALTISSIMA ENERGIA  
(FORMAZIONE DI NUCLEI DI ELEMENTI PESANTI)**

Il suo nucleo avrà raggiunto intanto una temperatura intorno ai 100 milioni di °C, che innescherà la fusione di tre nuclei di elio-4 in un nucleo di carbonio-12 (composto da 6 protoni e 6 neutroni). Nella fase terminale, quando tutto l'elio si sarà trasformato in carbonio, cesseranno tutte le reazioni per mancanza di "combustibile" termonucleare ed il Sole subirà una contrazione gravitazionale finale, collassando, data la sua massa relativamente modesta, in una stella nana bianca del diametro di qualche decina di migliaia di chilometri, formata da un nucleo fatto di protoni e neutroni ed avente una densità pari circa ad un milione di volte quella dell'acqua, e da uno strato superficiale di elettroni, estremamente condensato.

"Ma ancora non ho capito" disse Giulia, "come si formano i metalli all'interno delle stelle."

"Ti spiego subito. Dai calcoli astrofisici risulta che se una stella ha una massa fino a 1,4 volte la massa del Sole, al termine della sua vita collasserà in una stella nana bianca. Se invece la massa è compresa tra 1,4 e 3,5 volte la massa solare, la stella, dopo aver bruciato tutto l'elio, incrementerà ulteriormente la temperatura del suo nucleo bruciando il carbonio e producendo, per successive fusioni termonucleari, elementi via via più pesanti fino al ferro.

Quando il nucleo della stella sarà prevalentemente costituito da ferro, la stella non avrà più alcun elemento da bruciare e pertanto collasserà definitivamente e bruscamente sotto l'azione della gravità trasformandosi in una stella supernova e liberando l'energia gravitazionale attraverso un'esplosione immane, durante la quale i neutroni presenti in

essa saranno assorbiti dai nuclei di ferro, dando luogo alla sintesi di tutti gli altri elementi pesanti, tra i quali anche l'oro, fino all'uranio. Una supernova si può osservare, anche per parecchi giorni, ed appare come una stella molto più luminosa del Sole, come avvenne, ad esempio, per la supernova della nebulosa del Granchio, osservata nel 1054 d.C.

Quando una stella collassa in una supernova, assumendo temperature che possono superare il miliardo di gradi, proietta nello spazio getti di materia di altissima energia, contenenti quasi tutti i nuclei degli elementi chimici naturali, che pertanto fanno parte della polvere cosmica dalla cui aggregazione hanno origine i corpi celesti. Come residuo dell'esplosione rimane una stella di neutroni, cioè una pulsar, così denominata per la caratteristica emissione di impulsi radio periodici, dovuti al fatto che si tratta di una piccola stella, del diametro di qualche decina di chilometri, dotata di un campo magnetico molto intenso e rotante rapidamente su se stessa."

"E se una stella ha una massa maggiore di 3,5 masse solari, che cosa succede?" chiese Daniela?

"In questo caso", spiegò Gianni, "la stella muore trasformandosi in un buco nero, come prevede la teoria einsteiniana della relatività generale."

"Che cos'è un buco nero?" soggiunse Daniela.

"Un buco nero, definito come una singolarità dello spazio-tempo, è un oggetto cosmico a simmetria sferica avente il raggio di alcuni chilometri, che genera un campo gravitazionale avente un'intensità così grande, che neppure la luce, che si propaga nel vuoto a 300000 km/s, può sfuggire alla sua attrazione; esso pertanto appare nero.

La grandissima intensità del campo gravitazionale di un buco nero è dovuta al fatto che una massa pari, per esempio, a quella del Sole, è concentrata in una sfera con diametro piccolissimo, qualche chilometro, rispetto a quello caratteristico di una stella ( da un minimo di una decina di migliaia di chilometri per una stella nana bianca fino a qualche centinaio di milioni di chilometri per una stella gigante rossa). Questo significa che la densità della materia che forma un buco nero è intorno a 19 miliardi di tonnellate per centimetro cubo. Pertanto tutti gli oggetti, anche i fotoni, sia quelli della radiazione luminosa che quelli dei raggi X e gamma, trovandosi in prossimità di un buco nero, vengono inevitabilmente inghiottiti dalla singolarità spazio-temporale che lo caratterizza (campo gravitazionale infinitamente grande). Pensa che la massa del Sole, pur essendo enorme, 2 miliardi di miliardi di miliardi di tonnellate, non basta per farlo collassare in un buco nero, essendo distribuita in una sfera di 1.400.000 km di diametro, mentre dovrebbe essere di soli 6 km il diametro necessario perchè la sua massa possa concentrarsi fino a raggiungere la densità (concentrazione di materia) tipica di un buco nero! Se invece consideriamo la Terra, che ha una massa di circa 6000 miliardi di miliardi di tonnellate e un diametro di circa 12800 km, possiamo calcolare che per ottenere la densità necessaria per farla collassare in un buco nero, bisognerebbe comprimerla, cosa impossibile a farsi, entro una sfera di soli 18 mm di diametro."

"Sono numeri enormi, che sfuggono alla nostra comprensione", replicò Daniela.

"Niente affatto", disse Roberto, "se immagini l'universo come una sfera del raggio di 15 miliardi di anni luce."

"A quanti chilometri corrisponde un anno luce?" chiese Daniela.

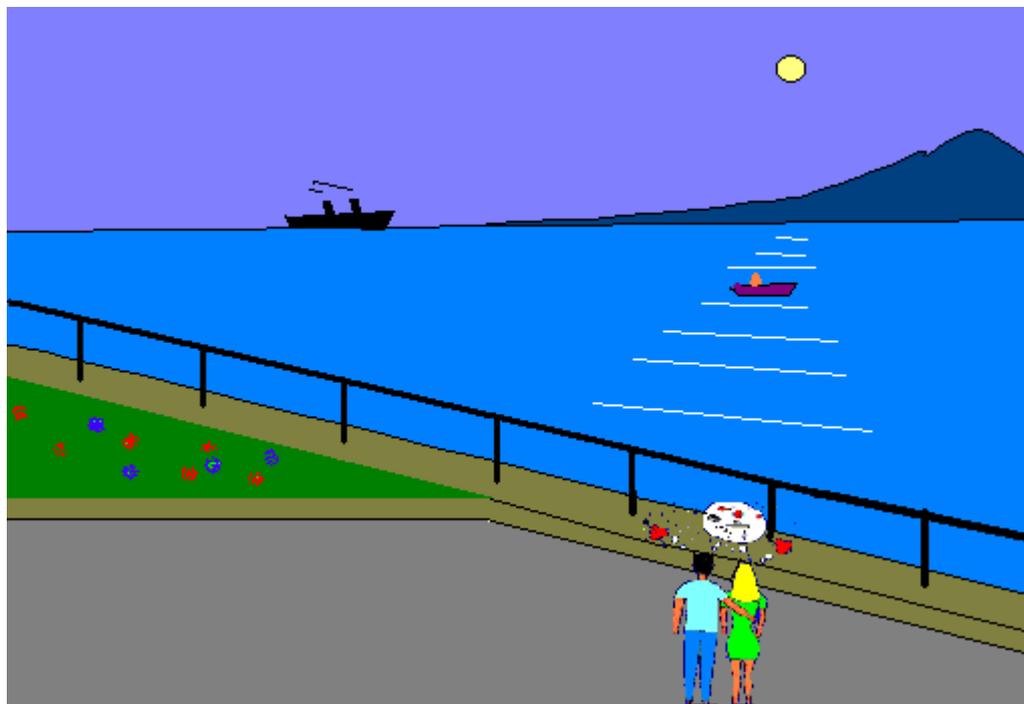
"Un anno luce",rispose Roberto, equivale a circa 9500 miliardi di km."

"Bene", disse Gianni, "è già tardi, soprattutto per Giulia, se non vi dispiace, torneremo a trovarvi la prossima settimana, anche per dare un'occhiata al cielo col vostro telescopio. Vi avvertiremo.""Prego, potrete venirci a trovare ogni qual volta vi piaccia", risposero gli amici.

"Grazie ed arrivederci"."Arrivederci."

### III STELLE, PIANETI ED ESSERI VIVENTI

#### *LA MATERIA DI CUI SONO FATTI CONTIENE GLI STESSI COMPONENTI FONDAMENTALI: QUARK ED ELETTRONI*



Gianni e Giulia non si vedevano da due giorni a causa dei loro impegni di studio. Erano le 16 e Gianni inviò a Giulia un messaggio chiedendole di poterla incontrare verso le 20 all'internet caffè nei pressi del lungomare. Giulia gli rispose con un messaggio di conferma.

Si incontrarono alle 20,45, quando il locale era già molto affollato; decisero pertanto di trascorrere qualche ora insieme passeggiando sul lungomare. Si tenevano per mano scambiandosi tenerezze con la complicità di una splendida luna piena che donava al mare magici riflessi d'argento, mentre al loro sommesso chiacchierare si sovrapponevano il verso dei gabbiani ed i lontani rumori di alcune barche da pesca.

"Gianni, quando l'altra sera si parlava con Roberto, Antonio e Daniela delle stelle che nascono, si evolvono e muoiono, pensavo al nostro amore, a quanto esso possa essere intenso da resistere al tempo che passa, senza spegnersi come la luce di una stella che muore; secondo te il nostro amore può paragonarsi ad una stella?"

"Direi invece, Giulia, che il nostro amore è come una stella doppia."

"Mi piace questa similitudine ! Dimmi il nome di una stella doppia!"

"Sirio! E' la stella che appare la più luminosa del cielo, perchè, trovandosi alla distanza di 8,6 anni luce dalla Terra, è molto più vicina di altre stelle, come Deneb, per esempio, che, pur essendo circa 2500 volte più luminosa di Sirio, dista dalla Terra 1500 anni luce. Nella seconda metà del XIX secolo si scoprì che Sirio fa parte di un sistema

binario, composto da Sirio A, la stella che vediamo, e Sirio B, molto meno luminosa della compagna, ma molto importante perchè fu la prima nana bianca osservata. Come Sirio A e Sirio B attraendosi orbitano intorno al loro comune centro di gravità, così tu ed io siamo in orbita intorno al centro di gravità del nostro amore."

"E se siamo come una stella doppia, avremo abbastanza idrogeno da bruciare perchè la fiamma del nostro amore duri per tutta la vita?"

"Senz'altro, Giulia, la fiamma del nostro amore è così viva che non si spegnerà neanche con la morte.

Spero che il centro di gravità del nostro amore sia sempre equidistante dai nostri cuori e che il sentimento che io provo per te non sia mai più intenso di quello che tu provi per me."

"Gianni, l'altra sera sono rimasta impressionata sentendoti parlare dell'enorme densità di un buco nero.

Hai detto, se non ricordo male, che un centimetro cubo della materia che lo costituisce pesa intorno a 19 miliardi di tonnellate.

Ne deduco che la materia debba contenere tanti spazi vuoti anche all'interno dei protoni e dei neutroni, in aggiunta a quelli tra elettroni e nuclei atomici, se essa può essere compressa fino ad assumere densità così elevate e difficili da concepire".

"Proprio così, Giulia. Sappiamo infatti che l'esistenza di spazi vuoti all'interno degli atomi della materia, ritenuta inammissibile dagli antichi filosofi, che teorizzavano invece il cosiddetto *horror vacui*, di lucreziana memoria, cioè la tendenza della natura a riempire tutti gli spazi vuoti, è stata confermata sperimentalmente ed in modo inequivocabile da Rutherford, cui si deve la scoperta, nel 1911, dell'esistenza del nucleo atomico, che si può immaginare come una microscopica sfera nella quale si concentra quasi tutta la massa di un atomo, ed il cui raggio è di alcuni millesimi di miliardesimo di cm, mentre quello di un atomo è di alcuni centomilionesimi di cm, il che significa che il volume di un atomo è mille miliardi di volte maggiore di quello del relativo nucleo. Considera pertanto che la densità della materia nucleare è mille miliardi di volte maggiore di quella dell'acqua (1 g/cm<sup>3</sup>).

Successivamente Niels Bohr, in base ai risultati delle ricerche di Rutherford, formulò nel 1913 la prima teoria dell'atomo. Devo dirti tuttavia che il vuoto della fisica moderna non è uno spazio-tempo completamente privo di massa-energia; infatti la teoria quantistica dei campi si basa sull'esistenza di un "vuoto" fatto di particelle virtuali di materia e di antimateria, che continuamente si formano e si annichilano a coppie, senza che sia possibile rivelarle sperimentalmente, perchè altrimenti verrebbe violato il principio di conservazione della massa-energia. In realtà la natura permette che questo principio sia violato soltanto per intervalli di tempo tanto più brevi quanto maggiore sia la massa delle particelle ed antiparticelle che dal vuoto si materializzano a coppie, per distruggersi reciprocamente immediatamente dopo, mentre la loro massa si trasforma in raggi gamma, cioè in energia elettromagnetica radiante."

"Ma allora, Gianni, come si può ammettere che le leggi della natura siano violate?"

"Non dimenticare, Giulia, che stiamo parlando di fenomeni del microcosmo, che riguardano *le cose invisibili*. In effetti questi fenomeni di fisica virtuale sono

perfettamente compatibili con il principio d'indeterminazione di Heisenberg, che regola il comportamento di tutti gli oggetti del microcosmo.

E' come dire che queste piccole trasgressioni microcosmiche, che equivalgono a prestiti di massa-energia da restituire a brevissima scadenza ad un inflessibile e scrupoloso controllore dei bilanci energetici naturali, siano sempre tollerate, purchè la natura non se ne accorga".

"E per quanto riguarda gli spazi vuoti all'interno dei protoni e dei neutroni di cui è fatto il nucleo di un atomo, esistono conferme sperimentali?"

"Fino ai primi anni '60 si continuava a ritenere che il protone ed il neutrone fossero effettive particelle elementari, cioè non aventi struttura interna e pertanto non contenenti altre subparticelle fondamentali.

D'altra parte negli anni '50 i fisici, pur continuando a studiare mediante palloni sonda i raggi cosmici, cioè i flussi di particelle di altissima energia (protoni, neutroni, ioni pesanti, elettroni ed altre particelle, come i mesoni, di massa intermedia tra quella dell'elettrone e quella del protone), provenienti da zone dell'universo esterne al sistema solare, cominciarono ad utilizzare i primi acceleratori di particelle (elettrosincrotroni e protosincrotroni) per studiare le collisioni di alta energia tra elettroni (o protoni) ed opportuni bersagli metallici. Giunsero così alla scoperta di un vero e proprio "zoo" di nuove particelle, sia cariche che neutre, allora chiamate impropriamente elementari (pioni, kaoni, iperoni), con massa compresa tra circa 0,14 volte e 1,4 volte la massa del protone ed i cui schemi di classificazione erano diventati tanto complessi, che risultava difficile ammettere che in natura ci fosse posto per un numero così elevato di particelle "elementari". La svolta venne da un fisico statunitense, Murray Gell-Mann, il quale nel 1962 propose un rivoluzionario schema di classificazione che si basava sulle proprietà di simmetria delle particelle note. Addirittura riuscì a prevedere l'esistenza di una nuova particella con carica negativa e massa pari a circa 1,78 volte la massa del protone, l'iperone omega, che fu rivelata sperimentalmente un anno dopo, confermando brillantemente la validità dello schema a gruppi di otto o dieci particelle (ottetti o decupletti) di Gell-Mann."

"Perchè la sua teoria ebbe successo?"

"Il successo della teoria derivò dal fatto che nel 1964 Murray Gell-Mann e George Zweig, lavorando indipendentemente l'uno dall'altro, erano riusciti a stabilire, basandosi sulla teoria matematica dei gruppi, che per classificare tutte le particelle fino allora note, bastava ipotizzare l'esistenza di tre nuove particelle davvero fondamentali, cui Gell-Mann diede il nome misterioso di quark (u,d,s ; up, down, strange, cioè su, giù, strano), dotate di carica elettrica frazionaria, rispettivamente  $+(2/3)$  e,  $-(2/3)$  e,  $-(1/3)$  e, rispetto alla carica elementare e (carica dell'elettrone), che vale circa 1,6 decimi di miliardesimo di miliardesimo di coulomb.

Nella teoria di Gell-Mann, che fa parte dell'attuale "modello standard", il protone è formato da due quark su più uno giù, mentre un quark su e due quark giù formano il neutrone. Gli iperoni (lambda, sigma, csi), la cui massa supera quella del protone, sono formati da una combinazione di quark non strani (su,giù) e da un quark strano, mentre i

mesoni  $\pi$  (pioni) e K (kaoni) e tutti gli altri mesoni che sono stati scoperti negli ultimi 40 anni, sono formati da un quark e da un antiquark. C'è da dire che il termine "mesone", che inizialmente, quando i mesoni conosciuti erano pochi, veniva usato soltanto per indicare le particelle con massa intermedia tra quella dell'elettrone e quella del protone, oggi invece indica ogni particella formata da un quark e da un antiquark, anche se la sua massa supera quella del protone."

"Gianni, hai detto antiquark. Che cos'è un antiquark?"

"E' è una particella di antimateria avente la stessa massa ed una carica elettrica uguale e di segno opposto rispetto al quark di cui è antiparticella. Pertanto gli antiquark anti-su, anti-giù ed anti-strano hanno masse rispettivamente uguali a quelle dei quark su, giù e strano e cariche elettriche pari, rispettivamente, a  $-(2/3)$  e,  $+(2/3)$  e  $+(1/3)$  e".

"Perchè si parla di quark ed antiquark strani?"

"Perchè, assieme ai quark degli altri due tipi, formano le particelle strane (kaoni ed iperoni), così chiamate per il loro strano comportamento, in quanto la loro velocità di decadimento in pioni e nucleoni risulta bassa come quella di decadimento beta dei nuclei radioattivi, che è determinata dalle forze deboli di Fermi, mentre la velocità con cui esse si formano nelle collisioni tra pioni e nucleoni è molto alta, tipica delle interazioni forti."

"Ma i quark esistono davvero?"

"Sì, Giulia. Sin dai primi anni '70 numerosi esperimenti di collisione tra elettroni e protoni, eseguiti con acceleratori sempre più potenti, consentirono di evidenziare l'esistenza della struttura interna del protone. Infatti i dati sperimentali dimostravano che nell'urto contro il bersaglio il protone si comportava come se al suo interno fossero libere di muoversi tre particelle, che tuttavia non potevano essere estratte da esso per il fatto che la forza attrattiva (interazione forte) che le tiene legate cresce molto rapidamente quando si prova a separarle.

Pertanto, con gli attuali acceleratori, non si possono osservare quark allo stato libero; occorrerebbero acceleratori immensi, tali da fornire energie di collisione enormi, pari a quelle disponibili un milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo dopo il big bang.

Successivamente, in oltre trent'anni di esperimenti eseguiti presso i vari centri di ricerca mondiali, i più importanti dei quali sono il CERN di Ginevra ed il Fermilab di Chicago, sono state acquisite ed elaborate quantità enormi di dati che sono coerenti, in modo inequivocabile, con l'esistenza dei quark.

Ecco perchè possiamo affermare che i componenti fondamentali della materia che costituisce le stelle, i pianeti e tutti gli esseri viventi, sono proprio i quark e gli elettroni: i primi aggregandosi formano i protoni ed i neutroni del nucleo atomico, mentre gli elettroni si distribuiscono attorno al nucleo come una nuvola di carica elettrica negativa, determinando le proprietà chimiche dei singoli elementi."

"Quindi si può pensare che in un buco nero la materia si sia condensata a tal punto da non lasciare alcun vuoto tra i quark?"

"Possiamo pensarlo."

"Gianni, dopo avere ascoltato le tue spiegazioni, mi sento proiettata nell'infinitamente

piccolo, provo quasi la strana sensazione di navigare con la mente in un oceano di quark ed elettroni."

"Giulia, prova a liberare tutta la tua fantasia, pensa di essere piccola come un quark e di poter navigare all'interno di un protone o di un neutrone.

Non solo subiresti continuamente violenti urti contro i quark, il che sarebbe tutt'altro che piacevole, ma provando ad allontanarti da essi, ti vedresti raggiunta da tantissimi gluoni lanciati dai quark, e tu stessa, dopo averli assorbiti, li rilanceresti verso di essi, in un estenuante ping pong che metterebbe a durissima prova i tuoi nervi, facendoti sentire sottoposta ad una forza attrattiva molto intensa, tanto più intensa quanto più tu tentassi di allontanarti dai quark."

"Hai parlato di gluoni? Di che si tratta?"

"Immagina di giocare a ping pong con me. Sia quando lanciamo la pallina, sia quando la prendiamo, dobbiamo muoverci rapidamente interagendo con essa attraverso le forze d'urto. Se paragoni la pallina ad un gluone ed i nostri corpi ai quark, puoi immaginare come la forza attrattiva che agisce tra due quark sia dovuta al continuo scambio di gluoni, che non sono altro che pacchetti di energia subnucleare che si muovono sempre alla velocità della luce nel vuoto, essendo particelle prive di massa.

La forza attrattiva prodotta dallo scambio dei gluoni (dal latino *glus*, colla) tra due quark costituisce la cosiddetta colla subnucleare, e si chiama interazione forte, proprio perchè è la forza più intensa esistente in natura."

Gianni, i gluoni non ti fanno pensare alla forza del nostro amore?"

"Lo penso anch'io, Giulia. Ricordi il primo e l'ultimo verso del Paradiso: "la gloria di Colui che tutto move/.../ l'Amor che move il Sole e l'altre stelle"? L'universo è emanazione dell'amore di Dio, e così anche le forze che agiscono tra le particelle del microcosmo si possono interpretare come materializzazioni di questo amore universale."

"E' bellissimo quello che hai detto; le tue parole mi fanno sognare."

"Amore, noi facciamo parte di questo disegno di Dio."

La sirena di una nave che entrava nel porto interruppe la romantica passeggiata di Gianni e Giulia, che d'altra parte erano già stanchi. Si scambiarono qualche tenero bacio e decisero di incontrarsi nella tarda mattinata del giorno dopo all'Università, per permettere a Giulia di assistere a qualche esame di botanica.

## IV

### **"SAPORI" E "COLORI" DEL MICROCOSMO** ***INVENTATI DAI FISICI PER SPIEGARE*** ***LE FORZE SUBNUCLEARI DEBOLI E FORTI***

Quella mattina Giulia era un po' in ansia, dopo aver ascoltato alcune domande poste dai professori a Carlo e Silvana, che si presentavano già per la terza volta. Gianni tentò di rincuorarla accompagnandola al bar dell'Università per offrirle un gelato, e subito dopo la convinse a fare una passeggiata lungo i viali dell'orto botanico.

"Giulia, ti vedo molto preoccupata, come si sono comportati i professori?"

"Male, Gianni, molto male ! Hanno posto a Carlo e Silvana domande molto strane, su argomenti che non avevano trattato durante le lezioni. Quando vedevano che i ragazzi si trovavano in difficoltà, diventavano sempre più severi e cavillosi, ed infine li hanno bocciati".

"Su, non fare così, sono convinto che il tuo esame andrà bene."

"Come fai a dire questo?"

"Ti conosco molto bene, so che non sei affatto superficiale. La tua grande curiosità per tutto ciò che riguarda la natura ti aiuterà a superare l'esame senza difficoltà."

"Gianni, come puoi essere così ottimista?"

"Osserva quelle piante esotiche lussureggianti, quei meravigliosi fiori profumati, che con i loro colori intensi e luminosi ci comunicano tanta gioia di vivere e tanto amore, quelle coccinelle che visitano pigramente quel rosaio, sulle cui foglie le gocce d'acqua risplendono come brillanti. Come puoi non essere ottimista davanti a questo tripudio del Creato, che ci comunica l'immenso amore di Dio per l'umanità? Pensa che tutti questi colori li vediamo grazie al nostro cervello, come risultato dello scambio di impulsi elettrici tra esso ed i fotorecettori, coni e bastoncelli, della retina dei nostri occhi, quando essi vengono attivati dalle radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa tra 400 e 800 nanometri, mentre siamo ciechi per tutte le altre radiazioni elettromagnetiche: infrarosse ed ultraviolette con lunghezze d'onda rispettivamente maggiori di 800 nanometri e minori di 400 nanometri, raggi X e raggi gamma. I nostri occhi vedono infatti soltanto una piccola porzione dello spettro elettromagnetico, cioè dell'insieme di tutte le lunghezze d'onda, ed i colori soggettivi che si formano nel nostro cervello sarebbero notevolmente diversi se i fotorecettori dei nostri occhi fossero sensibili ad altre lunghezze d'onda."

"Quindi, noi vediamo dei falsi colori, come quelli generati dai computer."

"Proprio così, Giulia. Se fossero solo questi i falsi colori ... Pensa che i fisici, che sono di solito persone molto fantasiose, parlano di "sapori" e "colori" delle particelle elementari di cui è fatta la materia."

"Come può una particella elementare puntiforme, quark o elettrone, avere un sapore ed un colore?"

"L'altra volta ti ho detto che le particelle elementari di cui sono fatti gli atomi della materia sono i quark e gli elettroni, e che i protoni ed i neutroni del nucleo atomico sono formati da terne di quark, rispettivamente uud e udd. I quark u (up, su) e d (down, giù) sono di tipo diverso non soltanto per la massa, ma anche perchè il primo ha una carica elettrica positiva pari a (2/3) di quella elementare, cioè di quella dell'elettrone, in valore assoluto, mentre il secondo ha una carica negativa pari a (1/3) di quella elementare. I fisici dicono che i loro "sapori" sono u e d."

"Quindi si parla di "sapori" per distinguere un tipo di quark da un altro?"

"Esatto ! Ma cercherò di essere più chiaro con un esempio. Ti chiedo soltanto un po' di pazienza. Nei fenomeni di decadimento radioattivo (decadimento beta) dei nuclei atomici in nuclei di altri atomi, un neutrone si trasforma in un protone emettendo un elettrone di alta energia ed un neutrino, che è una particella neutra, con una massa quasi nulla, la cui esistenza fu ipotizzata da Pauli nel 1931 per spiegare l'apparente violazione del fondamentale principio di conservazione dell'energia in tali fenomeni.

Ebbene, un neutrone (udd) si può trasformare in un protone (uud) proprio per il cambiamento di sapore, da d in u, di uno dei suoi quark; e poiché il cambiamento di "sapore" determina una variazione di carica elettrica (il neutrone è privo di carica elettrica), si ha una compensazione con l'emissione di un elettrone, la cui carica è negativa (-1):  $-1/3 = 2/3 - 1$  ."

"Perchè i quark cambiano sapore?"

"Il loro cambiamento di "sapore" è causato dalle forze subnucleari deboli, la cui prima teoria fu sviluppata da Enrico Fermi nel 1934. Tieni presente che, mentre la materia di cui siamo fatti contiene soltanto quark u e d, detti quark della prima famiglia, durante la formazione dell'universo, quando la temperatura e l'energia delle particelle erano elevatissime, la materia era costituita prevalentemente da quark della terza famiglia, i più pesanti, corrispondenti ai "sapori" top (alto) e bottom (basso) (t e b) e, successivamente, a temperature ed energie minori, da quark della seconda famiglia, con massa minore rispetto ai precedenti ed aventi i "sapori" charm (incantato) e strange (strano) (c e b).

In aggiunta a queste tre famiglie di quark, che sono soggette alle interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche, oltre a quella gravitazionale, si devono considerare tre famiglie di particelle soggette soltanto alle interazioni gravitazionali, deboli ed elettromagnetiche, che proprio per questa loro caratteristica vengono indicate collettivamente con il nome di leptoni (dal greco leptòs = leggero).

Nell'universo attuale esistono soltanto leptoni della prima famiglia, cioè elettroni e neutrini elettronici, con le rispettive antiparticelle (positrone ed antineutrino elettronico). La terza e la seconda famiglia di leptoni esistevano soltanto durante la formazione dell'universo, assieme, rispettivamente, alla terza ed alla seconda famiglia di quark. In particolare, appartengono alla terza famiglia, la particella tau, con una massa circa 3400 volte maggiore di quella elettronica, ed il neutrino tauonico, mentre la seconda famiglia comprende il muone, circa 212 volte più pesante dell'elettrone, ed il neutrino muonico."

"Quindi, come i quark, anche i leptoni hanno "sapore"?"

"Proprio così. Infatti si fa riferimento ai "sapori" dell'elettrone, del muone, del tauone e

dei rispettivi neutrini. Inoltre, poiché per ogni particella, quark o leptone, esiste la corrispondente antiparticella, antiquark o antileptone, cioè la particella di antimateria ad essa coniugata, si parla anche di "antisapori" dei quark:

/u (anti-up, anti-su), /d (anti-down, anti-giù),

/c (anti-charm, anti-incantato), /s (anti-strange, anti-strano),

/t (anti-top, anti-alto), /b (anti-bottom, anti-basso).

Gli "antisapori" dei leptoni sono il positrone o antielettrone, l'antimuone, l'antitauone, ed i rispettivi antineutrini."

"Anche i leptoni possono cambiare sapore?"

"Sì, per esempio un antineutrino elettronico, interagendo con un protone produce un positrone ed un neutrone;

in questo caso le forze deboli cambiano il "sapore" dell'antineutrino nel "sapore" del positrone.

"Mi hai detto che le particelle elementari hanno anche un colore. Che significa?"

"I tre quark di cui sono composti i protoni ed i neutroni sono fermioni, cioè particelle elementari che obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac; infatti, poiché possiedono un momento angolare, cioè un moto di rotazione intrinseca, lo spin, pari alla metà della costante universale  $h/(2\pi)$  di Planck, seguono un principio introdotto nel 1925 dal fisico austriaco Wolfgang Pauli per spiegare le caratteristiche della "corteccia" elettronica degli atomi e delle molecole. Questo principio afferma che due particelle dotate di spin semidispari ( $1/2$ ,  $3/2$ , ecc.), non possono occupare lo stesso stato quantico, il che significa che, se hanno la stessa energia, devono avere gli spin discordi, cioè le loro "rotazioni intrinseche" devono avvenire in sensi opposti, come se fossero due trottole capovolte l'una rispetto all'altra.

Nel caso dei tre quark che formano un protone o un neutrone, comunque si orientino gli spin, due di essi saranno sempre allineati nello stesso verso, violando il principio di Pauli. E' necessario pertanto, perchè non sia violato tale fondamentale principio, che essi abbiano

un'ulteriore caratteristica, cioè una speciale carica, che è analoga alla carica elettrica ed è all'origine della forza subnucleare forte. Questa carica speciale è stata denominata carica di "colore", per sfruttare la comoda analogia tra le leggi di composizione delle cariche di "colore" dei quark e quelle della sintesi additiva dei colori, a partire dai tre colori fondamentali, rosso, verde e blu.

I fisici, nell'elaborare, nei primi anni '70, la cromodinamica quantistica, che è la teoria delle interazioni subnucleari forti tra quark, stabilirono che si possono formare soltanto particelle aventi tre "colori" diversi, "rosso", "verde" e "blu" oppure un "colore" ed un "anticolore", intendendosi per "anticolore" una combinazione di due "colori" fondamentali, tale da fornire il "bianco" assieme al "colore" complementare che si considera. E poiché esistono tre quark con i "colori" "rosso", "verde" e "blu", per ogni "sapore" (u,d,c,s,t,b), bisogna tenere conto di 18 combinazioni "colore-sapore", corrispondenti ad altrettanti quark.

Le particelle contenenti tre quark con "colori" diversi sono barioni ( protone, neutrone ed iperoni), mentre quelle formate da un quark e da un antiquark con colori

complementari che sommati danno il "bianco", sono mesoni (pioni, kaoni ecc.)."

"Come si spiega la forza attrattiva tra quark?"

"La forza attrattiva tra due quark, crescente rapidamente all'aumentare della distanza, si spiega con lo scambio di pacchetti di energia subnucleare, i gluoni, con massa nulla e spin unitario, analoghi ai fotoni, anch'essi con massa nulla e spin unitario, che sono invece pacchetti di energia elettromagnetica al cui scambio, secondo l'elettrodinamica quantistica, è dovuta la forza attrattiva o repulsiva tra due particelle cariche.

Tuttavia, poiché lo scambio del gluone può avvenire sia tra due quark dello stesso tipo ("colore") sia tra quark di "colori" diversi, è stato necessario introdurre ben 8 tipi di gluoni, dei quali 6, a differenza del fotone, che è privo di carica elettrica, sono dotati di una combinazione carica/anticarica, cioè di un "colore" e di un "anticolore":

(rosso/antiblu, antirosso/blu,  
blu/antiverde, antiblu/verde,  
rosso/antiverde, antirosso/verde).

Queste combinazioni servono a spiegare lo scambio dei "colori" (cariche di colore) tra due quark.

Gli altri 2 tipi di gluoni, incolore, servono invece per spiegare le forze tra due quark dello stesso colore.

Per esempio, un quark con carica rossa si trasforma in un quark con carica verde emettendo un gluone con cariche rossa/antiverde. Se invece un quark con carica verde assorbe un gluone con cariche rossa/antiverde, si trasforma in un quark con carica rossa."

"Mi vuoi spiegare meglio che cosa sono i gluoni ed i fotoni?"

"Tieni presente che sia i gluoni che i fotoni sono quanti di energia, cioè pacchetti energetici che si muovono con la velocità della luce nel vuoto, creando rispettivamente i campi gluonico ed elettromagnetico, cioè delle zone dello spazio-tempo tali che in ogni loro punto siano misurabili forze subnucleari forti, che agiscono soltanto sulle cariche di colore dei quark, oppure forze elettromagnetiche, che agiscono sulle particelle cariche in quiete o in moto. Entrambi i tipi di quanti, avendo spin intero, prendono il nome di bosoni, poiché obbediscono alla statistica di Bose-Einstein, che consente ad essi, a differenza di quanto si verifica per i fermioni, di stare insieme, occupando lo stesso stato quantico."

"Ma quanto è misterioso e lontano dalle nostre esperienze quotidiane il mondo delle particelle elementari !"

"Vedi, Giulia, il microcosmo è basato su leggi fisiche molto strane, completamente diverse da quelle valide per gli oggetti e gli esseri viventi del mondo fisico ordinario e quindi anche per noi che, pur essendo fatti di quark ed elettroni, siamo dei supergiganti rispetto ad essi, che sono assimilabili a punti materiali."

"Quali sono le teorie che si occupano delle leggi del microcosmo?"

"Sono quattro:

1) la meccanica quantistica, sviluppata negli anni venti da Heisenberg, Schroedinger e Dirac, è basilare per lo studio di tutti i fenomeni che coinvolgono le particelle;

2) l'elettrodinamica quantistica, fondata negli anni '30 da Dirac, Jordan, Heisenberg e Pauli, e perfezionata negli anni '50 da Feynman, Tomonaga e Schwinger, si occupa delle interazioni elettromagnetiche tra particelle;

3) la teoria elettrodebole, sviluppata nella seconda metà degli anni '60 da Glashow, Salam e Weinberg, tratta in modo unitario le interazioni elettromagnetiche e quelle subnucleari deboli, da cui dipendono i cambiamenti di sapore di quark e leptoni ed i fenomeni di decadimento radioattivo (beta) dei nuclei atomici, sia naturali che artificiali, che si trasformano in altri nuclei emettendo elettroni (o positroni) e neutrini (o antineutrini);

4) la cromodinamica quantistica, che fu sviluppata negli anni '70 con metodi analoghi a quelli dell'elettrodinamica quantistica, e si occupa dello studio delle interazioni subnucleari forti tra i quark all'interno dei barioni e dei mesoni, chiamati collettivamente adroni (particelle pesanti, dal greco *hadròs* = pesante)."

"Ma perchè i fisici non hanno pensato di formulare un'unica teoria che renda conto del comportamento delle quattro forze fondamentali?"

"Altrochè, Giulia ! I fisici hanno sempre tentato di formulare teorie di unificazione di due o più forze fondamentali. Nel 1873 Maxwell, nel suo trattato sull'elettromagnetismo fornì la prima teoria di unificazione delle forze elettriche e magnetiche, dimostrando con le sue celebri equazioni che i fenomeni elettrici e magnetici sono aspetti diversi dell'elettromagnetismo. Lo stesso Einstein negli ultimi decenni della sua vita si sforzò invano di fornire una teoria unificata dei fenomeni gravitazionali ed elettromagnetici, nell'ambito della relatività generale.

Infine, dopo che Salam, Weinberg e Glashow negli anni '60 ebbero grande successo nel formulare la teoria elettrodebole, che ad alte energie fornisce una visione unitaria delle interazioni deboli ed elettromagnetiche, da oltre vent'anni si tenta di unificare questa teoria con la cromodinamica quantistica e con la versione quantistica della teoria della relatività generale."

"Con quali risultati?"

"Finora, purtroppo non è stato possibile inserire la teoria elettrodebole, la cromodinamica quantistica e la teoria della relatività generale in uno schema unitario (teoria del tutto, T.O.E. Theory Of Everything) che integri in modo coerente le 4 forze fondamentali, anche se esistono parecchie teorie, note come teorie della grande unificazione (G.U.T. Grand Unification Theory), che forniscono una formulazione unitaria delle forze elettrodeboli e subnucleari forti. Le maggiori difficoltà si incontrano però quando si tenta di raggiungere il duplice obiettivo di fornire una teoria quantistica della gravitazione e di unificare la forza di gravità con le altre tre forze. Attualmente la ricerca di una tale teoria costituisce un ambito traguardo cui i teorici sperano di avvicinarsi attraverso la teoria delle superstringhe e le cosiddette teorie supersimmetriche, che dovrebbero rappresentare con un'unica forza, una superforza, la perfetta simmetria che esisteva nell'universo, prima che le fluttuazioni quantistiche del vuoto la spezzassero, dando origine alla materia ordinaria con le quattro forze che conosciamo." "Ma sono state verificate sperimentalmente queste teorie?"

"Non è possibile farlo per l'esiguità delle energie raggiungibili dagli attuali acceleratori,

rispetto a quelle esistenti al momento del big bang.

Carlo Rubbia poté verificare nel 1983 al CERN di Ginevra l'esistenza dei bosoni vettoriali pesanti  $W^{+/-}$  e  $Z^0$ , perché l'energia necessaria per osservare l'unificazione delle forze elettromagnetiche e deboli, era di soli 100 GeV, valore per cui l'intensità delle forze deboli uguaglia quella delle forze elettromagnetiche, e che era compatibile con le energie allora disponibili.

Sarebbe invece impensabile, almeno con le attuali tecnologie, verificare l'unificazione delle forze forti con quelle elettrodeboli. Occorrerebbe un'energia di qualche milione di miliardi di GeV, enorme rispetto a quella (14000 GeV) che potrà rendere disponibile il supercollisore LHC (Large Hadron Collider), che si prevede di far entrare in funzione a Ginevra nel 2007. A maggior ragione non avrebbe senso parlare dell'energia di 10 miliardi di miliardi di GeV, l'energia esistente  $10^{-43}$  secondi dopo il big bang (tempo di Planck); occorrerebbe infatti un acceleratore di dimensioni cosmiche."

"A proposito, che unità di energia è il GeV?"

"Il GeV è l'energia che una particella dotata di una carica uguale a quella elettronica, acquisirebbe qualora fosse accelerata da una tensione di un miliardo di volt, circa 100 volte maggiore della tensione tipica che determina la scarica di un fulmine."

"Ma perché sono necessarie energie così elevate?"

"Perché, come nel caso dei bosoni pesanti scoperti da Rubbia, è necessario impiegare supercollisori capaci di produrre fasci di protoni e di antiprotoni con energia totale parecchie volte maggiore di quella equivalente alla massa delle particelle da generare.

Con l'energia che renderà disponibile il supercollisore LHC dovrebbe essere invece possibile verificare l'esistenza di qualcuna delle particelle previste dalle teorie supersimmetriche, le particelle del supermondo, e soprattutto l'esistenza del bosone scalare (o del campo scalare) di Higgs (con spin 0), che serve a conferire massa a tutte le particelle del modello standard."

"Gianni, non mi avevi mai parlato del campo scalare di Higgs! Che tipo di campo è?"

"Si tratta in effetti di un campo molto particolare, che, secondo le teorie che ne richiedono la presenza, riempirebbe il *falso vuoto* dello spazio-tempo sin dai primissimi istanti dopo il big bang.

Si tratterebbe di un campo quantistico capace di interagire con le particelle, bosoni o fermioni che siano, facendo in modo che esse acquisiscano massa. E' un campo necessario, per esempio, per spiegare, nell'ambito della teoria elettrodebole, il fatto che il fotone sia un bosone vettoriale privo di massa e che i bosoni vettoriali  $W^{+/-}$  e  $Z^0$  siano invece molto pesanti (rispettivamente 81 e 93 GeV). Si pensa che alle alte energie, al di sopra del valore di unificazione elettrodebole di 100 GeV, il fotone ed i bosoni  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$  siano tutti e quattro senza massa, rendendo ugualmente intense le forze deboli ed elettromagnetiche, e che invece, al di sotto di questa energia, per effetto dell'interazione con il campo scalare nascosto di Higgs, tre di essi acquisiscano le masse osservate, rompendo la simmetria e lasciando pertanto il fotone privo di massa. I fisici sperano vivamente di trovare la particella di Higgs, altrimenti sarebbero costretti ad inventare un nuovo meccanismo che giustifichi il mistero della massa delle particelle del modello standard."

"Perchè, Gianni, esiste anche il mistero della massa?"

"Sì, e consiste nel fatto che finora non si è capito perchè le masse misurate per le varie particelle, abbiano proprio quei valori e non altri, e quale sia, in sostanza, la legge universale che stabilisce la pesantezza di una particella."

"Ma allora il modello standard non consente di calcolare la massa delle particelle?"

"No, purtroppo ! Esso non fa altro che introdurre dei parametri, che dipendono dalla massa del bosone di Higgs, che non è calcolabile teoricamente."

Giulia aveva ascoltato attentamente Gianni e dava l'impressione di avere acquisito una grande serenità, come se avesse dimenticato tutte le preoccupazioni che l'avevano fatta diventare ansiosa per l'esame che avrebbe dovuto sostenere l'indomani.

La loro passeggiata fu interrotta dalla voce del custode che li invitava ad uscire, accingendosi a chiudere il cancello. Giulia abbracciò Gianni con energia, mostrandogli tutta la sua gratitudine per averla rasserenata.

"Amore mio, pregherò Gesù per te", le sussurrò Gianni, accarezzandole teneramente i capelli scompigliati dal vento."

"Verrai ad assistere al mio esame?", disse Giulia con voce implorante.

"E come potrei non esserci? Passerò in auto da casa tua alle otto per darti un passaggio."

"Grazie amore, mi dai tanta forza. Come farei se non ci fossi tu?" replicò Giulia stringendosi a Gianni.

Dopo essersi baciati teneramente, si allontanarono scambiandosi languidi sguardi.

## **Atomi**

*Miliardi di miliardi di miliardi  
di microcosmi invisibili.*

*Novantadue sono quelli naturali,  
fatti di vuoto, massa ed elettricità,  
ora sorgenti ed ora pozzi di luce.*

*Formano il nostro corpo,  
non la nostra anima.*

*Non li trasforma la nostra morte corporale,  
vanno a formare altre vite ed altre cose,  
in terra, in acqua e in cielo,  
finchè Dio vorrà.*

**Antonino Cucinotta**

## IL MISTERO DEL DUPLICE COMPORTAMENTO DELLA MATERIA E DELLA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

### *ONDE O PARTICELLE?*

Il mattino seguente Gianni ebbe la fortuna di poter parcheggiare vicino al portone della palazzina in cui abitava Giulia. Erano già le otto e dieci, e Gianni le inviò un messaggio per sollecitarla ad uscire. Alle otto e venti Giulia entrò in macchina scusandosi per il ritardo, dovuto al suo nervosismo. Pur essendo il traffico alquanto caotico, riuscirono tuttavia ad arrivare all'Università in tempo utile per trovare posto nell'aula degli esami. Quel giorno i professori erano meno scorbutici del solito, e le tre ragazze che furono esaminate prima di Giulia, nonostante qualche difficoltà iniziale, riuscirono a superare la prova, sia pure con il minimo dei voti. Era giunto il momento di Giulia, che, probabilmente grazie all'aiuto psicologico di Gianni, era abbastanza rilassata. L'esame di botanica andò liscio come l'olio e si concluse con un bel ventisette, che scatenò la gioia dei due ragazzi, che, elettrizzati dal successo, si precipitarono al bar per festeggiare l'evento.

"Giulia, ho pregato tanto perchè tu potessi superare agevolmente l'esame, e Gesù mi ha ascoltato dandoti questa gioia. Eri così preoccupata, pur avendo fatto il tuo dovere fino in fondo, che stavi facendo prevalere il tuo pessimismo. Vedi, le mie preghiere mi hanno aiutato a darti coraggio."

"Ho pregato tanto anch'io, Gianni, e le nostre preghiere Gesù le ha esaudite, come per aggiungere amore al nostro amore."

Dopo avere sorbito un ottimo gelato, decisero di recarsi al mare per concedersi qualche ora di felicità in quell'afosa giornata di giugno, segnata da una gioia così intensa. Era già mezzogiorno quando giunsero al lido. La sabbia rovente li stimolò ad indossare subito i costumi da bagno conservati nel bagagliaio dell'auto alla fine dell'estate precedente, assieme a qualche asciugamano e ad altri accessori balneari. Dopo avere nuotato per oltre mezz'ora, distesero gli asciugamani sulla spiaggia e vi si sdraiarono esausti, crogiolandosi al sole.

"Giulia, perchè non usi gli occhiali da sole?", chiese Gianni.

"Stavo appunto per prenderli, c'è una luce abbagliante e mi bruciano ancora gli occhi per la salsedine."

"Eh, Giulia, la luce abbagliante almeno la puoi vedere, ma i raggi ultravioletti, che proprio verso quest'ora sono particolarmente dannosi per la nostra pelle, sono invisibili."

"Lo so, tuttavia vorrei capire da che cosa dipendono i loro effetti dannosi."

"Giulia, sono onde elettromagnetiche come le onde radio, i raggi infrarossi e la luce visibile, e la loro caratteristica è la lunghezza d'onda molto piccola, minore di 400 nanometri."

E poiché l'energia dei fotoni, secondo una formula introdotta da Einstein, è direttamente proporzionale alla frequenza delle onde elettromagnetiche, e quindi inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda, un'esposizione prolungata ai raggi ultravioletti, data la loro lunghezza d'onda molto piccola rispetto a quella della luce visibile, può determinare seri danni alla pelle, sia immediati che futuri, se pensiamo alla possibilità che si formino dei melanomi."

"Mi hai già parlato una volta dei fotoni, che, se non ricordo male, sono pacchetti di energia elettromagnetica. Ma allora, perchè quando si parla di radiazione elettromagnetica, talvolta si fa riferimento alle onde elettromagnetiche e talvolta ai fotoni? Si tratta di cose diverse?"

"Giulia, per capire questo bisogna considerare uno dei tanti aspetti misteriosi delle leggi della natura: la radiazione elettromagnetica mostra in alcune situazioni un comportamento ondulatorio, apparendo costituita da onde elettromagnetiche, in altre un comportamento corpuscolare, apparendo costituita da tanti corpuscoli, pacchetti di energia, che sono appunto i fotoni."

"Spiegati meglio."

"Se tu proietti un raggio di luce su uno schermo opaco avente un forellino, le onde elettromagnetiche che costituiscono la luce si sparpaglieranno al di là del forellino, propagandosi in direzioni diverse da quella del raggio e formando tanti coni luminosi con il vertice nel forellino, corrispondenti a massimi dell'intensità luminosa, separati l'uno dall'altro da coni oscuri corrispondenti a minimi dell'intensità luminosa.

Questo fenomeno, che prende il nome di diffrazione, è caratteristico di tutte le onde (sonore, luminose, radio). Un fenomeno analogo si osserva anche quando si invia, come fece per la prima volta il fisico tedesco Otto von Laue nel 1912, un sottile fascio di raggi X, ben collimati, su un cristallo, per esempio, di salgemma, o su una lamina di un metallo qualsiasi. In questo caso, ponendo al di là del cristallo o della lamina metallica una lastra fotografica, si osservano delle figure di diffrazione costituite da tante piccole macchie disposte simmetricamente intorno alla direzione del fascio di raggi X. Dalla misura degli angoli di diffrazione, conoscendo i parametri del reticolo cristallino, si può calcolare la lunghezza d'onda dei raggi X, che è comparabile con le distanze tra gli atomi del cristallo. Viceversa, conoscendo la lunghezza d'onda dei raggi X, si possono calcolare i parametri che caratterizzano una data struttura cristallina.

Entrambi i fenomeni sono tipici del comportamento ondulatorio della radiazione elettromagnetica, e sono dovuti al fatto che le onde elettromagnetiche si propagano attraverso zone di spazio aventi dimensioni paragonabili con la loro lunghezza d'onda. Infatti, se il forellino praticato nello schermo opaco venisse allargato, il fenomeno descritto non si osserverebbe più, ed il raggio luminoso continuerebbe a propagarsi in linea retta. In modo analogo, se i raggi X si propagassero attraverso un foro di dimensioni molto maggiori della loro lunghezza d'onda, non produrrebbero più il fenomeno osservato.

L'aspetto corpuscolare della radiazione elettromagnetica viene evidenziato in altri fenomeni, per esempio nell'effetto fotoelettrico, che consiste nell'emissione di elettroni dalla superficie di un metallo in presenza di radiazione luminosa. I dati sperimentali che

lo caratterizzano possono essere spiegati soltanto considerando il metallo colpito da un flusso di fotoni, ed applicando le formule stabilite nel 1905 da Einstein, cui fu conferito nel 1921 il premio Nobel per la fisica, proprio per avere spiegato l'effetto fotoelettrico sulla base della sua ipotesi dei fotoni. La conferma definitiva dell'esistenza dei fotoni fu ottenuta nel 1923 dal fisico statunitense Compton, il quale poté verificare che un fotone X, collidendo con uno degli elettroni atomici più esterni e quindi debolmente legati al nucleo, subisce una diminuzione della sua energia, evidenziata da un aumento di lunghezza d'onda e dall'emissione di un elettrone, il che è perfettamente compatibile con le leggi fisiche dell'urto tra il fotone e l'elettrone.

Quindi la radiazione elettromagnetica si comporta, a seconda dei fenomeni fisici osservati, sia come flusso di onde elettromagnetiche sia come flusso di pacchetti di energia elettromagnetica, i fotoni o quanti di radiazione, che si propagano con la velocità della luce nel vuoto."

"Suppongo che, per simmetria, anche le particelle possano comportarsi come la radiazione elettromagnetica."

"Proprio così, Giulia. Infatti l'ipotesi ondulatoria avanzata da De Broglie, che nel 1924 propose di associare ad ogni particella una lunghezza d'onda inversamente proporzionale alla sua quantità di moto e quindi al prodotto della massa per la velocità, fu verificata per gli elettroni nel 1927 da Davisson e Germer, nel 1929 da Thomson, e per i neutroni nel 1947 da Fermi e Marshall, con esperimenti di diffrazione analoghi a quelli effettuati con i raggi X.

Ma, indipendentemente dal corpuscolo che si considera, qualsiasi particella, elementare o composta che sia, qualsiasi atomo, ione o molecola, evidenziano proprietà ondulatorie che producono, in particolari condizioni sperimentali, figure di diffrazione analoghe a quelle che si ottengono con la luce o con i raggi X."

"Abbi pazienza, Gianni, se nel caso dei fotoni si tratta di pacchetti di onde elettromagnetiche, che onde sono quelle associate alle particelle?"

"La risposta alla tua domanda fu data da Max Born nel 1926. La sua interpretazione fece abbandonare ai fisici il concetto di onde di materia associate alle particelle a favore di quello di onde di probabilità.

Infatti la meccanica quantistica o meccanica ondulatoria consente di calcolare l'ampiezza e l'intensità delle onde di probabilità che formano il "pacchetto di probabilità" associato ad una particella.

Per il principio d'indeterminazione che Heisenberg formulò nel 1927, non è possibile in meccanica quantistica, a differenza della meccanica classica di Galilei-Newton, determinare la traiettoria di una particella, poichè, se si misura la sua posizione in un determinato istante, l'errore commesso nella misura della sua velocità è inversamente proporzionale all'errore con il quale si determina la sua posizione; quindi, anche ammettendo che un osservatore potesse misurare con la massima precisione possibile la sua posizione, la misura della sua velocità sarebbe affetta da un errore grandissimo, che impedirebbe di determinare la traiettoria. Viceversa, l'errore commesso nella misura della posizione di una particella sarebbe grandissimo in concomitanza con una misura molto accurata della sua velocità."

"Sono molto strane le limitazioni imposte dal principio d'indeterminazione. Da che cosa dipendono?"

"Dipendono proprio dal fatto che una particella si può comportare, a seconda del tipo di misura che si voglia eseguire, sia come un'onda sia come un corpuscolo materiale. La prevalenza di uno dei due comportamenti dipende dalla grandezza fisica che si vuole misurare.

Se deve essere misurata con elevata precisione la velocità, poiché la lunghezza d'onda di De Broglie è inversamente proporzionale ad essa, prevale l'aspetto ondulatorio, mentre la posizione è affetta da un errore molto grande, essendo legata all'aspetto corpuscolare. Viceversa, se deve essere misurata con grande precisione la posizione, prevale l'aspetto corpuscolare, mentre la velocità è affetta da un errore molto grande.

Il fisico danese Niels Bohr, fondatore negli anni '20 della famosa scuola di Copenaghen, diceva che la velocità e la posizione di una particella, e così anche l'energia che viene assorbita o ceduta in un fenomeno quantistico e la durata del fenomeno, sono grandezze fisiche complementari, poiché non si possono misurare contemporaneamente con elevata precisione, escludendosi a vicenda l'aspetto ondulatorio e quello corpuscolare. E' possibile soltanto calcolare la probabilità che una particella si trovi in un dato punto dello spazio. Infatti un atomo, per esempio quello di idrogeno, viene concepito dalla meccanica quantistica come un protone immerso in una nube di probabilità la cui densità è massima ad una distanza dal nucleo corrispondente al raggio di Bohr, cioè a circa mezzo centomillesimo di centimetro, e tende rapidamente a zero al crescere della distanza dell'elettrone dal nucleo. Al termine orbita si sostituisce il termine orbitale, proprio per indicare la funzione matematica che descrive l'andamento della probabilità e quindi la densità elettronica nello spazio intorno al nucleo."

"Perché la materia e la radiazione elettromagnetica si comportano ora come onde ora come particelle? Si conosce la causa di questo strano, duplice comportamento?"

"Questo fa parte dei misteri della natura. Possiamo dire soltanto che per i corpi aventi massa molto grande rispetto a quella degli oggetti del microcosmo, la lunghezza delle onde di probabilità è così piccola che il comportamento ondulatorio non si osserva, e valgono le leggi della meccanica classica. Esistono pertanto due meccaniche completamente diverse: quella classica, valida per i corpi di dimensioni molto grandi rispetto a quelle atomiche, e quella quantistica, valida per tutti gli oggetti del microcosmo, fermioni o bosoni che siano."

"Gianni, mettiamoci all'ombra, non ti sembra che ci siamo abbronzati abbastanza parlando di fotoni e particelle?"

"Hai ragione, Giulia, anzi, se ti va possiamo andare a pranzare in quel locale al fresco, lassù in collina."

"Ottima idea, andiamo."

Erano già le due del pomeriggio quando Gianni e Giulia arrivarono al ristorante.

Consumarono una zuppa di pesce, sorseggiando del vino bianco freddo. Conclusero il pranzo sorbendo un gelato di fragola. Stavano per pagare il conto, quando entrarono nel locale Piero e Giusy, due ragazzi che Gianni e Giulia avevano conosciuto frequentando Roberto, l'architetto astrofilo single che era solito organizzare piacevoli riunioni nella

sua villetta.

Piero si era laureato da pochi mesi in filosofia, mentre la sua ragazza, Giusy, frequentava il terzo anno di giurisprudenza.

"Oh, guarda un po' chi si rivede, "disse Gianni rivolto ai due ragazzi, "sarebbe stata una bella occasione per stare insieme; purtroppo noi abbiamo già pranzato."

"Bene" replicarono Piero e Giusy, "così rimarrete a farci compagnia e poi potremo andarcene via insieme."

"D'accordo, vi facciamo compagnia", rispose Gianni, mentre Giulia annuiva sorridendo. Piero e Giusy si fecero portare pasta al forno, bistecche ai ferri, birra e frutta e pranzarono in fretta, mentre Gianni e Giulia sfogliavano un rotocalco.

"Ehi, voi due innamorati romantici", chiese Piero a Gianni e Giulia mentre uscivano tutti insieme dal locale, "avete impegni per questa sera?"

"No, stasera siamo liberi."

"Allora vi invito a trascorrere la serata a casa mia, avremo tante cose da dirvi, non ci frequentiamo da parecchio tempo."

"D'accordo, grazie Piero", rispose Gianni, confortato da un bel sorriso di Giulia, "a che ora?"

"Verso le ventuno."

"Va bene, arrivederci."

"Arrivederci."

## VI

### BOSONI E FERMIONI

#### *POSSIAMO ESISTERE PERCHE' SIAMO FATTI DI FERMIONI*

Piero abitava con i genitori e due sorelle in un villaggio collinare, dal quale si potevano ammirare splendidi tramonti sul mare, in una casa con un ampio giardino, che d'estate gli consentiva di rilassarsi al fresco ... e di filosofare assieme a Giusy.

Conoscendo il temperamento romantico dei due amici, era quasi certo che l'invito a stare al fresco in una zona tranquilla, avrebbe senz'altro incontrato il loro gradimento.

I quattro ragazzi si accomodarono in giardino, mentre una complice brezza carica d'aromi d'origano e mentuccia soffiava dalla collina verso il mare, che andava tingendosi di rosa con riflessi dorati, sotto i raggi del sole al tramonto.

"Si sta bene quassù", disse Gianni sdraiandosi sull'erba, "respirando quest'aria di collina fresca e profumata mi sento leggero leggero. Venite a sdraiarvi tutti qui accanto a me."

"No Gianni," replicò Piero, "lasciami godere questo splendido tramonto assieme alle ragazze. Non sarai forse un po' geloso?"

"Su, Piero, non si tratta di gelosia, non mi va proprio di stare qui da solo come un fermione, mentre voi come tre bosoni state insieme a godervi lo spettacolo."

"Hai detto due parole strane", replicò Piero, "fermione, bosoni, non avrai forse bevuto un po' troppo oggi al ristorante?"

Sentendosi dare dell'ubriaco, Gianni esplose in una fragorosa risata.

"Fermione, bosoni, che cosa hai voluto dire?", chiese Piero, mentre le ragazze ridevano a più non posso.

"Bene", replicò Gianni, "se vi calmate un po', cercherò di spiegarvi il senso della mia frase."

Tutti gli oggetti che popolano il mondo subatomico sono bosoni o fermioni, secondo che il loro spin, che è una grandezza fisica tipica del microcosmo, sia intero (0, 1, 2 ...) o semintero ( $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ , ...).

I bosoni si chiamano così perchè seguono la distribuzione statistica descritta dal fisico indiano Bose e da Einstein (statistica di Bose-Einstein).

I fermioni seguono invece la distribuzione statistica di Fermi-Dirac.

Sono bosoni i fotoni ed i gluoni, pacchetti di energia, con massa nulla e spin 1, che si propagano con la velocità della luce nel vuoto e determinano, rispettivamente, le forze elettromagnetiche che agiscono tra particelle cariche, e le forze subnucleari forti che agiscono tra i quark e, per fare un altro esempio, gli atomi di elio-4, il cui spin totale è nullo. Sono fermioni l'elettrone, i quark, il protone, il neutrone, il neutrino, gli atomi di elio-3, che hanno tutti spin semintero.

I bosoni sono particelle "molto socievoli", possono occupare tutte lo stesso stato quantico, cioè in pratica possono avere la stessa energia.

Per esempio, gli atomi di elio-4 alla temperatura di circa  $-271^{\circ}\text{C}$  subiscono la cosiddetta "condensazione di Bose-Einstein", occupando tutti lo stesso stato quantico

ed evidenziando il fenomeno della superfluidità, che fu scoperto da Kapitza nel 1938 e consiste nel fatto che l'elio-4, a differenza dell'elio 3, può scorrere molto velocemente senza attrito viscoso in sottili capillari, anche contro la forza di gravità, producendo vistosi zampilli (effetto fontana).

I fermioni, a differenza dei bosoni, sono particelle "poco socievoli", in quanto, come stabilisce il principio di Pauli, non possono occupare lo stesso stato quantico.

Se due fermioni hanno la stessa energia, i loro spin devono essere opposti, cioè antiparalleli, altrimenti i numeri quantici sarebbero identici, violando il principio di Pauli."

"Gianni, ora che ho capito il senso della tua frase", disse Piero, "mi vuoi spiegare quali sarebbero, in pratica, le conseguenze di un comportamento dei fermioni uguale a quello dei bosoni, quindi non conforme al principio di Pauli?"

"Gli orbitali elettronici degli atomi avrebbero tutti la stessa energia e pertanto collasserebbero in orbitali vicinissimi al nucleo atomico, facendo diventare la materia milioni di milioni di volte più densa dell'acqua, come la materia collassata di cui sono fatte le stelle nane bianche, il che impedirebbe ogni forma di vita."

"Allora è il principio di Pauli che ci salva, osservò Giusy.

"E' proprio così, ma non sappiamo perchè la natura si comporti in un modo così strano. Potremmo dire che esiste il mistero dello spin delle particelle, in quanto la struttura della materia di cui è fatto l'universo dipende in ultima analisi da questa variabile misteriosa, esclusivamente quantistica, tipica del microcosmo."

## VII

# LA CORRELAZIONE QUANTISTICA A DISTANZA TRA COPPIE DI PARTICELLE IDENTICHE

## *CONSENTE DI TELETRASPORTARE STATI QUANTICI ATOMICI E FOTONICI*

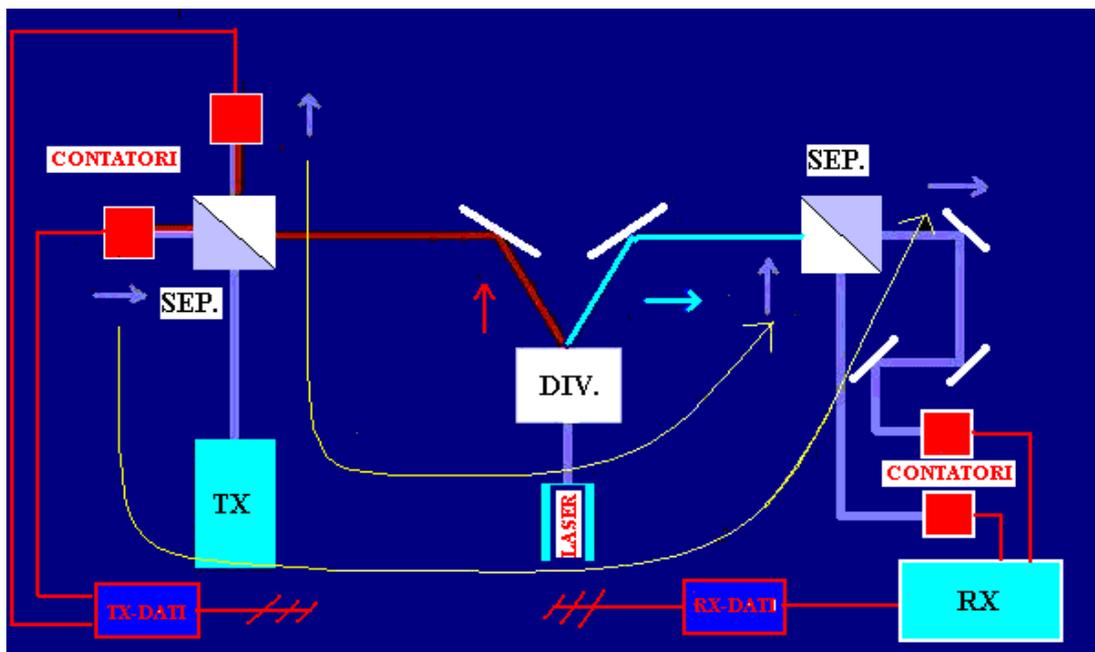
"Che mi dici del teletrasporto di cui si sente spesso parlare da qualche anno a questa parte?", chiese Piero a Gianni.

"E' un fenomeno quantistico che si verifica come conseguenza del fatto che tutte le particelle dello stesso tipo sono indistinguibili l'una dall'altra, conformemente al principio d'indeterminazione di Heisenberg, che impedisce di determinare la traiettoria di una particella. Questo principio infatti non consente, se è nota la posizione di una particella in un dato istante, di determinarne la posizione negli istanti successivi, e quindi di seguirne il moto per identificarla, a differenza di quanto si verifica nella realtà fisica degli oggetti macroscopici."

"Ma, in pratica, in che cosa consiste il teletrasporto?",

chiese Giusy, "E' lo stesso teletrasporto trattato ampiamente nei film di fantascienza alla Star Trek?"

"No! Per niente. Nei film sono gli esseri umani ad essere teletrasportati, il che è pura fantasia. Invece, negli esperimenti effettuati finora si è solo riusciti a teletrasportare lo stato quantico (la polarizzazione) di un fotone tra due punti distanti qualche decina di metri, o tra due laboratori distanti qualche chilometro e collegati con cavi a fibre ottiche, come hanno fatto i ricercatori del CERN nel mese di gennaio di quest'anno.



## TELETRASPORTO DI STATI QUANTICI FOTONICI

Questi esperimenti di ottica quantistica utilizzano due raggi laser correlati, ottenuti cioè da un unico raggio mediante un cristallo birifrangente e caratterizzati dal fatto che, se uno dei due è polarizzato verticalmente, l'altro lo è orizzontalmente.

Pertanto anche i fotoni dei due raggi, pur propagandosi in direzioni diverse, conservano sempre la correlazione iniziale, ed essendo indistinguibili, danno origine a fenomeni che i fisici chiamano *quantum entanglement*."

"Che cosa significa?" chiese Giusy.

"Letteralmente significa *confusione quantistica*, e consiste nel fatto che se due oggetti quantistici, particelle o fotoni, hanno avuto origine in un punto dello spazio-tempo da un evento che abbia prodotto una correlazione iniziale, per esempio tra gli spin, paralleli o antiparalleli, o tra i piani di oscillazione dei campi elettrici delle onde elettromagnetiche associate a due fotoni, cioè tra i relativi stati di polarizzazione, questa correlazione iniziale si manterrà sempre, indipendentemente dalla distanza, metri o anni luce, che separa i due oggetti quantistici che si sono allontanati dal punto in cui sono stati generati. Questo implica che, se si misura lo stato quantico di uno dei due oggetti correlati, a causa dell'ineliminabile perturbazione introdotta dal sistema di misura, si determini una variazione dello stato quantico, che si trasmette *istantaneamente* a distanza, per effetto della correlazione, all'altro oggetto. Se, per esempio, lo spin di una particella fosse invertito per mezzo di un campo magnetico utilizzato nell'apparato di misura, si invertirebbe *istantaneamente* anche lo spin dell'altra particella.

Un fenomeno analogo si verificherebbe se, generati due raggi laser correlati, cioè polarizzati perpendicolarmente tra loro, il piano di polarizzazione di uno di essi venisse ruotato di un certo angolo facendolo propagare attraverso un cristallo birifrangente; anche il piano di polarizzazione dell'altro raggio verrebbe *istantaneamente* dello stesso angolo."

"Come si può spiegare questo misterioso comportamento?", replicò Giusy.

Si può spiegare, nel caso di due fotoni correlati, considerando che, essendo essi indistinguibili, in ciascun raggio ogni fotone si trova in uno stato di polarizzazione al quale si sovrappone lo stato di polarizzazione del fotone ad esso correlato, facente parte dell'altro raggio; questo è perfettamente compatibile con i principi della meccanica quantistica, in base ai quali un oggetto del microcosmo può trovarsi in uno stato quantico risultante dalla sovrapposizione di tanti stati quantici. E' come se i due fotoni, pur propagandosi a distanza ed in direzioni diverse, si scambiassero *istantaneamente* informazioni sui loro stati di polarizzazione."

"Ma in pratica", chiese Piero "come si realizza il teletrasporto?"

"Si impiegano due fasci laser correlati A e B, che si propagano in direzioni diverse e si accoppia otticamente ad uno di essi, mediante un separatore di fascio a prismi (o con specchi semiriflettenti) e cristalli polarizzatori, un fascio laser C contenente un'informazione, associata all'angolo formato dal relativo piano di polarizzazione con un dato piano di riferimento. L'esperimento di teletrasporto consiste nel verificare che, se dal lato A l'informazione immagazzinata nel fascio C non è più disponibile dopo l'accoppiamento con il fascio A, poiché, per il principio d'indeterminazione,

l'accoppiamento dei due fasci equivale ad effettuare una misura che distrugge gli stati quantici (di polarizzazione) iniziali, generando come risultato un nuovo stato quantico risultante da una combinazione degli stati iniziali, contemporaneamente la stessa informazione venga acquisita dal fascio correlato B, dal quale sarà possibile, successivamente, recuperarla dopo avere ricevuto dalla stazione trasmittente, via radio o con qualsiasi altro sistema di telecomunicazione, i risultati delle misure effettuate sui fasci A e C"

"Ma allora si verifica soltanto un teletrasporto di informazione, non di materia", domandò Giulia, "è esatto, Gianni?"

"Sì, è proprio così; attraverso i fasci laser correlati A e B, vengono teletrasferite a B soltanto le *variazioni* di stato quantico subite da A. In altri termini gli stati di polarizzazione dei fotoni del fascio B vengono modificati in base all'informazione che viene teletrasportata attraverso il *quantum entanglement*. E così anche nel futuribile teletrasporto di molecole, gli atomi che compongono le molecole dovranno essere disponibili, allo stato libero, nella stazione ricevente, in quanto verranno teletrasportati soltanto gli stati quantici necessari alla formazione dei legami chimici di una data molecola.

Supponiamo, per esempio, che l'inclinazione del piano di polarizzazione del fascio C, da riprodurre a distanza, assuma, in sequenza, in base ad una data codifica,  $n$  valori. Dopo l'accoppiamento tra i fasci A e C e la conseguente sovrapposizione dei loro stati di polarizzazione, i piani di polarizzazione dei fotoni uscenti dal separatore di fascio, saranno sempre perpendicolari tra loro, essendo perpendicolari tra loro i piani di polarizzazione imposti dal separatore di fascio del trasmettitore, mentre il piano di polarizzazione del fascio B, sempre a  $90^\circ$  rispetto a quello del fascio A per effetto della correlazione iniziale, assumerà, in sequenza, come per effetto di un'azione a distanza, le stesse inclinazioni assunte, in sequenza, dal piano di polarizzazione del fascio C, non consentendo tuttavia di acquisire in chiaro i dati trasmessi. Ma è importante considerare che, anche se le variazioni degli stati quantici del fascio B non mostrano in chiaro i dati immagazzinati nel fascio C, un computer quantistico, basato non sui classici bit a due valori, ma sui qubit (*quantum bit*, bit quantistici generati da tutte le possibili combinazioni degli stati 0 e 1) potrebbe benissimo elaborarle, senza bisogno di attendere la ricezione dei dati con convenzionali sistemi di telecomunicazione per avere la conferma che il teletrasporto sia riuscito. In particolare, per effetto della correlazione quantistica, i dati inseriti nel fascio C sotto forma di sequenza di angoli di polarizzazione, determinano sia nel trasmettitore che nel ricevitore, uguali sequenze di conteggi dei fotoni rilevati da ciascuna coppia di contatori."

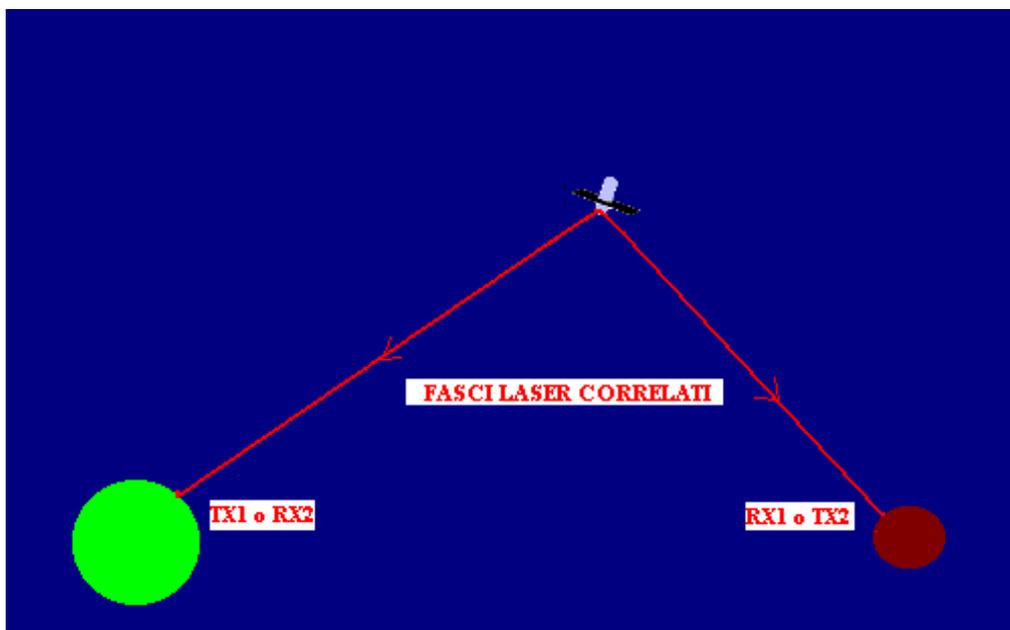
"Ma, Gianni, in questo modo", soggiunse Giulia, "non verrebbero violati sia il principio d'indeterminazione che quello relativistico che vieta il superamento della velocità della luce e quindi l'azione a distanza, cioè istantanea?"

"No, Giulia, sono salvi entrambi i principi. Infatti, il principio di Heisenberg non viene violato, in quanto, dopo l'accoppiamento dei fasci A e C, si può soltanto dire che i relativi fotoni sono polarizzati in piani perpendicolari tra loro, senza conoscere tuttavia i loro stati di polarizzazione, per l'indistinguibilità delle particelle identiche, imposta

appunto dal suddetto principio. E neppure i principi della teoria della relatività vengono violati, in quanto il teletrasporto implica soltanto il trasferimento istantaneo della *variazione* dell'inclinazione del piano di polarizzazione del fascio A per effetto dell'accoppiamento con il fascio C, senza alcuna possibilità di trasferire informazione e quindi di acquisire i bit, se non dopo la trasmissione dei dati delle misure da A a B, via radio o con altro mezzo, quindi sempre con velocità minore o uguale a quella della luce."

"Sarà possibile un giorno teletrasportare oggetti macroscopici?", chiese Giusy.

"Anche se questo non si può escludere a priori, tuttavia bisogna ammettere che un esperimento di questo tipo è fantascientifico. Si potrebbero, tutt'al più, teletrasportare microcristalli, oppure costruire nuovi sistemi di elaborazione, di telecomunicazione e di crittografia."



**FUTURIBILE TELETRASPORTO BIDIREZIONALE TRA DUE PIANETI  
CON FASCI LASER CORRELATI EMESSI DA UNA STAZIONE SPAZIALE**

"Perchè", chiese Piero, "se la meccanica quantistica fu creata negli anni '20, solo da pochi anni si eseguono esperimenti di questo tipo?"

"In effetti, se ne parla da tanti anni. Nel 1935, a Princeton, Einstein, Podolsky e Rosen proposero un esperimento concettuale paradossale, noto come effetto EPR, da effettuare con particelle correlate, atomi o fotoni ottenuti dallo sdoppiamento di un unico fascio. Proposero l'esperimento con l'intento di confutare una tesi di Niels Bohr, il quale sosteneva che la correlazione tra le particelle si manifestasse esclusivamente attraverso l'*entanglement quantistico* a distanza, e non attraverso variabili nascoste stabilite al momento della generazione dei due fasci, come invece sosteneva Einstein, il quale, basandosi su concetti di fisica classica, non poteva ammettere che due particelle potessero scambiarsi informazioni a distanza, istantaneamente, cioè ad una velocità superiore a quella della luce.

La questione rimase in sospenso per decenni, finchè, a partire dai primi anni '60, potendo disporre di intensi fasci laser necessari per produrre fasci coerenti di fotoni correlati, in parecchi laboratori si progettaronο esperimenti di ottica quantistica attraverso i quali furono poste le basi per gli esperimenti di teletrasporto, effettuati sin dal 1997, all'Università di Innsbruck da Anton Zeilinger, all'Università di Roma "La Sapienza" da Francesco De Martini, ed al CERN (2003). Bisogna dire tuttavia che l'interpretazione dei risultati di alcuni esperimenti derivanti dall'effetto EPR è tuttora oggetto di accese dispute, il che mette in evidenza che, ad oltre settant'anni dalla formulazione della meccanica quantistica, alcuni suoi aspetti teorici sono tuttora alquanto controversi.

"Ragazzi, è tardi, abbiamo chiacchierato abbastanza, è ora di andar via", disse Giulia tirando la mano destra di Gianni per sollecitarlo ad alzarsi.

"Hai ragione, Giulia, è già mezzanotte, ti accompagno a casa. Giusy, Piero, grazie ed arrivederci alla prossima volta."

"Gianni, la prossima volta sarete voi ad invitarci."

"D'accordo. Arrivederci."

## VIII

### LE QUATTRO FORZE FONDAMENTALI DELLA NATURA (*GRAVITAZIONALI, ELETTROMAGNETICHE, SUBNUCLEARI FORTI E SUBNUCLEARI DEBOLI*)

Erano trascorsi più di quindici giorni da quella sera e Gianni e Giulia non avevano avuto la possibilità di vedersi; si erano sentiti solo per telefono. Gianni era stato molto impegnato nello sviluppo della sua tesi sull'evoluzione stellare, e anche Giulia aveva studiato parecchio per preparare un altro esame. Si scambiarono dei messaggi per mettersi d'accordo e trascorrere allegramente una giornata insieme, dopo tanto tempo di forzata lontananza, e decisero di concedersi una visita alla bellissima isoletta che si intravedeva all'orizzonte. L'indomani mattina, imbarcatisi su una nave veloce, presero posto sul ponte più alto, che era in quel momento deserto, avidi di sole, di mare e d'amore.

"Giulia, mi sei mancata tanto, e quanto più soffrivo per la tua mancanza, tanto più gioivo pensando al momento in cui ci saremmo rivisti."

"Ho provato anch'io le stesse sensazioni", replicò Giulia stringendosi con energia a Gianni, avido di tenerezze, "il nostro amore è come la forza forte, che diventa sempre più intensa al crescere della distanza tra i quark."

"Ricordi bene, Giulia. Però stai attenta ... se la forza dell'amore che ci attrae è intensa quanto quella che agisce tra i quark, i nostri corpi corrono il rischio di disintegrarsi ..."

"Gianni, che stai dicendo, mi prendi in giro?"

"Non oserei mai, sto solo giocando con le parole per ricordarti che gli atomi di cui sono fatti i nostri corpi, stanno insieme grazie alle forze elettromagnetiche attrattive che producono i legami chimici, forze che sono cento volte meno intense di quelle forti, che legano i quark tra loro. Quindi se la forza del nostro amore è come la forza forte, cento volte più intensa delle forze elettromagnetiche, ti invito a dedurne l'inevitabile conseguenza cui ho accennato."

"Hai sempre voglia di scherzare !"

"Pensa, Giulia, scherzi a parte, che la forza subnucleare forte, oltre a legare terne di quark tra loro per formare protoni e neutroni, rende stabili i nuclei atomici.

Il suo raggio d'azione è però piccolissimo, minore di un decimillesimo di milionesimo di centimetro, cioè inferiore al raggio del protone, il che spiega perchè soltanto i protoni ed i neutroni all'interno del nucleo atomico siano soggetti alla forza forte, ma non gli elettroni, che orbitano intorno al nucleo a distanze di circa dieci milionesimi di centimetro, molto maggiori del raggio d'azione.

Devi considerare inoltre che in un nucleo due protoni, due neutroni o un protone ed un neutrone si attraggono con una forza nucleare, la cosiddetta forza residua, dovuta allo scambio di coppie quark-antiquark, che è così intensa da superare ampiamente la forza elettrica repulsiva tra i protoni, che tende a disintegrare il nucleo atomico."

"Deduco che la stabilità della materia debba dipendere da equilibri molto delicati. Può

accadere che questi equilibri qualche volta si rompano?"

"Sì, può accadere. Pensa che nei nuclei atomici pesanti come quelli dell'uranio, del torio e del plutonio, l'equilibrio è così delicato che basta che arrivi un neutrone a perturbarlo, perchè si produca la fissione, che consiste nella disintegrazione dei nuclei in due frammenti, con la produzione di almeno due neutroni, che determinano, se la quantità del combustibile nucleare è superiore a quella critica, la fissione a valanga di altri nuclei, cioè una reazione a catena, con lo sviluppo di grandi quantità d'energia, parecchie decine di milioni di volte maggiori di quelle che si liberano nella combustione di un'uguale quantità di carbone o petrolio."

"Allora, se non deduco male, l'energia che si ottiene dalla fissione nucleare corrisponde all'energia elettrica dei frammenti che si respingono avendo cariche elettriche dello stesso segno?"

"Proprio così, Giulia."

"Qual è il ruolo delle altre forze?"

"La forza di gravità, la forza di Newton, il cui raggio d'azione è infinito, è la più debole, cento miliardi di miliardi di miliardi di miliardi di volte meno intensa della forza forte ed un miliardo di miliardi di miliardi di miliardi di volte meno intensa di quella elettromagnetica.

Diventa tuttavia molto importante qualora si considerino enormi distribuzioni di materia, come quella delle nubi d'idrogeno dalla cui contrazione gravitazionale hanno origine le stelle. Possiamo considerare la gravità come la forza motrice dell'universo.

La quarta forza è quella subnucleare debole, la forza di Fermi, che è diecimila miliardi di volte meno intensa di quella forte, ha un raggio d'azione di circa un decimilionesimo di miliardesimo di centimetro, e determina i cambiamenti di sapore dei quark e dei leptoni, ed in particolare i fenomeni di decadimento beta dei nuclei radioattivi, che emettono elettroni di alta energia trasformandosi in nuclei di altri elementi.

D'altra parte, a dispetto della sua debolezza, la forza subnucleare debole è importantissima su scala cosmica, proprio per la sua caratteristica di produrre cambiamenti di sapore. Infatti la velocità dei processi di fusione termonucleare dei nuclei leggeri che hanno luogo all'interno delle stelle, è controllata proprio dalla forza debole, i cui effetti possono essere valutati misurando i flussi di neutrini emessi dalle stelle.

Se non esistessero le forze deboli, le stelle brucerebbero in un istante tutto l'idrogeno disponibile, comportandosi come bombe H. Magari fosse possibile, nei laboratori di fisica del plasma ricreare per lunghi periodi le stesse condizioni presenti nelle stelle, per ottenere una fusione nucleare lenta e controllabile! Si otterrebbero quantità d'energia illimitate sfruttando l'idrogeno ed il deuterio estraibili dal mare. Si tenta di fare questo da oltre cinquant'anni, purtroppo invano."

"Secondo te, Gianni, quali sono le forze più importanti per la nostra vita?"

"Sono senz'altro quelle elettromagnetiche, le forze di Coulomb, cento volte meno intense della forza forte e con raggio d'azione infinito. Da esse dipendono non soltanto i legami chimici, per esempio quelli tra le basi della molecola a doppia elica del DNA, fondamentali per la nascita e l'evoluzione di tutti gli esseri viventi, ma anche i sapori, i

colori e gli odori che fanno parte della nostra vita. Considera che nel nostro corpo le papille gustative della lingua, i coni ed i bastoncelli degli occhi ed i recettori olfattivi del naso interagiscono con gli stimoli ambientali attraverso reazioni biochimiche che hanno luogo mediante trasferimenti e condivisioni di elettroni tra atomi e molecole, quindi attraverso forze di natura elettromagnetica."

"Mi hai parlato soltanto dell'importanza delle forze elettromagnetiche per lo sviluppo di qualsiasi forma di vita. Penso che esse siano altrettanto importanti nel determinare le caratteristiche fisiche della materia inerte."

"Hai detto bene, Giulia. Considera i 92 elementi chimici naturali, dall'idrogeno all'uranio: le loro proprietà fisiche, quali lo stato di aggregazione (solido, liquido, gassoso), la densità, la trasparenza alla radiazione luminosa, la durezza, l'elasticità, il calore specifico, le temperature che caratterizzano i cambiamenti di fase, la conducibilità elettrica, il magnetismo, dipendono tutte dalla struttura di atomi, molecole e cristalli, quindi dalle interazioni elettromagnetiche che interessano la cosiddetta "corteccia elettronica", cioè gli orbitali atomici, molecolari e cristallini, soggetti al campo elettrostatico dei nuclei carichi positivamente. La forma degli orbitali è determinata dalla meccanica quantistica, che si basa sui fondamentali principi di Heisenberg e di Pauli."

"Quindi, Gianni, deduco che la realtà fisica in tutti i suoi aspetti è governata prevalentemente dalle forze elettromagnetiche !"

"Hai dedotto bene. Pensa che perfino le forze d'attrito che ti consentono di camminare senza scivolare, non sono altro che forze elettriche che agiscono tra le molecole del materiale del pavimento e quelle della gomma delle tue scarpe."

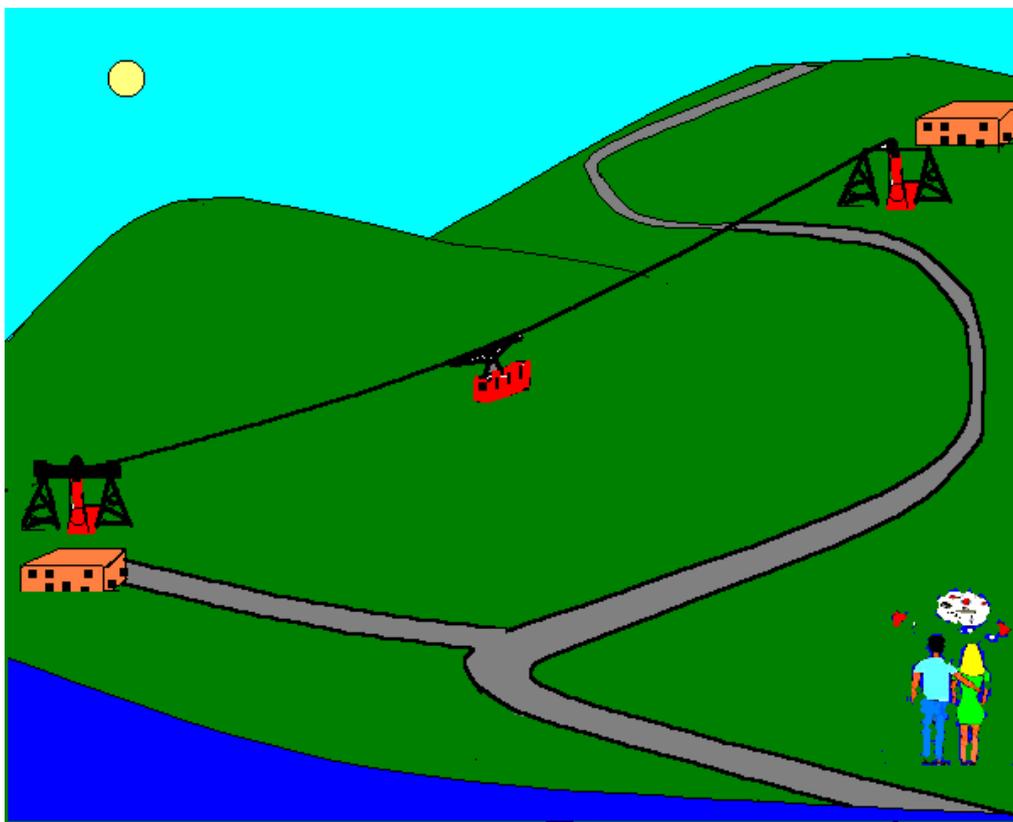
Si accorsero intanto che la nave era già pronta per attraccare, e scesero dal ponte per prepararsi a sbarcare.

"Giulia, guarda quelle colline lassù, ti piacerebbe andarci con la funivia?"

"Sì, senz'altro, hai avuto un'idea magnifica, ci divertiremo."

Quindi s'incamminarono verso la stazione della funivia, desiderosi di fare una rapida escursione romantica sulle colline, per ammirare dall'alto quella sublime composizione naturale di sole, verde, cielo e mare che si offriva ai loro occhi stanchi, che per tanti giorni erano stati costretti, sotto esami, alla visione ravvicinata dei libri.

**IX**  
**IL MISTERO DELLA GRAVITA',**  
**UNA FORZA SUI GENERIS.**  
***CURVA LO SPAZIO E RALLENTA IL TEMPO***



Attesero oltre venti minuti prima di poter partire; c'erano infatti molti turisti ed era disponibile una sola cabina. Finalmente arrivò il loro turno.

Durante la salita Gianni cingeva le braccia al corpo di Giulia come per proteggerla, mentre le sfiorava il viso con teneri baci.

Il panorama mozzafiato che si offriva ai loro occhi era complice dell'estasi in cui si trovavano immersi, ma ben presto la brusca decelerazione precedente l'arrivo alla stazione terminale li riportò con i piedi per terra.

"Gianni, è stato bellissimo, è stato come volare in questo meraviglioso cielo azzurro che ci fa sentire così liberi e contenti di trovarci insieme in questo luogo da favola."

"Giulia, è un altro segno dell'amore di Dio, che ci fa il dono di farci sentire così felici. Guarda quel sentiero che si snoda tra siepi fiorite, mi fa pensare al nostro percorso d'amore".

"Su Gianni, percorriamolo ed andiamo a fare un picnic sull'erba di quel pianoro."

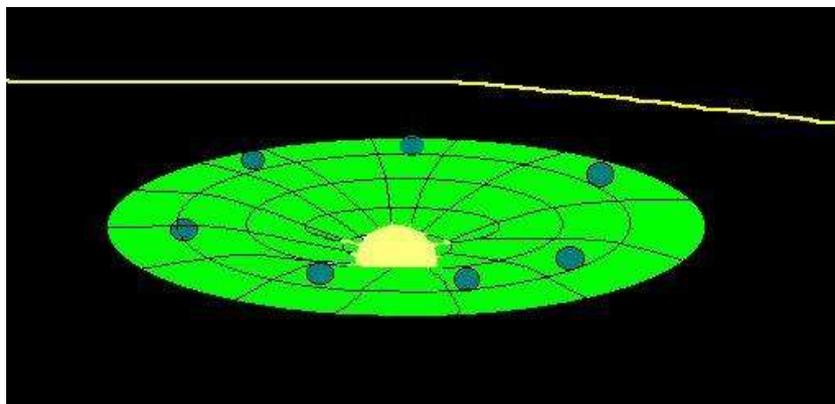
"D'accordo, ma non sarà un po' faticoso per te andare fin lassù con il tuo zainetto pieno pieno? Su, dallo a me, lo porto io."

"Grazie Gianni, sei eccezionale."

"Giulia, non esagerare, sai quanto sia grande il mio amore per te, sopporto con piacere questo sforzo aggiuntivo contro la gravità, che è proprio una forza *sui generis*, direi addirittura misteriosa."

"Perchè misteriosa?"

"E' misteriosa per una caratteristica che la rende completamente diversa dalle altre tre forze fondamentali (elettromagnetica, subnucleare forte e subnucleare debole). Se consideriamo, per esempio, la forza dovuta al campo elettrico che accelera i corpi elettrizzati, notiamo che l'accelerazione acquisita da questi, a parità di carica elettrica, è inversamente proporzionale alla loro massa. Invece la forza di gravità, come stabilisce la legge di Galilei sulla caduta dei gravi, imprime ai corpi in caduta libera la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro massa.



#### SPAZIO-TEMPO CURVATO DALLA MASSA

Dalla considerazione di questo particolare comportamento della forza gravitazionale, Einstein dedusse il principio di equivalenza, sul quale fondò la sua teoria della gravitazione, nota anche come teoria della relatività generale."

"In che cosa consiste questo principio?"

"Te lo spiego con un esempio. Immagina di trovarti su un'astronave la cui traiettoria sia stata calcolata per raggiungere un pianeta e supponi che, a tua insaputa, mediante un segnale radio trasmesso dal centro di controllo, siano stati accesi i razzi ausiliari, in modo tale da determinare un'accelerazione diretta verso il pianeta. Ebbene, Giulia, potresti avvertire l'effetto dell'accelerazione, sentendoti spinta nel verso opposto ad essa a causa della forza d'inerzia, che, come quella gravitazionale, è direttamente proporzionale alla massa, come quando su un'auto in fase di accelerazione ti senti spinta contro la spalliera del sedile, ma non saresti assolutamente in grado di distinguere, neppure usando l'accelerometro e facendo l'ipotesi che tu non avessi la possibilità di accorgerti che i razzi fossero stati accesi, l'accelerazione causata dal campo gravitazionale da quella acquisita dall'astronave per effetto della forza propulsiva dei razzi ausiliari. In questo consiste il principio di equivalenza, che afferma appunto che un campo gravitazionale è indistinguibile da un moto accelerato del sistema di riferimento, che nel nostro esempio è l'astronave. Questo principio equivale anche ad affermare che

il valore della massa inerziale di un corpo, cioè di quella massa che si oppone all'accelerazione causata da una forza, coincide con quello della massa gravitazionale, intesa come massa che produce campo gravitazionale."

"Ma, in sintesi, che cosa afferma la teoria einsteiniana della gravitazione?"

"Afferma che, in assenza di distribuzioni di massa e di energia, che sono facce della stessa medaglia, cioè della massa-energia, lo spazio-tempo, non subendo alcuna deformazione, si comporta come l'ordinario spazio euclideo, facendo muovere i corpi in linea retta e con velocità costante, qualora essi non siano soggetti a forze; il che equivale a dire che vale il principio d'inerzia di Galilei-Newton, che impone ad un corpo non soggetto a forze di muoversi sempre in linea retta e con velocità costante. Se invece sono presenti distribuzioni di massa-energia, quindi non soltanto di materia in quiete o in moto dovuta alla presenza di corpi celesti, ma di energia di qualsiasi tipo (elettromagnetica, termica, nucleare), lo spazio-tempo viene curvato, ed un corpo in moto, anche se non è soggetto all'azione di altre forze non gravitazionali, segue una traiettoria curva, il che equivale a dire che in uno spazio-tempo curvo la traiettoria più breve tra due punti, la cosiddetta geodetica, non è più una retta, ma una linea curva."

"Quindi Einstein interpretò la gravità come una proprietà geometrica dello spazio-tempo?"

"Sì, è proprio così. Potrei dirti che la teoria einsteiniana della gravitazione è una sorta di geometria dell'universo, basata sulla geometria di Riemann, in sostituzione della geometria euclidea, che conserva comunque la sua validità soltanto in uno spazio-tempo piatto, cioè in assenza di distribuzioni di massa-energia."

"Esistono conferme sperimentali?"

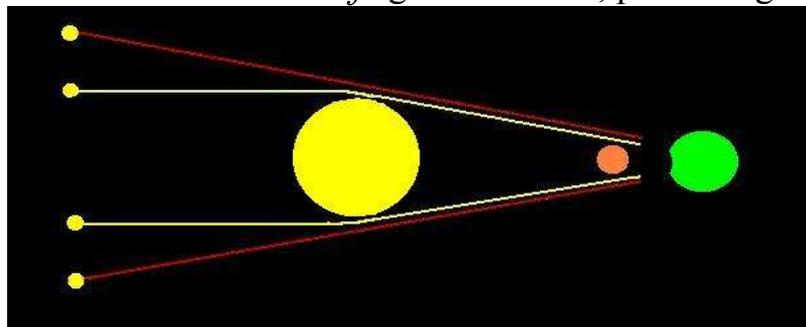
"Eccome ! E sono anche parecchie. Pensa che la prima conferma della validità della teoria della gravitazione, fu ottenuta nel 1919 dall'astronomo inglese Sir Arthur Eddington, misurando durante un'eclissi di sole la piccolissima deviazione che subivano i raggi luminosi provenienti da due stelle, propagandosi in prossimità del disco solare.

"Quale altra verifica importante puoi citare?"

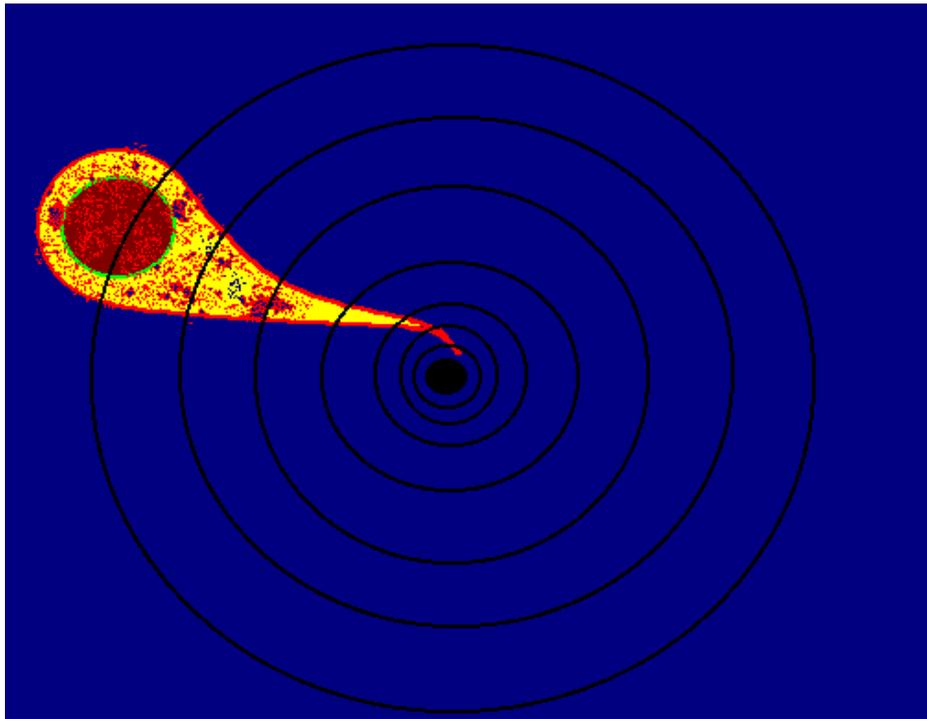
"Quella dello spostamento gravitazionale verso il rosso della radiazione luminosa."

"Ti vuoi spiegare meglio?"

"E' uno spostamento noto come *red shift* gravitazionale, per distinguerlo da quello



OSSERVAZIONE DELLA DEVIAZIONE DEI RAGGI LUMINOSI  
DI DUE STELLE DURANTE UN'ECLISSE DI SOLE



**BUCO NERO CHE ASSORBE LA MATERIA DI UNA STELLA  
EMETTENDO RAGGI X E ONDE GRAVITAZIONALI**

dovuto all'effetto Doppler, e consiste nel fatto che la lunghezza d'onda della luce emessa dalle stelle aumenta per effetto del loro campo gravitazionale. E poichè lo spostamento della lunghezza d'onda della luce verso la regione rossa dello spettro, equivale ad una diminuzione della frequenza e ad un aumento del periodo, che è l'inverso della frequenza, si dice anche che la gravità rallenta il tempo, in quanto noi, misurando il periodo della luce attraverso la sua lunghezza d'onda, rileviamo un valore maggiore di quello che verrebbe rilevato sulla superficie di una stella.

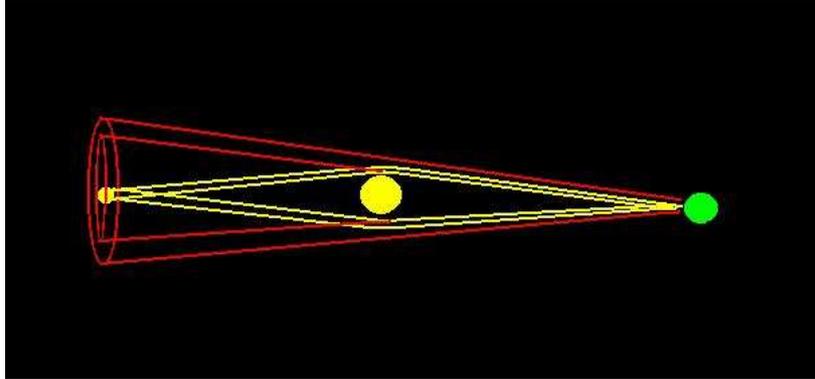
E' come se i fotoni della radiazione luminosa, la cui energia, per la teoria di Einstein sull'effetto fotoelettrico, è direttamente proporzionale alla frequenza, propagandosi dalla superficie di una stella verso di noi, perdessero energia per effetto del lavoro fatto contro il campo gravitazionale, subendo un aumento della lunghezza d'onda. Da questo si può inoltre dedurre che, nel caso limite di un buco nero, il cui campo gravitazionale è infinitamente grande, il tempo debba essere rallentato fino a fermarsi e che la frequenza e l'energia dei fotoni emessi debbano anch'esse ridursi a zero, rendendo il buco invisibile"

"E' straordinario! Ma, dimmi ancora, Gianni, esistono altre prove più recenti della deviazione subita dalla luce per effetto della curvatura dello spazio-tempo?"

"Sì. Attualmente parecchi astrofisici si occupano di verificare il fenomeno della lente gravitazionale, che consiste nel fatto che i raggi luminosi di una stella lontana, propagandosi in prossimità di un corpo celeste di grande massa, come un buco nero o una stella di neutroni, subiscono una deviazione che li focalizza intensificandoli, proprio come si verifica in una lente."

"Oh, Gianni, finalmente siamo quasi arrivati, com'è bello quassù. Questo fantastico panorama mi comunica tanta pace e tanta libertà e mi parla dello sconfinato amore di Dio per l'umanità."

"E' vero, Giulia, provo anch'io le tue stesse sensazioni; ci troviamo quassù noi due soli a contatto con la natura, per vivere il nostro amore."



**OSSERVAZIONE DEGLI ANELLI DI EINSTEIN FORMATI DA UNA STELLA OCCULTATA DA UN'ALTRA STELLA DI GRANDE MASSA ( EFFETTO "LENTE GRAVITAZIONALE")**

Non è meraviglioso? Parlando di gravitazione e di spazio-tempo curvo, quasi non abbiamo avvertito la fatica del lavoro fatto contro la gravità durante la salita; l'abbiamo quasi neutralizzata con la forza del nostro amore.

"Gianni, ricorda che la vera fede ed il vero amore possono spostare anche le montagne." Intanto, distesero una tovaglia sull'erba e consumarono una colazione a base di appetitosi panini riempiti con fantasia, bevendo aranciata, mentre il loro hi-fi portatile diffondeva distensivi brani mozartiani. Il picnic si protrasse fino alle quattro del pomeriggio, quando i due ragazzi, sazi di sole, di mare, di musica, di azzurro ... e di panini, decisero di recarsi alla stazione della funivia.

La discesa fino alla stazione di partenza regalò loro frequenti ed intensi momenti romantici, il cui incanto non fu per niente sciupato dalle brusche variazioni di velocità. Usciti dalla cabina, s'incamminarono lentamente verso il molo in attesa della nave.

***A ricordo del passaggio della cometa Hale-Bopp***

*Ghiaccio vagante nel cielo,  
luce siderale carica di mistero,  
diffondi la tua chioma d'argento  
messaggera di eternità.*

*Pellegrina solitaria del cosmo,  
affascini chi ti scorge nelle notti serene  
e si annulla nella tua  
immagine che sa d'infinito.*

*Tremila anni ad ogni tuo passaggio.*

*Ti videro genti oggi estinte,  
ti vediamo noi una volta sola,  
simbolo del nostro limite,  
silente calendario dell'eternità.*

Antonino Cucinotta

## X

### IL MISTERO DELL'ANTIMATERIA

#### *L'UNIVERSO FATTO DI MATERIA ESISTE PER UNA MISTERIOSA ASIMMETRIA INIZIALE TRA MATERIA ED ANTIMATERIA*

Gianni, poc'anzi, pensando ancora alla forza di gravità, immaginavo come sarebbe bello poterla annullare per volare liberi nell'aria come uccelli."

"Giulia, non è possibile annullare la forza di gravità. Gli uccelli riescono semplicemente ad equilibrarla sfruttando le forze aerodinamiche che agiscono sulle loro ali; si tratta dello stesso principio fisico che consente agli aerei ed agli elicotteri di volare."

"Lo so, Gianni, stavo scherzando!"

"L'avevo capito."

"Gianni, sento spesso parlare di antimateria e mi chiedo se esista l'antigravità, se cioè sia possibile, come avviene per le cariche elettriche e per i poli magnetici dello stesso segno, verificare l'esistenza di forze gravitazionali repulsive."

"Ma, Giulia, una delle proprietà specifiche delle forze gravitazionali è proprio quella di essere sempre attrattive. Forse confondi l'antimateria con l'antigravità, che a differenza dell'antimateria, non esiste. Non esistono forze gravitazionali repulsive tra due corpi, perchè, diversamente da quanto si verifica per le cariche elettriche e per i poli magnetici, alle masse gravitazionali non si può attribuire una polarità. Ricordi che le forze gravitazionali, considerate su scala cosmica, cioè facendo riferimento a stelle, galassie ed ammassi di galassie, rappresentano le forze motrici primarie che addensano la materia dando origine a tutti gli oggetti celesti? Ecco il motivo per cui devono essere necessariamente attrattive."

"Allora spiegami che cos'è antimateria."

"Bene, Giulia, in attesa che arrivi la nave, cercherò di spiegarti il mistero dell'antimateria."

"Come, anche per l'antimateria si parla di mistero?"

"Sì, e ti spiego perchè. Nel 1928 il fisico inglese Paul Dirac, nell'ambito della meccanica quantistica, scrisse un'equazione d'onda analoga a quella di Schroedinger, ma conforme alla teoria einsteiniana della relatività speciale. Ebbene, l'applicazione dell'equazione di Dirac ai fermioni, particelle con spin semidispari (elettrone, protone, neutrone, neutrino), fornisce, nel caso di fermioni liberi, cioè non soggetti a campi di forza, in aggiunta alle normali soluzioni con energia positiva, anche soluzioni con energia negativa, a prima vista prive di significato, ma suscettibili di un'interpretazione notevolissima dal punto di vista fisico, se si fa l'ipotesi che gli stati con energia negativa relativi ad una particella corrispondano a quelli della sua antiparticella, avente la stessa massa e dotata di carica elettrica e di numeri quantici di segno opposto. Pertanto, oltre

ai normali stati elettronici, con energia positiva, bisogna considerare anche quelli con energia negativa, associati agli antielettroni, cioè ai positroni, che hanno la stessa massa e carica elettrica opposta a quella, negativa, degli elettroni. In modo analogo, agli stati protonici, si associano quelli degli antiprotoni, che sono antiparticelle aventi la stessa massa e carica elettrica opposta a quella, positiva, dei protoni. L'ipotesi di Dirac trovò brillanti conferme sperimentali nel 1933, quando il fisico statunitense Anderson scoprì i positroni nei raggi cosmici, e nel 1955, quando Emilio Segrè scoprì l'antiprotone bombardando bersagli metallici con il fascio di protoni di alta energia generato dal bevatrone da 6 GeV dell'Università di Berkeley (California). Oggi si sa che per ogni particella, sia essa carica o neutra, esiste la rispettiva antiparticella, una particella simmetrica rispetto ad un ipotetico "specchio della natura" che trasforma particelle in antiparticelle, e viceversa.

## **Materia ed antimateria**

*Uno specchio misterioso separa il mondo dall'antimondo.*

*Al di qua dello specchio*

*un protone si rivede come antigemello negativo,*

*un elettrone come antigemello positivo,*

*un neutrone come antigemello simmetrico.*

*Un atomo ed il suo antiatomo emettono la stessa luce.*

*Un essere vede il suo antiessere.*

*Gemelli ed antigemelli si avvicinano allo specchio e lo raggiungono.*

*Ora non li vediamo più.*

*Si sono annichilati in coppie di gammafotoni.*

Antonino Cucinotta

Pensa che i fisici del CERN sono riusciti recentemente a produrre antiatomi, in particolare atomi di anti-idrogeno, formati da un positrone e da un antiprotone."

"Gianni, che succede se una particella urta la sua antiparticella?"

"Una caratteristica fondamentale delle antiparticelle è quella di annichilarsi quando collidono con le rispettive particelle, dando luogo, per la legge relativistica della conservazione della massa-energia, all'emissione di energia elettromagnetica (fotoni gamma) equivalente alla somma delle loro masse. Inoltre, è impossibile distinguere un atomo dal corrispondente antiatomo, in quanto le righe spettrali emesse hanno la stessa lunghezza d'onda e la stessa intensità."

"Allora, dimmi, in che cosa consiste il mistero di cui mi hai parlato?"

"Il mistero dell'antimateria consiste nel fatto che finora non si è potuto capire perché l'universo sia quasi tutto fatto di materia, perché cioè l'antimateria sia così rara. E' un'asimmetria per la quale, alla luce delle attuali teorie cosmologiche, non esiste una

spiegazione definitiva.

Alcuni fisici fanno l'ipotesi che subito dopo il big bang sia venuta meno la simmetria che dalla radiazione iniziale aveva prodotto numeri uguali di quark e di antiquark.

Inizialmente i quark si sarebbero uniti agli antiquark con un rapporto 1/1, annichilandosi in fotoni gamma, ma lasciando alla fine della fase di annichilazione, proprio per effetto della rottura di simmetria, un eccesso di quark, uno per miliardo, tale da determinare la formazione di un universo costituito quasi interamente da particelle di materia, con pochissima antimateria."

"Ma qual è stata la causa della rottura della simmetria?"

"E' proprio questa la domanda alla quale fisici e cosmologi non sono in grado di dare una risposta definitiva.

Alcuni fisici ritengono che se nei primi milionesimi di secondo dopo il big bang non si fosse verificata una violazione della cosiddetta simmetria di carica-parità (CP), tale da alterare la perfezione dello "specchio della natura", l'universo, fatto soltanto di quark ed elettroni, quindi di materia, non esisterebbe. Ma l'infinito amore del Creatore impedì che la simmetria continuasse ad essere perfetta e le fluttuazioni quantistiche, coerenti con il principio d'indeterminazione di Heisenberg, determinarono un esiguo eccesso di quark rispetto agli antiquark; di conseguenza i quark che in piccolissima percentuale non riuscirono a trovare antiquark con cui annichilarsi in radiazione elettromagnetica, rimasero liberi, dando origine, nelle successive fasi di raffreddamento, al mondo fatto di materia."

"Ma allora è possibile che la simmetria universale in qualche caso venga violata?"

"Sì, Giulia, la simmetria fu imperfetta subito dopo il big bang ed è imperfetta sempre, ed a violarla sono soltanto le forze subnucleari deboli di Fermi, quelle stesse forze che controllano la fusione termonucleare che fa brillare le stelle."

"Ma i fisici come sono pervenuti alla formulazione di quest'ipotesi?"

"Bene! La violazione della simmetria speculare, cioè della cosiddetta parità (P), prevista teoricamente da Lee e Yang nel 1957 sulla base di alcuni problematici decadimenti dei kaoni, fu verificata nello stesso anno da Wu, che osservò significative asimmetrie tra destra e sinistra negli elettroni prodotti dal decadimento radioattivo del cobalto-60.

Oltre alla violazione della simmetria P ed a quella della simmetria C per coniugazione di carica, che consiste nel rilevare differenti comportamenti delle particelle rispetto alle antiparticelle, che hanno carica elettrica opposta, non furono rilevate fino al 1964 altre violazioni da parte delle forze deboli, e si riteneva addirittura inviolabile la simmetria CP, consistente nel considerare entrambe le simmetrie."

"Che scoperta fu fatta nel 1964?"

"Ebbe grande rilievo nella comunità scientifica la scoperta di Christenson, Fitch e Cronin, che studiando il decadimento dei kaoni neutri, che sono mesoni strani formati dalla misteriosa sovrapposizione di una coppia antiquark strano + quark down e della corrispondente coppia di antiparticelle, quark strano + antiquark down, osservarono per la prima volta la violazione della simmetria di CP. Questa violazione è stata sempre confermata eseguendo ulteriori misure sempre più precise, non soltanto sui kaoni, ma anche, negli ultimi anni, sui mesoni B°. Finora invece i fenomeni prodotti dalle forze

elettromagnetiche, subnucleari forti e gravitazionali non hanno mai evidenziato alcuna violazione delle simmetrie P,C,T e CP."

"Ma la violazione della simmetria di CP in pratica come viene evidenziata?"

"Studiando come si comporta la materia, nei decadimenti di particelle soggette alle forze deboli, qualora si applichino successivamente le trasformazioni P (parità) e C (coniugazione di carica). Si controlla cioè se i risultati delle misure risultino modificati applicando le trasformazioni C e P, cioè sostituendo alle particelle le rispettive antiparticelle ed applicando una riflessione spaziale. Se i risultati risultano identici, entro i limiti degli errori sperimentali, la violazione di CP non sussiste, altrimenti significa che la natura, in relazione ai decadimenti delle particelle che si considerano, fa distinzione tra destra e sinistra e tra le particelle e le rispettive antiparticelle."

"Ma ancora mi sfugge perchè la violazione di CP sia così importante !"

"E' importante considerare che la violazione di CP nel decadimento di una particella in due o più particelle è molto importante, anche perchè consente nello stesso tempo di verificare se le particelle prodotte dalla disintegrazione siano in grado di ricombinarsi per rigenerare la particella che le ha generate in un tempo uguale a quello che in media essa impiega per decadere. Si tratta in sostanza di verificare la reversibilità temporale di un processo. Ma mentre nel caso dei processi soggetti alle forze forti ed elettromagnetiche, la reversibilità temporale non è stata mai violata, il che significa che le particelle coinvolte possono andare avanti e indietro nel tempo senza accorgersene, nei processi deboli, cioè nei cambiamenti di sapore causati dalle forze deboli, è come se le particelle fossero in grado di distinguere tra passato e futuro, proprio come succede a noi esseri macroscopici, che non possiamo certo viaggiare indietro nel tempo. Ebbene, una cosa è certa: anche se nei processi deboli le simmetrie P,C, CP e T vengono violate, finora non è stata mai violata la simmetria CPT, che è un vero e proprio principio naturale, e consiste nel considerare assieme le tre simmetrie rilevando i dati sperimentali di un processo qualsiasi. Questo significa che finora non è stata rilevata alcuna differenza tra le masse ed i tempi di decadimento delle particelle instabili e delle rispettive antiparticelle."

"Ma in quale fase dell'evoluzione dell'universo si pensa che si sia verificata la violazione di CP?"

"Generalmente si fa l'ipotesi che la rottura della simmetria sia avvenuta durante la fase inflazionaria, cioè di rapida espansione iniziale subito dopo il big bang, a causa di perturbazioni quantistiche dello stato di vuoto, che avrebbero modificato le caratteristiche dello spazio-tempo, rendendolo disomogeneo, o come si suole dire, "spugnoso", su lunghezze comparabili con quella caratteristica della scala di Planck ( $\sim 10^{-35}$  m)."

"Guarda, Gianni, la nave sta per attraccare, avviciniamoci."

## XI

### LE ONDE

#### MECCANICHE, ELETTROMAGNETICHE E GRAVITAZIONALI *PERTURBANO I MEZZI IN CUI SI PROPAGANO, TRASMETTENDO ENERGIA*

"Purtroppo, Giulia, il mare è molto agitato, vedi quei cavalloni?"

"Sì, li vedo, non mi aspettavo di trovare un mare così mosso. Vai a fidarti del bollettino meteo! Pazienza!"

"Eh, quei marinai avranno un bel daffare per ormeggiare la nave. Speriamo bene !"

"Gianni, a proposito di onde, guardo il mare agitato e penso ai vari tipi di onde: marine, acustiche, sismiche, elettromagnetiche. Qual è la caratteristica fisica che hanno in comune?"

"E' semplice, Giulia. E' quella di trasmettere energia dal punto in cui vengono generate verso tutti i punti soggetti agli effetti della loro propagazione. Pensa ai fronti d'onda circolari generati dalla caduta di un sasso in uno specchio d'acqua calma; si tratta di onde circolari che si propagano concentricamente dal punto d'impatto del sasso, trasferendo energia a tutta la superficie liquida.

Nel caso particolare delle onde marine, l'energia è trasmessa attraverso il mezzo di propagazione mediante oscillazioni meccaniche trasversali rispetto alla direzione di propagazione dell'onda, con periodiche trasformazioni dell'energia potenziale gravitazionale accumulata in corrispondenza delle creste, per effetto del sollevamento del liquido, in energia cinetica, e viceversa.

Vedi quel motoscafo ormeggiato presso il pontile? Le onde lo raggiungono facendolo oscillare prevalentemente lungo la verticale: quando arriva la cresta dell'onda viene spinto verso l'alto, per abbassarsi subito dopo all'arrivo del ventre. E' quasi in risonanza con l'onda."

"Che significa? Spiegami."

"E' lo stesso fenomeno per cui, se imprimi ad un'altalena delle spinte opportunamente sincronizzate con le sue oscillazioni, puoi aumentarne l'ampiezza. Se l'intervallo di tempo tra due spinte consecutive è quasi uguale al periodo delle oscillazioni dell'altalena, che equivale ad un pendolo fisico, essa oscilla in risonanza con le spinte periodiche che le imprimi. L'altalena in risonanza è un po' come noi due, quando avvertiamo che i nostri cuori vibrano entrambi all'unisono, risuonando sulla lunghezza d'onda dei nostri sentimenti."

"Sei un poeta!"

"Non esagerare", disse Gianni accarezzando teneramente i capelli di Giulia carichi di salsedine ..."

"Su, Gianni, continua, mi stavi parlando dei vari tipi di onde: acustiche, sismiche, elettromagnetiche ..."

"Le onde acustiche (o sonore) sono onde meccaniche che si propagano nei mezzi elastici, solidi, liquidi o gassosi, dotati sia di inerzia (massa) che di elasticità, e si distinguono in onde infrasoniche, se la frequenza è minore di 20 Hz (soglia inferiore di udibilità), onde ultrasoniche, se la frequenza è maggiore di 15000 Hz (soglia superiore di udibilità) ed onde acustiche, con frequenza compresa tra 20 Hz e 15000 Hz. Devi però tenere presente che, mentre nei solidi le onde meccaniche si propagano attraverso oscillazioni sia longitudinali che trasversali, nei liquidi e nei gas esse si trasmettono soltanto mediante compressioni e rarefazioni longitudinali; infatti nei fluidi, le cui proprietà sono isotrope, cioè indipendenti dalla direzione, non si possono propagare oscillazioni trasversali.

Le onde sismiche non sono altro che particolari onde meccaniche che si propagano attraverso il mantello e gli strati della crosta terrestre, sia mediante oscillazioni longitudinali, dirette verso la superficie terrestre lungo i raggi che partono dall'ipocentro, che è il punto in cui ha origine il terremoto, sia mediante oscillazioni trasversali, perpendicolari a tali raggi."

"E le onde elettromagnetiche, in che cosa differiscono da quelle luminose?"

"La luce, come sostenne Maxwell nel suo trattato sui fenomeni elettromagnetici e come fu dimostrato dalle famose esperienze di Hertz, è costituita da onde elettromagnetiche, la cui frequenza assume valori molto elevati, da 375000 GHz a 750000 GHz, che corrispondono rispettivamente alla luce rossa ed a quella violetta.

La radiazione luminosa, come tutte le altre radiazioni elettromagnetiche (onde radio, raggi infrarossi, ultravioletti, X e gamma), trasporta energia elettromagnetica attraverso un campo elettrico ed un campo magnetico oscillanti, perpendicolari tra loro ed alla direzione di propagazione dell'onda, e si propaga nel vuoto con la velocità di 300000 km/s, e nei mezzi ottici (trasparenti) con una velocità inversamente proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo.

Però, a differenza delle onde meccaniche, che hanno sempre bisogno di un mezzo, solido, liquido o gassoso, per propagarsi, la luce e tutte le altre radiazioni elettromagnetiche, si propagano anche nel vuoto. Infatti la luce emessa dai corpi celesti si propaga nel vuoto dello spazio cosmico."

"E le onde elettromagnetiche come si generano?"

"Accelerando le cariche elettriche. Infatti il lavoro fatto per accelerare una carica elettrica si converte in energia elettromagnetica che si propaga a distanza attraverso onde elettromagnetiche. Un'antenna trasmittente è essenzialmente un conduttore isolato che irradia nello spazio le onde elettromagnetiche generate dagli elettroni di conduzione accelerati dal campo elettrico ad alta frequenza applicato dal trasmettitore.

"Esistono altri tipi di onde capaci di propagarsi nel vuoto?"

"Sì, le onde gravitazionali. La loro esistenza fu prevista da Einstein nell'ambito della teoria della relatività generale. Sono generate da moti accelerati di oggetti celesti e si propagano nel vuoto con la velocità della luce, trasportando energia mediante un campo gravitazionale oscillante che si evidenzia attraverso periodiche deformazioni dello spazio-tempo.

Per esempio, le onde gravitazionali possono essere generate da collisioni tra stelle

ordinarie, tra stelle di neutroni o tra buchi neri, dal collasso di una supernova, dalla fusione (coalescenza) di due galassie, o per effetto delle violente accelerazioni impresse da un buco nero agli oggetti celesti catturati dal suo intensissimo campo gravitazionale"

"Gianni, si sono avute conferme sperimentali della loro esistenza?"

"Essendo debolissime le oscillazioni indotte sulla Terra dalle onde gravitazionali, con ampiezze di alcuni millesimi di nanometro, la loro rivelazione è un lavoro estremamente delicato, che si basa sull'impiego di antenne risonanti costituite da grandi masse metalliche fissate a sospensioni elastiche capaci di eliminare i disturbi dovuti alle onde sismiche. Le antenne vengono raffreddate alla temperatura di qualche decimo di grado  $K^{\circ}$ , al fine di rendere minime le oscillazioni dovute all'agitazione termica, che altrimenti impedirebbero di rivelare le infinitesime oscillazioni trasmesse dalle onde gravitazionali. Anche se da oltre trent'anni si costruiscono antenne gravitazionali terrestri in parecchi laboratori mondiali, i risultati sperimentali finora sono stati modesti, essendo stato possibile soltanto rivelare indirettamente l'emissione di onde gravitazionali attraverso le variazioni di periodo di sistemi binari formati da stelle di neutroni orbitanti intorno al comune baricentro. Tuttavia, grazie anche allo sviluppo di avanzate tecniche di rivelazione, basate sull'interferometria laser, gli attuali sforzi di ricerca si sono intensificati, con l'obiettivo di sviluppare una nuova branca della ricerca cosmologica, che consenta di studiare il cosmo catalogando le sorgenti di onde gravitazionali, in modo analogo a quanto è stato fatto in quarant'anni con i radiotelescopi e con le sonde spaziali dotate di telescopi a raggi X.

Si pensa addirittura di poter rivelare e studiare la radiazione gravitazionale fossile generata dal big bang, in modo analogo a quanto si è fatto e si continua a fare con la radiazione elettromagnetica fossile da  $3^{\circ}K$ , con il notevole vantaggio di una risoluzione migliore, dovuta al fatto che le onde gravitazionali, a differenza delle onde elettromagnetiche, subiscono un'attenuazione trascurabile attraversando i corpi celesti di grande massa, il che consentirebbe di ottenere informazioni dettagliate sulla loro struttura interna, attraverso una vera e propria "radiografia gravitazionale."

Nel frattempo le manovre di attracco erano state completate e i due ragazzi si apprestavano ad imbarcarsi.

## XII

### **NELL'UNIVERSO L'ENERGIA, LA QUANTITA' DI MOTO, IL MOMENTO ANGOLARE E LA CARICA ELETTRICA SI CONSERVANO, *RIVELANDOCI CHE LO SPAZIO-TEMPO E' OMOGENEO ED ISOTROPO***

Imbarcatisi sulla nave, Gianni e Giulia, avevano deciso di salire sul ponte più alto, così come avevano fatto durante il viaggio d'andata, ma un fortissimo vento di scirocco li costrinse a ripararsi in sala passeggeri.

"Pazienza", disse Giulia, "questo vento ci ha rovinato il viaggio!"

"Su, Giulia, non fare così, importante è non annoiarsi, ed a noi, con tutte le cose che abbiamo da dirci, capita raramente di annoiarci! Penso che conserverai sempre il tuo entusiasmo e la tua curiosità per la natura. Sei ammirevole e riesci sempre a stupirmi." "Per questo, Gianni, stiamo bene insieme. L'amore è soprattutto capacità di comunicare, di trasmettersi sensazioni, conoscenze, di completarsi a vicenda, di dare senza mai stancarsi, e tu questo lo fai sempre."

"Ma anche tu, Giulia, lo fai. In questo momento sto pensando ad alcuni principi fondamentali della natura, in particolare al principio di conservazione dell'energia, in base al quale le quantità delle varie forme di energia presenti nell'universo, cinetica, gravitazionale, termica, elettromagnetica, nucleare, possono singolarmente aumentare o diminuire convertendosi da una forma ad un'altra, come, per esempio, si verifica in un generatore elettrico, che assorbe energia meccanica per trasformarla in energia elettrica; ma sempre in modo tale che si mantenga costante la loro somma, cioè l'energia totale. In effetti bisogna considerare la massa-energia totale, poiché nell'ambito della teoria della relatività speciale di Einstein si parla del principio di conservazione della massa-energia, tenendo conto delle trasformazioni di massa in energia, e viceversa, secondo la notissima formula  $E = m c^2$ . Ebbene, io penso che anche per noi sia valido questo principio: tutto quello che fa parte di noi in quanto coppia, cioè tutto il nostro patrimonio di sentimenti, conoscenze, esperienze, si è formato e si accresce attraverso continui scambi di energie umane diverse, sia tra noi due che tra noi e gli altri, dandoci la possibilità di sperimentare la quintessenza dell'amore evangelico, un amore che fa capire che il dare è sempre molto più proficuo del ricevere e che se si riuscisse a globalizzare l'altruismo, sforzandosi individualmente di convertire l'egoismo in altruismo, molti dei mali che oggi affliggono il mondo potrebbero essere eliminati. E come nell'universo la massa-energia totale si conserva, così anche l'amore totale si conserva. Come vedi, il principio di conservazione della massa-energia universale potrebbe essere reinterpretato, a prescindere dalla realtà fisica, come principio di conservazione dell'Amore universale."

"Gianni, hai parlato della formula relativistica  $E = m c^2$ . Qual è il suo significato fisico? Perché è così importante?"

"Giulia, devi considerare anzitutto che Einstein nel formulare nel 1905 la teoria della

relatività speciale, detta anche teoria della relatività ristretta, perchè, a differenza di quella della relatività generale, riguarda soltanto sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme, cioè non accelerati o inerziali, utilizzò delle formule (trasformazioni) che il fisico olandese Lorentz aveva introdotto per dimostrare che le equazioni della teoria elettromagnetica di Maxwell conservano la stessa forma nel passaggio da un sistema di riferimento ad un altro, purchè entrambi i sistemi siano inerziali.

Ebbene, le formule trovate da Lorentz prima del 1905, mescolando lo spazio con il tempo, implicano non soltanto che la posizione di un oggetto rispetto ad un sistema di riferimento inerziale dipenda dal tempo, dalla velocità costante con cui il sistema inerziale considerato si sposta rispetto ad un secondo sistema inerziale, dalla velocità della luce nel vuoto, e dalla posizione assunta dall'oggetto rispetto al secondo sistema, ma anche, e qui sta la novità, che il tempo misurato rispetto al sistema inerziale considerato dipenda dal tempo, differente, misurato rispetto al secondo sistema, dalla velocità costante del sistema considerato rispetto al secondo, dalla velocità della luce nel vuoto e dalla posizione assunta dall'oggetto rispetto al secondo sistema. C'è anche da dire che, se si considerasse infinita la velocità della luce, che, come le costanti universali  $h$  di Planck e  $G$  di Newton, è collegata alla struttura dell'universo, le formule di Lorentz si ridurrebbero alle classiche formule del principio di relatività, che Galileo enunciò con riferimento all'impossibilità di distinguere con esperienze di meccanica eseguite su una nave, quali per esempio la misura del periodo di oscillazione di un pendolo, lo stato di moto rettilineo ed uniforme della nave da quello di quiete.

Pertanto la teoria di Einstein demolisce definitivamente il concetto newtoniano di tempo assoluto, affermando che la durata di un fenomeno fisico dipende dal sistema di riferimento rispetto al quale si esegue la misura. Se io, per esempio, guidando la mia auto su un rettilineo, a velocità costante, accendessi per un certo intervallo di tempo, misurato col mio orologio, una lampadina installata sul parabrezza, la durata di accensione misurata da un osservatore fermo sulle strisce pedonali in attesa di attraversare, risulterebbe allungata, sia pure di un frazione di secondo estremamente piccola, rispetto a quella misurata a bordo dell'auto. Tutto dipende dal fatto che, considerando finita la velocità  $c$  della luce, com'è in realtà, non è istantanea la propagazione dei raggi luminosi che raggiungono l'osservatore fermo."

"Ma allora, Gianni, ai fini pratici, i risultati della teoria relativistica non differiscono in modo significativo da quelli deducibili dal principio di relatività di Galileo! Che ne dici?"

"Eh, no, Giulia, le differenze sono trascurabili finchè si considerano velocità molto piccole rispetto a 300000 km/s, come nel caso della mia auto in moto a 40 km orari, una velocità circa 27 milioni di volte minore di quella della luce nel vuoto. La situazione è ben diversa quando si considerano le particelle elementari, le cui velocità sono vicinissime a quella della luce, come nel caso dei protoni e degli antiprotoni di alta energia che generano nuove particelle urtandosi frontalmente in un anello di accumulazione come quello del CERN di Ginevra. In questo caso la meccanica di Galileo-Newton darebbe risultati completamente errati, in quanto le particelle sono oggetti del microcosmo tipicamente relativistici, la cui massa di moto può diventare

oltre un centinaio di volte maggiore di quella delle particelle ferme (massa a riposo). Questo è un importantissimo risultato relativistico collegato alla formula di cui parliamo.

Infatti, la massa di un oggetto in moto diventa tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto tra la sua velocità e quella della luce nel vuoto. Al limite, per velocità differenti da quella della luce per quantità infinitesime, la massa di moto, e così anche l'energia relativistica totale  $E = mc^2$  tenderebbero a valori infinitamente grandi, proprio perchè, essendo la velocità  $c$  insuperabile, occorrerebbero energie infinitamente grandi per far aumentare ancora la velocità di un oggetto relativistico avente una massa di moto infinitamente grande, e questo non è fisicamente ammissibile.

La formula  $E = mc^2$  vale anche se si considera la massa di quiete  $m^0$  di un corpo, invece della massa di moto  $m$ , il che significa appunto che massa ed energia sono equivalenti, nel senso che si trasformano reciprocamente l'una nell'altra, proprio come avviene negli anelli di accumulazione, nei quali un'energia di circa 2000 GeV (1 GeV = 1 miliardo di elettronvolt) fornita alle particelle che collidono frontalmente, si trasforma direttamente in massa, dando origine a nuove particelle molto più pesanti di quelle iniettate nell'anello di accumulazione, oppure come avviene nelle stelle, la cui energia si ottiene dalla trasformazione della piccolissima differenza (difetto di massa) tra la massa totale dei nuclei di idrogeno che subiscono la fusione termonucleare e la massa totale dei nuclei di elio che si formano.

"Hai qualche altro esempio relativistico più convincente?"

"Sì, Giulia, poiché sei ancora scettica, ti parlerò della vita media dei muoni, che sono leptoni instabili circa 200 volte più pesanti degli elettroni e decadono in elettroni e neutrini con una vita media di circa 2 milionesimi di secondo, misurata, è importante sottolinearlo, quando sono in quiete rispetto al sistema di riferimento.

I muoni, prodotti dal decadimento dei pioni che si generano nell'atmosfera, al di sopra di 6 km, in seguito all'impatto delle particelle della radiazione cosmica, costituita prevalentemente da protoni e ioni di altissima energia provenienti dallo spazio extragalattico, raggiungono la superficie terrestre e decadono.

Se consideri che per percorrere 6 km alla velocità della luce, senza disintegrarsi, un muone dovrebbe impiegare un tempo di 20 milionesimi di secondo, dieci volte maggiore della sua vita, non puoi comprendere come sia possibile rivelare al suolo buone percentuali di muoni non ancora disintegrati e rivelarne subito dopo, con speciali contatori a coincidenza gli elettroni di decadimento, senza ammettere la validità della legge relativistica di dilatazione del tempo.

Infatti, se si ammette che la loro velocità media si mantenga intorno al 99,86 % di quella della luce nel vuoto, si calcola che il tempo di decadimento misurato nel sistema di riferimento terrestre sia circa 20 volte il cosiddetto tempo proprio, o tempo locale, misurato da un ipotetico osservatore microscopico trasportato dal muone. Se neanche questo esempio dovesse servire per convincerti ...."

"Su, Gianni, non disperare, finalmente sei riuscito a vincere il mio scetticismo."

"Meno male. Sono contento."

"Gianni, a proposito del principio di conservazione dell'energia, mi piacerebbe sapere

se in natura esistano altri principi di conservazione altrettanto importanti."

"Eccome ! Almeno tre te li posso citare subito."

"E quali sono?"

"Due di essi riguardano non soltanto la meccanica classica, ma si mantengono validi anche in meccanica quantistica. Sono il principio di conservazione della quantità di moto ed il principio di conservazione del momento della quantità di moto, meglio noto come principio di conservazione del momento angolare. Il terzo riguarda l'elettromagnetismo ed è il principio di conservazione della carica elettrica."

"Me li puoi spiegare con qualche esempio?"

"Sì, senz'altro. Tieni presente anzitutto che la quantità di moto di un corpo è il prodotto della massa per la velocità, questa considerata come vettore, cioè in valore, direzione e del verso, e che per il terzo principio della dinamica, che afferma che ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria, nei sistemi costituiti da due o più corpi in movimento la quantità di moto totale si conserva, purchè sia nulla la risultante delle forze esterne che agiscono sul sistema.

Pensa in particolare al sistema solare, nel quale le forze interne sono quelle di attrazione gravitazionale tra tutte le possibili coppie di corpi: Sole-pianeta, pianeta-pianeta, pianeta-satellite, Sole-satellite e satellite-satellite.

Poichè tutte queste forze, uguali e contrarie a due a due, producono accelerazioni uguali e contrarie e di conseguenza variazioni uguali e contrarie delle quantità di moto, ci rendiamo conto che la somma delle quantità di moto di tutti i corpi si mantiene praticamente costante, purchè si considerino trascurabili le forze esercitate dai corpi esterni al sistema solare. Come ulteriore esempio puoi considerare il gioco del biliardo. Negli urti tra due o più biglie si esercitano forze interne impulsive di azione e reazione, che determinano variazioni uguali e contrarie delle singole quantità di moto. Anche in questo caso si conserva la quantità di moto totale del sistema di biglie, che sono soggette alle sole forze interne impulsive, poichè l'unica forza esterna, quella di gravità, non influisce, essendo equilibrata dal tavolo orizzontale."

"Quali altri esempi applicativi puoi citare?"

"Il rinculo di un'arma da fuoco, il funzionamento di un aereo a reazione o quello di un missile. In questi casi la quantità di moto totale, inizialmente nulla, si mantiene tale, in quanto, mentre il proiettile ed i gas caldissimi espulsi dall'aereo o dal missile acquistano quantità di moto in un verso per effetto delle forze interne al sistema, rispettivamente l'arma, l'aereo o il missile acquistano una quantità di moto uguale in modulo e con verso opposto.

Il principio di conservazione del momento angolare di un sistema di corpi in moto, oppure di un corpo rigido con un asse fisso, può essere considerato l'equivalente rotazionale del principio di conservazione della quantità di moto, con la differenza che alle forze bisogna sostituire i loro momenti, intesi come prodotti delle forze che agiscono sui singoli corpi per le rispettive distanze dal punto o dall'asse di rotazione. Il momento angolare si conserva se è nullo il momento totale delle forze esterne.

Se, per esempio, consideri un pianeta in orbita intorno al Sole, poichè le forze interne di attrazione gravitazionale, uguali e contrarie, che agiscono tra il Sole ed il

pianeta, essendo sempre forze centrali, cioè dirette lungo la retta Sole-pianeta, non possono far variare il momento angolare dei due corpi celesti, il momento angolare totale del sistema si conserva, nell'ipotesi di poter ritenere praticamente trascurabile il momento risultante dovuto alle forze esterne esercitate dagli altri corpi celesti. Pensa che l'invariabilità della giacitura del piano dell'orbita di un pianeta è una conseguenza diretta del principio di conservazione del momento angolare, che è un vettore perpendicolare al piano dell'orbita e si mantiene costante in modulo, direzione e verso."

"Mi puoi citare qualche altro esempio importante?"

"Il graduale allontanamento della Luna dalla Terra (circa un centimetro l'anno).

Per effetto dell'attrito causato dalle maree, diminuiscono sia la velocità di rotazione della Terra che il suo momento angolare intrinseco, la cui variazione viene compensata dall'aumento del momento angolare orbitale della Luna, che per questo si allontana dalla Terra. Questo aumento fa aumentare l'area dell'orbita lunare, in modo tale che il momento angolare del sistema Terra-Luna si conservi. Con il principio di conservazione del momento angolare si spiegano inoltre il funzionamento delle bussole giroscopiche di aerei, navi, sottomarini ed astronavi, in modo indipendente dal campo magnetico, e quello di tutti i veicoli a due ruote, ed infine le acrobazie dei tuffatori e le piroette delle ballerine. Una ballerina, facendo perno su un piede e contraendo o distendendo gli arti superiori ed inferiori, è in grado di ruotare su se stessa con velocità angolare rispettivamente crescente o decrescente.

Tieni presente inoltre che sia il principio di conservazione della quantità di moto che quello di conservazione del momento angolare sono principi universali validi sia nel macrocosmo che a livello microcosmico.

Ricordi quando si parlava di bosoni e fermioni? I loro spin non sono altro che momenti angolari intrinseci che obbediscono al principio universale di conservazione del momento angolare. L'ultimo principio del quale voglio parlarti è quello di conservazione della carica elettrica. La carica elettrica totale di un sistema si conserva, in quanto le cariche elettriche macroscopiche, che sono sempre multiple della carica elettrica elementare, quella dell'elettrone, pari a circa 16 centesimi di miliardesimo di miliardesimo di coulomb, si generano e si annullano coinvolgendo sempre numeri interi di coppie di cariche elementari con polarità contrarie. Infatti, un atomo o una molecola elettricamente neutri, quando perdono uno o più elettroni, diventando ioni, cioè microsistemi suscettibili di essere accelerati o frenati da un campo elettrico, acquisiscono rispettivamente una o più cariche elettriche elementari positive; di conseguenza la carica elettrica totale, inizialmente nulla, si mantiene tale anche dopo la ionizzazione. Analogamente, uno ione o una molecola neutri possono catturare uno o più elettroni, diventando ioni negativi; anche in questo la carica elettrica totale del sistema, inizialmente pari ad una o più cariche elementari negative, si mantiene costante."

"Ma qual è, Gianni, il vero, riposto significato fisico di tutti questi principi di conservazione? Qual è la ragione profonda per cui il mondo fisico debba sempre funzionare senza violarli?"

"Giulia, il significato fisico dei principi di conservazione si può comprendere tenendo

conto dell'omogeneità dello spazio-tempo, che impedisce l'esistenza di zone particolari nelle quali le leggi della fisica possano essere diverse. In altri termini le leggi fisiche non devono cambiare comunque ci si sposti nello spazio-tempo, il che, alla luce della teoria della relatività, che lega intimamente spazio e tempo, richiede di effettuare un'operazione di simmetria per traslazione nello spazio-tempo, incrementando o decrementando di valori arbitrari, non soltanto le coordinate spaziali  $x,y,z$ , ma anche la quarta coordinata, che corrisponde al tempo.

E come dimostrò Emmy Noether nel secolo scorso, si può verificare che applicando una trasformazione di questo tipo alle equazioni della fisica, si conservano sia la quantità di moto sia l'energia. Applicando invece una trasformazione consistente in una generica rotazione spaziale, si può verificare la conservazione del momento angolare.

Per quanto riguarda invece la carica elettrica, si può verificare che essa si conserva, se si applica alle equazioni della teoria elettromagnetica di Maxwell una particolare trasformazione, detta simmetria locale di *gauge* (*gauge* è la scala graduata di uno strumento di misura). Questa simmetria, detta anche simmetria di scala, evidenzia che l'esigenza di garantire che le suddette equazioni mantengano la stessa forma senza considerare la scala delle lunghezze, cioè indipendentemente dall'entità degli spostamenti nello spazio-tempo, conduce direttamente alla conservazione della carica elettrica."

"Mi vuoi spiegare con un esempio in che cosa consista una simmetria locale di *gauge*?"

"Sì, Giulia, ti accontento subito. L'importanza delle simmetrie locali di *gauge* va oltre: esse infatti sono state applicate con successo anche alla teoria elettrodebole ed alla cromodinamica quantistica (QCD), evidenziando l'esigenza di introdurre, nell'ambito della prima, accanto al fotone, bosone vettoriale privo di massa, i bosoni vettoriali pesanti  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , necessari per spiegare la rottura della simmetria alle basse energie, e nell'ambito della seconda il gluone, il bosone vettoriale della forza forte, privo di massa e che, a differenza del fotone, che è privo di carica elettrica, è dotato di due cariche subnucleari forti, cioè di cariche di colore. In altri termini, si è capito che, dovendo le leggi fisiche mantenere sempre la stessa forma in seguito ad una trasformazione di simmetria locale di *gauge*, deve manifestarsi un campo, rispettivamente elettrodebole o gluonico che, attraverso lo scambio di un bosone vettoriale (fotone, bosoni  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  e gluoni), conservi la simmetria locale. Considera, per esempio, un protone, che è composto da tre quark, due up ed uno down, aventi cariche di colore, cioè le cariche che generano la forza subnucleare forte, tali da renderlo, convenzionalmente, incolore. Se tieni presente che i tre quark hanno colori convenzionali diversi, rosso, verde e blu, che sommati danno il bianco per assicurare l'assenza di colore del protone, ti rendi conto che l'applicazione al protone di una trasformazione di simmetria locale consistente nel cambiare, per esempio un quark verde in un quark rosso, richiede necessariamente, affinché il protone rimanga incolore e la simmetria locale si conservi, che contemporaneamente il quark rosso diventi un quark verde. Come si può ottenere questo? Attraverso lo scambio di un gluone virtuale rosso-antiverde, emesso dal quark rosso ed assorbito da quello verde. Pertanto lo scambio alla velocità della luce di un gluone virtuale bicolore, che è un bosone

vettoriale analogo al fotone, con spin unitario e privo di massa, genera la forza subnucleare forte attrattiva tra due quark di colori diversi, che nasce appunto dall'esigenza di conservare la simmetria locale."

### XIII

## **L'ENTROPIA DELL'UNIVERSO AUMENTA SEMPRE, RIVELANDOCI IL VERSO DELLA FRECCIA DEL TEMPO**

"Gianni, l'altra volta mi hai detto che le particelle elementari, ad eccezione dei kaoni neutri, non distinguono tra passato e presente. Immagini come cambierebbe il mondo se si potesse andare indietro nel tempo?"

"Sì, è fantastico immaginarlo, si potrebbe tornare indietro per ripetere tante volte, e con modalità sempre diverse, le esperienze della propria vita, rimediando a scelte sbagliate, ad esperienze non vissute, ed a rivivere i momenti di felicità ! Ma la realtà del mondo fisico ci impedisce di farlo."

"Mi vuoi spiegare perché le particelle lo possano fare quasi sempre, a differenza degli esseri viventi e degli oggetti della realtà fisica?"

"Vedi, Giulia, dovrei darti una spiegazione più a livello filosofico che a livello fisico, ma mi limiterò a dirti che la freccia del tempo è collegata all'entropia dell'universo."

"Che cos'è l'entropia?"

"Entropia, parola di origine greca, significa letteralmente cambiamento, ed è una grandezza fisica la cui misura indica il disordine di un sistema fisico."

"Mi fai un esempio?"

"La motonave che ci sta riportando a casa può navigare sfruttando l'energia meccanica prodotta dai suoi motori diesel a spese dell'energia chimica contenuta nella nafta che li alimenta. Ma non tutto il calore prodotto dalla combustione del carburante nei cilindri, viene trasformato in energia meccanica.

Una legge di natura, nota come secondo principio della termodinamica ed inviolabile come i principi di conservazione di cui abbiamo discusso, impedisce che una percentuale significativa del calore prodotto venga trasformata in energia meccanica. Generalmente, il rendimento dei motori termici più efficienti non supera il 40 %, il che significa che soltanto il 40% del calore prodotto nei cilindri viene convertito in energia meccanica, mentre il rimanente 60% viene disperso nell'ambiente sia attraverso la ciminiera sia attraverso i condensatori, raffreddati ad acqua.

Nonostante negli oltre centocinquanta anni di scienza termodinamica, si sia tentato in tutti i modi di aggirare questo principio con perfezionamenti tecnici di varia natura, si è potuto tutt'al più aumentare di poco il rendimento. E' lo stesso principio che sta alla base del funzionamento del frigorifero e che implica che per far passare il calore da un corpo freddo ad un corpo caldo, sia sempre necessario impiegare lavoro meccanico. Potremmo dire che è il principio che stabilisce il verso spontaneo della freccia del calore, dai punti ad una data temperatura verso quelli a temperatura minore. Questo principio, noto anche come principio di degradazione dell'energia, non è in conflitto con quello di conservazione dell'energia, ma contribuisce a rendere la vita sempre più difficile e l'ambiente sempre più caldo ed inquinato termicamente dal calore rilasciato dalle centrali elettriche, che può fare aumentare di qualche grado la temperatura di un lago o di un corso d'acqua utilizzati per fornire l'acqua di raffreddamento. E' il principio

che stabilisce che nell'universo il disordine aumenta sempre, proprio come l'entropia, la cui misura esprime l'entità del disordine."

"Sì, Gianni, ma come colleghi questo principio alla freccia del tempo?"

"Considera che l'universo, che è fatto di spazio-tempo e di massa-energia, si espande continuamente per la legge di Hubble, e che la radiazione fossile da 3 °K si raffredda continuamente sin dall'istante del big bang. Se tieni presente inoltre che l'espansione continua, implicando l'allontanamento delle galassie secondo la legge di Hubble, fa evolvere l'universo verso stati caratterizzati da densità di materia e luminosità sempre minori, e che l'universo si espande perchè è lo spazio-tempo che si espande, trovi la connessione tra freccia termica e freccia del tempo."

"Ma in pratica, che cosa ci impedisce di invertire la nostra freccia del tempo?"

"Vedi, mentre le particelle elementari sono oggetti quantistici del microcosmo e per esse è un fatto spontaneo, ad eccezione dei kaoni neutri, sperimentare che le leggi fisiche non cambiano invertendo la freccia del tempo, noi invece, come tutti gli altri esseri ed oggetti macroscopici, contenendo numeri enormi di particelle, sperimentiamo l'effetto medio dell'inversione temporale effettuata su tutte le particelle, cioè l'interferenza distruttiva tra gli effetti quantistici che interessano le singole particelle, e quindi l'impossibilità di far diminuire il disordine (entropia) del nostro sistema di particelle. Ricordi che il teletrasporto, almeno finora, può essere sperimentato soltanto su coppie correlate di atomi e di fotoni e non su oggetti macroscopici? Come vedi, c'è analogia tra le due situazioni."

"Guarda, Gianni, stiamo per entrare nel porto.

Sembra che lo scirocco si sia attenuato, prepariamoci a scendere."

La nave attraccò senza problemi. Erano già le 20 e Gianni e Giulia erano così stanchi, che decisero di prendere un taxi per raggiungere le rispettive abitazioni.

"Gianni, sono arrivata. Allora, a Dio piacendo, ci rivedremo nei primi giorni di settembre. Trascorrerò l'estate con i miei cugini in Toscana ed attenderò i tuoi messaggi."

"Ti chiamerò, Giulia".

"Bacio ! Ciao ancora !"

"Giulia, sei sempre nel mio cuore e nella mia mente, arrivederci a settembre !"

# **APPENDICE**

## **GLI APPUNTI DI GIANNI**

# FORMULARIO

## LE FORMULE PIU'IMPORTANTI DELLA FISICA

### Le forze universali di Newton e Coulomb

1) Legge di gravitazione universale di Newton:

$$F = - (G M_1 M_2 / R^2).$$

Forza attrattiva tra due masse poste alla distanza R.

$G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$  è la costante di attrazione universale ed il segno – indica, per convenzione, che la forza è attrattiva. Il raggio d'azione della forza è infinito.

2) Legge di Coulomb:  $F = +/- (KQ_1Q_2 / R^2)$ .

Forza elettrostatica tra due cariche elettriche poste alla distanza R.

La forza è attrattiva (segno -) se le polarità delle cariche sono discordi, repulsiva (segno +) se sono concordi.

La costante di proporzionalità K dipende dal sistema di unità di misura.

Nel sistema M.K.S.A.  $K = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \times 10^9 \text{ m/F}$ ;

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  è la costante dielettrica del vuoto. Il raggio d'azione della forza è infinito.

### La seconda legge della dinamica (seconda legge di Galilei-Newton)

Consente di risolvere il problema fondamentale della dinamica: conoscendo la forza risultante **F** che agisce su un corpo avente massa m, che si può sempre immaginare concentrata nel suo centro di massa ( modello del punto materiale), e le condizioni iniziali (posizione e velocità), determinare il moto del punto.

1)  $dp/dt = F$  (equazione vettoriale).

Equazioni scalari:

$$2) dp_x/dt = F_x, dp_y/dt = F_y, dp_z/dt = F_z,$$

dove  $\mathbf{p} = m\mathbf{v} = d\mathbf{v}/dt$  è la quantità di moto, "momentum" in inglese, le cui componenti sono:

$$3) p_x = m dx/dt, p_y = m dy/dt, p_z = m dz/dt.$$

La velocità è il vettore  $\mathbf{v} (v_x, v_y, v_z)$ , le cui componenti sono le derivate delle coordinate  $x, y, z$  rispetto al tempo:

$$4) x = dx/dt, y = dy/dt, z = dz/dt,$$

Caso particolare: massa costante durante il moto:

$$5) m\mathbf{a} = \mathbf{F},$$

$$6) m d\mathbf{v}/dt = \mathbf{F}$$

$$7) m d^2\mathbf{s}/dt^2 = \mathbf{F}$$

Equazione differenziale del moto (vettoriale).

$$8) m d^2x/dt^2 = F_x, m d^2y/dt^2 = F_y, m d^2z/dt^2 = F_z, \text{ equazioni differenziali del moto (scalari).}$$

L'equazione  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  esprime la proporzionalità diretta tra la forza  $\mathbf{F}$  e l'accelerazione  $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt = d^2\mathbf{s}/dt^2$ , dove  $\mathbf{s} (x, y, z)$  è il vettore che fornisce la posizione del punto materiale di massa  $m$ , avente le coordinate  $x, y, z$  in un dato sistema inerziale (non accelerato).

9) Come caso particolare della seconda legge della dinamica si ottiene la **prima legge della dinamica (principio d'inerzia di Galilei-Newton)**.

Se  $\mathbf{F} = 0$ ,  $\mathbf{a} = 0$ , cioè un corpo non soggetto a forze, se è in quiete rimane in quiete, altrimenti si muove in linea retta e con velocità costante (moto rettilineo uniforme).

$$10) \text{ Caso particolare: } \mathbf{F} = m\mathbf{a} = (mv^2/R) \text{ vers } R.$$

Forza centripeta agente su un corpo di massa  $m$  in moto con la velocità  $v$  costante in modulo lungo una circonferenza di raggio  $R$  (moto circolare uniforme).

La forza è sempre diretta verso il centro della circonferenza (vers  $R$ ) ed è direttamente proporzionale all'accelerazione centripeta  $\mathbf{a} = v^2/R$ .

11) Come conseguenza della seconda legge della dinamica si ottiene il **teorema lavoro-energia (teorema delle forze vive)**.

$$\text{Se } L = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} = F s \cos(\mathbf{F} \wedge \mathbf{s}) \text{ ( in J, joule)}$$

è il lavoro compiuto dalla forza  $\mathbf{F}$  in relazione al vettore spostamento  $\mathbf{s}$  formante con essa l'angolo  $\mathbf{F} \wedge \mathbf{s}$  e  $K = (1/2) m v^2$  è l'energia cinetica (forza viva, *vis viva*) posseduta da

un corpo di massa  $m$  in moto con la velocità  $v$ , vale la relazione

$$L = K_{\text{fin}} - K_{\text{in}} = \left(\frac{1}{2}\right) m v_{\text{fin}}^2 - \left(\frac{1}{2}\right) m v_{\text{in}}^2,$$

dove  $v_{\text{in}}$  e  $v_{\text{fin}}$  sono rispettivamente le velocità iniziale e finale del corpo.

12) In particolare, se su un corpo agiscono soltanto forze conservative, cioè forze costanti o dipendenti dalle coordinate in modo tale che il lavoro da esse compiuto dipenda soltanto dagli estremi della traiettoria e non dalla sua forma (forze newtoniane e coulombiane), il lavoro  $L$  si può esprimere come differenza tra i valori che assume una funzione  $U(x, y, z)$  (energia potenziale) negli estremi della traiettoria  $P1(x_1, y_1, z_1)$  e  $P2(x_2, y_2, z_2)$ :

$$L_{12} = U(x_1, y_1, z_1) - U(x_2, y_2, z_2) = -\Delta U(x, y, z) =$$

$$=\Delta K = K_2 - K_1 = \left(\frac{1}{2}\right) m v_2^2 - \left(\frac{1}{2}\right) m v_1^2.$$

Si conserva pertanto durante il moto l'energia meccanica totale  $E$ , data dalla somma delle energie cinetica e potenziale (**principio di conservazione dell'energia meccanica totale**)

$$E = \text{costante} = U(x_1, y_1, z_1) + \left(\frac{1}{2}\right) m v_1^2 = U(x_2, y_2, z_2) + \left(\frac{1}{2}\right) m v_2^2.$$

Nel caso di corpo di massa  $m$ , dotato di una carica elettrica  $q$ , che si muova, con velocità iniziale  $v_1$ , dal punto  $P1(x_1, y_1, z_1)$  al punto  $P2(x_2, y_2, z_2)$ , sottoposto alla differenza di potenziale elettrostatico  $V(x_1, y_1, z_1) - V(x_2, y_2, z_2)$ , il principio di conservazione dell'energia fornisce la seguente relazione:  $qV(x_1, y_1, z_1) + \left(\frac{1}{2}\right) m v_1^2 = qV(x_2, y_2, z_2) + \left(\frac{1}{2}\right) m v_2^2$ , dalla quale si può calcolare la velocità finale  $v_2$ .

13) La seconda legge della dinamica, qualora venga applicata ad un fluido ideale, cioè non viscoso, fornisce l'equazione di Eulero che descrive il moto dei fluidi ideali:  $\rho \mathbf{a} = \rho \mathbf{F} - \text{grad } p$ , dove  $\rho$  è la densità,  $\mathbf{F}$  è la forza per unità di massa e  $p$  è la pressione. Se, in particolare  $\mathbf{F}$  coincide con il rapporto peso/massa  $= \mathbf{P}/m = \mathbf{g}$ , cioè con l'accelerazione di gravità, si ottiene l'equazione fondamentale dell'idrodinamica:

$$\rho \mathbf{a} = \rho \mathbf{g} - \text{grad } p.$$

Se  $\mathbf{a} = 0$ , si ottiene l'equazione fondamentale dell'idrostatica:  $\rho \mathbf{g} = \text{grad } p$ , dalla quale si ottiene la legge di Stevino  $p = \rho g h + p_0$ , che descrive la dipendenza lineare della pressione idrostatica  $p$  di un liquido dalla profondità  $h$  e dalla pressione  $p_0$  agente sulla sua superficie libera.

14) Si può dimostrare che l'applicazione dell'equazione di Eulero  $\rho \mathbf{a} = \rho \mathbf{g} - \text{grad } p$  a due punti qualsiasi di un liquido ideale incompressibile ( $\rho$  costante), conduce al teorema di Bernoulli, che esprime il principio di conservazione dell'energia meccanica totale, per unità di volume del liquido:

$$p_1 + \rho g h_1 + \left(\frac{1}{2}\right) \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \left(\frac{1}{2}\right) \rho v_2^2.$$

**La terza legge della dinamica  
(principio di azione e reazione di Newton)**

Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria:

$$1) \mathbf{F}_{12} = - \mathbf{F}_{21} .$$

La forza  $\mathbf{F}_{12}$  (gravitazionale, elettrica, di natura qualsiasi) che il corpo 1 esercita sul corpo 2 è uguale e contraria alla forza  $\mathbf{F}_{21}$  che il corpo 2 esercita sul corpo 1.

2) Applicando la terza legge della dinamica ad un sistema formato da 2 o più particelle, sulle quali agiscono soltanto le forze interne  $\mathbf{F}_{ij}$ , che si annullano a coppie essendo uguali e contrarie, si dimostra che si mantiene costante la somma vettoriale delle quantità di moto dei singoli corpi (**principio di conservazione della quantità di moto**):

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots + \mathbf{p}_N ; \quad d\mathbf{P}/dt = \sum_{ij} \mathbf{F}_{ij} = \mathbf{0} ;$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots + \mathbf{p}_N = \text{costante} .$$

**Estensione della seconda legge della dinamica al moto di un sistema materiale rigido vincolato ad un asse di rotazione fisso e soggetto al momento di una o più forze esterne**

$J = \sum_i m_i r_i^2$  (per un sistema rigido discreto) o  $J = \int r^2 dm$  (per un sistema rigido continuo):

momento d'inerzia (inerzia rotazionale), corrispondente alla massa  $m$  (inerzia nel moto lineare);

$\phi$  : spostamento angolare, corrispondente allo spostamento lineare  $s$  ;

$\omega = d\phi/dt$  : velocità angolare, corrispondente alla velocità lineare  $v = ds/dt$ ;

$\mathbf{M} = \sum \mathbf{R}_k \times \mathbf{F}_k$  : momento risultante rispetto all'asse delle forze esterne  $\mathbf{F}_k$  applicate al sistema rigido nei punti  $P_k$  individuati dai vettori  $\mathbf{R}_k$  ; corrisponde alla forza risultante  $\mathbf{F}$  nel moto lineare;

$\mathbf{L} = J \omega$  : momento angolare (momento della quantità di moto, "angular momentum" in inglese) del sistema rigido rispetto all'asse ; corrisponde alla quantità di moto  $\mathbf{P}$  nel moto lineare;

$$1) J d\omega /dt = \mathbf{M};$$

$$2) J d^2 \phi /dt^2 = \mathbf{M}$$

Equazione differenziale del moto rotatorio con asse fisso (seconda legge della dinamica rotazionale nel caso particolare di un sistema rigido con asse fisso).

3) Come caso particolare della seconda legge della dinamica rotazionale, si ottiene una legge analoga al principio d'inerzia per il moto lineare. Se infatti si annulla il momento

risultante delle forze esterne applicate al sistema rigido con un asse fisso, si annulla l'accelerazione angolare ed il momento angolare  $\mathbf{L} = J \omega$  si mantiene costante (**principio di conservazione del momento angolare**).

Pertanto la velocità angolare  $\omega$ , in assenza di forze d'attrito, si mantiene costante.

4) In particolare il momento angolare si conserva se il sistema è costituito da due corpi soggetti soltanto a forze interne (forze centrali) di natura gravitazionale (moto orbitale di un pianeta o di un satellite) o elettrostatica (moto orbitale degli elettroni attorno al nucleo atomico). Poiché infatti, in entrambi i casi, i corpi, per effetto delle reciproche forze interne attrattive, ruotano attorno al loro centro di massa, e si può considerare trascurabile, in prima approssimazione, il momento risultante delle forze esterne, si mantiene costante il momento angolare totale  $\mathbf{L}_T = \mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_2$ .

### **Primo principio della termodinamica**

$dQ = dU + dL$  ;  $Q = (U_{\text{fin}} - U_{\text{in}}) + L$  , dove  $Q$  è l'energia termica fornita ad un sistema termodinamico,

per es. ad un gas ideale libero di espandersi in un cilindro,  $(U_{\text{fin}} - U_{\text{in}})$  è la variazione di energia interna del gas, cioè la variazione dell'energia cinetica molecolare ed  $L = \int p \, dV$  è il lavoro compiuto dal gas espandendosi.

### **Secondo principio della termodinamica**

$dS \geq dQ/T$  , dove  $S$  è una grandezza di stato, dipendente cioè soltanto dalle variabili termodinamiche, ed il segno di uguaglianza vale solo nei processi reversibili. E poiché tutti i processi naturali, come per esempio il trasferimento di calore tra due corpi a temperature diverse, sono irreversibili, l'entropia dell'universo aumenta sempre. Se, in particolare, si considera una trasformazione irreversibile che avvenga in condizioni di isolamento termico, non verificandosi alcun trasferimento di calore,  $dQ = 0$  e  $dS > 0$  , cioè l'entropia finale è sempre maggiore di quella iniziale.

### **Alcune formule della teoria cinetica dei gas**

Statistica di **Maxwell-Boltzmann** per la distribuzione delle velocità molecolari di un gas alla temperatura assoluta  $T$  ( $K^\circ$ ):

$$1) P(v) = 4\pi \left[ \frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} v^2 \exp[-mv^2/(2kT)],$$

dove  $m$  è la massa molecolare e  $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}^\circ$  è la costante di Boltzmann.

$P(v)$  fornisce la probabilità che una molecola abbia velocità  $v$ , mentre  $dN = N P(v) dv$ , con  $N$  numero totale di molecole, è il numero di molecole aventi velocità comprese tra  $v$  e  $v + dv$ .

Velocità quadratica media delle molecole:

$$2) v_{q.m.} = \sqrt{3kT/m}$$

Teorema di equipartizione dell'energia

3) In un sistema alla temperatura  $T$ , costituito da un numero grandissimo di molecole, l'energia cinetica si distribuisce in parti uguali tra i gradi di libertà delle molecole, in ragione di  $kT/2$  per ogni grado di libertà:

Esempi:

*Gas ideale con molecole monoatomiche*

Esistono 3 gradi di libertà traslazionali, pertanto l'energia cinetica media molecolare vale  $E_m = 3kT/2$ ;

*Gas ideale con molecole biatomiche*

Esistono 5 gradi di libertà, 3 traslazionali e 2 rotazionali, pertanto l'energia cinetica media molecolare vale  $E_m = 5kT/2$ ;

*Gas ideale con molecole triatomiche o poliatomiche*

Esistono 6 gradi di libertà, 3 traslazionali e 3 rotazionali, pertanto l'energia cinetica media molecolare vale  $E_m = 6kT/2 = 3kT$ .

## Equazioni di Maxwell

### I

$$1) \oint_L \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS + d/dt (\int_S \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS) ;$$

$$2) \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \text{ (in forma differenziale);}$$

In particolare, nei mezzi omogenei ed isotropi, essendo costanti la conducibilità elettrica  $\sigma = 1/\rho$  e la costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$ , si ha:

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$  (il vettore induzione elettrica  $\mathbf{D}$  è direttamente proporzionale al campo elettrico  $\mathbf{E}$ );

$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}$  oppure  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  ( **Legge di Ohm** ).

Pertanto si ottengono le seguenti equazioni differenziali:

$$3) \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \partial \mathbf{E} / \partial t ;$$

$$4) \partial H_z / \partial y - \partial H_y / \partial z = J_x + \varepsilon_0 \varepsilon_r \partial E_x / \partial t ;$$

$$5) \partial H_x / \partial z - \partial H_z / \partial x = J_y + \varepsilon_0 \varepsilon_r \partial E_y / \partial t ;$$

$$6) \partial H_y / \partial x - \partial H_x / \partial y = J_z + \varepsilon_0 \varepsilon_r \partial E_z / \partial t .$$

Queste equazioni esprimono la **legge di Ampere-Maxwell** per la circuitazione del campo magnetico  $\mathbf{H}$  (forza magnetomotrice - f.m.m.) lungo una linea chiusa  $L$  che sia il contorno di una superficie  $S$  attraversata dal flusso della densità di corrente di conduzione  $\mathbf{J}$  e dal flusso di un campo elettrico variabile nel tempo (flusso della densità di *corrente di spostamento*, data dalla derivata dell'induzione elettrica  $\mathbf{D}$ ).

Il contributo  $d/dt (\int_S \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS)$  fu aggiunto da Maxwell, che lo denominò "corrente di spostamento" per estendere la validità della legge di Ampere a fenomeni elettromagnetici determinati da una corrente elettrica "aperta", come si verifica nei fenomeni di carica e di scarica di un condensatore, nei quali, per calcolare la circuitazione magnetica, oltre al contributo della corrente di conduzione che interessa le armature ed i conduttori che formano il circuito, bisogna considerare anche quello dovuto al campo elettrico variabile esistente nel dielettrico. In altri termini Maxwell giunge alla geniale conclusione, esclusivamente attraverso deduzioni teoriche, che un campo magnetico può essere generato oltrechè da una normale corrente di conduzione (in un metallo, in un elettrolito o in un gas ionizzato), anche da un campo elettrico variabile nel tempo, il che rende possibile la propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto.

## II

$$7) \oint_L \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS = - d/dt (\int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS) ;$$

$$8) \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \text{ (in forma differenziale) .}$$

In particolare, nei mezzi omogenei ed isotropi,

essendo costante la permeabilità magnetica relativa  $\mu_r$ ,

$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$  ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ), il vettore induzione magnetica  $\mathbf{B}$  è direttamente proporzionale al campo magnetico  $\mathbf{H}$ .

Pertanto si ottengono le seguenti equazioni differenziali:

$$9) \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \mu_0 \mu_r \partial \mathbf{H} / \partial t ;$$

Equazioni scalari:

$$10) \partial E_z / \partial y - \partial E_y / \partial z = - \mu_0 \mu_r \partial H_x / \partial t ;$$

$$11) \partial E_x / \partial z - \partial E_z / \partial x = -\mu_o \mu_r \partial H_y / \partial t ;$$

$$12) \partial E_y / \partial x - \partial E_x / \partial y = -\mu_o \mu_r \partial H_z / \partial t .$$

Queste equazioni esprimono la **legge di induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann-Lenz** per la circuitazione del campo elettrico (f.e.m.) lungo una linea chiusa L che sia il contorno di una superficie S attraversata dalle linee di forza di un campo d'induzione magnetica  $\mathbf{B} = \mu_o \mu_r \mathbf{H}$ . Se il flusso di  $\mathbf{B}$  attraverso S è variabile nel tempo, si genera lungo la linea L una f.e.m. indotta.

Un campo magnetico variabile nel tempo genera un campo elettrico non conservativo (o rotazionale).

### III

$$14) \oint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dS = 0 ;$$

$$15) \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \text{ (in forma differenziale) ;}$$

$$16) \mu_o \mu_r \operatorname{div} \mathbf{H} = 0;$$

$$17) \operatorname{div} \mathbf{H} = 0;$$

$$18) \partial H_x / \partial x + \partial H_y / \partial y + \partial H_z / \partial z = 0.$$

Queste equazioni esprimono il teorema di Gauss per il flusso del vettore induzione magnetica  $\mathbf{B}$  uscente da una qualsiasi superficie chiusa contenente un magnete o un circuito elettrico.

Le linee di forza del campo magnetico sono sempre chiuse, in quanto non esistono poli magnetici isolati (monopoli magnetici).

### IV

$$19) \oint_S \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \, dS = \rho ;$$

$$20) \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \text{ (in forma differenziale);}$$

$$21) \operatorname{div} \mathbf{E} = \rho / (\epsilon_o \epsilon_r) ;$$

$$22) \partial E_x / \partial x + \partial E_y / \partial y + \partial E_z / \partial z = \rho / (\epsilon_o \epsilon_r) .$$

Queste equazioni esprimono il Teorema di Gauss per il flusso del campo elettrico  $\mathbf{E}$  uscente da una qualsiasi superficie chiusa  $\mathbf{S}$  contenente cariche elettriche distribuite con densità ???

### **Forza di Lorentz agente su una carica elettrica $q$ in moto con velocità $\mathbf{v}$ in un campo elettromagnetico ( $\mathbf{E}$ , $\mathbf{B}$ )**

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}).$$

Mentre la forza esercitata dal campo elettrico  $\mathbf{E}$  è parallela ad esso e ha verso concorde o discorde a seconda che la carica  $q$  sia positiva o negativa, la forza esercitata dal campo magnetico, essendo data dal prodotto vettoriale tra  $q \mathbf{v}$  e  $\mathbf{B}$ , è sempre perpendicolare al piano individuato da  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{B}$  ed il suo verso si ottiene applicando la regola della vite destrorsa: se la vite gira nel verso da  $\mathbf{v}$  a  $\mathbf{B}$  attraverso l'angolo più piccolo, il verso della forza coincide con quello di avanzamento della vite o con quello opposto a seconda che la carica  $q$  sia positiva o negativa.

### **Equazione di continuità**

$$1) \frac{dQ}{dt} = - \left( \oint_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS \right);$$

$$2) \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_V \rho dV \right) = - \int_V \operatorname{div} \mathbf{J} dV;$$

$$3) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{J} = 0.$$

Queste equazioni esprimono il **principio di conservazione della carica elettrica**.

### **Equazioni delle onde elettromagnetiche**

Applicando alle equazioni di Maxwell opportuni operatori differenziali, si ottengono le equazioni delle onde elettromagnetiche.

Se si considera la propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto, essendo

$$\rho = 0, \mathbf{J} = 0,$$

$\epsilon_r = 1, \mu_r = 1, \mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$  e  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ , la prima e la seconda equazione assumono le seguenti espressioni

$$1) \operatorname{rot} \mathbf{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t};$$

$$2) \operatorname{rot} \mathbf{E} = - \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}.$$

Tenendo presente inoltre che nel vuoto  
 $\text{div } \mathbf{H} = 0$  ,  $\text{div } \mathbf{E} = 0$ , si ottiene:

$$3) \partial/\partial t (\text{rot } \mathbf{H}) = \epsilon_0 \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 ;$$

$$4) \text{rot} (\text{rot } \mathbf{E}) = - \mu_0 \text{rot} (\partial \mathbf{H} / \partial t);$$

$$5) \text{rot} (\text{rot } \mathbf{E}) = \text{grad div } \mathbf{E} - \Delta \mathbf{E} ,$$

dove  $\Delta \mathbf{E} = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$  è l'operatore di Laplace;

$$6) \text{rot} (\partial \mathbf{H} / \partial t) = \partial / \partial t (\text{rot } \mathbf{H}) ;$$

$$7) \text{grad div } \mathbf{E} - \Delta \mathbf{E} = - \mu_0 \partial / \partial t (\text{rot } \mathbf{H}) =$$

$$= - \epsilon_0 \mu_0 \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 ;$$

$$8) \Delta \mathbf{E} = \epsilon_0 \mu_0 \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 = (1/c^2) \partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2 ,$$

(equazione differenziale dell'onda elettrica)

dove  $c = 1 / \sqrt{(\epsilon_0 \mu_0)} = 3 \times 10^8$  m/s è la velocità della luce nel vuoto.

Operando in modo analogo, si ottiene l'equazione differenziale dell'onda magnetica:

$$9) \Delta \mathbf{H} = \epsilon_0 \mu_0 \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 = (1/c^2) \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 .$$

Le equazioni 8) e 9) descrivono la propagazione di un'onda elettromagnetica nel vuoto con velocità  $c$ .

Un'onda elettromagnetica è costituita dai campi elettrico e magnetico oscillanti, perpendicolari tra loro ed alla direzione di propagazione dell'onda, che trasportano energia ed impulso di natura elettromagnetica, il che significa che la radiazione elettromagnetica esercita una pressione.

### Formula di Larmor

Esprime la potenza elettromagnetica irradiata da una carica elettrica  $q$  in moto con accelerazione  $\mathbf{a}$

$$W = \mu_0 q^2 a^2 / (6 \pi c) .$$

## FORMULE DI RELATIVITA' RISTRETTA

### Trasformazione speciale di Lorentz

Nel 1904 Lorentz scoprì che le equazioni di Maxwell risultano covarianti, cioè mantengono la stessa forma nel passaggio tra due sistemi inerziali (non accelerati).

Se  $S = (O, x, y, z, t)$  e  $S' = (O', x', y', z', t')$  sono due sistemi inerziali disposti inizialmente con gli assi corrispondenti paralleli e con velocità relativa  $v$  di traslazione costante e diretta parallelamente agli assi  $x$  e  $x'$ , il passaggio da  $S$  a  $S'$  si ottiene con le formule ( $c$  è la velocità della luce nel vuoto):

1)

$$x' = (x - vt) / \sqrt{(1 - v^2/c^2)};$$

$$y' = y;$$

$$z' = z;$$

$$t' = (t - xv/c^2) / \sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

Le formule inverse sono le seguenti:

2)

$$x = (x' + vt') / \sqrt{(1 - v^2/c^2)};$$

$$y = y';$$

$$z = z';$$

$$t = (t' + x'v/c^2) / \sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

La trasformazione di Lorentz, se si fa tendere  $c$  all'infinito, fornisce le formule della trasformazione di Galileo :

3)  $x' = x - vt$  ;  $y' = y$  ;  $z' = z$  ;  $t' = t$  (tempo assoluto);

4)  $x = x' + vt'$  ;  $y = y'$  ;  $z = z'$  ;  $t = t'$ ;

### Formule relativistiche di composizione delle velocità in una trasformazione di Lorentz

1)  $V'_x = (V_x - v) / (1 - vV_x/c^2)$  ;

2)  $V'_y = V_y (\sqrt{(1 - v^2/c^2)}) / (1 - vV_x/c^2)$  ;

3)  $V'_z = V_z (\sqrt{(1 - v^2/c^2)}) / (1 - vV_x/c^2)$  ;

Formule inverse

4)  $V_x = (V'_x + v) / (1 + vV'_x/c^2)$  ;

5)  $V_y = V'_y (\sqrt{(1 + v^2/c^2)}) / (1 + vV'_x/c^2)$  ;

$$6) V_z = V'_z (\sqrt{(1 + v^2/c^2)}) / (1 + v V'_x/c^2).$$

In ogni caso si ottiene sempre la velocità limite  $c$ , anche

se  $V'_x = V'_y = V'_z = c$  :

$$7) V_x = (c + c)/(1 + c c/c^2) = 2c/2 = c;$$

$$8) V_y = V_z = c (\sqrt{(1 + c^2/c^2)}) / (1 + c c/c^2) = c 2/2 = c.$$

### Dilatazione temporale

Se nel sistema inerziale  $S'$  ( $x',y',z',t'$ ) ha luogo un fenomeno fisico la cui durata, misurata da un osservatore in  $S'$  sia  $\Delta t_1'$  (durata propria o locale), lo stesso fenomeno, osservato dal sistema inerziale  $S$  ( $x,y,z,t$ ), in moto relativo rispetto ad  $S'$  con velocità costante  $v$ , parallela agli assi  $x$  e  $x'$  risulta di durata

$\Delta t_1$  maggiore, secondo la formula:

$$1) \quad \Delta t_1 = \Delta t_1' / \sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

Se  $v$  tende a  $c$ , la dilatazione temporale tende a diventare infinitamente grande.

N.B.: Il fenomeno è simmetrico. Infatti un fenomeno di durata  $\Delta t_2$  (durata propria) in  $S$  osservato da  $S'$  evidenzia una dilatazione temporale:

$$2) \quad \Delta t_2' = \Delta t_2 / \sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

### Contrazione delle lunghezze

Le lunghezze esibiscono invece un comportamento opposto. Se un osservatore in  $S'$  misura la lunghezza

di un oggetto in quiete rispetto a  $S'$ , rilevando il valore  $L_1'$  (lunghezza propria o locale), un osservatore in  $S$  rileva il valore  $L_1$  minore, secondo la formula:

$$1) L_1 = L_1' \sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

Se  $v$  tende a  $c$ , la lunghezza tende a zero.

N.B.: Il fenomeno è simmetrico. Infatti una lunghezza

$L_2$  misurata in  $S$ , quando viene misurata da  $S'$  evidenzia una contrazione:

$$2) \quad L_2' = L_2 \sqrt{(1 - v^2/c^2)}.$$

### Legge di variazione della massa $m$ di un corpo in funzione della velocità

$$m = m_0 / \sqrt{(1 - v^2/c^2)},$$

dove  $m_0$  è la massa del corpo misurata in un sistema di riferimento rispetto al quale sia in quiete (massa a riposo). La massa di moto  $m$  (massa relativistica), dipende dall'energia acquisita dal corpo quando viene accelerato da una forza e

**crece continuamente all'aumentare di  $v$  fino a diventare infinitamente grande per  $v$  tendente a  $c$ .**

**Infatti, essendo la velocità della luce una velocità insuperabile, occorrerebbe un'energia infinita per far acquisire la velocità  $c$  ad un corpo con massa a riposo diversa da zero. Soltanto le particelle con massa a riposo nulla, fotoni e gluoni, possono muoversi alla velocità  $c$ .**

### **Energia cinetica relativistica ed equivalenza tra massa ed energia**

Espressione relativistica del teorema lavoro-energia

$$1) dL = d mc^2 ;$$

Il differenziale del lavoro fatto sul corpo uguaglia il differenziale dell'energia relativistica.

E poiché  $dL$  uguaglia  $dK$ , differenziale dell'energia cinetica, si ottiene:

$$2) d mc^2 = dK.$$

Integrando si ottiene:

$$3) mc^2 = K + C .$$

Dovendo risultare  $mc^2 = m_0 c^2$  per  $K = 0$ , si ha:

$$C = m_0 c^2 .$$

$$4) K = mc^2 - m_0 c^2 = (m - m_0)c^2 = \Delta m c^2 ;$$

$$5) K = m_0 c^2 [ 1 / \sqrt{(1 - v^2/c^2)} - 1 ].$$

Questa è l'espressione dell'energia cinetica relativistica, che tende all'espressione classica  $K = (\frac{1}{2})m_0 v^2$  quando è  $v \ll c$ .

6) Se nell'equazione 4) all'energia cinetica  $K$  si sostituisce una qualsiasi forma di energia  $E$ , si ottiene

**il principio di equivalenza tra massa ed energia :**

$$7) \Delta E = \Delta m c^2$$

Inoltre i principi di conservazione della massa e dell'energia vengono sostituiti dal principio di conservazione della massa-energia, cioè dell'energia relativistica totale:

$$8) E = mc^2 = m_0 c^2 + K + U ;$$

$m_0 c^2$  è l'energia associata alla massa a riposo

ed  $U$  è energia sotto qualsiasi forma (termica, elettromagnetica, elastica, nucleare, chimica).

9) Relazione tra energia relativistica totale  $E = mc^2$ , massa a riposo  $m_0$  e quantità di moto ("momentum" in inglese)  $p = mv = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  :

$$E = \sqrt{(p^2 c^2 + m_0^2 c^4)}.$$

## FORMULE DI RELATIVITA' GENERALE

**Lunghezza dell'elemento d'arco infinitesimo in uno spazio-tempo curvo di cui siano note le dieci componenti del tensore metrico  $g_{ik}$**

$$ds = \sqrt{(\sum_{ik} g_{ik} dx^i dx^k)};$$

### Equazioni di Einstein

$$R_{ik} - \left(\frac{1}{2}\right) g_{ik} R + \Lambda g_{ik} = (8\pi G / c^2) T_{ik};$$

oppure  $G_{ij} + \Lambda g_{ik} = (8\pi G / c^2) T_{ik}$ , dove  $G_{ik} = R_{ik} - \left(\frac{1}{2}\right) g_{ik} R$ , è il tensore di Einstein,  $G$  è la costante di attrazione universale, e  $T_{ik}$  è il tensore massa-energia che descrive la distribuzione di materia e di qualsiasi forma di energia (equivalente alla massa) che curva lo spazio-tempo.

$R_{ik}$  ed  $R = \sum_{ik} g_{ik} R^{ik}$  sono rispettivamente il tensore di Ricci e lo scalare di curvatura, mentre  $\Lambda = 4\pi G\rho/c^2$  è la costante cosmologica, che dipende dalla densità di materia  $\rho$  dell'universo e fu introdotta da Einstein dopo la pubblicazione della sua teoria, con l'intento di aggiungere "artificialmente" una forza repulsiva che contrastasse l'azione della gravità, al fine di impedire il collasso gravitazionale dell'universo.

Le dieci equazioni differenziali di Einstein hanno come incognite le componenti  $g_{ik}$  del tensore metrico, che consentono di determinare le geodetiche (linee di lunghezza minima) della regione di spazio-tempo curvo che si considera.

### Raggio di un buco nero (raggio di Schwarzschild)

1)  $R_S = 2GM/c^2$ , dove  $M$  è la massa del buco nero,  $G$  è la costante di attrazione universale e  $c$  è la velocità della luce nel vuoto.

Questa formula, che normalmente si ricava risolvendo le equazioni per un campo gravitazionale a simmetria sferica, può essere dedotta in modo elementare applicando la teoria newtoniana.

Se si considera la massa  $m$  equivalente all'energia relativistica  $E = hv$  di un fotone, si ha:

2)  $m = E / c^2 = hv / c^2$ , dove  $h$  è la costante universale di Planck e  $v$  è la frequenza della radiazione luminosa.

Si impone quindi la condizione che l'energia cinetica equivalente all'energia del fotone sia uguale alla sua energia potenziale gravitazionale alla superficie del buco nero, e si ottiene  $R_{Sch}$  :

$$3) E = G m M / R_{Sch} ;$$

$$4) (\frac{1}{2}) mc^2 = G m M/R_{Sch};$$

$$5) R_{Sch} = 2G M/c^2 .$$

Si ottiene così la condizione limite per il raggio che deve avere una stella iperdensa di massa  $M$ , affinché neanche la luce possa sfuggire al suo

campo gravitazionale:  $R < 2G M/c^2$ .

Per esempio tutta la massa del Sole ,  $M_s$ , dovrebbe essere concentrata in una sfera con un raggio di circa 3 km:

$$M_s \approx 3,29 M_\odot \approx 3,29 \times 5,983 \times 10^{24} \text{ kg} = 1,97 \times 10^{30} \text{ kg};$$

$$R_s \approx 6,95 \times 10^5 \text{ km};$$

$$R_{Sch} = 2G M_s / c^2 = 2 \times 6,67 \times 10^{-11} \times 1,97 \times 10^{30} / 9 \times 10^{16} \approx 2,91 \text{ km} .$$

In tali condizioni la densità assumerebbe il valore di

$$1,97 \times 10^{30} / [4\pi \times (2,91 \times 10^3)^3 / 3] = \approx 1,97 \times 10^{30} / 1,03 \times 10^{11} \approx 1,91 \times 10^{19} \text{ kg/m}^3 = 1,91 \times 10^{13} \text{ kg/cm}^3 = 19,1 \times 10^9 \text{ t/cm}^3 .$$

### **Spostamento gravitazionale verso il rosso (red shift )**

Il decremento della frequenza  $\nu$  della radiazione luminosa è dato dalla formula:

$$1) (\nu_o - \nu) / \nu = ( c/\lambda_o - c/\lambda) / c/\lambda) =$$

$$= (\lambda - \lambda_o) / \lambda_o = GM / ( c^2 R ) .$$

Questa formula fornisce l'incremento relativo di lunghezza d'onda (arrossamento) di una radiazione luminosa soggetta al campo gravitazionale di un corpo celeste di massa  $M$  e raggio  $R$ , e può essere dedotta elementarmente esprimendo la variazione di frequenza della radiazione in funzione della variazione di energia potenziale gravitazionale, dalla superficie del corpo celeste all'infinito:

$$2) h (\nu_0 - \nu) = (GM/R) (h\nu_0 / c^2);$$

$$8) (\nu_0 - \nu) / \nu_0 = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = GM / (c^2 R).$$

Se, per esempio, si considera il red shift della radiazione solare, si ottiene:

$$\begin{aligned} (\nu_0 - \nu) / \nu_0 &= (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = GM_s / (c^2 R_s) = \\ &= 6,67 \times 10^{-11} \times 1,97 \times 10^{30} / (9 \times 10^{16} \times 6,95 \times 10^8) \approx \approx 1,31 \times 10^{20} / 6,25 \times 10^{25} \approx \\ &2,096 \times 10^{-6}. \end{aligned}$$

### **Deviazione subita dai raggi luminosi per effetto del campo gravitazionale generato da un corpo celeste di massa M**

$$\alpha \text{ (in rad)} = 4GM / (c^2 d),$$

dove d è la distanza tra il raggio luminoso ed il centro del corpo celeste, di forma sferica.

Se, in particolare si considera un raggio luminoso che si propaghi in prossimità della superficie solare,  $d = R_s$ ,  $M = M_s$ , e si ottiene:

$$\begin{aligned} \alpha &= 4GM_s / (c^2 R_s) \approx 8,384 \times 10^{-6} \text{ rad} \ll 4,8 \times 10^{-4} \text{ }^\circ \approx \\ &\approx 1,73''. \end{aligned}$$

## **LE FORMULE CHE SEGNAVARONO IL PASSAGGIO DALLA FISICA CLASSICA ALLA TEORIA DEI QUANTI ED ALLA MECCANICA QUANTISTICA**

### **Quantizzazione dell'energia di un oscillatore armonico (formula di Planck)**

$$\varepsilon = n h \nu, \text{ con } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s (costante universale di Planck).}$$

### **Distribuzione spettrale dell'energia elettromagnetica emessa da un corpo nero alla temperatura assoluta T (formula di Planck):**

$$\rho(\lambda, T) d\lambda = (8\pi / \lambda^5) hc \{1 / [\exp(hc / (k \lambda T)) - 1]\} d\lambda$$

energia elettromagnetica emessa per  $m^3$  nell'intervallo infinitesimo tra le lunghezze d'onda  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$ .

### Legge dello spostamento (di Wien)

$$\lambda_{\max} T = 0,29 \text{ cm} \cdot ^\circ\text{K}$$

Fornisce il valore  $\lambda_{\max}$  per il quale si ottiene la massima emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un corpo nero, alla temperatura  $T$  (corpo ideale capace di assorbire totalmente la radiazione termica che incide su di esso, indipendentemente dai valori della frequenza e della temperatura).

Al crescere della temperatura il massimo dell'emissione si sposta verso le lunghezze d'onda minori.

Si può determinare, per esempio, la lunghezza d'onda in corrispondenza della quale viene rilevata la massima intensità della radiazione termica fossile, che deriva dal big bang ed il cui spettro è quello tipico un corpo nero alla temperatura di 3 gradi assoluti ( $T = 3 \text{ }^\circ\text{K}$ ):

$$\lambda_{\max} = 0,29/3 \approx 9,67 \times 10^{-2} \text{ cm};$$

la frequenza corrispondente è

$$\nu_{\max} = c/\lambda_{\max} = 3 \times 10^{10}/9,67 \times 10^{-2} \approx 3,1 \times 10^{11} \text{ Hz} = 310 \text{ GHz}.$$

### Legge di Stefan-Boltzmann per il potere emissivo integrale di un corpo nero alla temperatura $T$

$$E = \int_0^\infty E(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4,$$

dove  $\sigma = 5,66 \times 10^{-8} \text{ J}/^\circ\text{K}^4 \text{ m}^2 \text{ s}$  è la costante di Stefan-Boltzmann.

Per esempio il Sole, che può essere assimilato ad un corpo nero alla temperatura assoluta di  $5800 \text{ }^\circ\text{K}$ , emette una potenza specifica di  $5,66 \times 10^{-8} \times 5800^4 \approx 3,28 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^2$ , che moltiplicata per la superficie solare ( $A_s = 4\pi R_s^2 = 6,06 \times 10^{18} \text{ m}^2$ ), fornisce una potenza di  $1,97 \times 10^{15} \text{ W} = 1970 \times 10^9 \text{ kW}$  (1970 miliardi di kW).

### Legge dell'effetto fotoelettrico (di Einstein)

$$1) K_{\max} = h\nu - W$$

L'energia cinetica massima dei fotoelettroni emessi da una superficie metallica illuminata con radiazione luminosa di frequenza  $\nu$ , varia linearmente al variare della frequenza.

$W$  è il lavoro di estrazione del metallo, che determina

la frequenza di soglia  $\nu_0$  al di sotto della quale l'effetto non ha luogo :

$$2) h\nu - W > 0 \text{ per } \nu > W/h = \nu_0.$$

Einstein immaginò i fotoni come pacchetti di energia elettromagnetica aventi energia  $E$

=  $h \nu$  e quantità  
di moto  $p = h \nu/c = hc/(\lambda c) = h/\lambda$  .

### **Livelli energetici dell'atomo di idrogeno (atomo di Rutherford-Bohr) e degli atomi con un solo elettrone (atomi ionizzati)**

$E = - 2\pi^2 m Z^2 e^4 / (n^2 h^2)$  ,  
con  $n = 1, 2, 3, \dots$  numero quantico.

2)  $\nu_{em} = (E_{in} - E_{fin})/h$  ;  
 $\nu_{ass} = (E_{fin} - E_{in})/h$  ;

frequenza della radiazione emessa ( $E_{in} > E_{fin}$ ) o assorbita ( $E_{in} < E_{fin}$ ) nella transizione dell'atomo tra due livelli energetici (emissione o assorbimento di un fotone).

## **FORMULE DI FISICA QUANTISTICA**

### **Dualismo onda-corpuscolo per la materia e per la radiazione elettromagnetica**

1) Radiazione elettromagnetica  
(ipotesi dei fotoni di Einstein, 1905)

Energia dei fotoni associati ad onde elettromagnetiche  
con frequenza  $\nu$  e lunghezza d'onda  $\lambda$  :  
 $E = h \nu = hc/\lambda$  .

Quantità di moto ("momentum" in inglese) di un fotone:  $p = E/c = h \nu / c = h/\lambda$  .

2) Materia  
(ipotesi di De Broglie, 1924)

Frequenza delle onde pilota associate ad una particella  
con energia relativistica totale  $E = \sqrt{(p^2 c^2 + m_0^2 c^4)}$   
e quantità di moto  $p$ :  
 $\nu = E/h$ .

Lunghezza d'onda associata ad una particella  
con energia relativistica totale  $E$  e quantità di moto  $p$ :  
 $\lambda = h/p$ .

3) La velocità di gruppo

$V_g = dv/d(1/\lambda) = (dE/h)/d(p/h) = dE/dp$  delle onde pilota coincide con la velocità  $v$  della particella:

$$dE/dp = d/dp (\sqrt{(p^2 c^2 + m_0^2 c^4)}) = 2p c^2 / [2\sqrt{(p^2 c^2 + m_0^2 c^4)}] = p c^2 / E = \\ = mv c^2 / (m c^2) = v.$$

### **Principio d'indeterminazione di Heisenberg (1927)**

Relazioni d'indeterminazione per coppie di grandezze fisiche non misurabili contemporaneamente con la massima precisione (grandezze complementari):

quantità di moto e coordinata lineare associata

1)  $\Delta p_x \Delta x \geq h/2\pi$  ;

2)  $\Delta p_y \Delta y \geq h/2\pi$  ;

3)  $\Delta p_z \Delta z \geq h/2\pi$  ;

momento angolare e coordinata angolare associata

4)  $\Delta L_\phi \Delta \phi \geq h/2\pi$  ;

energia e tempo

5)  $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$  .

La costante universale di Planck vale  $6,63 \times 10^{-34}$  J s .

Se si calcola, per esempio, con riferimento alla forza debole che trasforma un protone in un neutrone, e viceversa, il tempo di "volo" di un bosone

vettore  $W^+$  o  $W^-$ , la cui massa equivale a  $81 \text{ GeV} =$

$81 \times 10^9 \times 1,6 \times 10^{-19}$  J, si ottiene:

$$\Delta t \approx h/(2\pi \Delta E) = 6,63 \times 10^{-34} / (2\pi \times 81 \times 10^9 \times 1,6 \times 10^{-19}) \approx 6,63 \times 10^{-34} / 8,13 \times 10^8 \\ \approx 8,15 \times 10^{-27} \text{ s}.$$

### **Equazione d'onda di Schroedinger (1925)**

$$[-\hbar^2/(8\pi^2m) (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2) + U]\Psi = i (\hbar/2\pi) \partial\Psi/\partial t ;$$

$\Psi(x,y,z,t)$  è la funzione d'onda (complessa) che descrive l'evoluzione temporale dello stato quantico della particella soggetta al campo di forza descritto dall'energia potenziale  $U(x,y,z,t)$ .

Secondo Max Born (1926) l'espressione

reale  $\Psi^*(x,y,z,t) \Psi(x,y,z,t) dx dy dz$  fornisce la probabilità di trovare la particella nel

volume infinitesimo compreso tra  $x$  e  $x + dx$ ,  $y$  e  $y + dy$  e  $z$  e  $z + dz$ .

L'equazione di Schroedinger è l'equazione fondamentale della meccanica quantistica non relativistica.

Se, in particolare l'energia potenziale  $U$  è indipendente dal tempo, la funzione d'onda  $\Psi(x,y,z,t)$  può essere espressa come prodotto delle funzioni  $\Theta(t)$  e

$\phi(x,y,z)$ , e l'equazione di Schroedinger viene scissa in due equazioni:

$$1) \frac{d\Theta(t)}{dt} = - (2\pi i/\hbar) E \Theta(t),$$

dove  $\Theta(t) = C \exp(-2\pi i \nu t)$ ,  $\nu = E/\hbar$  è la frequenza dell'onda di probabilità ed  $E$  è l'energia totale della particella;

$$2) [-\hbar^2/(8\pi^2 m) (\Delta + U)] \phi(x,y,z) = E \phi(x,y,z),$$

dove  $\Delta$  è l'operatore di Laplace.

Le soluzioni di questa equazione (degli stati stazionari) sono le autofunzioni  $\phi_k(x,y,z)$ , che soddisfano a determinate condizioni analitiche per determinati valori discreti (autovalori)  $E_k$  dell'energia.

Con  $k$  si indica l'insieme dei numeri quantici che individuano lo stato della particella.

### Equazione d'onda di Dirac (1928)

$$\partial\Psi/\partial t + \sum_{k=1,2,3} \alpha_k \partial\Psi/\partial x_k + i m \beta\Psi = 0.$$

$$\sum_{k=1,2,3} \gamma_k \partial\Psi/\partial x_k + m\Psi = 0 \text{ (forma covariante),}$$

dove  $\alpha_k$ ,  $\beta$  e  $\gamma_k$  sono matrici  $4 \times 4$  e le coordinate nello spazio-tempo quadridimensionale sono  $x_1, x_2, x_3,$

$$x_4 = ict.$$

È un'equazione relativistica per particelle ed antiparticelle con spin  $1/2$ . Le soluzioni che si ottengono per una particella libera, non soggetta a campi di forze, corrispondono a livelli energetici con lo stesso modulo e segni opposti:  $E = \pm \sqrt{(p^2 c^2 + m_0^2 c^4)}$ .

L'esistenza di livelli energetici negativi, priva di significato fisico per una particella libera, fu interpretata da Dirac facendo l'ipotesi dell'esistenza di antiparticelle, dotate di massa uguale e di carica elettrica opposta.

La scoperta del positrone e delle altre antiparticelle confermò brillantemente l'ipotesi di Dirac.

**PEOPLEPHYSICS.COM**  
***SITO DI CULTURA SCIENTIFICA***

*Webmaster & Author: Antonino Cucinotta*  
Graduate in Physics  
Electronics and Telecommunications Teacher  
at the Industrial Technical High School "Verona Trento"  
of Messina (Sicily), Italy  
Copyright 2002 - All rights reserved

*Webmaster ed Autore: Prof. Antonino Cucinotta*  
Dottore in Fisica  
Docente di Elettronica e Telecomunicazioni  
presso l'Istituto Tecnico Industriale "Verona Trento" di Messina  
Copyright 2002 - Tutti i diritti riservati

## INTRODUZIONE

???

***E' POSSIBILE ABBATTERE LA BARRIERA DI INCOMUNICABILITA' CHE IMPEDISCE AGLI UOMINI DI SCIENZA DI FARSI CAPIRE DA TUTTI ?***

***E' POSSIBILE FAR CAPIRE ALLA GENTE L'IMPORTANZA DELLA CULTURA SCIENTIFICA NELL' UTILIZZAZIONE CONSAPEVOLE E RESPONSABILE DEI PRODOTTI TECNOLOGICI CHE DERIVANO DALLE APPLICAZIONI AVANZATE DELLE CONOSCENZE SCIENTIFICHE ?***

***E' POSSIBILE SPIEGARE CON PAROLE SEMPLICI LE LEGGI DELLA NATURA A CHI NON HA MAI STUDIATO FISICA ?***

Questo sito nasce dall'esigenza di sperimentare un approccio elementare ad un vasto campo delle conoscenze scientifiche, quello che riguarda le leggi scritte dal Creatore nella struttura dell'universo, che stanno alla base di tutti i fenomeni fisici che è possibile osservare nel mondo in cui viviamo. Generalmente, chi non possiede una cultura scientifica di base, sentendo parlare di fisica e di fisici, è portato a pensare esclusivamente ad armi nucleari e sistemi missilistici strategici, confondendo la fisica (dal greco *physis* = natura), che è la scienza che ha per oggetto lo studio dei fenomeni naturali e delle leggi che li governano, con le varie tecnologie (elettroniche, nucleari, robotiche, missilistiche) che derivano dalle applicazioni delle leggi fisiche.

Non si considera che, mentre gli ingegneri che operano nei vari settori tecnologici, applicano nei loro progetti le leggi naturali scoperte dai fisici, questi invece, nel fare ricerca pura (la ricerca che viene fatta senza chiedersi quale ne sia l'utilità), hanno come unici obiettivi il progresso della conoscenza e la ricerca di leggi e modelli che siano in grado, non soltanto di spiegare i fenomeni naturali già studiati sperimentalmente, ma di prevederne altri, non ancora osservati, perchè, per esempio, molto rari, ma che potrebbero essere osservati in futuro e spiegati come conseguenze delle leggi fisiche note ed ampiamente verificate dalla comunità scientifica.

Nel campo delle scienze fisiche le difficoltà di comprensione per i non addetti ai lavori sono dovute principalmente ai termini specifici ed ai formalismi matematici di varia complessità che costituiscono il linguaggio standard utilizzato per l'esposizione di una teoria.

Perchè allora non provare a spiegare in modo elementare le leggi fisiche usando il linguaggio comune, prendendo spunti dall'osservazione della natura e dei molteplici aspetti della realtà che ci circonda e limitando al minimo indispensabile l'uso delle formule matematiche?

Ma, al di là della conoscenza delle leggi naturali, è fondamentale per l'uomo ipertecnologico del terzo millennio riscoprire il piacere di provare stupore e curiosità osservando la natura in tutti i suoi aspetti, da quelli più misteriosi ed inaccessibili a quelli più evidenti e comuni, ma non per questo meno affascinanti.

Ci si abitua quasi immediatamente ad utilizzare i più svariati prodotti tecnologici avanzati ,di cui non si può più fare a meno, ma non si prova alcuna curiosità per le leggi fisiche che stanno alla base del loro funzionamento: così si diventa utilizzatori passivi ed acritici di tecnologia, come se il contenitore di ogni prodotto tecnologico rappresentasse una barriera impenetrabile tra la mente e la conoscenza delle leggi fisiche che ne governano il funzionamento.

Un primo passo verso la demolizione della barriera di incomunicabilità deve essere fatto impostando lo studio delle scienze , e della fisica in particolare, con metodi didattici innovativi, per eliminare la netta separazione esistente tra la cultura umanistica e quella scientifica, sforzandosi di diffondere, soprattutto nei giovani, una mentalità nuova che promuova la formazione di una cultura di base unitaria, umanistico-scientifica, atta ad eliminare ogni sorta di pregiudizio nei confronti della vera scienza, che deve essere considerata unicamente una meravigliosa frontiera di espansione dello spirito umano verso il campo sconfinato della conoscenza.

In questo contesto nasce l'idea di offrire alla gente una visione nuova delle leggi naturali, svincolata dai poco attraenti schemi didattici tradizionali ed orientata essenzialmente a stimolare la curiosità scientifica per tutto quello che fa parte della nostra vita.

# LE DOMANDE PIU' FREQUENTI SUL MONDO FISICO

***Credo in Dio Padre Onnipotente, Creatore del Cielo e della Terra, di tutte le cose visibili ed invisibili ...***

## **Atomi**

Miliardi di miliardi di miliardi  
di microcosmi invisibili.  
Novantadue sono quelli naturali,  
fatti di vuoto, massa ed elettricità,  
ora sorgenti ora pozzi di luce.  
Formano il nostro corpo,  
non la nostra anima.  
Non li trasforma la nostra morte corporale,  
vanno a formare altri organismi ed altre cose,  
in terra, in acqua e in cielo,  
finchè Dio vorrà.

***By Webmaster***

## **Materia ed antimateria**

Uno specchio misterioso separa il mondo dall'antimondo.  
Al di qua dello specchio  
un protone si rivede come antigemello negativo,  
un elettrone come antigemello positivo,  
un neutrone come antigemello simmetrico.  
Un atomo ed il suo antiatomo emettono la stessa luce.  
Un essere vede il suo antiessere.  
Gemelli ed antigemelli si avvicinano allo specchio e lo raggiungono.  
Ora non esistono più.  
Si sono trasformati in coppie di gammafotoni.

***By Webmaster***

#### **D. Che cos'è lo spazio-tempo ?**

R. Lo spazio-tempo è formato dall'intima unione dell'ordinario spazio tridimensionale con il tempo, che rappresenta la quarta dimensione della realtà.

Si potrebbe assimilare lo spazio-tempo ad un immenso rotolo di nastro, che al momento della creazione dell'universo era tutto arrotolato: con l'evolversi dell'universo il nastro, che rappresenta lo spazio, si è srotolato nel passato, si srotola nel presente e continuerà a srotolarsi nel futuro, finchè l'universo esisterà.

Anche se il nastro ha due sole dimensioni , lunghezza e larghezza, questo modello rende bene l'immagine del tempo che passa, mentre il nastro si srotola .

Per rappresentare più efficacemente l'evolversi dell'universo nello spazio-tempo, si può immaginare una sfera di materiale elastico, puntiforme al momento della creazione (big bang - grande scoppio) , che si sia espansa uniformemente, fino a rappresentare il cosmo come ci appare attualmente, con centinaia di miliardi di galassie le cui distanze aumentano continuamente, rendendolo sempre meno denso di materia e sempre meno luminoso (l' espansione dell'universo fu scoperta dall'astronomo Hubble negli anni '20).

L'evoluzione cosmica sta scritta nello spazio-tempo, che ha la stessa età dell'universo (stimata attualmente in 15 miliardi di anni).

#### **D. Perché parliamo di spazio-tempo e non di spazio e di tempo, separatamente?**

R. Perché la misura della durata di qualsiasi fenomeno fisico, per esempio quella di un flash emesso da una sorgente luminosa, se viene eseguita, indipendentemente, da un osservatore in quiete rispetto alla sorgente e da un osservatore in movimento rispetto ad essa (per esempio da un osservatore a bordo di un aereo), fornisce valori tanto più diversi quanto maggiore è la velocità dell'osservatore in movimento.

In particolare, l'intervallo di tempo misurato dall'osservatore in moto rispetto alla sorgente risulta maggiore dell'intervallo di tempo misurato dall'osservatore in quiete rispetto ad essa.

Questo si verifica perchè, mentre per Galilei e Newton la misura di un intervallo di tempo è assoluta, cioè indipendente dal moto di chi osserva un fenomeno fisico, nell'ambito della Teoria della Relatività di Einstein la misura di un intervallo di tempo dipende dalla velocità dell'osservatore.

Pertanto si parla di tempo proprio (o locale)  $\Delta t_p$  , misurato da un osservatore in quiete rispetto al sistema di riferimento nel quale ha luogo un fenomeno fisico e di tempo non locale  $\Delta t_{nl}$  , misurato da un osservatore in moto rispetto al predetto sistema di riferimento.

Ovviamente le differenze tra i valori misurati dai due osservatori risultano, in pratica, significative soltanto se la velocità  $v$  dell'osservatore non è troppo piccola rispetto quella della luce nel vuoto ( $c = 300000 \text{ km/s}$ ):  $\Delta t_{nl} = \Delta t_p : \text{radice quadrata di } (1 - v^2/c^2)$ .

Poichè la misura di un intervallo tempo dipende dal sistema di riferimento nel quale si trova l'osservatore, nella fisica relativistica (einsteiniana), a differenza di quanto si

verifica nell'ambito della fisica newtoniana, non si può considerare assoluta una misura di tempo, e si introducono pertanto i concetti di spazio-tempo (cronotopo) e di evento spazio-temporale (punto-evento dello spazio-tempo individuato da 4 parametri, che rappresentano le 3 coordinate spaziali e la coordinata temporale).

Le misure di lunghezza e di tempo relative ad un esperimento (per esempio, quelle relative alla lunghezza ed al periodo di oscillazione di un pendolo), che programmiamo di eseguire all'interno di una carrozza ferroviaria, sono valide rispetto al treno, che rappresenta il nostro sistema di riferimento.

Un altro osservatore, a bordo di un'auto, potrebbe osservare a distanza l'esperimento attraverso un binocolo e misurare la lunghezza ed il periodo del pendolo rispetto al proprio sistema di riferimento, l'auto, in moto rispetto al treno.

L'osservatore sull'auto rileverebbe una lunghezza lievemente minore (contrazione delle lunghezze) ed un periodo lievemente maggiore (dilatazione del tempo) rispetto ai valori rilevati dall'osservatore a bordo del treno.

Infatti l'osservatore a bordo dell'auto, per effettuare le misure utilizza la luce proveniente dal pendolo, ed il ritardo, sia pure piccolissimo, associato al cammino dei raggi luminosi, che si propagano con velocità  $c$ , influenza sia la valutazione della lunghezza che quella del periodo di oscillazione.

La dipendenza delle misure di tempo e di lunghezza dal sistema di riferimento verrebbe meno se la velocità della luce fosse infinita, cioè se le onde elettromagnetiche (e la luce, che è costituita da onde elettromagnetiche) si propagassero istantaneamente.

In tal caso un osservatore in quiete ed uno in moto rileverebbero gli stessi valori.

#### ***D. Che cos'è la massa di un corpo ?***

R. Un oggetto o un essere vivente sono fatti di materia, e la materia è fatta di microsistemi, gli atomi dei 92 elementi chimici esistenti in natura, dal più leggero, l'idrogeno, al più pesante, l'uranio.

Gli atomi dei vari elementi si aggregano tra loro secondo le leggi della chimica per formare i cristalli e le molecole di tutti i composti chimici di cui sono fatti tutti gli oggetti e tutti gli esseri viventi.

Le molecole dei metalli (rame, argento, zinco...ecc.) sono monoatomiche, quelle dei metalloidi (carbonio, fosforo, ossigeno, zolfo... ecc.) biatomiche o pluriatomiche a seconda dell'elemento chimico che si considera; per esempio le molecole di molti elementi chimici gassosi (idrogeno, cloro, azoto, ecc.) sono formate da due atomi.

Gli atomi sono costituiti da un nucleo centrale, fatto di protoni con carica elementare positiva e di neutroni privi di carica elettrica, e da una nuvola di elettroni con carica elementare negativa, distribuiti attorno al nucleo con una densità che dipende dall'elemento chimico considerato.

Dal numero degli elettroni (numero atomico  $Z$ ), che negli atomi elettricamente neutri (non ionizzati) coincide con quello dei protoni del nucleo, dipendono le proprietà chimiche che caratterizzano l'elemento.

La quantità di materia che forma un oggetto inerte o un essere vivente è associata ad

una proprietà fisica fondamentale: la massa o inerzia.

Un camion o un elefante possiedono una massa molto maggiore di quella di una pallina da tennis, e questo implica risposte (accelerazioni) molto diverse ad una forza della stessa intensità.

Infatti la seconda legge fondamentale della meccanica (scoperta da Galileo Galilei ed inclusa da Isacco Newton nei suoi "*Principia mathematica philosophiae naturalis*") afferma che l'accelerazione (variazione di velocità per unità di tempo) impressa da una forza ad un corpo, inizialmente in quiete o in moto rettilineo uniforme con una data velocità iniziale, è direttamente proporzionale all'intensità della forza applicata.

D'altra parte, applicando la stessa forza a corpi di massa diversa, si ottengono accelerazioni inversamente proporzionali alla massa del corpo.

### **Esempio**

Applicando la stessa forza di 200 kg-peso ad un corpo avente una massa di 1000 kg, e successivamente ad un corpo di massa doppia, si ottiene nel secondo caso un'accelerazione dimezzata.

La massa di un corpo, detta più precisamente massa inerziale, rappresenta l'attitudine di un corpo a resistere all'accelerazione prodotta da una forza.

Quanto minore è la massa di un corpo, tanto più il corpo viene accelerato (o decelerato) da una data forza.

La seconda legge fondamentale della meccanica si può esprimere con la seguente formula (approssimata, in quanto si considera, per semplicità, l'accelerazione media del corpo invece di quella istantanea):

$F = M a = M (V_{fin} - V_{in}) / (T_{fin} - T_{in})$ , dove  $a$  è l'accelerazione media, espressa dal rapporto tra la variazione (aumento o diminuzione di velocità = velocità finale - velocità iniziale) e l'intervallo di tempo corrispondente ( $T_{fin} - T_{in}$ ).

Dalla formula si deduce che, mantenendo costante la forza  $F$  applicata ad un corpo, se raddoppia la massa  $M$  del corpo, l'accelerazione  $a$  si dimezza e che, viceversa, se  $M$  si dimezza,  $a$  raddoppia.

Per avere un primo esempio applicativo di questa legge, possiamo considerare la forza frenante  $F$  necessaria per arrestare il moto di un veicolo: a parità di velocità e di tempo di frenata, la forza d'attrito (forza resistente) che devono esercitare i freni è direttamente proporzionale alla massa  $M$  del veicolo.

Analogamente, la forza motrice  $F$  necessaria per accelerare un veicolo dalla quiete fino ad una data velocità in un intervallo di tempo assegnato, è direttamente proporzionale alla massa  $M$  del veicolo.

Così anche la forza impulsiva che si sviluppa in caso di collisione del veicolo contro un ostacolo o contro un altro veicolo, è direttamente proporzionale a  $M$ , a parità di velocità del veicolo e di durata dell'impatto.

Infatti il veicolo, in fase di accelerazione o di decelerazione, è soggetto ad una forza  $F = M a = M \Delta V / \Delta t$ , proporzionale alla massa (inerzia)  $M$  ed avente rispettivamente lo stesso verso della velocità o il verso opposto.

Se si richiedono un tempo ed uno spazio di frenata minori, bisogna aumentare proporzionalmente la forza frenante  $F$  per ottenere la stessa variazione di velocità  $\Delta V$  (e di quantità di moto  $M \Delta V$ ) in un intervallo di tempo  $\Delta t$  minore.

Con le stesse considerazioni si spiega la protezione assicurata da un corpo elastico interposto nell'urto tra un corpo in moto ed un ostacolo rigido (si pensi ad un materasso pneumatico utilizzato per attutire gli effetti dell'urto prodotto dalla caduta libera di una persona da un' altezza di qualche metro).

Pur essendo notevole la velocità prima dell'urto, l'elasticità e la cedevolezza del mezzo elastico interposto determinano un aumento dell'intervallo di tempo necessario per ridurre a zero la velocità durante l'urto; pertanto diminuiscono notevolmente la decelerazione  $a = \Delta V/\Delta t$  (accelerazione negativa durante l'urto) e con essa la forza impulsiva  $F = Ma$ , proporzionale ad  $a$ .

#### ***D. Che cos'è l'energia ?***

R. Quando eseguiamo un lavoro manuale, per esempio per sollevare un oggetto molto pesante, avvertiamo la fatica ed abbiamo la sensazione che il nostro corpo abbia speso "qualcosa" per svolgere quel lavoro; è stata spesa una certa quantità di energia.

In questo caso il lavoro manuale è stato eseguito impegnando i muscoli del nostro corpo, che non sono altro che veri e propri motori biologici che convertono in lavoro meccanico le riserve di energia accumulate attraverso i complessi processi biochimici che intervengono tutte le volte che ingeriamo del cibo per alimentarci.

Svolgendo lavoro meccanico su un oggetto, non facciamo altro che applicare ad esso delle forze (motrici) che ne aumentano la velocità, contrastando l'azione di altre forze (resistenti) che si oppongono al movimento.

Nel caso del corpo sollevato ad una certa altezza, la forza che si oppone al movimento (forza resistente) è la forza di gravità, cioè il peso.

Affinchè il corpo possa essere sollevato ad una data altezza  $h$ , è necessario applicare ad esso una forza motrice che superi il peso.

Quanto maggiore è l'altezza (spostamento verticale subito dal corpo), tanto maggiori risultano l'energia spesa ed il lavoro meccanico eseguito  $L = Fh$ , che in questo caso particolare deve superare il prodotto del peso  $P$  dell'oggetto per lo spostamento verticale  $h$ .

Se per esempio solleviamo a 2 metri dal suolo un oggetto del peso di 50 kg, eseguiamo un lavoro maggiore di  $50 \text{ kg-peso} \times 2 \text{ metro} = 100 \text{ kgm}$  (chilogrammetri - kgm), spendendo un'energia maggiore di 100 kgm.

Quindi un corpo o un sistema (nel nostro caso il sistema è il nostro corpo) possiedono energia se sono in grado di compiere lavoro su uno o più corpi o su un altro sistema.

Viceversa, se su un corpo o su un sistema viene eseguito del lavoro meccanico da uno o più corpi o da un altro sistema, viene accumulata energia, che potrà essere utilizzata successivamente.

#### ***D. Come si accumula l'energia ?***

R. Il modo più semplice per accumulare energia consiste nel fare acquisire velocità ad un corpo; si parla in questo caso di energia cinetica o di moto, in quanto una massa  $M$  qualsiasi, accelerata da una forza fino a raggiungere una certa velocità  $V$ , se urta contro uno o più corpi, è in grado di compiere lavoro su di essi accelerandoli durante l'urto e cedendo una parte più o meno grande dell'energia cinetica accumulata, a seconda delle masse in gioco nell'urto e del tipo d'urto.

L'energia cinetica di un corpo è direttamente proporzionale al quadrato della velocità ed è data dalla formula

$$E_c = (1/2) M V^2.$$

Se la velocità di un corpo raddoppia, l'energia cinetica quadruplica.

Questo che spiega l'esigenza di moderare la velocità di un veicolo per limitare i danni conseguenti ad urti contro altri veicoli.

Gli urti si definiscono elastici, se si conserva l'energia cinetica totale accumulata dai corpi prima dell'urto, cioè se l'energia cinetica totale dopo l'urto risulta uguale a quella iniziale.

In pratica gli urti non sono mai completamente elastici, in quanto una parte più o meno grande dell'energia cinetica totale dei corpi prima dell'urto, viene spesa per deformare la struttura di essi in modo irreversibile, come si verifica nei violentissimi urti frontali tra due veicoli o nell'urto di un veicolo contro un muro.

Il lavoro che viene compiuto dalle intense forze impulsive che agiscono durante un urto anelastico (non elastico) si converte in calore per il primo principio della termodinamica, in modo analogo a quanto si verifica battendo un chiodo con un martello o piegando più volte un pezzo di metallo; il lavoro di deformazione si trasforma in calore.

Urti approssimativamente elastici si possono considerare quelli che avvengono tra palle da biliardo o tra le molecole di un gas.

Ricordiamo che, oltre all'energia muscolare animale ed umana, l'energia cinetica dei venti e delle masse d'acqua è stata l'unica fonte energetica naturale largamente sfruttata nei secoli scorsi per produrre forza motrice, prima dell'utilizzazione industriale dei motori termici ed elettrici.

Tuttora, una percentuale piccola, ma non trascurabile, dell'energia elettrica prodotta, è di origine idrica o eolica.

L'energia si può accumulare sotto altre forme:

### ***energia gravitazionale***

Viene accumulata come energia potenziale (o di posizione) in tutti i sistemi costituiti da masse distanziate nello spazio (sistemi di corpi, masse solide e liquide situate ad una data altezza rispetto al suolo).

### ***energia elastica***

Viene accumulata come energia potenziale in un corpo elastico, per esempio in una molla, oppure comprimendo un gas in una bombola.

## ***energia chimica***

Si libera nelle reazioni chimiche in virtù dell' energia di legame tra gli atomi che interagiscono per formare le molecole ed i cristalli degli elementi naturali e dei composti chimici.

## ***energia termica (calore)***

Corrisponde all'energia cinetica delle molecole che costituiscono la materia.

Entra in gioco negli scambi energetici che si verificano tra solidi, liquidi, gas e vapori per effetto di differenze di temperatura, che corrispondono a differenze di velocità e di energia cinetica delle molecole.

In particolare l'energia termica accumulata in un fluido (liquido, gas o vapore), che si comporta da accumulatore termico, può essere trasformata in energia meccanica nelle macchine termiche (a vapore ed a combustione interna), sfruttando la differenza di temperatura esistente tra la sorgente termica che riscalda il fluido e l'ambiente esterno.

Nelle macchine frigorifere e negli impianti di climatizzazione si sfrutta il principio della pompa di calore, che consiste nel trasferire calore da un ambiente ad un altro a temperatura maggiore, attraverso la compressione di un gas o di un vapore, ottenuta a spese di energia meccanica (elettrica).

Nella prima fase del ciclo termodinamico, l'ambiente a temperatura minore, attraverso i serpentini dell'evaporatore, cede calore ad un gas o ad un vapore liquefatti, provocandone il passaggio allo stato gassoso; successivamente il gas o il vapore vengono liquefatti per compressione, a spese dell'energia elettrica assorbita per far funzionare il compressore, cedendo calore all'ambiente a temperatura maggiore, attraverso i serpentini del condensatore.

Il calore trasferito all' ambiente a temperatura maggiore uguaglia la somma del calore ceduto dall' ambiente a temperatura inferiore e dell' energia elettrica trasformata in lavoro meccanico, trascurando le perdite del sistema causate dalle forze d'attrito e dalla resistenza elettrica degli avvolgimenti del motore (energia elettrica non convertita in energia meccanica).

## ***energia elettrica***

Viene prodotta dai generatori elettrici sfruttando varie forme di energia primaria (cinetica, gravitazionale, termica, chimica, nucleare, solare).

Viene immagazzinata come energia elettrostatica nei condensatori (mediante il campo elettrico stazionario esistente tra le armature) e sotto forma di energia chimica negli accumulatori (pile secondarie).

## ***energia magnetica***

Viene accumulata nel campo magnetico generato dai magneti permanenti (calamite naturali o artificiali) e dagli elettromagneti (elettrocalamite con avvolgimento di filo di rame o di lega superconduttrice).

## **energia nucleare**

Si libera nelle reazioni nucleari di fissione e fusione.

Nei nuclei instabili degli elementi più pesanti (uranio, plutonio, torio) le forze elettriche con cui i protoni (nuclei degli atomi d'idrogeno dotati di carica elementare positiva) si respingono tendendo a disgregare il nucleo, sono equilibrate in modo alquanto precario dalle forze nucleari attrattive che si esercitano tra tutti i nucleoni (protoni e neutroni), mantenendo compatto il sistema di nucleoni.

Pertanto basta che il nucleo venga urtato da un neutrone lento, perchè le forze elettriche repulsive prevalgano su quelle nucleari attrattive, causando la fissione (scissione) del nucleo in due frammenti (nuclei di elementi più leggeri dell'uranio) più 1 o 2 neutroni, con emissione di una notevole quantità di energia cinetica, che si trasforma in calore.

I nuclei degli elementi leggeri (idrogeno, deuterio, trizio) possono invece subire, a temperature elevatissime (almeno decine di milioni di °C), la fusione termonucleare per formare neutroni e nuclei di elio, liberando una grandissima quantità di energia, corrispondente all'energia di legame dei nuclei di elio che si formano.

### **D. Qual è il significato della famosa equazione einsteiniana $E = m c^2$ ?**

R. Prima della formulazione della teoria einsteiniana, si consideravano separatamente i fondamentali principi di conservazione della massa e dell'energia.

Il principio di conservazione della massa, formulato nel diciottesimo secolo dal chimico Lavoisier e già espresso da Lucrezio nel poema "*De rerum natura*", consiste nel considerare costante ed indistruttibile la quantità di materia presente in natura: in un sistema qualsiasi e, per estensione, nell'universo la quantità totale di materia è sempre la stessa; la materia può subire trasformazioni fisico-chimiche, ma non si distrugge ("*in natura nulla si distrugge, tutto si trasforma*").

Il principio di conservazione dell'energia, formulato nel diciannovesimo secolo, afferma che, qualunque sia la forma di energia che si considera (meccanica, termica, elettrica, ...), in un sistema qualsiasi e, per estensione, nell'universo, la quantità totale di energia è costante.

Einstein dimostrò che i due principi non sono altro che due facce della stessa medaglia, *il principio di conservazione della massa e dell'energia*, che afferma che in un sistema qualsiasi e, per estensione, nell'universo, la massa si può trasformare in energia e, viceversa, l'energia si può trasformare in massa, come in pratica si verifica nelle reazioni nucleari ed in quelle tra particelle subnucleari.

In sostanza, nel bilancio energetico di qualsiasi sistema bisogna includere il termine  $M c^2$ , dove M rappresenta la somma delle masse di tutti i corpi che formano il sistema, valutate come "masse in quiete o a riposo".

Il termine di massa in quiete (o a riposo) deriva dal fatto che Einstein dimostrò che la massa di un corpo dipende dalla sua velocità rispetto ad un particolare sistema di riferimento.

## **Esempio**

Se si considera la massa di un oggetto mantenuto fermo all'interno di un'auto in moto, la massa del corpo misurata a bordo dell'auto è la massa in quiete  $m_0$ , essendo il corpo fermo rispetto all'auto; se invece si considera la massa del corpo rispetto alla strada, si parla di massa del corpo in moto  $m(v)$ , che è tanto più grande della massa in quiete quanto maggiore è la velocità  $v$  del corpo, che in questo caso coincide con la velocità dell'auto.

In pratica, la differenza tra le due masse è così piccola da risultare insignificante per un oggetto macroscopico, la cui velocità sia molto minore della velocità della luce nel vuoto ( $c = 300000 \text{ km/s}$ ), a meno che non si considerino oggetti microscopici, come le particelle elementari (elettroni, protoni, neutroni), che possono raggiungere, data la loro piccolissima massa in quiete, velocità molto vicine a  $c$ , in corrispondenza delle quali gli effetti relativistici sono molto significativi.

Se durante una trasformazione di un sistema fisico, si verifica una diminuzione della massa totale degli oggetti che costituiscono il sistema, significa che la differenza (difetto di massa) si è trasformata in energia secondo la legge  $E = \Delta m c^2$ , dove  $\Delta m$  rappresenta in questo caso la differenza tra la massa iniziale e quella finale.

Il grandissimo valore di  $c$  comporta che sia grandissima la quantità di energia che si libera da una sia pur piccolissima quantità di materia che scompare, come si verifica nei reattori nucleari a fissione e nelle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel sole e nelle stelle.

## **D. Perché la velocità di un corpo non può mai raggiungere il valore limite della velocità della luce nel vuoto ?**

R. Perché la massa  $m(v)$  di un corpo in moto cresce al crescere della velocità  $v$ , tendendo a diventare grandissima oltre ogni limite, teoricamente infinita, quanto più la velocità si avvicina a  $c$ .

La formula che rappresenta la dipendenza della massa relativistica dalla velocità è la seguente:

$$m(v) = m_0 : \text{radice quadrata di } (1 - v^2/c^2).$$

Poiché massa ed energia sono equivalenti, bisognerebbe fornire al corpo un'energia infinita, il che risulta fisicamente impossibile.

## **D. Quali sono le "cariche fondamentali" della materia ?**

R. La carica elettrica, la carica subnucleare debole e la carica subnucleare forte.

Esse corrispondono ad altrettante forze (interazioni) fondamentali della natura, considerando a parte la forza (interazione) gravitazionale, che agisce sulla massa di qualsiasi corpo, indipendentemente dal tipo di carica che esso possiede.

E' facile parlare delle forze elettriche, le quali, assieme a quelle gravitazionali, sono ben

note a tutti, poichè ad esse si devono le reazioni chimiche e biochimiche, l'esistenza di qualsiasi forma di vita, i fenomeni elettrici naturali, e le innumerevoli applicazioni dell'elettromagnetismo che hanno consentito di realizzare le meraviglie tecnologiche del mondo contemporaneo.

Meno note sono le forze subnucleari deboli (forze di Fermi), alle quali sono dovuti i fenomeni di decadimento  $\beta$  degli elementi radioattivi naturali ed artificiali, e da cui dipende la velocità delle reazioni di fusione termonucleare che avvengono nel sole e nelle stelle.

Citiamo infine le forze subnucleari forti, dalle quali dipendono il funzionamento dei reattori nucleari a fissione e fusione e la stabilità dei nuclei atomici, che altrimenti si disintegrerebbero, se le intense forze elettriche repulsive tra i protoni non fossero controbilanciate dalle più intense forze nucleari attrattive tra i nucleoni (protoni e neutroni).

#### ***D. Che cosa intendono dire i fisici quando parlano di campi ?***

R. La diffusione capillare dei telefoni cellulari ha comportato l'uso frequente del termine "campo" nel linguaggio corrente, in quanto spesso si sente dire "in questa zona non c'è campo", per riferirsi all'impossibilità di ricevere segnali elettromagnetici di intensità sufficiente al buon funzionamento del telefono cellulare.

Inoltre, per quanto riguarda i telefonini ed i sistemi di radio e telediffusione, si parla spesso di intensità dei campi elettromagnetici, con riferimento alla vigente normativa di prevenzione ambientale. Ma che cos'è un campo ?

Partendo dall'esempio relativo ai telefoni cellulari, si è portati ad associare al campo elettromagnetico qualcosa di invisibile che si sposta dal trasmettitore al ricevitore, "impregnando" lo spazio.

Così è in realtà. Infatti un campo è una grandezza fisica (temperatura, pressione, forza di gravità, velocità) il cui valore varia con continuità in una data regione dello spazio.

Un campo di forza (elettrico, magnetico, subnucleare o gravitazionale), esercita forze sui corpi sensibili ad esso, cioè dotati di cariche che evidenziano le forze dovute al campo.

La "carica fondamentale" sensibile al campo elettromagnetico è la carica elettrica, che nel mondo macroscopico equivale sempre ad un multiplo della carica elettrica elementare, la carica elettrica negativa dell'elettrone.

Analogamente, i nucleoni (protoni e neutroni) sono portatori di una "carica subnucleare forte" che li rende sensibili al campo della cosiddetta "forza forte", espressione poco elegante usata per indicare la forza subnucleare forte, che è la più intensa tra tutte le forze naturali.

In modo analogo si parla della "carica subnucleare debole" delle particelle subnucleari (elettroni, positroni, muoni e neutrini) sensibili al campo della forza subnucleare debole, che è molto meno intensa delle forze elettromagnetiche e subnucleari forti, ma più intensa della forza gravitazionale, che infatti è la più debole delle forze della natura e

diventa molto importante soltanto su vasta scala, quando si considerano le grandissime quantità di materia che formano i corpi celesti (asteroidi, pianeti, satelliti, stelle e galassie).

Sulla Terra la forza di gravità è molto intensa per la notevole massa del nostro pianeta e per la distanza relativamente piccola ( $\sim 6400$  km) tra i corpi che subiscono la forza-peso ed il centro della Terra, punto nel quale si può considerare concentrata tutta la massa del pianeta, come si dimostra nell'ambito della teoria newtoniana della gravitazione.

#### ***D. Che cosa s' intende per campi quantistici ?***

R. Nei primi tre decenni del ventesimo secolo i fisici riuscirono ad elaborare una teoria molto sofisticata, la "meccanica quantistica o meccanica ondulatoria", che servì a spiegare completamente tutti i fenomeni atomici che la fisica classica, basata sulle leggi della meccanica classica di Galilei e Newton e sull' elettromagnetismo classico di Maxwell, non consentiva di spiegare.

Il microcosmo atomico-molecolare evidenzia che tutte le particelle elementari si comportano come onde aventi una lunghezza (di De Broglie)  $\lambda = h / (MV)$ , inversamente proporzionale alla quantità di moto ( $MV =$  prodotto della massa per la velocità), ed obbediscono al principio di indeterminazione di Heisenberg (1927), in base al quale si può affermare che, quando una particella viene confinata in una regione di spazio di dimensioni comparabili con la lunghezza d'onda associata ad essa, l' indeterminazione (errore o incertezza) che caratterizza la misura della quantità di moto è inversamente proporzionale all' indeterminazione con cui è nota la sua posizione all'interno della regione di confinamento.

Questo equivale ad affermare che le particelle elementari, a causa del loro comportamento ondulatorio, sono tanto meno localizzabili nello spazio, quanto meglio conosciamo la loro velocità, quindi anche la loro quantità di moto.

Perde pertanto significato il concetto di traiettoria di una particella, fondamentale invece nella fisica classica, nell'ambito della quale di un corpo in moto possiamo determinare contemporaneamente posizione e velocità, con tutta la precisione richiesta.

L'impossibilità di definire la traiettoria di una particella viene sostituita dalla possibilità di definire in ogni punto dello spazio la probabilità di trovarvi la particella.

D'altra parte si può dimostrare teoricamente che, se una particella è confinata in una ben delimitata regione dello spazio, come nel caso di un elettrone atomico, l'esigenza di assicurare una probabilità praticamente nulla di trovare una particella all'esterno della zona di confinamento, implica l'impossibilità di assegnare all'energia della particella qualsiasi valore, ma soltanto determinati valori:

ne risulta la quantizzazione dell'energia, già introdotta nella primitiva versione della fisica quantistica da Max Planck (1900 - teoria dei quanta) e Niels Bohr (1913 - teoria dell'atomo d'idrogeno).

Per effetto della quantizzazione non tutti i valori dell'energia sono permessi ad un elettrone in un atomo, ma soltanto ben determinati valori (autovalori) che rappresentano

i livelli energetici dell'atomo.

Analogamente si parla di quantizzazione della quantità di moto di una particella costretta a muoversi in una regione ben delimitata dello spazio.

E le masse e le cariche elettriche delle particelle elementari più comuni (elettroni, protoni e neutroni), come vengono spiegate ?

Anch'esse hanno valori ben determinati, ma tuttora non sappiamo perchè.

Possiamo solo dire che le masse e le cariche elettriche delle particelle dipendono dalla struttura dell'universo, e precisamente dai valori delle tre costanti fondamentali che determinano le caratteristiche del mondo fisico: la costante  $G$  della legge di gravitazione universale di Newton, la velocità della luce nel vuoto  $c$  e la costante di Planck  $h$ .

In questo contesto, anche i campi di probabilità che descrivono le particelle elementari e le loro interazioni sono quantizzati, essendo sempre quantizzate le grandezze fisiche (energia, quantità di moto, momento angolare) associate ad essi.

### ***I Esempio:***

Einstein formulò l'ipotesi dei fotoni (quanti di luce) per spiegare l'effetto fotoelettrico.

Tenendo presente che un fotone è un quanto del campo elettromagnetico che trasporta l'energia  $E = h f$ , dove  $f$  è la frequenza delle onde elettromagnetiche, si osserva che l'energia della radiazione elettromagnetica, nell'interazione con le particelle del microcosmo, si fraziona in un flusso di pacchetti di energia tutti uguali, denominati quanti o fotoni.

I quanti del campo elettromagnetico si possono considerare come speciali "particelle" che, avendo massa a riposo nulla, viaggiano sempre alla velocità della luce nel vuoto.

Nell'ambito dell'elettrodinamica quantistica (Q.E.D., Quantum Electro-Dynamics), che è stata sviluppata successivamente alla formulazione della meccanica quantistica relativistica da parte di Paul Dirac (1928), la forza attrattiva o repulsiva tra due particelle cariche è dovuta al fatto che una particella carica è completamente schermata da una nuvola di fotoni virtuali, cioè non rilevabili sperimentalmente, che vengono continuamente scambiati tra una particella e l'altra.

La forza attrattiva o repulsiva è tanto più intensa quanto più le particelle sono vicine (legge di Coulomb).

Una spiegazione molto elementare dell'aumento della forza coulombiana al diminuire della distanza  $R$  tra le cariche, può essere fornita, soltanto a livello intuitivo, se si considera che al diminuire di  $R = c \Delta t$ , diminuisce il tempo di transito  $\Delta t$  impiegato dai fotoni per passare, con la velocità della luce  $c$ , da una particella all'altra.

Pertanto, per la II legge fondamentale della dinamica

$F = \Delta P / \Delta t$ , la diminuzione di  $\Delta t$  aumenta la variazione della quantità di moto  $P$  per unità di tempo; quindi la forza coulombiana, attrattiva o repulsiva, aumenta.

### ***II Esempio:***

Nel 1935 il fisico giapponese Yukawa pensò di estendere questo meccanismo ad una coppia di nucleoni (protoni e neutroni), facendo l'ipotesi che le forze subnucleari forti,

attrattive, tra due nucleoni, cioè tra protone e protone, tra neutrone e neutrone e tra protone e neutrone (forze di Heisenberg-Maiorana), fossero dovute al continuo scambio di particelle virtuali, i mesoni, carichi positivamente, negativamente o neutri e dotati di massa a riposo intermedia tra quella del protone e quella dell'elettrone (~270 volte la massa elettronica).

La conferma definitiva della validità della teoria di Yukawa fu ottenuta nel 1947, quando Occhialini e Powell scoprirono nella radiazione cosmica particelle cariche con massa pari a 270 volte quella dell'elettrone, che furono identificate con i mesoni  $\pi$  (pioni).

Lo scambio di un pione virtuale tra due nucleoni implica una temporanea violazione del principio di conservazione dell'energia, in quanto, durante il transito del pione, la massa-energia complessiva del sistema costituito dai due nucleoni e dal pione virtuale è superiore alla massa-energia complessiva del sistema sia prima che dopo il transito, quando sono presenti soltanto i due nucleoni.

Tuttavia la natura tollera questa violazione, purchè essa sia compatibile con il principio di indeterminazione di Heisenberg, che impone che il tempo di transito sia tanto più breve quanto maggiore sia la massa-energia della particella scambiata.

Dovendo essere brevissimo ( $10^{-23}$  secondi, tempo caratteristico delle interazioni subnucleari forti) il tempo di transito  $\tau$  del pione, la cui massa a riposo, a differenza di quella del fotone, è diversa da zero, risulta piccolissima la distanza  $R = c \tau$  che deve esserci tra due nucleoni perchè essi siano soggetti alla forza subnucleare forte:  $R = 3 \cdot 10^{10} \text{cm/s} \times 10^{-23} \text{ s} = 3 \cdot 10^{-13} \text{cm} = 3 \text{ fermi}$ .

La forza subnucleare forte ha infatti un raggio d'azione cortissimo ed è 1000 volte più intensa della forza elettromagnetica, la quale invece si estende a distanza grandissima, teoricamente all' infinito; ad essa sono sensibili non solo il protone ed il neutrone, ma tutti gli altri adroni (particelle pesanti), che sin dagli anni '50 furono scoperti nei raggi cosmici e successivamente prodotti artificialmente negli acceleratori di particelle.

I quanti del campo subnucleare forte sono proprio i mesoni, che svolgono un ruolo analogo a quello dei fotoni nel caso del campo elettromagnetico.

### **III Esempio:**

Nel 1968 il modello basato sul "ping pong" di particelle virtuali fu esteso da Salam, Weinberg e Glashow alle forze subnucleari deboli, che determinano i fenomeni di decadimento radioattivo (decadimento beta), per i quali Fermi formulò negli anni '30 una prima,

validissima teoria, basandosi sull'ipotesi dell'esistenza del neutrino, avanzata da Pauli.

Salam, Weinberg e Glashow formularono una teoria delle interazioni deboli basata sulle particelle  $W$  (bosone positivo e negativo) e  $Z^0$  (bosone neutro), caratterizzate da masse ancora più grandi di quella dei pioni (mesoni) e da distanze d'interazione ancora più piccole.

Inoltre riuscirono a dimostrare che i campi quantistici subnucleare debole ed elettromagnetico, studiati ad alte energie, tendono ad identificarsi in un unico tipo di campo quantistico, il campo "elettrodebole", per effetto del quale le particelle  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , denominate bosoni vettoriali intermedi, producono una forza debole avente la stessa intensità di quella elettromagnetica.

#### ***D. Che cos'è lo spin di una particella?***

R. Le particelle elementari che costituiscono la materia si possono rappresentare come sferette di dimensioni ultramicroscopiche, con un raggio dell'ordine di decimi di milionesimi di milionesimi di centimetro, e possono essere neutre oppure dotate di carica elettrica positiva o negativa.

Ma esiste un'altra proprietà, tipica del microcosmo, che distingue una particella da un'altra: lo spin.

Una particella può avere spin diverso da zero o nullo, a seconda che sia dotata o meno di un moto di rotazione intorno al proprio asse; se una particella è dotata di spin (momento angolare intrinseco), si comporta come una microscopica trottola.

Una particella elettricamente carica come l'elettrone o il protone, o neutra come il neutrone, può essere considerata come una microscopica trottola contenente particelle virtuali che ruotano al suo interno, ed equivale, per il teorema di equivalenza di Ampere tra spira e magnete, ad un magnete di dimensioni infinitesime.

Le particelle si comportano in modo diverso, a seconda del valore dello spin: se le particelle hanno spin 0, come i pioni (mesoni  $\pi$ ), o spin intero, come per es. il fotone, che ha spin 1, si definiscono bosoni, dal nome del fisico indiano Bose che ne studiò la statistica (statistica di Bose-Einstein); se invece hanno spin frazionario ( $1/2$ ,  $3/2$  ...), come l'elettrone, il positrone, il protone ed il neutrone, che hanno spin  $1/2$ , si definiscono fermioni, dal nome di Enrico Fermi che ne studiò la statistica.

La differenza di comportamento tra bosoni e fermioni sta nel fatto che, mentre due o più bosoni, anche in numero grandissimo, possono occupare lo stesso stato quantico, individuato per ogni particella da una combinazione di numeri quantici, relativi all'energia ed al momento angolare, due fermioni invece, per il principio di esclusione di Pauli, non possono avere gli stessi numeri quantici.

Un notevole esempio del comportamento dei bosoni (condensazione in un unico stato quantico) ci è offerto dall'elio liquido, che a temperature minori o uguali a quattro gradi al di sopra dello zero assoluto ( $-273,16$  °C o  $0^\circ$  K), evidenzia un comportamento molto singolare: la superfluidità, che consiste nella capacità di risalire nei tubi capillari e nei contenitori, contro la gravità, per dar luogo al cosiddetto "effetto fontana".

Infatti i nuclei di elio, formati da 2 protoni e 2 neutroni, il cui spin totale si annulla, si comportano come bosoni scalari (con spin zero).

I fermioni invece, non potendo trovarsi nello stesso stato quantico, disperdono la loro energia ed il loro momento angolare in un intervallo di valori quantizzati, che è tanto più ampio quanto più numerose sono le particelle del sistema.

## **Esempio**

Se per gli elettroni atomici, che hanno spin  $1/2$ , non valesse il principio di Pauli, essi si condenserebbero in un unico stato quantico in prossimità del nucleo atomico, con una conseguente compressione di tutta la materia .

La densità della materia aumenterebbe enormemente , raggiungendo valori molto vicini a quelli della materia nucleare (collasso della struttura atomica).

## **D. Quali sono le "essenze" della materia che forma tutti gli oggetti e gli esseri viventi del Creato ?**

R. Tutti gli oggetti e gli esseri viventi del Creato, che hanno origine e si evolvono nello spazio-tempo, sono fatti di:

### **MASSA-ENERGIA,**

E' la massa-energia dei protoni, dei neutroni e degli elettroni che formano gli atomi della materia.

### **CARICHE FONDAMENTALI DELLA MATERIA,**

Le cariche fondamentali delle particelle che formano gli atomi sono di tre tipi e determinano la stabilità della materia nei confronti della conversione della massa in energia:

1) Cariche elettriche :

I leptoni (elettrone, muone, tauone) , i barioni (protone, iperone ed altre particelle con massa superprotonica), i mesoni (pioni, kaoni, ecc...) e le rispettive antiparticelle, hanno una carica elettrica pari, in valore assoluto, a  $1,6 \cdot 10^{-19} C$  (carica fondamentale  $e$ ).

Ai quark ed agli antiquark si assegna invece una carica elettrica frazionaria pari, a seconda del tipo di quark, a  $\pm (2/3) e$  o a  $\pm (1/3) e$ .

Le cariche elettriche sono le sorgenti delle forze elettromagnetiche, dalle quali dipendono la struttura atomica, l'energia di legame tra gli atomi che formano le molecole ed i cristalli, ed i fenomeni di assorbimento e di emissione dell'energia elettromagnetica (sotto forma di fotoni) da parte di atomi, molecole e cristalli.

2) Cariche subnucleari deboli (sapori):

- 6 dei quark su (up) , giù (down), strano (strange), incanto (charm), basso (bottom), alto (top);

- 6 dei leptoni (elettrone, neutrino elettronico, muone, neutrino muonico, tauone , neutrino tauonico).

Sono le sorgenti delle forze subnucleari deboli (forze di Fermi) ed elettrodeboli (di Salam, Weinberg, Glashow), da cui dipendono sia i cambiamenti di sapore dei quark (per es. da incanto a strano o da giù a su) e dei leptoni (per es. da elettrone a neutrino elettronico attraverso lo scambio di un bosone  $W$ ), sia i fenomeni di decadimento radioattivo  $\beta$  che si verificano nel nucleo atomico e che consistono nella trasformazione di un protone in un neutrone, con l'emissione di un positrone (elettrone positivo) e di un

neutrino, oppure in quella di un neutrone in un protone, con l'emissione di un elettrone e di un antineutrino.

### 3) Cariche subnucleari forti

Sono le sorgenti delle forze subnucleari forti da cui dipendono l'energia che lega protoni e neutroni nel nucleo atomico e le interazioni forti dei quark , degli antiquark e di tutti gli adroni (mesoni e barioni).

Nell'ambito del modello standard ( cromodinamica quantistica - Q.C.D) le cariche subnucleari forti sono le cariche di colore dei quark , dei rispettivi antiquark e dei gluoni (quanti del campo gluonico che determina le forze subnucleari forti cui sono soggetti i quark e gli antiquark) .

## **CAMPI QUANTISTICI.**

I campi quantistici associati alle forze agenti tra le particelle che formano gli atomi, sono di tre tipi:

1) Campo elettromagnetico, mediato dallo scambio di fotoni virtuali (non rilevabili sperimentalmente) tra particelle dotate di carica elettrica.

Poichè i fotoni che determinano la forza elettromagnetica (privi di carica elettrica e con massa a riposo nulla), hanno spin unitario, si tratta di un campo quantistico bosonico.

2) Campo elettrodebole (di Salam, Weinberg, Glashow) , associato allo scambio di bosoni virtuali ( $W^+$ ,  $W^-$  carichi e  $Z^0$  neutri), con massa a riposo diversa da zero, tra i leptoni e tra i quark e gli antiquark che costituiscono gli adroni.

Poichè i bosoni che determinano la forza debole hanno spin unitario, si tratta di un campo quantistico bosonico.

3) Campo gluonico (dal latino *glus* = colla) , mediato dallo scambio di otto tipi di gluoni virtuali.

I gluoni, che determinano la forza subnucleare forte alla quale sono soggetti i quark e gli antiquark, hanno massa nulla, sono privi di carica elettrica, ma sei di essi sono dotati di 2 cariche di colore.

Anche in questo caso, poichè i gluoni scambiati hanno spin unitario, si tratta di un campo quantistico bosonico.

# SCIENZA E FEDE

Scienza e fede: due sorelle da troppo tempo separate dalla mancanza di umiltà di molti scienziati e dalla scarsa diffusione delle conoscenze scientifiche.

Perchè ci si ostina a volerle tenere separate ?

Perchè non si riconosce che entrambe sono meravigliosi doni trasmessi da Dio agli uomini attraverso lo Spirito Santo ?

Si afferma che scienza e fede sono disgiunte perchè la scienza opera nel campo delle realtà immanenti e la fede in quello delle realtà trascendenti, ma non si vuole riconoscere che entrambe sono facce della stessa medaglia: la verità.

Perchè non considerare scienza e fede come due vie maestre convergenti entrambe verso Dio ?

Perchè negare che se l'uomo, percorrendo la via della scienza, riconosce con umiltà i propri limiti conoscitivi nei riguardi dell'intima essenza delle realtà immanenti, è portato necessariamente a riconoscere l'Assoluto ? Perchè non ammettere che le conoscenze scientifiche, che giorno per giorno si accumulano in tutti i laboratori del mondo grazie al continuo, sempre più ingente impiego di risorse umane ed economiche, non sono altro che conoscenze "di superficie" della realtà in cui viviamo, utili soltanto a costruire modelli *apparentemente coerenti* delle realtà immanenti che costituiscono l'oggetto dell'indagine scientifica ?

L'intima essenza dei fenomeni naturali ci sfugge, in quanto allo scienziato che si occupa di ricerca fondamentale, basta soltanto trovare leggi e modelli che risultino coerenti rispetto al metodo sperimentale (galileiano), garantendo soltanto la verifica sperimentale e la previsione dei fenomeni, senza riferimento alla loro intima essenza.

I metodi della ricerca scientifica fondamentale (pura), quella che ha come oggetto la scoperta della struttura del mondo fisico, senza riferimento ad alcuna applicazione, richiamano in sostanza quanto sosteneva il filosofo tedesco Emanuele Kant (Koenigsberg, 1724-1804), per il quale lo scienziato riesce ad acquisire soltanto una conoscenza fenomenica della natura, cioè una conoscenza relativa esclusivamente a ciò che appare, mentre gli sfugge l'intima essenza della realtà, che può essere soltanto intelligibile (noumeno), cioè soltanto pensata, al di fuori della struttura spazio-temporale che ci mostra i fenomeni come filtrati attraverso lenti colorate.

L'attualità del punto di vista kantiano può essere evidenziata dai seguenti esempi:

I Esempio - Incompatibilità tra la meccanica classica e la meccanica quantistica, connessa alla duplice natura della materia, sia corpuscolare (in meccanica classica) che ondulatoria (in meccanica quantistica o ondulatoria).

Esiste una meccanica specifica dei fenomeni del microcosmo, la meccanica quantistica di Heisenberg, Schroedinger, Dirac, completamente disgiunta dalla meccanica classica di Galileo-Newton, che è valida invece soltanto quando si considerano fenomeni meccanici ordinari, cioè relativi a corpi e sistemi materiali macroscopici, che possono essere visti, toccati, modificati e sottoposti a misure fisiche, con gli ordinari strumenti

meccanici (regoli graduati, bilance, dinamometri). Al contrario, i sistemi microscopici (atomi, molecole, cristalli), obbedendo al principio di indeterminazione di Heisenberg, impediscono all'osservatore di conoscere completamente e contemporaneamente la velocità e la posizione di ciascuna particella elementare (elettroni, protoni, neutroni) di cui sono costituiti; infatti, tenendo conto, in base al principio di complementarità di Niels Bohr, che la presenza dell'osservatore che esegue la misura altera completamente lo stato quantico, è sempre necessario eseguire due misure, in tempi diversi, la prima, per esempio, per misurare la velocità di una particella, ignorandone completamente la posizione, la seconda per misurarne la posizione, ignorandone completamente la velocità (è impossibile in meccanica quantistica definire la traiettoria di una particella).

II Esempio - Incompatibilità tra l'elettrodinamica classica e l'elettrodinamica quantistica, connessa alla duplice natura della radiazione elettromagnetica, sia ondulatoria (in elettrodinamica classica) che corpuscolare (in elettrodinamica quantistica).

Valgono considerazioni analoghe a quelle fatte per i fenomeni meccanici.

Infatti le radiazioni elettromagnetiche (luce, raggi infrarossi, raggi ultravioletti, onde radio, raggi X, raggi  $\gamma$ ) si comportano classicamente, come onde, nei fenomeni elettromagnetici macroscopici (riflessione, rifrazione, interferenza, diffrazione, polarizzazione), e come corpuscoli (fotoni o quanti di radiazione) nei fenomeni elettromagnetici microscopici (emissione ed assorbimento di radiazioni elettromagnetiche da parte di atomi, molecole e cristalli).

III Esempio - Incompatibilità tra la teoria della relatività generale (teoria della gravitazione) di Einstein e la meccanica quantistica.

Finora sono falliti tutti i tentativi di riformulare la teoria della gravitazione secondo i principi della meccanica quantistica.

Lo spazio-tempo curvo della teoria gravitazionale di Einstein è finora sfuggito a tutti i tentativi di quantizzazione ed appare sempre più evidente la difficoltà di formulare una teoria unificata (TOE - Theory Of Everything, teoria del tutto) delle quattro forze fondamentali della natura (gravitazionale, elettromagnetica, subnucleare debole e subnucleare forte).

Mentre infatti, per le forze elettromagnetiche e subnucleari deboli, è stato possibile dimostrare teoricamente (teoria elettrodebole di Weinberg, Salam, Glashow) e verificare sperimentalmente (Rubbia, 1983) che esse sono riconducibili ad un'unica forza (la forza elettrodebole scambiata dai bosoni vettori  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ ), rimangono escluse sia la forza subnucleare forte agente tra i quark per effetto dello scambio di gluoni, nell'ambito della teoria della cromodinamica quantistica, sia quella gravitazionale, la cui quantizzazione richiede lo scambio di quanti di energia gravitazionale (gravitoni). Le varie teorie di unificazione formulate per rappresentare in un unico schema le quattro forze (teoria delle superstringhe e teorie supersimmetriche o teorie del supermondo) non sono state fino adesso confermate sperimentalmente, mentre si spera di poter evidenziare con il nuovo collisore LHC (Large Hadron Collider del CERN) i fantomatici bosoni di Higgs,

che consentirebbero di spiegare i valori di massa delle particelle descritte dal modello standard.

IV Esempio - L'incapacità di spiegare il mistero della materia oscura.

Le più recenti osservazioni cosmologiche sulle galassie portano ad ammettere che le loro zone periferiche contengano una quantità di materia molto maggiore di quella visibile, al fine di potere spiegare la stabilità della loro struttura in rapporto alle elevate velocità orbitali periferiche.

Da queste osservazioni si deduce che nell'universo la quantità totale di materia visibile costituisce soltanto il 5 % della massa totale che è necessaria, in base alle attuali teorie cosmologiche, per giustificare le misure delle velocità di allontanamento delle galassie, ricavate dallo spostamento verso il rosso (red shift per effetto Doppler) delle loro righe spettrali.

Come è fatta la materia oscura? Si tratta di neutrini o di altre particelle esotiche, cioè di particelle che non costituiscono la materia ordinaria?

Gli esempi considerati possono dare solo una vaga idea dell'estrema complessità dei problemi che i fisici tentano di risolvere nel ricercare uno schema teorico unitario che consenta di inquadrare e descrivere in modo coerente gli innumerevoli aspetti della struttura del Creato, senza introdurre troppe subteorie specifiche, valide in particolari condizioni fisiche: la relatività generale per descrivere le grandi concentrazioni di materia (galassie ed ammassi di galassie), la fisica quantistica (meccanica quantistica, elettrodinamica quantistica e cromodinamica quantistica) per descrivere il microcosmo. Si ha quasi la sensazione che al crescere della complessità delle teorie formulate per studiare l'infinitamente piccolo, si schiudano scenari microcosmici di complessità sempre più grande, come se il micromondo fosse costituito da tante strutture, sempre più fini, l'una incapsulata dentro l'altra, fino al raggiungimento delle lunghezze tipiche della scala di Planck ( $4,1 \cdot 10^{-35} \text{m}$ ).

Il mondo fisico appare sempre più misterioso a mano a mano che l'energia dei nostri ultramicroscopi, i superacceleratori di particelle, diventa sempre più grande. Ecco venir fuori dal microcosmo un misterioso limite al bisogno di conoscenza dell'uomo, che imperterrito continua ad usare le "lenti colorate" dello spazio-tempo per sforzarsi di capire con strumenti mentali infinitamente inadeguati ciò che è posto al di là del limite di conoscenza fino al quale il Creatore gli ha consentito di arrivare. L'uomo si trova ad un bivio: continuare ad ostentare la sua *hybris* (orgoglio, tracotanza, presunzione) per tentare di capire ciò che non è più in grado di capire, oppure riconoscere umilmente, attraverso la fede, l'onnipotenza del Creatore dell'universo.

# I PIONIERI DELLA FISICA

## DA ARCHIMEDE A CARLO RUBBIA

### ARCHIMEDE

(Matematico e fisico siracusano (282 - 212 a. C.)

Archimede è l'unico grande fisico pregalileiano.

I suoi contributi allo sviluppo della meccanica ci sono giunti attraverso alcuni capitoli incompleti della sua opera "I principi della meccanica".

Si deve ad Archimede la teoria della leva, fondamentale per la realizzazione delle macchine semplici.

Ricordiamo in proposito la sua celebre frase "*Da mihi ubi consistam et terram movebo* - Datemi un punto d'appoggio e solleverò il mondo", riferita alla possibilità di equilibrare con la leva forze molto grandi con forze motrici tanto minori quanto maggiore sia la distanza tra il fulcro della leva ed il punto in cui esse vengono applicate. Con l'enunciazione del suo principio idrostatico (Un corpo immerso in un liquido riceve una spinta verso l'alto pari al peso del volume di liquido spostato), fonda la statica dei fluidi, la applica all'equilibrio dei galleggianti, ed inventa un metodo per la determinazione del peso specifico dei corpi.

E' considerato uno dei precursori del calcolo infinitesimale, per aver fornito un valore approssimato di  $\pi$ , compreso tra  $21/7$  e  $22/7$ , calcolato con il metodo dei poligoni inscritti e circoscritti ad una circonferenza, applicato in più fasi di approssimazioni successive, al crescere del numero dei lati.

### GALILEO GALILEI

(Matematico e fisico pisano (1564 - 1642)

E' il fondatore della scienza moderna, basata sul metodo sperimentale (induttivo-deduttivo), da lui assunto come fondamento imprescindibile del progresso scientifico.

Dopo Archimede, si registra un vuoto scientifico di circa 18 secoli.

Infatti il progresso scientifico fu rigidamente bloccato dall'atto di fede incondizionato nelle teorie aristoteliche, che si basavano esclusivamente sul metodo deduttivo, negando validità alla verifica sperimentale, che veniva esclusa a priori, ritenendo che per spiegare i fenomeni naturali bastasse non contraddire l'aristotelico "*ipse dixit*", e dedurre i fatti osservati dalle errate ed immodificabili premesse aristoteliche.

Il metodo sperimentale introdotto da Galilei consiste in una ciclicità del pensiero, in base alla quale, partendo dall'osservazione dei dati sperimentali di un fenomeno fisico, viene formulata un'ipotesi di legge, che consenta di spiegare i risultati osservati (fase induttiva: dall'esperimento alla legge); si verifica successivamente la legge ipotizzata, applicandola (fase deduttiva: dalla legge all'esperimento) alla descrizione del fenomeno osservato.

Variando di volta in volta i parametri di verifica del fenomeno fisico, è possibile controllare che le previsioni teoriche effettuate in base alla legge ipotizzata, trovino conferma nei risultati sperimentali che si ottengono.

Esempio: Si osserva il lancio di un proiettile, rilevandone le coordinate lungo la traiettoria parabolica, in corrispondenza di determinati istanti.

Si ipotizza una legge di moto che tenga conto sia del moto rettilineo uniforme in senso orizzontale, sia del moto verticale con accelerazione costante (accelerazione di gravità).

Scritte le equazioni del moto, si calcolano le coordinate del proiettile in determinati istanti, partendo dalla conoscenza della velocità e dell'angolo di lancio.

Si lancia di nuovo il proiettile, rilevandone le coordinate negli istanti prefissati per la verifica della legge.

Se i valori sperimentali delle coordinate coincidono, entro i limiti degli errori di misura, con i valori previsti teoricamente, l'ipotesi di legge si trasforma in legge, altrimenti si formula un'altra ipotesi.

Galileo applica il suo metodo di ricerca a numerosi fenomeni meccanici che erano stati sempre descritti empiricamente, senza ricorrere a leggi esprimibili con formule matematiche, ed è pertanto considerato il fondatore della meccanica come scienza, in quanto nega la validità delle tesi aristoteliche sul moto, in base alle quali gli studiosi pregalileiani ritenevano ciecamente, senza fare alcun esperimento, che una forza applicata ad un corpo ne determinasse la velocità e non, come Galilei sperimentalmente provò, l'accelerazione.

Galilei diede fondamentali contributi alla meccanica:

ricavò sperimentalmente le leggi del moto dei corpi in caduta libera, operando, forse, dalla sommità della torre di Pisa, e soprattutto servendosi del piano inclinato. Studiò il moto dei proiettili, enunciò le prime due leggi fondamentali della dinamica (il principio d'inerzia e la legge di proporzionalità tra forza ed accelerazione) ed il principio di relatività che porta il suo nome, e che riguarda l'invarianza delle leggi della meccanica per due osservatori in moto rettilineo ed uniforme l'uno rispetto all'altro.

Inventò inoltre il cannocchiale terrestre, che, a differenza del cannocchiale astronomico di Keplero, fornisce immagini non capovolte.

In campo astronomico scoprì le macchie solari (1611) e 4 dei 12 satelliti di Giove (Io, Europa, Ganimede e Callisto), e propugnò la teoria eliocentrica di Nicolò Copernico, in contrapposizione alla teoria geocentrica di Aristotele e Tolomeo, pagando di persona con gravi limitazioni della libertà, fino all'abiura davanti al Santo Uffizio, il suo sconfinato amore per la verità scientifica.

## ISACCO NEWTON

(Matematico e fisico inglese (1642 - 1727))

È il fisico che con la pubblicazione (1687) della sua principale opera "*Philosophiae naturalis principia mathematica*" continuò il lavoro di Galilei, fornendo le basi fisico-matematiche per lo sviluppo della meccanica moderna.

I contributi di Newton allo sviluppo della fisica sono, a dir poco, straordinari. Formulò il terzo principio della dinamica (principio di azione e reazione) ed enunciò la legge di gravitazione universale.

Inventò, indipendentemente da Leibnitz, il calcolo infinitesimale, che gli servì per formulare esattamente la seconda legge della meccanica e ricavare da essa e dalla legge di gravitazione universale le leggi di Keplero relative al moto dei pianeti.

Si tenga presente in proposito che Keplero, che non conosceva la legge di forza tra il Sole ed i pianeti, ricavò le sue tre leggi esclusivamente su basi matematiche, studiando i dati delle osservazioni astronomiche.

A Newton si devono inoltre notevolissimi contributi nel campo dell'ottica: la formula delle lenti, il telescopio a riflessione, la teoria corpuscolare della luce, lo studio delle frange d'interferenza in luce bianca attraverso lamine sottili, la scoperta della dispersione cromatica della luce bianca che si propaga attraverso un prisma (studio dello spettro della luce solare), e la simultanea scoperta della riconversione dei colori dello spettro in luce bianca, utilizzando un altro prisma (analisi e sintesi spettrale della luce bianca).

### ALESSANDRO VOLTA

Fisico (1745 - 1827)

E' considerato il fondatore dell'elettrologia.

A conclusione di una lunga serie di esperienze sulle tensioni originate dal contatto tra due metalli, e di una famosa disputa con il fisiologo bolognese Galvani in merito all'esistenza dell'elettricità animale, Volta realizzò nel 1799 la pila a colonna, il primo dispositivo elettrochimico capace di generare una corrente continua.

La realizzazione della pila diede avvio ad un secolo di ricerche fondamentali sui fenomeni elettrici e magnetici.

Prima di dedicarsi alle ricerche che lo condussero alla realizzazione della pila, si dedicò allo studio delle leggi che governano la dilatazione termica dei gas e realizzò una particolare pistola che sfruttava la violenta espansione di una miscela gassosa di idrogeno ed ossigeno, innescata dalla scintilla elettrica.

Gli si deve inoltre l'invenzione dell'elettroforo a disco, una speciale macchina elettrostatica ad induzione che gli consentiva di accumulare rapidamente considerevoli quantità di elettricità statica.

### MICHAEL FARADAY

Fisico inglese (1791 - 1867)

E' considerato il più grande sperimentatore nel campo dei fenomeni elettrici e magnetici. Nel 1831 ebbe l'idea di effettuare un esperimento inverso rispetto a quello di Oersted, che nel 1820 scoprì il campo magnetico generato dalla corrente elettrica, osservando la deviazione che subisce un ago magnetico, inizialmente in equilibrio nel

campo magnetico terrestre, ogni qual volta venga fatta passare la corrente elettrica in un filo posto in prossimità di esso.

Faraday scoprì che se ad un circuito elettrico chiuso si avvicina un magnete, durante l'avvicinamento del magnete si genera nel circuito una corrente indotta temporanea (principio dell'induzione elettromagnetica), e che anche durante l'allontanamento del magnete, si genera una corrente indotta temporanea, con verso opposto rispetto alla precedente.

La legge di Faraday, che vale per qualsiasi variazione temporale del flusso magnetico concatenato ad un circuito elettrico, è rappresentata matematicamente dalla formula di Neumann-Lenz, e sta alla base del funzionamento dei generatori elettrici e dei trasformatori.

Altri importanti contributi di Faraday riguardano lo schermo elettrostatico (gabbia di Faraday), le leggi dell'elettrolisi (scissione di un composto chimico in soluzione o allo stato fuso, per effetto della corrente elettrica), il concetto di campo con la relativa rappresentazione grafica (criterio di Faraday), basata sull'addensarsi e sul diradarsi delle linee di forza, ed il potere rotatorio del campo magnetico nei riguardi del piano di polarizzazione di un fascio luminoso che si propaghi in un qualsiasi mezzo otticamente inattivo, cioè incapace, in assenza del campo magnetico, di far ruotare il piano di polarizzazione di un raggio luminoso.

### ANDRE' MARIE AMPERE

Fisico francese (1775 - 1836)

Le sue ricerche sulle forze agenti tra circuiti elettrici e magneti lo condussero ad enunciare il teorema di equivalenza tra un ago magnetico ed una spira percorsa dalla corrente elettrica.

La sua profonda intuizione scientifica lo spinse ad estendere a livello microscopico la validità del suo teorema, facendo l'ipotesi che il campo magnetico generato da un magnete permanente fosse dovuto ad un grandissimo numero di correnti elettriche elementari, equivalenti ad altrettanti aghi magnetici microscopici.

La sua ipotesi fu confermata brillantemente, a circa un secolo di distanza, dopo la scoperta dello spin e dell'associato momento magnetico dell'elettrone, del protone e del neutrone e di tante altre particelle elementari, nell'ambito della meccanica quantistica.

Ampere fu inoltre il fondatore dell'elettrodinamica classica, per avere enunciato le leggi che descrivono le forze elettrodinamiche, attrattive o repulsive, che si esercitano tra due circuiti elettrici.

### GEORG SIMON OHM

Fisico tedesco (1787- 1854)

Abilissimo sperimentatore, è considerato uno dei fondatori dell'elettrotecnica, per avere scoperto la legge che stabilisce la proporzionalità diretta tra l'intensità della corrente

elettrica in un conduttore e la differenza di potenziale (tensione) esistente ai suoi estremi.

Enunciò contemporaneamente la legge che consente di calcolare per un dato conduttore la costante di proporzionalità tra tensione e corrente, che prende il nome di resistenza elettrica, e che dipende dalla resistenza specifica del metallo, dalla lunghezza e dalla sezione del conduttore.

### GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF

Fisico tedesco (1824-1887)

E' considerato uno dei fondatori dell'elettrotecnica, per avere scoperto le leggi dei circuiti elettrici.

Altri suoi contributi fondamentali riguardano l'ottica, per avere inventato ,assieme a Bunsen, lo spettroscopio, che serve ad analizzare le componenti cromatiche di una radiazione luminosa, e la termodinamica, nell'ambito della quale enunciò il principio fondamentale secondo il quale l'energia radiante specifica (per unità di superficie), emessa da un corpo mantenuto ad una data temperatura, è tanto maggiore quanto maggiore risulta l'energia radiante specifica assorbita dal corpo, a parità di temperatura.

### JAMES CLERK MAXWELL

Fisico e matematico scozzese (1831- 1879)

La sua genialità lo portò ad occuparsi di diverse branche della fisica.

Effettuando una rigorosa analisi fisico-matematica dei fenomeni elettrici e magnetici scoperti da Oersted, Faraday, Ampere ed Ohm, sviluppò dal 1864 al 1873 la teoria dell'elettromagnetismo, esposta nel trattato "Elettricità e magnetismo", fornendo attraverso le sue celebri equazioni la teoria unificata dei fenomeni elettrici e magnetici e giungendo a prevedere, esclusivamente su basi teoriche, che la luce è costituita da onde elettromagnetiche, per le quali valgono le stesse leggi di riflessione, rifrazione, interferenza, diffrazione e polarizzazione stabilite per le onde luminose, il che fu brillantemente dimostrato sperimentalmente, verso la fine del XIX secolo, da Heinrich Hertz.

Fondò inoltre la meccanica statistica, che gli servì per sviluppare, sulla base della sua formula di distribuzione delle velocità molecolari, la teoria cinetica dei gas, che è fondamentale per lo studio statistico dei sistemi termodinamici.

### WILLIAM THOMSON (LORD KELVIN)

Fisico inglese (1824 - 1907)

E' considerato uno dei fondatori della termodinamica, nel cui ambito introdusse la scala

assoluta delle temperature (scala Kelvin) .

Nel campo dell'elettromagnetismo studiò le correnti oscillatorie smorzate che hanno origine in un circuito resistivo-induttivo-capacitivo, e fornì la formula della relativa frequenza caratteristica.

Sviluppò inoltre la teoria della propagazione dei segnali elettrici nelle linee di trasmissione, ricavando le cosiddette "equazioni dei telegrafisti", fondamentali per la progettazione delle linee telegrafiche e telefoniche.

### HEINRICH RUDOLPH HERTZ

Fisico tedesco (1857-1894)

Fisico sperimentale di eccezionale valore, nel 1887, attraverso una serie di celebri esperienze sulle onde elettromagnetiche, dimostrò brillantemente che queste si propagano con la velocità della luce, obbedendo alle stesse leggi delle onde luminose.

A seguito delle esperienze di Hertz fu definitivamente dimostrata la natura elettromagnetica dei fenomeni luminosi, come aveva previsto Maxwell nel 1873, basandosi esclusivamente su considerazioni fisico-matematiche.

Nel 1887 scoprì, indipendentemente da Hallwachs, l'effetto fotoelettrico, che consiste nell'emissione di cariche elettriche negative (elettroni) da parte di una superficie metallica illuminata.

### WILHELM CONRAD ROENTGEN

Fisico tedesco (1845- 1923)

Nel 1895, effettuando esperienze sui raggi catodici, giunse alla scoperta dei raggi X, detti anche raggi Roentgen, che sono costituiti da onde elettromagnetiche con frequenza elevatissima e lunghezza d'onda compresa tra qualche miliardesimo di centimetro e qualche centomillesimo di centimetro, emesse durante l'urto di elettroni accelerati da elevate differenze di potenziale (da parecchie decine ad alcune centinaia di KV), contro gli atomi che costituiscono la materia, che vengono in tal modo eccitati verso livelli energetici superiori, per poi emettere l'energia acquisita, sotto forma di raggi X ( fotoni X) con lunghezza d'onda caratteristica dell'atomo bombardato (raggi X con spettro a linee).

I raggi X a spettro continuo vengono invece emessi ogni qual volta un elettrone di alta energia subisca un'accelerazione o una decelerazione, conformemente alle previsioni della teoria elettromagnetica classica, che implica l'emissione di onde elettromagnetiche da parte di un corpo carico che si muova di moto accelerato (o decelerato).

Fu il primo fisico cui fu conferito nel 1901 il premio Nobel, appena istituito.

### ANTOINE HENRI BECQUEREL

Fisico francese (1852-1908)

Nel 1896 , durante alcune ricerche sui materiali fosforescenti, tendenti a scoprire se essi emettessero radiazioni simili ai raggi X, sperimentando con varie sostanze, scoprì che i sali di uranio emettono radiazioni capaci di impressionare una lastra fotografica e di scaricare un conduttore carico di elettricità, anche dopo avere attraversato una lastra di alluminio.

Becquerel aveva scoperto per puro caso la radioattività naturale, che consiste nell' emissione da parte dei nuclei atomici di radiazioni ionizzanti di vario tipo: particelle  $\alpha$  , cioè nuclei di elio con carica elettrica positiva pari a 2 volte la carica dell'elettrone, particelle  $\beta$  (elettroni di alta energia) e raggi  $\gamma$ , di natura ondulatoria come i raggi X, ma molto più penetranti di questi.

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1903 assieme ai coniugi Curie.

### PIERRE CURIE

Fisico francese ( 1859-1906)

### MARIE SKLODOWSKA CURIE

Fisico polacco (1867-1934)

Successivamente alla scoperta di Becquerel, studiando la radioattività dei minerali di uranio, scoprirono che alcune varietà di pechblenda, pur contenendo una bassa percentuale di uranio, emettevano una radioattività molto più intensa di quella dell'uranio, il che fece loro supporre che contenessero un elemento dotato di una radioattività molto più intensa.

Dopo lunghe e faticosissime ricerche, che richiesero l'impiego di circa 6 tonnellate di pechblenda, riuscirono nel 1898 ad estrarre poco meno di un grammo del nuovo elemento, cui diedero il nome di radio.

Alla scoperta del radio seguì subito dopo quella del polonio, molto più radioattivo del radio.

Nel 1903 ricevettero il premio Nobel assieme a Becquerel.

### MAX PLANCK

Fisico tedesco (1856 - 1947)

E' il fondatore della fisica quantistica, per avere formulato il fondamentale postulato di quantizzazione dell'energia, in base al quale riuscì a dare soluzione all'annoso problema dello spettro dell'energia radiante emessa dal "corpo nero", che è un corpo ideale capace di assorbire tutta l'energia radiante che riceve.

Diversi illustri fisici, quali Rayleigh, Jeans e Wien avevano tentato invano di fornire una teoria che spiegasse le curve sperimentali dell'energia radiante emessa, a varie temperature, da un corpo mantenuto a temperatura costante ed assimilabile con buona approssimazione ad un corpo nero.

Le notevoli discrepanze tra teoria ed esperimenti furono brillantemente eliminate da

Planck nel 1901.

Planck postula che l'energia elettromagnetica venga assorbita esclusivamente in ragione di multipli di una quantità elementare, il quanto ("pacchetto"), la cui energia  $E$  è direttamente proporzionale alla frequenza  $f$  della radiazione,  $E = hf$ , dove  $h$  è una costante universale che porta il suo nome.

Successivamente estese il suo postulato a tutte le forme di energia, determinando una feconda rottura con la fisica classica, nell'ambito della quale non era stato possibile spiegare i risultati sperimentali.

Ebbe così origine la teoria dei quanti, che diede a sua volta impulso, nei primi decenni del XX secolo, alla creazione della meccanica quantistica e dell'elettrodinamica quantistica, su cui si basano la teoria quantistica dei campi e le attuali teorie (teoria elettrodebole e cromodinamica quantistica), cui fa riferimento il "modello standard" del microcosmo.

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1918.

### ALBERT EINSTEIN Fisico tedesco (1879-1955)

Le sue geniali teorie, che rivoluzionarono la fisica nei primi anni del XX secolo, forniscono le basi per la comprensione delle frontiere della fisica contemporanea.

Trasferitosi in Svizzera nel 1902, dopo essere stato assunto come esperto presso l'ufficio brevetti di Berna, si dedicò con eccezionale spirito critico all'analisi delle principali questioni scientifiche che avevano messo in crisi la fisica classica, dopo la mirabile unificazione maxwelliana (1873) dei fenomeni elettrici e magnetici.

Nel 1905 Einstein, sottoponendo a profonda analisi i concetti di spazio e di tempo e tenendo conto dell'esito negativo delle numerose esperienze effettuate nel 1887 dai fisici statunitensi Michelson e Morley, che dimostrarono l'inesistenza dell'etere, ipotetico mezzo introdotto dai fisici per spiegare la propagazione delle onde elettromagnetiche, si convinse della necessità di postulare sia l'indipendenza della velocità  $c$  della luce (e di qualsiasi altra radiazione elettromagnetica) nel vuoto ( $c = 300000$  k/s) dal moto della sorgente e dal sistema di riferimento di chi osserva un fenomeno fisico, sia l'estensione del principio di relatività di Galileo, limitato inizialmente ai soli fenomeni meccanici, a tutti i fenomeni fisici.

Per far questo, utilizzò delle formule di trasformazione che Lorentz aveva introdotto per dimostrare l'invarianza delle equazioni di Maxwell rispetto a due osservatori in moto rettilineo ed uniforme l'uno rispetto all'altro, e costruì la "teoria della relatività ristretta (o speciale)", così denominata perchè con essa è possibile trattare in modo nuovo tutti i fenomeni fisici che si svolgono in sistemi di riferimento non soggetti a moti accelerati ed in assenza di campi gravitazionali, considerando il tempo non più in senso assoluto, cioè indipendente dall'osservatore, ma legato allo spazio attraverso le trasformazioni di Lorentz.

Nello stesso periodo (1905), studiando la teoria dei quanti, enunciata da Planck in

relazione al problema dell'energia radiante emessa dal corpo nero, pensò di utilizzarla per spiegare le caratteristiche dell'effetto fotoelettrico, scoperto da Hertz e Hallwachs nel 1887, e consistente nell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica illuminata.

La sua teoria, basata sull'ipotesi dei fotoni, quanti (pacchetti) di energia elettromagnetica di entità proporzionale alla frequenza della radiazione luminosa, consentì di spiegare completamente tutte le caratteristiche dell'emissione fotoelettrica, altrimenti del tutto inspiegabili applicando le leggi della fisica classica.

Per la sua teoria, che ampliò la teoria di Planck, dando origine alla fisica quantistica, gli fu conferito il premio Nobel nel 1921.

L'ipotesi dell'esistenza dei fotoni fu brillantemente confermata nel 1923 da Compton, che riuscì ad identificare i fotoni X diffusi, con cambiamento di lunghezza d'onda, dagli elettroni atomici.

Nello stesso periodo Einstein contribuì inoltre in modo decisivo alla spiegazione dei continui, caotici, movimenti delle particelle di una soluzione colloidale (moti browniani), dovuti all'agitazione termica.

Tra il 1905 ed il 1916 Einstein estese la teoria della relatività, elaborando la geniale "teoria della relatività generale", che è in sostanza una nuova teoria della gravitazione che spiega i moti dei corpi celesti su basi geometriche, facendo dipendere dalla massa la curvatura dello spazio-tempo.

La teoria della relatività generale, pubblicata nel 1916, consente di spiegare effetti di fondamentale importanza per l'astrofisica e la cosmologia, quali lo spostamento gravitazionale verso il rosso (distinto da quello dovuto al moto, per l'effetto Doppler) delle righe spettrali della luce emessa da una stella, la curvatura subita dai raggi luminosi che si propagano in prossimità di una stella e l'esistenza dei buchi neri, corpi celesti invisibili derivanti dalla contrazione di una stella nella fase finale della sua evoluzione, e caratterizzati da concentrazioni di materia così grandi da impedire perfino l'emissione dei fotoni.

Einstein dedicò il resto della sua vita alla ricerca di una teoria relativistica comprendente i fenomeni gravitazionali e quelli elettromagnetici, impostando le premesse per la ricerca di una teoria unitaria comprendente tutte le forze fondamentali della natura (gravitazionale, elettromagnetica, debole e forte).

La teoria unitaria delle forze fondamentali costituisce tuttora l'obiettivo di una straordinaria e stimolante sfida per i fisici del XXI secolo.

## LORD ERNEST RUTHERFORD

Fisico inglese (1871-1937)

Sono fondamentali le sue ricerche sui fenomeni radioattivi, effettuate dal 1897 al 1907 in collaborazione con J.J. Thomson e F.Soddy, per determinare le leggi di decadimento ( $\alpha$  e  $\beta$ ) degli elementi radioattivi delle tre famiglie naturali (dell'uranio-radio, del torio

e dell' attinio). Nell'ambito di ciascuna serie il capostipite, che è l'elemento con la vita media più lunga (alcuni miliardi di anni), decadendo si trasforma nell'elemento radioattivo successivo, e così via attraverso tutti gli elementi instabili consecutivi, fino alla formazione di un elemento stabile (un isotopo del piombo). La sua principale scoperta riguarda il nucleo atomico.

Nel 1911 Rutherford, dopo due anni di ricerche effettuate assieme Geiger e Marsden, bombardando sottili foglie d'oro con particelle  $\alpha$  ed esaminando la distribuzione angolare delle particelle diffuse in tutte le direzioni, si rese conto dell' impossibilità di accettare il modello atomico proposto nel 1902 da J.J. Thomson, che immaginava gli elettroni dispersi all' interno di una sfera dotata di carica elettrica positiva, distribuita uniformemente ed uguale a quella negativa dovuta agli elettroni, in modo tale che fosse mantenuta la neutralità elettrica .

I dati sperimentali erano invece compatibili con l'esistenza di un nucleo positivo contenente quasi tutta la massa dell'atomo, in quanto gli eventi relativi alla diffusione delle particelle  $\alpha$  a grandi angoli o addirittura, sia pure con scarsa frequenza, all'indietro, erano compatibili soltanto con un nucleo positivo massiccio.

Rutherford enunciò pertanto la scoperta del nucleo atomico, dando un impulso decisivo allo sviluppo della fisica atomica.

A Rutherford va inoltre attribuito il merito di avere prodotto la prima reazione nucleare artificiale.

Infatti, nel 1919 , bombardando con particelle  $\alpha$  un materiale contenente azoto, ottenne come prodotti di reazione un isotopo dell' ossigeno e nuclei d'idrogeno (protoni), dei quali potè misurare l'energia cinetica.

Nel 1908 gli fu conferito il premio Nobel per la chimica.

## NIELS BOHR

Fisico danese (1885-1951)

Allievo di J.J. Thomson e Rutherford, nel 1913 elaborò la prima teoria della struttura atomica, basandosi sul modello atomico di Rutherford ed applicando all'atomo più semplice, l'atomo d'idrogeno, le leggi della meccanica classica ed alcuni postulati che tenevano conto della quantizzazione dell'energia e del momento angolare dell'unico elettrone orbitante attorno al nucleo (protone), carico positivamente.

Il modello atomico che ne derivò, prese il nome di modello di Bohr-Rutherford, e consentì di disporre di una teoria atomica elementare, che rappresentò tuttavia il primo importante passo per la costruzione della fisica atomica.

Fondò la scuola di fisica di Copenaghen, presso la quale si formarono negli anni '20 i più illustri esponenti della fisica atomica europea.

Nel campo della fisica nucleare introdusse il modello a goccia del nucleo atomico, di fondamentale importanza per lo studio della fissione dell'uranio e del plutonio con neutroni lenti.

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1922.

## LOUIS-VICTOR PIERRE RAYMOND DE BROGLIE

Fisico francese (1892- 1987)

Nel formulare l'ipotesi (1924) del comportamento ondulatorio delle particelle elementari, che diede impulso alla creazione della meccanica quantistica di Schroedinger (detta anche meccanica ondulatoria), fu guidato dall'analogia con il dualismo ondulatorio-corpuscolare ipotizzato da Einstein (teoria dei fotoni, 1905) per spiegare l'effetto fotoelettrico.

De Broglie avanza l'ipotesi che, per analogia con quanto si verifica per la radiazione elettromagnetica, che nell'interazione con gli oggetti del microcosmo (atomi e particelle), evidenzia proprietà corpuscolari, in quanto i fotoni (pacchetti di energia elettromagnetica) si comportano come se fossero vere e proprie particelle materiali, anche per la materia del microcosmo debba essere possibile evidenziare proprietà ondulatorie, e che pertanto a qualsiasi particella dotata di quantità di moto  $p = mv$ , sia associata un'onda di probabilità con lunghezza  $\lambda = h/p$ , dove  $h$  è la costante universale di Planck che caratterizza i fenomeni fisici del microcosmo.

L'ipotesi di De Broglie fu verificata sperimentalmente (1927) da Davisson e Thomson , che evidenziarono con esperimenti di diffrazione il comportamento ondulatorio degli elettroni, ottenendo fotografie degli anelli di diffrazione molto simili a quelle ottenute da Laue e Bragg nei primi anni '10, con i raggi X, che sono onde elettromagnetiche.

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1929.

## WERNER HEISENBERG

Fisico tedesco (1901-1976)

Dopo la laurea fu allievo di Bohr presso la scuola di Copenaghen.

Nel 1925, indipendentemente da Schroedinger formulò la meccanica quantistica, introducendo il formalismo delle matrici.

Celebre il principio d' indeterminazione , enunciato nel 1927 come principio basilare per lo studio dei fenomeni fisici del microcosmo.

Fu tra i fondatori dell'elettrodinamica quantistica.

Sono fondamentali le sue ricerche nel campo della teoria quantistica dei campi e della fisica delle particelle elementari.

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1932.

## ERWIN SCHROEDINGER

Fisico austriaco (1887-1961)

Nel 1925, indipendentemente da Heisenberg, formulò la meccanica quantistica, introducendo come equazione fondamentale la sua equazione d'onda, la cui soluzione è la funzione d'onda.

L'equazione di Schroedinger, detta anche equazione delle onde di probabilità, descrivendo l'atomo come una nuvola di probabilità, consente di calcolare la probabilità di trovare l'elettrone in un punto di date coordinate rispetto al nucleo.  
Gli fu conferito il premio Nobel assieme a Dirac nel 1933.

### PAUL ANDRIEN MAURICE DIRAC

Fisico inglese (1902-1984)

Dopo la pubblicazione dei lavori di Heisenberg e Schroedinger, fornì nel 1928 una versione relativistica dell'equazione d'onda, feconda di fondamentali risultati nel campo della fisica delle particelle elementari con spin 1/2 (elettrone, muone, neutrino, protone), in quanto implica l'esistenza di antiparticelle (positrone, antimuone, antineutrino, antiprotone), la prima delle quali, il positrone, fu scoperta nel 1932 da Anderson negli sciami di particelle della radiazione cosmica.

L'equazione d'onda relativistica è fondamentale per lo sviluppo dell'elettrodinamica quantistica, di cui Dirac è considerato uno dei fondatori.

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1933 assieme a Schroedinger.

### ENRICO FERMI

Fisico (1901-1954)

Straordinaria figura di fisico teorico e sperimentale.

Effettuò ricerche di importanza basilare in tutti i settori della fisica, apportando contributi la cui genialità è riconosciuta da tutta la comunità scientifica internazionale.

Dopo aver lavorato con alcuni dei più illustri fisici del XX secolo, a Gottinga e Leida, ed essere stato nominato accademico d'Italia a soli 27 anni, dal 1923 al 1938, anno del suo trasferimento negli Stati Uniti, apportò fondamentali contributi alla statistica quantistica delle particelle elementari con spin semidispari, denominate in suo onore fermioni, alla struttura atomica, alla teoria delle forze deboli (1934), dette anche forze di Fermi, che determinano la radioattività  $\alpha$ , ed alla produzione di parecchi isotopi radioattivi artificiali ottenuti bombardando i nuclei con neutroni lenti.

Le sue ricerche sui neutroni, effettuate presso l'Università di Roma (1934-1938), furono basilari per la scoperta della fissione nucleare ad opera di Hahn e Strassman (1939).

Negli Stati Uniti realizzò e collaudò (1942), nell'ambito del progetto Manhattan, il primo reattore (pila) nucleare, partecipando alla realizzazione della bomba atomica.

Nel periodo postbellico, trascorso prevalentemente presso l'Università di Chicago, si dedicò prevalentemente a ricerche di fisica delle alte energie, sia studiando la radiazione cosmica, sia utilizzando i primi acceleratori di particelle, derivati dal ciclotrone di Lawrence, per lo studio degli urti tra pioni e nucleoni, unitamente ai primi calcolatori elettronici. Nel 1938 gli fu conferito il premio Nobel per le sue ricerche sui neutroni.

## WOLFGANG PAULI

Fisico austriaco (1900-1958)

La sua più importante scoperta è il principio di esclusione, noto anche come principio di Pauli.

Nel 1925, a seguito della formulazione della meccanica quantistica da parte di Heisenberg e Schroedinger, studiando la struttura atomica che veniva descritta dalla nuova meccanica, si convinse che, per potere rappresentare i livelli energetici degli atomi in modo coerente con i dati sperimentali ricavati dagli spettri ottici ed a raggi X, fosse indispensabile dedurre l'impossibilità per due elettroni atomici di occupare lo stesso stato, individuato da quattro numeri quantici: uno collegato all'energia, due al momento angolare orbitale ed il rimanente al momento angolare intrinseco (spin).

Se due elettroni, in particolare, possiedono tre numeri quantici uguali, devono avere spin orientati in versi opposti.

Il suo principio, che è una legge di natura valida per tutte le particelle elementari con spin semidispari, è fondamentale per spiegare non soltanto la struttura atomica dei vari elementi chimici, ma il comportamento di qualsiasi sistema quantistico le cui particelle siano fermioni, cioè obbediscano alla statistica di Fermi-Dirac; in particolare esso è indispensabile per spiegare la conducibilità elettrica dei metalli.

La sua genialità di fisico teorico gli consentì di prevedere nel 1931 l'esistenza del neutrino, particella con massa e carica elettrica nulle, e di spiegare così l'apparente violazione del principio di conservazione dell'energia, rilevata misurando la strana distribuzione energetica degli elettroni nei fenomeni di decadimento radioattivo  $\beta$ .

Sulla sua ipotesi dell'esistenza del neutrino Enrico Fermi costruì la sua teoria delle forze deboli (1934).

Il neutrino, difficilissimo da rivelare per la mancanza di carica elettrica e per la massa, che attualmente, secondo le più recenti ricerche, si ritiene sia piccolissima, ma non proprio nulla, è in grado, per es., di attraversare tutta la Terra senza interagire e svolge un ruolo fondamentale nel controllare la velocità delle reazioni di fusione termonucleare che avvengono nel sole e nelle altre stelle.

I neutrini sono stati rivelati per la prima volta da Cowan e Reines, nel 1956, studiando le interazioni deboli indotte in un reattore nucleare dai neutrini generati dal decadimento radioattivo dei frammenti di fissione.

E' considerato uno dei fondatori dell'elettrodinamica quantistica.

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1945.

## EUGENE PAUL WIGNER

Fisico statunitense di origine ungherese (1902-1995)

E' considerato, dopo Fermi, uno dei più grandi fisici nucleari. Verso la fine degli anni '30 studiò l'applicazione della meccanica quantistica al nucleo atomico, scoprendo fondamentali teoremi che riguardano le proprietà di simmetria spazio-temporale delle

forze nucleari, e sono applicabili anche in altri settori della fisica, in particolare nella fisica delle particelle elementari.

Il teorema dell'invarianza temporale stabilisce che i fenomeni fisici del microcosmo si svolgono allo stesso modo quando si va indietro nel tempo; si ha cioè la reversibilità temporale a livello microscopico, che è valida per tre delle quattro forze fondamentali.

Nel caso particolare delle interazioni elettromagnetiche, la validità del teorema di Wigner è stata verificata sperimentalmente (1964) dal fisico Antonino Zichichi.

I contributi di Wigner allo studio della struttura nucleare sono di importanza fondamentale .

Collaborò attivamente con Fermi al progetto Manhattan per la costruzione della prima bomba atomica.

Nel 1963 gli fu conferito il premio Nobel assieme a Maria Goeppert-Mayer e J. Hans D. Jensen.

### SIN-ITIRO TOMONAGA

Fisico giapponese (1906-1979)

### JULIEN SCHWINGER

Fisico statunitense (1918-1994)

### RICHARD FEYNMAN

Fisico statunitense (1918-1988)

Le loro ricerche hanno riguardato il perfezionamento dell'elettrodinamica quantistica, introdotta verso la fine degli anni '20 da Dirac, Heisenberg, Jordan e Pauli, che applicarono i principi della meccanica quantistica all'interazione tra le particelle elementari cariche ed il campo elettromagnetico.

La teoria originaria presentava parecchi inconvenienti derivanti dal non aver considerato le interazioni delle particelle cariche (elettroni, positroni, muoni, protoni, ecc...) con tutte le coppie virtuali particella-antiparticella che caratterizzano lo stato di vuoto dei campi quantistici (polarizzazione del vuoto); per tale motivo i calcoli davano luogo a contributi infiniti, fisicamente non accettabili.

Tomonaga, Schwinger e Feynman elaborarono, indipendentemente l'uno dall'altro, particolari tecniche di calcolo e di rinormalizzazione, fino a rendere l'elettrodinamica quantistica una delle teorie più accurate che siano mai state sviluppate.

I risultati della teoria furono brillantemente confermati dai risultati sperimentali (Lamb shift delle righe spettrali dell'atomo di idrogeno - 1947) collegati alla fisica virtuale, che descrive le fluttuazioni dello stato di vuoto dei campi quantistici.

Le tecniche di calcolo utilizzate per perfezionare la Q.E.D. (Quantum Electrodynamics), sono state successivamente utilizzate, nell'ambito del modello standard, sia nella teoria elettrodebole (la teoria unificata delle forze elettromagnetiche e deboli), sia nella cromodinamica quantistica (Q.C.D. - Quantum Chromo-Dynamics) ,che studia le

interazioni forti tra i quark, all'interno degli adroni. Fu conferito loro il premio Nobel nel 1965.

MURRAY GELL-MANN  
Fisico statunitense (1929)

Nel 1964, nell'ambito della ricerca di uno schema di classificazione delle nuove particelle elementari, mesoni e barioni, che erano state scoperte a partire dal 1947, propose uno schema unitario di classificazione, basato su ottetti di particelle, che venivano considerate non più elementari, ma costituite dall'unione di due o tre particelle veramente elementari, con carica frazionaria ( $2/3$  o  $1/3$  di quella dell'elettrone) e spin  $1/2$ , cui diede il misterioso nome di "quark".

I tre quark indicati con i simboli u (up), d (down) ed s (strange) si associano tra loro a gruppi di 3 per formare i barioni (protone, neutrone e particelle con massa maggiore di quella protonica), mentre per formare i mesoni si considerano coppie quark-antiquark, essendo gli antiquark  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{s}$  le antiparticelle dei quark u,d,s.

Nell'ambito del suo schema unitario, Gell-Mann riuscì inoltre a prevedere l'esistenza e la massa di un nuovo barione,  $\Omega^-$ , che fu scoperto poco dopo, fornendo una brillante conferma della validità del modello a 3 quark, che costituì la base per lo sviluppo dell'attuale "modello standard".

Gli fu conferito il premio Nobel nel 1969.

SHELDON LEE GLASHOW  
Fisico statunitense (1932)

ALVIN WEINBERG  
Fisico statunitense (1933)

ABDUS SALAM  
Fisico pakistano (1926 - 1996)

Sin dai primi anni '60, indipendentemente l'uno dall'altro, nel contesto di un lavoro di unificazione, il cui primo esempio risale a Maxwell, che trattò unitariamente i fenomeni elettrici e magnetici, elaborarono la teoria unificata delle forze elettromagnetiche e deboli (teoria elettrodebole), utilizzando ed estendendo le tecniche di calcolo introdotte da Feynmann e Schwinger per il perfezionamento dell'elettrodinamica quantistica, ed ipotizzando, analogamente a quanto fece il fisico giapponese Yukawa nel 1935 per la teoria delle interazioni forti, lo scambio di tre particelle virtuali pesanti, mediatrici della forza elettrodebole.

Le suddette particelle, indicate con i simboli  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , sono dei bosoni vettoriali intermedi con spin unitario e massa circa cento volte maggiore di quella del protone.

Un valore così elevato della massa-energia dei tre bosoni vettoriali virtuali, mediatori dell'interazione, rende conto, per analogia con le stime fatte da Yukawa relativamente alla massa del mesone  $\pi$  (pione), del cortissimo raggio d'azione della forza debole (minore di un decimilionesimo di miliardesimo di centimetro), imposto dai principi di indeterminazione e di conservazione dell'energia.

Con lo scambio dei bosoni carichi  $W^+$  e  $W^-$  si spiega anche il decadimento  $\beta$ , la cui prima teoria fu sviluppata da Enrico Fermi nel 1934.

Per esempio, in un nucleo atomico, la trasformazione di un neutrone in un protone con l'emissione di un elettrone e di un antineutrino, si spiega con lo scambio tra neutrone e protone, di un bosone virtuale  $W^-$ , che decade in una coppia elettrone-antineutrino; analogamente si spiega, con lo scambio di un bosone virtuale  $W^+$ , il decadimento  $\beta$  con emissione di positroni (interazioni con corrente debole carica).

Il bosone neutro  $Z^0$  serve invece a mediare la forza debole nei casi in cui non via trasferimento di carica elettrica (interazione con corrente debole neutra), per esempio nell'interazione tra un elettrone ed un positrone che scompaiono dando origine ad un bosone  $Z^0$ , che subito dopo decade in una coppia muone-antimuone.

Dimostrarono che le forze elettromagnetiche e le forze deboli derivano da un'unica forza, detta forza elettrodebole che, per rottura di simmetria alle basse energie, si differenzia in esse.

Si verifica infatti sperimentalmente che la forza debole aumenta al crescere dell'energia, fino ad assumere a circa 100 GeV la stessa intensità della forza elettromagnetica.

Fu conferito loro il premio Nobel nel 1979.

## CARLO RUBBIA

Fisico (1934)

## SIMON VAN DER MEER

Fisico olandese (1925)

Carlo Rubbia, che già nei primi anni '70 aveva contribuito presso il CERN (Ginevra) ad importanti esperimenti di rivelazione delle correnti deboli neutre prodotte da intensi fasci di neutrini, programmò tutta una serie di importanti esperimenti finalizzati alla rivelazione dei bosoni vettoriali intermedi previsti dalla teoria elettrodebole.

Le eccezionali capacità di ricercatore e di manager di Carlo Rubbia, che si avvale della preziosa esperienza di Van Der Meer nel riutilizzare, potenziandoli, i rivelatori e gli acceleratori di particelle esistenti, consentirono di realizzare in tempi brevi l'intero progetto di ricerca e di ottenere nel 1983 abbondanti ed evidenti prove dell'esistenza dei bosoni  $W$  e  $Z^0$  e della validità della teoria elettrodebole.

Fu conferito loro il premio Nobel nel 1984.

# L'ESPLORAZIONE DEL MICROCOSMO NEL XX SECOLO

## DALLE RICERCHE SUI RAGGI CATODICI AL MODELLO STANDARD

### GLI ESPERIMENTI SUI RAGGI CATODICI

L'esplorazione del micromondo ebbe inizio nella seconda metà del XIX secolo con lo studio della scarica elettrica nei gas rarefatti. Erano già disponibili dispositivi di laboratorio, noti come rocchetti di Ruhmkorff, capaci di generare alte tensioni, dell'ordine di parecchie decine di kV, sfruttando i fenomeni d'induzione elettromagnetica scoperti da Faraday. Era pertanto molto agevole studiare le caratteristiche della scarica elettrica nei tubi (di Crookes) contenenti gas rarefatti (alla pressione di qualche decimillesimo di mm di mercurio), e parecchi fisici si dedicarono allo studio delle caratteristiche dei cosiddetti "raggi catodici", emessi dal catodo dei tubi a scarica. Nel corso di tali ricerche furono accertate le proprietà dei "raggi catodici" di sviluppare calore nell'urto contro placchette metalliche disposte sulla loro traiettoria all'interno dei tubi, e di essere deviati sia da campi elettrici, applicati ai tubi (di Braun) attraverso coppie di placchette metalliche, sia da campi magnetici generati da magneti o da elettromagneti posti in prossimità dei tubi. Venne inoltre accertata la proprietà di tali "raggi" di propagarsi in linea retta dal catodo all'anodo, in assenza di campi elettrici e magnetici, e di produrre una fluorescenza verdastra nell'impatto con il vetro del tubo.

### LA SCOPERTA DEI RAGGI X (1895)

Studiando sperimentalmente i raggi catodici il fisico tedesco Roentgen (Nobel 1901) (Università di Karlsruhe), scoprì un nuovo tipo di raggi, da lui denominati X per la loro natura misteriosa, prodotti dalla decelerazione subita dalle particelle catodiche nell'urto contro il vetro del tubo. Si sa infatti dalla teoria dell'elettromagnetismo che una carica elettrica che subisca un'accelerazione o una decelerazione, irradia onde elettromagnetiche. I raggi X non essendo deviati, a differenza dei "raggi catodici", né da campi elettrici, né da campi magnetici, sono appunto, come fu accertato con diverse esperienze, radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa tra qualche milionesimo di centimetro e qualche centomillesimo di centimetro. Roentgen scoprì per caso i raggi X osservando la fluorescenza da essi indotta nei sali di bario, ed osservò inoltre la loro caratteristica più importante, quella di impressionare la lastra fotografica.

## LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITA' NATURALE (1896)

Il fisico francese Becquerel (Nobel 1903) scoprì la radioattività naturale, avendo osservato la proprietà dei sali di uranio di impressionare la lastra fotografica . Scopri', in particolare, sperimentando in presenza di un campo magnetico, che i sali di uranio emettono tre tipi di radiazioni :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ; le prime due di natura corpuscolare, l'ultima di natura ondulatoria. Negli anni immediatamente successivi altri fisici scoprirono che le particelle  $\alpha$  sono dotate di cariche positive , mentre le particelle  $\beta$  sono cariche negativamente. Si accertò inoltre che la radiazione  $\gamma$ , capace di attraversare strati di piombo di notevole spessore, è costituita da onde elettromagnetiche caratterizzate da una lunghezza d'onda molto minore di quella dei raggi X. Ai coniugi Pierre e Maria Curie , ai quali fu conferito il premio Nobel assieme a Becquerel, si deve la scoperta di un elemento, il radio, dotato di una radioattività molto più intensa di quella dell'uranio, dal quale deriva per decadimento radioattivo attraverso una serie di elementi radioattivi il cui capostipite è l'uranio . Si scoprì inoltre che gli elementi radioattivi contenuti nelle rocce della crosta terrestre appartengono a tre serie naturali di decadimento radioattivo, aventi per elementi capostipiti l'uranio, il torio e l'attinio e per elementi finali isotopi del piombo. In altri termini, nell'arco dei 4,5 miliardi di anni di età della Terra, dagli elementi capostipiti di ciascuna serie, per emissione di particelle radioattive e di radiazione  $\gamma$  si sono formati , in condizioni di equilibrio, tutti i successivi elementi, fino al piombo. Infatti, determinando le attuali concentrazioni dei vari elementi nelle rocce e misurando la velocità di decadimento di ciascun elemento, si risale all'età della Terra .

## LA SCOPERTA DELL' ELETTRONE (1897)

Tra le fondamentali scoperte fisiche che caratterizzano gli ultimi anni del XIX secolo, ricordiamo la misura del rapporto tra la carica elettrica e la massa dei "raggi catodici", effettuata nel 1897 dal fisico inglese Joseph John Thomson (Nobel 1906), che accertò definitivamente la loro natura corpuscolare, adoperando il termine "elettrone" per indicare la particella fondamentale con carica negativa, emessa dagli atomi che formano la materia.

"Gli atomi sono analoghi a microscopici sistemi planetari". E' questa una frase molto usata per spiegare con un' analogia la struttura dell'atomo, paragonando il Sole al nucleo atomico, la cui massa è quasi uguale a quella dell'intero atomo , ed i pianeti in orbita intorno al Sole agli elettroni che ruotano intorno al nucleo. Si sa che il nucleo contiene particelle fondamentali dette collettivamente nucleoni, cioè protoni e neutroni: i primi circa 1840 volte più pesanti degli elettroni e dotati di carica elettrica positiva, i secondi aventi una massa quasi uguale a quella dei protoni e privi di carica elettrica. Gli elettroni che orbitano intorno al nucleo , dotati di una carica elettrica negativa uguale in

modulo a quella del protone, formano la "corteccia" degli atomi e determinano, attraverso le forze elettromagnetiche, le proprietà meccaniche, termiche, chimiche, elettriche e magnetiche della materia (metalli, semiconduttori e metalloidi) nei vari stati d' aggregazione (solido, liquido, gassoso).

## L' IPOTESI DI MAX PLANCK SULLA QUANTIZZAZIONE DELL'ENERGIA RADIANTE DEL CORPO NERO (1900)

In termodinamica si definisce corpo nero un corpo ideale capace di assorbire tutta la radiazione termica incidente su di esso e, viceversa, di emettere tutta la radiazione termica corrispondente alla sua temperatura assoluta (in gradi Kelvin). Un corpo nero in pratica si realizza con un involucro metallico con la superficie interna riflettente, mantenuto a temperatura costante ed avente un forellino attraverso il quale venga emessa o assorbita la radiazione termica (radiazione infrarossa), il cui spettro continuo può essere esaminato con speciali spettroscopi dotati di lenti e prismi speciali, atti a trasmettere la radiazione infrarossa, e di sensori all'infrarosso che forniscono un segnale elettrico di ampiezza proporzionale all'intensità della radiazione infrarossa .

Un problema teorico di notevole importanza, verso la fine del XIX secolo, era quello di fornire una legge che riuscisse a rappresentare l'andamento delle curve sperimentali osservate. Parecchi fisici ,tra i quali Rayleigh, Jeans e Wien svilupparono teorie incomplete, basate sull'elettromagnetismo classico e sulla termodinamica, ma nessuno di loro riuscì a trovare la soluzione teorica completa e definitiva. Nel 1900 una soluzione innovativa fu fornita dal fisico tedesco Max Planck (Nobel 1918), considerato per questo il padre della teoria dei *quanta*: Planck ipotizzò per la prima volta la quantizzazione dell'energia elettromagnetica associata agli oscillatori armonici (cariche elettriche dotate di moto oscillatorio armonico) .In particolare,impostò il calcolo del potere emissivo del corpo nero ad una data temperatura T, considerando l'energia assorbita o emessa da ciascun oscillatore armonico , multipla di una quantità elementare  $E = h f$ , essendo f la frequenza dell'onda elettromagnetica emessa o assorbita ed h una costante universale, nota come costante di Planck. La sola introduzione di questa ipotesi bastò a Planck per risolvere definitivamente il problema del corpo nero, fornendo le formule in grado di rendere conto delle curve ottenute sperimentalmente. Furono poste in tal modo le premesse teoriche per lo sviluppo di una nuova fisica, la fisica quantistica.

## LA TEORIA DELLA RELATIVITA' SPECIALE (O RISTRETTA) DI A. EINSTEIN

Nel 1905 Albert Einstein estese a tutti i fenomeni fisici il principio di relatività, formulato da Galileo Galilei per i fenomeni meccanici e concernente l'equivalenza di tutti i sistemi di riferimento inerziali, cioè non accelerati, per quanto riguarda l'accelerazione subita da un corpo soggetto a forze. Einstein, dopo avere postulato

l'invariabilità del modulo della velocità della luce in qualsiasi sistema di riferimento, e dopo avere considerato la trasformazione delle coordinate spaziali necessaria per descrivere un fenomeno fisico nel passaggio da un sistema di riferimento inerziale ad un altro, considerò la trasformazione del tempo, introducendo il concetto di tempo locale o proprio, definito nell'ambito del particolare sistema di riferimento utilizzato, e trattando il tempo come la quarta coordinata spazio-temporale, indissolubilmente legata alle coordinate spaziali. Dalla relativizzazione del tempo, diretta conseguenza del valore finito e costante della velocità della luce, deriva la diversità della durata (locale) di un fenomeno fisico che si svolge in un dato sistema di riferimento inerziale, rispetto a quella valutata da un osservatore facente parte di un altro sistema di riferimento inerziale in moto rettilineo uniforme rispetto al primo. Per quanto riguarda la dinamica, Einstein introdusse i concetti di massa di quiete ( $m_0$ ), misurata in un sistema di riferimento rispetto al quale un corpo sia in quiete, e di massa di moto  $m(v)$ , che dipende dalla velocità  $v$  del corpo misurata in un generico sistema inerziale rispetto al quale esso sia in moto. La massa di moto dipende dalla velocità secondo una legge che prevede che un corpo con massa di quiete non nulla, per potersi muovere alla velocità della luce, abbia bisogno di un'energia cinetica infinita: infatti la massa cresce al crescere della velocità, tendendo a diventare infinita quando la velocità tende al valore della velocità della luce, e questo comporta un'energia cinetica infinitamente grande per  $v = c = 300000 \text{ km/s}$ . L'aumento di massa di un corpo è significativo soltanto quando la velocità diventa comparabile con quella della luce; pertanto il campo di verifica ideale della legge  $m(v)$  è quello delle particelle subatomiche, le cui velocità sono molto vicine a quella della luce. Un'altra conseguenza importantissima degli effetti relativistici, è la legge di conservazione della massa-energia, in base alla quale i classici principi di conservazione della massa e dell'energia vengono unificati in un'unica legge, detta di conservazione della massa-energia. Questa legge afferma che la variazione della massa di un corpo, per un ammontare  $\Delta m = m(v) - m_0$ , è sempre associata ad una cessione o ad un assorbimento di energia  $\Delta E = \Delta m c^2$  da parte del corpo. Questa legge è alla base del funzionamento dei reattori nucleari e di tutte le interazioni tra particelle elementari negli esperimenti di fisica delle alte energie.

## L'IPOTESI EINSTEINIANA DEI FOTONI CONSENTE DI SPIEGARE L'EFFETTO FOTOELETTRICO (1905)

L'effetto fotoelettrico consiste nell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica che sia sottoposta ad un flusso luminoso. L'effetto si verifica agevolmente utilizzando metalli come il cesio, i cui elettroni di conduzione sono legati debolmente agli ioni del reticolo cristallino, in modo tale che sia sufficiente una modesta quantità di energia (lavoro di estrazione) per estrarli dal metallo. Si osserva che ogni metallo è caratterizzato da una lunghezza d'onda di soglia, al di sotto della quale l'effetto fotoelettrico non ha luogo, e che la velocità massima dei fotoelettroni emessi non dipende dall'intensità di illuminamento della superficie metallica. Si osserva invece che l'intensità della corrente fotoelettronica prodotta è direttamente proporzionale

all'intensità di illuminamento. Con le leggi della fisica classica non è possibile rendere conto delle caratteristiche del fenomeno. Si deve ad Albert Einstein (Nobel 1921) la teoria dell'effetto fotoelettrico, basata sull'ipotesi dei fotoni: infatti Einstein, prendendo spunto dalla quantizzazione dell'energia introdotta da Max Planck nello studio della radiazione termica emessa dal corpo nero (corpo ideale caratterizzato dal massimo potere di emissione della radiazione termica), fece l'ipotesi che i fotoelettroni fossero estratti dal metallo in seguito all'urto con pacchetti di energia elettromagnetica di valore  $E = h f = hc/\lambda$ , detti fotoni o quanti di luce, dove si indica con  $h$  la costante di Planck, con  $\lambda$  la lunghezza d'onda e con  $f$  la frequenza della radiazione elettromagnetica assorbita dal metallo. In tal modo, la massima energia cinetica  $K$  con la quale vengono emessi i fotoelettroni è data dalla differenza tra l'energia  $E$  del fotone ed il lavoro di estrazione  $W$ , caratteristico del metallo:  $K = E - W$ . È immediato comprendere l'esistenza della lunghezza d'onda, di soglia, se si pensa che per estrarre un elettrone occorre un fotone con energia almeno pari a  $E = hc/\lambda_0 = W$ , dove  $\lambda_0$  è la lunghezza d'onda di soglia. Il fatto poi che l'intensità della corrente fotoelettrica sia proporzionale all'intensità di illuminamento, si spiega facilmente pensando che esiste un rapporto 1:1 tra fotoelettroni emessi e fotoni assorbiti, e che un raggio di luce è tanto più intenso quanto maggiore è il numero dei fotoni ad esso associati. La validità dell'ipotesi dei fotoni fu confermata sperimentalmente attraverso l'effetto Compton, scoperto nel 1923 e consistente nella diffusione di fotoni  $X$  e  $\gamma$  da parte di elementi a basso peso atomico, con una variazione dell'energia dei fotoni incidenti: si osservò per la prima volta in una camera a nebbia (di Wilson) l'urto tra i fotoni incidenti e gli elettroni più debolmente legati al nucleo, con la simultanea diffusione di elettroni e di fotoni meno energetici, associati ad una lunghezza d'onda maggiore di quella dei fotoni incidenti. La diminuzione di energia dei fotoni risultava pari all'energia cinetica degli elettroni diffusi. L'esistenza dei fotoni (quanti di radiazione luminosa,  $X$  o  $\gamma$ ) ha come conseguenza il dualismo ondulatorio-corpuscole per la radiazione elettromagnetica: la radiazione elettromagnetica si presenta sotto forma di onde elettromagnetiche quando essa incide su oggetti con dimensioni paragonabili con la sua lunghezza d'onda, ma molto grandi rispetto alla scala atomica; quando invece si considerano fenomeni su scala atomica, la radiazione elettromagnetica si presenta sotto forma di corpuscoli o pacchetti di energia, i fotoni, che si muovono alla velocità della luce ed interagiscono con le particelle subatomiche in base ai principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

## LA SCOPERTA DEL NUCLEO ATOMICO (1911)

Il fisico inglese Rutherford (vedi "i pionieri della fisica"), a conclusione di una serie di celebri esperienze effettuate all'Università di Cambridge, bombardando foglie d'oro con particelle  $\alpha$  (nuclei di elio), coadiuvato da Geiger e Marsden, scoprì che quasi tutta la

massa di un atomo è concentrata nel suo nucleo, carico positivamente ed intorno al quale orbitano gli elettroni.

## GLI ESPERIMENTI DI DIFFRAZIONE CON I RAGGI X E LO STUDIO DEI RETICOLI CRISTALLINI (1912-13)

Dopo la scoperta dei raggi X, accertata la loro natura ondulatoria, in quanto non vengono deviati da campi elettrici, nè da campi magnetici, rimaneva da determinare la loro lunghezza d'onda. Nel 1913 il fisico tedesco Max Von Laue (Nobel 1914) ed i fisici inglesi William Henry Bragg e William Lawrence Bragg, padre e figlio, (Nobel 1915), utilizzando cristalli di vario tipo, riuscirono ad ottenere immagini fotografiche delle figure di diffrazione ottenute interponendo un cristallo sul percorso dei raggi. W.H.Bragg e W.L.Bragg riuscirono inoltre a misurare la lunghezza d'onda della radiazione X e, una volta perfezionato il loro metodo di misura con l'invenzione dello spettrometro a raggi X, furono in grado di misurare le distanze interatomiche di parecchi cristalli, dando inizio alla diffrattometria a raggi X, tuttora di importanza fondamentale nello studio della struttura della materia.

## IL MODELLO ATOMICO DI BOHR-RUTHERFORD (1913)

Nei primi due decenni di questo secolo i fisici Rutherford, Bohr e Sommerfeld, sviluppando le teorie quantistiche elaborate da Planck e da Einstein, rispettivamente nell'ambito della quantizzazione dell'energia delle cariche oscillanti che sono all'origine della radiazione elettromagnetica emessa dal corpo nero ed in quello della quantizzazione dell'energia elettromagnetica assorbita da un metallo che emetta elettroni per effetto fotoelettrico, concepirono la prima teoria quantistica atta a calcolare la lunghezza d'onda delle righe osservate negli spettri ottici ed a raggi X dell'atomo di idrogeno e di altri atomi con un solo elettrone (elio e litio ionizzati).

Il fisico danese Bohr (fondatore della scuola di fisica di Copenaghen e Nobel 1922), sulla base della scoperta di Rutherford, propose il primo modello atomico, trattando l'atomo come un sistema solare in miniatura ed applicando le leggi della fisica classica ed alcuni postulati introdotti per rendere conto del fatto che, su scala atomica, sia l'energia  $E$  che il momento angolare  $L$  sono quantizzati, cioè i loro valori sono sempre multipli di una quantità di energia o di momento angolare elementari:  $E = n (h f)$ ,

$L = n h/(2\pi)$ , dove  $h$  è la costante universale di Planck ed  $n$  è un numero intero. Il modello atomico di Bohr-Rutherford, perfezionato da Sommerfeld considerando gli effetti relativistici, è molto semplice dal punto di vista matematico; tuttavia consente di calcolare soltanto i livelli energetici degli atomi con un solo elettrone, ma non la probabilità di transizione di un elettrone tra due livelli energetici, essenziale per la determinazione dell'intensità relativa alle righe di emissione o di assorbimento osservate allo spettroscopio.

## L'IPOTESI ONDULATORIA DI DE BROGLIE (1924)

Il fisico francese De Broglie (Nobel 1929), estendendo alla materia il dualismo onda-corpuscolo introdotto attraverso l'ipotesi einsteiniana dei fotoni, propone di associare ad una particella di massa  $m$ , che si muova con velocità  $v$ , la lunghezza d'onda  $\lambda = h/(mv)$ . Questa ipotesi consente di attribuire un comportamento ondulatorio a tutte le particelle materiali, tanto più marcato quanto minore sia la loro quantità di moto  $p = mv$ ; pertanto gli effetti ondulatori risultano trascurabili nel caso di particelle di massa molto maggiore di quella delle particelle che costituiscono l'atomo.

## LA MECCANICA QUANTISTICA NON RELATIVISTICA DI SCHROEDINGER (1925)

Il modello atomico elementare di Bohr-Rutherford rappresentò soltanto un approccio teorico provvisorio in attesa di una teoria atomica completa. Il fisico tedesco Erwin Schroedinger (Nobel 1933), partendo dall'ipotesi ondulatoria di De Broglie, costruì una teoria quantistica dell'atomo basata su un'equazione atta a descrivere il comportamento ondulatorio degli elettroni. Concepita originariamente per descrivere onde materiali associate agli elettroni, l'equazione d'onda di Schroedinger fu reinterpretata da Max Born (Nobel 1954) come equazione delle onde di probabilità. Pertanto l'equazione di Schroedinger, scritta per un qualsiasi microsistema ad uno o a molti elettroni (atomo, molecola o cristallo), ammette come soluzione la cosiddetta funzione d'onda, una funzione delle coordinate spaziali, dalla quale si ottiene la densità di probabilità di trovare un elettrone in un generico punto dello spazio. L'equazione di Schroedinger ammette soluzioni fisicamente accettabili (autofunzioni) soltanto per particolari valori dell'energia, detti autovalori, che coincidono, per esempio, con i livelli energetici dell'elettrone nell'atomo d'idrogeno. Analogamente, applicando l'equazione d'onda ad una molecola o ad un cristallo, si ottiene una funzione d'onda (autofunzione) dalla quale si ottiene la densità elettronica nella molecola o nel cristallo. La meccanica quantistica di Schroedinger, detta anche meccanica ondulatoria, è una teoria completa, in quanto consente di calcolare sia i livelli energetici degli elettroni in atomi, molecole e cristalli, sia le probabilità di transizione tra due stati quantici. È applicabile a qualsiasi particella elementare che si muova in un campo di forze, ed in particolare, all'interno del nucleo atomico, per calcolare i livelli energetici dei nucleoni (protoni e neutroni) soggetti al potenziale delle forze nucleari.

## IL PRINCIPIO D'INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG (1927)

Il fisico tedesco Werner Heisenberg (Nobel 1932), indipendentemente dal lavoro di Schroedinger, formulò la meccanica quantistica elaborando un approccio matematico basato sulle matrici (meccanica delle matrici). Ad ogni grandezza fisica osservabile

(energia, posizione, quantità di moto, momento angolare) associò un operatore descritto da una matrice, ed ottenne risultati formalmente analoghi a quelli di Schroedinger.

Nel 1927 enunciò il principio d'indeterminazione, che è basilare in meccanica quantistica, ed afferma che le incertezze (errori) associate alla misura simultanea di due grandezze complementari (posizione e quantità di moto oppure energia e tempo) sono inversamente proporzionali tra loro:

$\Delta x \cdot \Delta p_x = h/(2\pi)$ ;  $\Delta E \cdot \Delta t = h/(2\pi)$ . In altri termini, se in un esperimento si determina, per esempio, la quantità di moto  $p_x$  di una particella con un errore molto piccolo  $\Delta p_x$ , il corrispondente errore commesso nella misura simultanea della coordinata  $x$  della particella è molto grande, inversamente proporzionale a  $\Delta p_x$ .

### LA SCOPERTA DELLO SPIN DELL'ELETTRONE (1927)

Nel 1922 i fisici tedeschi Stern (Nobel 1943) e Gerlach studiando l'effetto di campi magnetici non uniformi su atomi di argento, per verificare la quantizzazione del momento magnetico atomico associato al momento angolare degli elettroni, scoprirono che un fascio ben collimato di atomi di Ag non ionizzati, attraversando lo spazio compreso tra le espansioni polari di un magnete, sagomate in modo tale da ottenere un campo non uniforme, al fine di applicare ai momenti magnetici atomici una forza e non una coppia, si suddivise in due fasci, in un modo non previsto né dalla fisica classica, secondo la quale il fascio si sarebbe dovuto scindere in tanti fasci elementari distribuiti con continuità in un certo angolo, né dalla teoria quantistica, secondo la quale si sarebbero dovuti formare tanti fasci orientati, in modo discreto, in alcune direzioni. L'esperimento fu ripetuto nel 1927 da Phipps e Taylor con atomi d'idrogeno non ionizzati e privi di momento magnetico, in quanto si trovavano nello stato fondamentale (con energia minima e momento angolare nullo), e fu osservato anche in tali condizioni lo sdoppiamento del fascio, che non poteva essere dovuto al momento magnetico associato al momento angolare orbitale degli elettroni, che era nullo. L'esperimento fu spiegato ammettendo l'esistenza di un momento magnetico associato ad un momento angolare intrinseco dell'elettrone, non previsto dalla fisica classica né dalla meccanica quantistica non relativistica di Schroedinger. Il momento angolare intrinseco dell'elettrone, che si può immaginare come una microtrottola carica, prende il nome di spin (trottola). Lo spin dell'elettrone e di altre particelle (protoni, neutroni, ecc.) è un momento di rotazione intrinseca tipicamente quantistico, la cui esistenza può essere giustificata soltanto da una teoria quantistica relativistica, come quella elaborata dal fisico inglese P.A.M. Dirac nel 1928.

### GLI ESPERIMENTI DI DIFFRAZIONE CON ELETTRONI (1927)

I fisici Clinton Davisson e George Thomson (Nobel 1937), adoperando fasci di elettroni e cristalli di nichel, evidenziarono figure di diffrazione analoghe a quelle

ottenute da Laue con i raggi X. Si ottenne così la prima conferma della validità dell'ipotesi ondulatoria di De Broglie. In successivi esperimenti, eseguiti da altri fisici con foglie d'oro e cristalli di vario tipo, si ottennero immagini fotografiche di anelli di diffrazione del tutto simili a quelli ottenuti con i raggi X. Gli esperimenti di Davisson e Thomson confermarono l'esistenza del dualismo ondulatorio-corpuscolare per la materia, oltre che per la radiazione. Alla diffrattometria a raggi X si affianca pertanto quella a fasci elettronici, che è a tutt'oggi di fondamentale importanza nelle ricerche sulla struttura della materia basate sulla misura della densità elettronica dei cristalli. Ricordiamo che il microscopio elettronico utilizza le proprietà ondulatorie della materia per generare immagini elettroniche di tessuti biologici e di materiali vari.

## LA MECCANICA QUANTISTICA RELATIVISTICA DI DIRAC E L'IPOTESI DELL' ANTIMATERIA (1928)

La meccanica quantistica (ondulatoria) basata sull'equazione di Schroedinger non tiene conto della teoria einsteiniana della relatività speciale, e pertanto non può rendere conto delle proprietà manifestate dalle particelle elementari che costituiscono la materia, qualora si considerino velocità non trascurabili rispetto a quella della luce. Per esempio alcune caratteristiche degli spettri ottici ed a raggi X emessi dall' atomo non possono essere spiegate nell'ambito della teoria di Schroedinger, che non fa riferimento allo spazio-tempo einsteiniano ed alle regole di trasformazione delle coordinate spazio-temporali nel passaggio da un sistema inerziale di riferimento ad un altro che si muova rispetto al primo con moto rettilineo uniforme. La formulazione della meccanica quantistica conforme ai principi relativistici si deve al fisico inglese Paul Adrien Maurice Dirac (Nobel 1933), che scrisse un'equazione d'onda conforme alle trasformazioni relativistiche delle coordinate spazio-temporali. Le caratteristiche fondamentali dell'equazione introdotta da Dirac consistevano nell'inclusione dello spin delle particelle in modo del tutto naturale, come conseguenza diretta del formalismo relativistico, e nel fornire per una particella due possibili valori dell' energia, differenti soltanto per il segno. L' interpretazione fornita da Dirac per gli stati con energia negativa associati ad una particella elementare libera, cioè non soggetta a campi di forza, si basava sull'ipotesi dell'esistenza della relativa antiparticella, cioè di una particella dotata della stessa massa e di carica elettrica di segno opposto. La prima conferma sperimentale dell'esistenza delle coppie particella-antiparticella si ebbe negli anni 1932-33, quando Anderson (Nobel 1936), Blackett (Nobel 1948) e Occhialini, studiando gli sciami delle particelle secondarie prodotte dai raggi cosmici nell'atmosfera terrestre, scoprirono l'antiparticella dell'elettrone, il positrone o elettrone positivo. Pochi anni dopo (1955), il fisico italiano Emilio Segrè (Nobel 1959), a conclusione di una serie di esperimenti effettuati con il bevatrone da 6,2 GeV dell' Università di Berkeley, riuscì a produrre l'antiprotone, fornendo un'ulteriore, brillante conferma della validità della meccanica quantistica relativistica di Dirac.

## L'IPOTESI DEL NEUTRINO DI WOLFGANG PAULI (1930)

L'esistenza del neutrino fu ipotizzata nel 1933 dal fisico austriaco Wolfgang Pauli (Nobel 1945) per spiegare la variabilità dell'energia cinetica degli elettroni emessi dai nuclei soggetti al decadimento radioattivo di tipo  $\beta$ . Pauli postula l'esistenza di una particella priva sia di massa che di carica elettrica, che possa rendere conto del fatto che gli elettroni emessi sono caratterizzati da energie cinetiche comprese tra zero ed un valore massimo. Ammettendo l'esistenza del neutrino si giustifica per il decadimento  $\beta$  la validità dei principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto: infatti, se si postula che i neutrini vengano emessi con velocità opposte a quelle degli elettroni e con energie cinetiche tali che sommate a quelle degli elettroni diano una somma costante, si giustificano immediatamente le modalità osservate sperimentalmente per il decadimento  $\beta$ . Essendo ritenuta quasi nulla la massa dei neutrini, si deve ammettere che essi si muovano con una velocità quasi uguale a quella della luce. Esistono tre tipi di neutrini con le rispettive antiparticelle, associati rispettivamente all'elettrone, al muone ed alla particella  $\tau$  (tauone). I neutrini appartengono alla famiglia dei leptoni e sono soggetti alla sola interazione debole.

## LA SCOPERTA DEL NEUTRONE (1932)

La scoperta del neutrone si deve al fisico inglese Chadwick (Nobel 1935), il quale fornì una nuova interpretazione degli esperimenti effettuati da Bothe e Becker (1930) e dai coniugi francesi Joliot - Curie (1932), bombardando bersagli di boro e di berillio con le particelle  $\alpha$  (nuclei di elio) emesse dal radio. Bothe e Becker e Joliot-Curie pensavano che il bombardamento con particelle  $\alpha$  determinasse l'emissione di fotoni  $\gamma$  di alta energia da parte dei nuclei di B e Be; invece le prove teorico-sperimentali prodotte da Chadwick evidenziarono l'esistenza del neutrone nei nuclei atomici, che anteriormente al 1932 si riteneva fossero costituiti da protoni ed elettroni. Il neutrone è privo di carica elettrica ed ha una massa circa uguale a quella del protone. Appartiene alla famiglia degli adroni ed è soggetto pertanto sia alle interazioni forti che a quelle deboli ed elettromagnetiche. Il neutrone ed il protone vengono entrambi definiti nucleoni, in quanto costituiscono i nuclei atomici.

## GLI STUDI DI ENRICO FERMI SUI NEUTRONI (1934-1938)

Enrico Fermi ed i suoi allievi Emilio Segrè , Franco Rasetti, Edoardo Amaldi, Ettore Majorana, Oscar D'Agostino, nel 1934 diedero inizio presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Roma ad una serie di celebri esperienze finalizzate allo studio della radioattività artificiale indotta dal bombardamento dei nuclei con neutroni. Nello stesso anno i coniugi Joliot-Curie avevano scoperto la radioattività artificiale bombardando l'alluminio con le particelle  $\alpha$  emesse dal polonio, ottenendo nuclei radioattivi che emettevano positroni invece di elettroni, come avviene per gli elementi radioattivi naturali. Fermi ebbe l'idea di utilizzare i neutroni al posto delle particelle  $\alpha$ , considerando che i neutroni, essendo privi di carica elettrica, non subiscono la repulsione da parte dei nuclei atomici carichi positivamente, e possono pertanto indurre con notevole efficacia le reazioni che rendono radioattivi i nuclei atomici. Le esperienze condotte su una sessantina di elementi chimici evidenziarono la possibilità di indurre molto agevolmente la radioattività , bombardando i nuclei con neutroni lenti, cioè neutroni rallentati interponendo tra la sorgente ed il bersaglio spessori di sostanze idrogenate (acqua, paraffina). Le esperienze della Scuola di Fermi furono di fondamentale importanza per la scoperta della fissione (scissione) nucleare dell'uranio e la realizzazione della pila atomica (reattore nucleare) presso l'Università di Chicago (dicembre 1942).

## LA SCOPERTA DELLA FISSIONE DELL'URANIO (1939)

La fase conclusiva delle ricerche di Enrico Fermi e dei suoi allievi sulla radioattività indotta da neutroni lenti, riguardò l'ultimo elemento naturale del sistema periodico, l'uranio. A differenza, però, di quanto si era verificato sperimentando su tutti gli altri elementi, l'interpretazione dei risultati sperimentali non era chiara per la produzione di alcuni elementi radioattivi con tempi di decadimento diversi , separabili chimicamente con estrema difficoltà, per l'esiguità delle quantità prodotte. Fermi ritenne che si fossero formati degli elementi chimici artificiali (transuranici), con numero atomico maggiore di quello dell'uranio (92). Ricerche analoghe a quelle svolte dal gruppo di Fermi venivano condotte in Germania da Hahn e Strassman, i quali nel 1939 , bombardando l'uranio con neutroni lenti, evidenziarono inequivocabilmente la presenza del bario e di altri elementi con numero atomico intermedio tra quelli dell'uranio e del bario. Dopo aver ripetuto parecchie volte le analisi dei prodotti di reazione, si convinsero di avere scoperto un fenomeno nuovo: la fissione (scissione) dell'uranio in due frammenti, con l'emissione di 2 o 3 neutroni. Subito dopo Enrico Fermi, al quale nel 1938 era stato assegnato il premio Nobel per le ricerche sulla radioattività artificiale indotta da neutroni lenti, enunciò la possibilità di utilizzare la fissione dell'uranio per produrre una reazione a catena, cioè una reazione nucleare che, avviata da un solo neutrone, si autosostenesse attraverso i 2 o 3 neutroni emessi in ogni fissione, che potevano produrre la fissione di altri nuclei di uranio, con un aumento esponenziale del numero

dei neutroni prodotti e l'emissione di una notevole quantità di energia, 200 MeV (megaelettronvolt), corrispondente a 200 milioni di volte l'energia che una particella dotata di una carica pari a quella elettronica, acquisisce dopo essere stata accelerata nel passaggio tra due elettrodi sottoposti ad una differenza di potenziale di 1 V. L'energia cinetica dei frammenti di fissione (nuclei con numeri atomici intermedi, la cui somma sia 92, e neutroni veloci) viene ceduta sotto forma di calore al mezzo moderatore, che serve a rallentare i neutroni fino a ridurre la loro energia a qualche frazione di elettronvolt, comparabile con l'energia di agitazione termica. Come moderatori di neutroni vennero utilizzate sostanze contenenti idrogeno (paraffina, acqua, acqua pesante), in quanto, essendo la massa di un neutrone circa uguale a quella di un nucleo d'idrogeno (protone), bastano pochi urti neutrone-protone per dissipare la maggior parte dell'energia cinetica di un neutrone veloce (da 1 a 5 MeV).

## DALLE RICERCHE SUI RAGGI COSMICI ALLA FISICA DELLE ALTE ENERGIE

Lo studio delle particelle secondarie (sciame di particelle) prodotte dai raggi cosmici, che sono costituiti da raggi X e particelle cariche, per la maggior parte protoni di alta energia provenienti dallo spazio esterno al sistema solare, consentì sin dal 1932 (Anderson) di scoprire nuove particelle elementari, la cui esistenza era stata prevista teoricamente. Furono scoperti in tal modo il positrone, i mesoni  $\pi$  (pioni), i muoni, che derivano dal decadimento dei pioni e, a partire dai primi anni '50 tante altre particelle, sia cariche che neutre, più pesanti del protone (particelle  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ ), la cui esistenza non era stata prevista teoricamente. I fisici si resero conto che dalle tre particelle (elettroni, protoni e neutroni) considerate inizialmente come unici mattoni della materia, si era passati nell'arco di mezzo secolo ad una numerosa famiglia di particelle, la cui esistenza rendeva tutt'altro che semplice elaborare un modello teorico che fosse in grado di descriverne soddisfacentemente le caratteristiche. Si osservavano comportamenti non rientranti negli schemi teorici ritenuti fino a quel momento validi, e si coniarono nuove categorie, come quella della "stranezza", per classificare alcune delle nuove particelle. Ci si rese conto gradatamente che le ricerche sui raggi cosmici, basate sull'osservazione delle tracce lasciate dalle particelle sulle lastre fotografiche o all'interno delle camere a nebbia (di Wilson), non erano più sufficienti a far progredire la neonata fisica delle particelle elementari. Si decise pertanto, nei vari centri internazionali di ricerca, di dare il via alla costruzione di grandi acceleratori di particelle, che consentissero di generare particelle di alta energia da scagliare contro un bersaglio metallico, per esempio una lamina di rame, di ferro o di tungsteno, per esaminare i prodotti di reazione e studiare agevolmente le caratteristiche degli urti al variare dell'energia e del tipo dei "proiettili" utilizzati. Lo studio sistematico degli eventi generati nell'impatto particella-bersaglio, fornisce ingenti quantità di informazioni sulla struttura della materia, e consente di verificare sperimentalmente la

validità dei modelli teorici che vengono proposti nell'intento di costruire un modello teorico generale. L'applicazione sistematica del metodo sperimentale galileiano è fondamentale non solo per ricevere conferme sulle previsioni teoriche elaborate relativamente ad una certa tipologia d'urto programmata, ma soprattutto per utilizzare coerentemente gli acceleratori come se fossero degli ultramicroscopi per l'osservazione della materia subnucleare, con una risoluzione tanto maggiore quanto più elevata è l'energia. E' ben noto infatti che il potere risolutivo di un microscopio ottico cresce al diminuire della lunghezza d'onda della radiazione visibile utilizzata per effettuare le osservazioni. In modo analogo, al crescere dell'energia delle particelle da scagliare contro il bersaglio, aumenta la risoluzione, in quanto diminuisce la lunghezza delle "onde di probabilità"  $\lambda = h/(mv)$ , data dalla relazione di De Broglie, basilare per la meccanica del microcosmo. Rielaborando lo schema del ciclotrone, primo esemplare di acceleratore circolare, realizzato nel 1931 da Lawrence (Nobel 1939) presso l'Università di California, furono realizzati negli USA ed in Europa (CERN di Ginevra e laboratori nazionali italiani, francesi e tedeschi) elettrosincrotroni e protosincrotroni per ricerche nel campo della fisica delle alte energie, ben distinta dalla fisica nucleare, che studia la materia ad energie relativamente basse.

## LE PARTICELLE FONDAMENTALI DELLA MATERIA : QUARK E LEPTONI

A partire dai primi anni '50, nell'arco di poco più di un decennio, la famiglia delle particelle elementari era diventata così numerosa da comprendere oltre una ventina di particelle, di cui soltanto alcune (il protone, il neutrone, l'elettrone ed il neutrino) venivano ritenute veramente elementari, mentre, considerando i risultati degli esperimenti di fisica delle alte energie che venivano effettuati con acceleratori sempre più potenti, si rafforzava sempre più il sospetto che tutte le altre fossero tutt'altro che elementari e che bisognasse ricercare delle vere particelle elementari, combinando le quali si potessero spiegare le proprietà di tutte le altre particelle. Nel 1964, indipendentemente l'uno dall'altro, i fisici Murray Gell-Mann (Nobel 1969) e George Zweig ipotizzarono che le particelle veramente elementari fossero i leptoni, cioè elettroni, muoni e neutrini con le rispettive antiparticelle, e che invece tutte le altre particelle, adroni, sensibili all'interazione subnucleare forte, fossero costituite da 2 o 3 particelle veramente elementari, dotate di carica elettrica frazionaria ( $2/3$  o  $1/3$ ), alle quali fu dato il nome di "quark", vocabolo di oscuro significato, presente nel romanzo "Ulisse" di James Joyce. Il modello a quark si basava originariamente su tre particelle fondamentali con spin  $1/2$ , con le rispettive antiparticelle: quark up, con carica elettrica positiva pari a  $2/3$  di quella elettronica, quark down, con carica elettrica negativa pari a  $1/3$  di quella elettronica e quark strange (strano), con carica elettrica negativa pari a  $1/3$  di quella elettronica, introdotto per spiegare la lentezza del decadimento dei mesoni K e di altri adroni strani. I mesoni ( $\pi$ , K, ecc) sono formati da un quark e da un antiquark, mentre i barioni (protone, neutrone, particelle (iperoni)  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ , ecc.) sono formati da tre quark. Le antiparticelle dei mesoni e dei barioni si ottengono sostituendo ai quark i rispettivi antiquark. Il modello a tre quark consentì di prevedere l'esistenza di nuove

particelle, per esempio il barione  $\Omega^-$ , che fu successivamente identificato in una particella di massa molto vicina a quella della particella prevista teoricamente.

## LE TRE GENERAZIONI DI QUARK E LEPTONI DEL MODELLO STANDARD

L'originario modello a tre quark (up,down, strange) proposto da Gell-Mann e Zweig, consentiva di spiegare le proprietà (massa, carica elettrica, spin e stranezza) di tutte le particelle note, e fu ritenuto valido fin quando non fu scoperta nel 1974 una nuova particella con una massa di 3,1 GeV, la cui esistenza, diversamente da quanto si era verificato per il barione  $\Omega^-$ , non era prevista dal modello. La nuova particella fu scoperta indipendentemente da due gruppi di ricerca: il gruppo del Brookhaven National Laboratory, che le diede il nome di J, ed il gruppo dello SLAC (Stanford Linear Accelerator Center - California), che le diede il nome di  $\Psi$ . La nuova particella, che risultava essere un mesone neutro, con spin unitario, venne prodotta facendo collidere elettroni e positroni di alta energia in un anello di accumulazione, che è uno speciale acceleratore circolare nel quale circolano in versi opposti un fascio di elettroni ed uno di positroni, che vengono accelerati e fatti collidere, grazie ad opportuni campi magnetici deviatori, in due o più punti della loro traiettoria circolare, in corrispondenza dei quali si verifica l'annichilazione delle coppie elettrone-positrone e la formazione di un fotone di alta energia. Successivamente il fotone, attraverso i suoi prodotti di decadimento, dà origine alla particella  $\Psi$ . Per includere la nuova particella nel modello a quark, fu necessario introdurre un nuovo tipo di quark, il quark charm (incantato), con spin  $1/2$  e carica elettrica  $2/3$  e, così denominato perché consentiva di spiegare, come era avvenuto per il quark strange, il lento decadimento della nuova particella, la quale, essendo un adrone, dovrebbe decadere in un intervallo di tempo di  $10^{-23}$  s, tipico delle particelle soggette all'interazione subnucleare forte, mentre si osserva il suo decadimento in tre pioni (positivo, negativo e neutro) in circa  $10^{-20}$  s. La particella  $\Psi$  è formata da una coppia quark charm (c)- antiquark charm ( $\bar{c}$ ), con carica elettrica totale nulla ( $2/3 - 2/3$ ), ed i cui spin si sommano dando lo spin unitario osservato. Bisogna considerare che i quark non sono stati mai osservati allo stato libero, in quanto le forze subnucleari forti che li legano per formare gli adroni (mesoni e barioni), sono caratterizzate da un'intensità che aumenta rapidamente al crescere della distanza tra i quark, il che implica grandissime energie di legame, di gran lunga maggiori dell'energia disponibile negli attuali acceleratori (2000 GeV). L'esistenza dei quark viene pertanto dedotta indirettamente, attraverso le proprietà delle particelle che derivano dalle loro combinazioni. La riformulazione del modello a quark, resa necessaria dalla scoperta della particella  $\Psi$  e dalla implicita scoperta del nuovo "sapore" charm, in aggiunta ai "sapori" up e down, consentiva tra l'altro di spiegare, per legge di simmetria, l'assenza di osservazioni sperimentali di decadimenti di particelle contenenti il quark strange in particelle contenenti il quark down. Questi decadimenti, denominati decadimenti neutri con cambiamento di sapore, in quanto entrambi i quark hanno la stessa carica elettrica e sapori diversi, si spiegano con il fatto che il quark charm (c) tende preferenzialmente

a decadere in un quark strange, emettendo un bosone intermedio  $W^+$ , la cui carica positiva consente di rispettare la legge di conservazione della carica elettrica :

$(2/3 = -1/3 + 1) : c \rightarrow s + W^+$ . Si osservano invece normalmente decadimenti di particelle contenenti quark down in particelle contenenti quark up

$(-1/3 = 2/3 - 1) : d \rightarrow u + W^-$ , mentre non sono stati mai osservati decadimenti di particelle contenenti quark charm in particelle contenenti quark up. E' stata così introdotta la seconda generazione di quark (charm-strange), corrispondente alla seconda generazione di leptoni (muone e neutrino muonico) , in aggiunta ai quark (up e down) ed ai leptoni (elettrone e neutrino elettronico) della prima generazione, che costituiscono la materia ordinaria. Le particelle elementari (con le rispettive antiparticelle) formate dai quark della seconda generazione erano molto più abbondanti nelle fasi iniziali della formazione dell'universo, quando le energie erano così elevate da favorirne la generazione, e la struttura della materia si basava esclusivamente su quark charm, strange, muoni e neutrini muonici, con le rispettive antiparticelle. Nel 1977, presso il Fermilab di Chicago, a conclusione di un lungo periodo di ricerche iniziate nel 1967 a Brookhaven studiando le coppie muone-antimuone ottenute bombardando nuclei di uranio con protoni da 30 GeV, fu scoperta una nuova particella pesante, il mesone Y, con una massa intorno a 10 GeV, la particella più pesante mai creata, fino allora, in urti di alta energia. Per inserire la nuova particella nel modello standard, con considerazioni analoghe a quelle che condussero all'introduzione del quark charm, fu necessario, data la bassa velocità di decadimento del mesone Y, ipotizzare l'esistenza di una coppia quark-antiquark. Fu così individuato il quinto quark, al quale fu dato il nome di bottom (basso) o beauty (bellezza), con spin 1/2 e carica elettrica -1/3, con il rispettivo antiquark. La scoperta del sesto quark ,con massa di 174 GeV e carica elettrica 2/3, cui fu dato il nome di top (alto) o truth (verità),ebbe luogo al Fermilab nel 1995, dopo circa 15 anni di ricerche infruttuose,data l'elevata massa del quark top (circa 187 volte più pesante del protone e 35000 volte più pesante del quark up). Fu necessario raggiungere l'energia di 1800 GeV per registrare un sufficiente numero di quark top in collisioni protone-antiprotone,utilizzando un sofisticatissimo sistema di rilevamento dei prodotti di decadimento. Gli urti protone-antiprotone generavano un quark top ed un antiquark top, che decadevano rispettivamente in coppie quark bottom-bosone intermedio  $W^+$  ed antiquark bottom-bosone intermedio  $W^-$  :

$p + \bar{p} \rightarrow t + \bar{t} ;$

$t \rightarrow b + W^+ ;$

$\bar{t} \rightarrow \bar{b} + W^- .$

Per quanto riguarda i leptoni, nel 1977 presso lo SLAC fu scoperto il leptone  $\tau$ (tauone), avente una massa di circa 1,8 GeV, osservando i prodotti di decadimento di esso sia in antimuoni ,neutrini muonici ed antineutrini tauonici,sia in elettroni, antineutrini elettronici e neutrini tauonici. Le masse dei tre tipi di neutrini, in prima approssimazione considerate nulle, hanno valori molto piccoli, compresi tra 2,5 eV e 17 MeV, e sono tuttora oggetto di sofisticate ricerche finalizzate a studiare la trasformazione di un tipo di neutrino negli altri due (esperimenti giapponesi con il SuperKamiokande sull' oscillazione della massa dei neutrini). Pertanto, con la scoperta

del sesto quark , il modello standard è stato aggiornato includendo la terza generazione di quark (top e bottom) e la terza generazione di leptoni (tau e neutrino tauonico), con le corrispondenti antiparticelle. Le particelle della terza generazione erano molto abbondanti nelle fasi iniziali della formazione dell'universo, ad energie molto più elevate di quelle compatibili con la seconda generazione di particelle. In altri termini, la simmetria del modello standard evidenzia l'esistenza di altre due possibili strutture della materia, analoghe a quella della materia ordinaria a noi nota, basata sui leptoni ed i quark della prima generazione.

## LE FORZE FONDAMENTALI DELLA NATURA ED I VETTORI DI FORZA DEL MODELLO STANDARD

Le forze fondamentali dell'universo sono quattro: la forza gravitazionale, la forza subnucleare debole, la forza elettromagnetica e la forza subnucleare forte. La forza gravitazionale è descritta in fisica classica dalla legge newtoniana della gravitazione universale (1686), ed in fisica relativistica dalla teoria della relatività generale di Einstein (1916). La teoria newtoniana, valida tuttora come teoria di prima approssimazione, consente di effettuare calcoli di meccanica celeste sufficientemente accurati nella maggior parte dei casi. Si basa sulla legge di gravitazione universale, che descrive la forza attrattiva che agisce tra due masse puntiformi  $M_1$  ed  $M_2$  , o tra due masse assimilabili a masse puntiformi (punti materiali), poste ad una distanza  $R$  l'una dall'altra:  $F = G M_1 M_2 / R^2$  , dove  $G$  è una costante universale. La forza attrattiva gravitazionale è direttamente proporzionale al prodotto delle masse, inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza e si annulla al tendere di  $R$  all'infinito.

La teoria della relatività generale di Einstein si basa invece sull'interpretazione geometrica della gravitazione, derivante dalla considerazione che in un campo gravitazionale, in assenza di altre forze, tutti i corpi, indipendentemente dalla loro massa, si muovono con la stessa accelerazione, conformemente a quanto enunciò Galileo Galilei. Einstein afferma infatti che la gravitazione è una proprietà dello spazio-tempo, la cui geometria dipende dalla distribuzione e dal movimento delle masse gravitazionali, nel senso che la geometria dello spazio-tempo, di tipo euclideo in assenza di masse gravitazionali, diventa non euclidea in presenza di esse. La massa ha la proprietà di curvare lo spazio-tempo; pertanto la traiettoria rettilinea e con velocità costante che un corpo seguirebbe nello spazio euclideo in assenza di altre masse, viene trasformata in una traiettoria curvilinea in uno spazio reso non euclideo dalla presenza di altre masse, che ne alterano la curvatura. La teoria einsteiniana consente di effettuare calcoli di meccanica celeste molto più accurati di quelli basati sulla teoria newtoniana, ed è fondamentale per lo sviluppo delle teorie sull'evoluzione dell'universo (teorie cosmologiche). La forza gravitazionale è la più debole delle forze dell'universo,  $10^{38}$  volte meno intensa della forza subnucleare forte agente tra i quark, essendo molto piccolo il valore della costante universale  $G$  ; i suoi effetti sono importanti solo in presenza di grandi distribuzioni di massa (stelle, pianeti, galassie). La forza elettromagnetica attrattiva o repulsiva agente tra due cariche puntiformi  $Q_1$  e  $Q_2$ , o tra

due cariche assimilabili a cariche puntiformi, poste ad una distanza  $R$  l'una dall'altra, è data dalla formula  $F = K Q_1 Q_2 / R^2$ , dove  $K$  è una costante universale. È matematicamente analoga alla legge di gravitazione universale di Newton, è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche, inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza, e si annulla al tendere di  $R$  all'infinito. L'intensità della forza elettromagnetica è 1/100 di quella della forza subnucleare forte.

In fisica classica la sintesi della descrizione dei fenomeni elettrici e magnetici fu effettuata da James Clerk Maxwell nella seconda metà del secolo XIX. Dopo la formulazione della meccanica quantistica relativistica di Dirac (1928), fu sviluppata la teoria quantistica dell'elettromagnetismo, nota come elettrodinamica quantistica (Q.E.D. Quantum Electro- Dynamics), perfezionata ulteriormente dai fisici (Nobel 1965) Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger e Richard Feynman, che l'hanno trasformata in una teoria coerente e completa, capace di fornire risultati molto accurati per tutte le interazioni elettromagnetiche tra particelle elementari. In elettrodinamica quantistica la forza attrattiva o repulsiva tra due particelle cariche si schematizza con lo scambio di un fotone virtuale ( $\gamma$ ), il cui trasferimento da una particella all'altra non viola il principio di conservazione dell'energia, purché il suo tempo di transito e l'energia messa in gioco siano compatibili con il principio d'indeterminazione di Heisenberg: quanto maggiore è l'energia  $\Delta E$  del fotone, tanto minore deve essere il relativo tempo di transito  $\Delta t$  ( $\Delta E \Delta t \approx h/(2\pi)$ ). La forza subnucleare debole, responsabile dei fenomeni di decadimento radioattivo dei nuclei atomici e delle particelle elementari instabili, è  $10^{13}$  volte più debole della forza subnucleare forte, ed ha un range cortissimo ( $10^{-16}$  cm), cioè si annulla per piccolissime distanze tra le particelle sensibili ad essa, i leptoni (elettroni, muoni, tauoni e rispettivi neutrini). La prima teoria sulle forze deboli si deve ad Enrico Fermi (1934); infatti le forze deboli si chiamano anche forze di Fermi. Successivamente, nel contesto della ricerca di una teoria unificata delle 4 forze fondamentali, negli anni '60, indipendentemente l'uno dall'altro, i fisici (Nobel 1979) Sheldon Lee Glashow e Steven Weinberg della Harvard University e Abdus Salam del Centro Internazionale di fisica teorica di Trieste, svilupparono una teoria unificata delle interazioni debole ed elettromagnetica (teoria unificata delle forze elettrodeboli). La teoria elettrodebole, basata sullo scambio dei bosoni virtuali intermedi  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , con spin 1, successivamente rivelati al CERN dai fisici (Nobel 1984) Carlo Rubbia e Simon Van der Meer, estende alle interazioni deboli ed elettromagnetiche il modello con il quale nel 1935 Hideki Yukawa (Nobel 1949) sviluppò la prima teoria delle forze nucleari agenti tra protoni e neutroni, basata sullo scambio dei mesoni  $\pi$  (pioni), successivamente scoperti nel 1947 da Powell (Nobel 1950), Occhialini, Muirhead e Lattes negli sciami di particelle della radiazione cosmica. La teoria elettrodebole di Glashow, Salam e Weinberg evidenzia che alle alte energie (maggiori di 100 GeV, valore caratteristico dell'unificazione elettrodebole), le forze elettromagnetica e debole tendono ad assumere la stessa intensità, e si possono ricondurre allo stesso meccanismo di scambio di bosoni, il fotone per le interazioni elettromagnetiche ed i bosoni  $W^{+/-}$  e  $Z^0$  per le interazioni deboli. Rimane da rivelare un ulteriore bosone, il

bosone di Higgs, la cui esistenza fu proposta nel 1964 da Peter Higgs dell'Università di Edimburgo, per spiegare la differenziazione della forza elettrodebole in forza debole e forza elettromagnetica. La scoperta del bosone pesante, neutro, di Higgs, con spin zero, che i fisici sperano possa verificarsi con il nuovo superacceleratore LHC (Large Hadron Collider) in costruzione presso il CERN di Ginevra, consentirebbe di spiegare la rottura di simmetria delle interazioni elettrodeboli, con l'acquisto di massa da parte dei bosoni intermedi  $W^{+/-}$  e  $Z^0$ , vettori della forza debole, e la separazione del fotone, privo di massa a riposo, vettore della forza elettromagnetica. La forza subnucleare forte è la più intensa delle forze fondamentali, ed agisce sia tra i nucleoni, mediata dallo scambio di pioni secondo il modello di Yukawa, sia tra i quark che compongono gli adroni (mesoni e barioni), mediata dallo scambio di otto tipi di bosoni con spin 1 e massa nulla, denominati gluoni (dal latino *glus* = colla). È una forza con range cortissimo ( $10^{-13}$  cm), che cresce al crescere della distanza tra i quark, il che implica l'impiego di energie di legame grandissime per i quark che compongono gli adroni, e quindi l'impossibilità di rivelare quark isolati. Prendendo spunto dall'elettrodinamica quantistica, è stata formulata una teoria analoga, la cromodinamica quantistica (Q.C.D. Quantum Chromo Dynamics), la quale, coerentemente con il principio di Pauli, che impone ai quark, aventi tutti spin  $1/2$ , di non occupare lo stesso stato quantico, considera, in aggiunta ai "sapori" dei quark (up, down, strange, charm, bottom e top), i cosiddetti "colori" (rosso, verde e blu), che sono dei parametri convenzionali (cariche di colore), che, analogamente alle cariche elettriche, servono a distinguere i quark con lo stesso sapore all'interno degli adroni. Per convenzione tutti i barioni devono essere formati da 3 quark con colori tali che la loro somma dia il bianco (rosso + verde + blu = bianco). Nel caso dei mesoni, invece, formati da un quark e da un antiquark, il colore del quark neutralizza l'anticolore dell'antiquark. Complessivamente, essendo 6 i "sapori" dei quark, si considerano 18 quark "colorati" ed i corrispondenti 18 antiquark. Un quark si considera schermato da una nuvola di gluoni virtuali e di coppie virtuali quark-antiquark, che vengono continuamente emessi e riassorbiti. La forza tra due quark o tra un quark ed un antiquark è dovuta allo scambio di 8 tipi diversi di gluoni, 2 che non trasportano "cariche di colore" e 6 che trasportano ciascuno 2 "cariche di colore" (rosso-antiverde, verde-antirosso, rosso-antiblu, blu-antirosso, verde-antiblu, blu-antiverde). La differenza tra i fotoni, quanti del campo elettromagnetico, ed i gluoni, quanti del campo gluonico, sta nel fatto che, mentre il fotone non trasporta carica elettrica, 6 degli 8 tipi di gluoni, invece, trasportano "cariche di colore", cioè le cariche subnucleari sensibili al campo gluonico.

	PRIMA GENERAZIONE	SECONDA GENERAZIONE	TERZA GENERAZIONE
QUARK	 <p><b>u</b> QUARK UP massa = 0,005 GeV carica elettrica = <math>2/3 e</math></p>	 <p><b>c</b> QUARK CHARM massa = 1,3 GeV carica elettrica = <math>2/3 e</math></p>	 <p><b>t</b> QUARK TOP massa = 174 GeV carica elettrica = <math>2/3 e</math></p>
	 <p><b>d</b> QUARK DOWN massa = 0,007 GeV carica elettrica = <math>-e/3</math></p>	 <p><b>s</b> QUARK STRANGE massa = 0,15 GeV carica elettrica = <math>-e/3</math></p>	 <p><b>b</b> QUARK BOTTOM massa = 5 GeV carica elettrica = <math>-e/3</math></p>
LEPTONI	 <p><b>e<sup>-</sup></b> ELETTRONE massa = 0,0005 GeV carica elettrica = <math>-e</math></p>	 <p><b>μ<sup>-</sup></b> MUONE massa = 0,105 GeV carica elettrica = <math>-e</math></p>	 <p><b>τ<sup>-</sup></b> TAUONE (TAU) massa = 1,8 GeV carica elettrica = <math>-e</math></p>
	 <p><b>ν<sub>e</sub></b> NEUTRINO (neutro) ELETTRONICO massa &lt; 0,0000000025 GeV</p>	 <p><b>ν<sub>μ</sub></b> NEUTRINO (neutro) MUONICO massa &lt; 0,00025 GeV</p>	 <p><b>ν<sub>τ</sub></b> NEUTRINO (neutro) TAUONICO massa &lt; 0,017 GeV</p>
<b>VETTORI DI FORZA</b>			
 <p><b>γ</b> massa=0 (neutro) FOTONE</p>	 <p><b>g</b> massa = 0 (neutro) GLUONE</p>	 <p>massa = 91 GeV (neutro) <b>Z<sup>0</sup></b> BOSONE Z</p>	 <p>massa = 80 GeV carica elettrica = <math>\pm e</math> <b>W</b> BOSONE W</p>

## LE TRE GENERAZIONI DI QUARK E LEPTONI ED I VETTORI DI FORZA DEL MODELLO STANDARD

### INTERAZIONI DI QUARK E LEPTONI

I quark e gli antiquark sono soggetti a tutte le 4 forze fondamentali: forte, elettromagnetica, debole e gravitazionale. I leptoni carichi (elettroni, muoni e tauoni) sono soggetti alle interazioni elettromagnetica, debole e gravitazionale. I leptoni neutri (neutrini) sono soggetti alle interazioni debole e gravitazionale.

### DAL MODELLO STANDARD ALLE TEORIE DELLA GRANDE UNIFICAZIONE

Il modello standard, basato sulla teoria elettrodebole e sulla cromodinamica quantistica, non ha finora consentito di includere in esso, in modo coerente, una teoria quantistica della gravitazione, basata sullo scambio di quanti di energia gravitazionale, i gravitoni, con massa nulla e spin 2. I fisici hanno da tempo formulato varie teorie tendenti ad unificare ad altissime energie, in un'unica teoria supersimmetrica, tre o tutte e quattro le forze fondamentali della natura, rispettivamente a  $10^{15}$  GeV (valore corrispondente all'unificazione delle forze forte ed elettrodebole) ed a  $10^{19}$  GeV (valore corrispondente alla scala di Planck della teoria quantistica della gravità ed alla teoria delle superstringhe). Una teoria supersimmetrica dovrebbe consentire di descrivere la struttura della materia nei primissimi istanti di formazione dell'universo,  $1,4 \cdot 10^{-43}$  secondi dopo il Big Bang, quando l'universo aveva dimensioni dell'ordine della scala di

Planck,  $4,1 \cdot 10^{-35}$  metri, ed una temperatura di  $3,6 \cdot 10^{32}$  °K . Tuttavia, le varie teorie proposte, dette Teorie della Grande Unificazione (G.U.T.) e teorie del tutto (T.O.E.), tra le quali citiamo la teoria delle superstringhe (o supercorde), non riescono a fornire una visione coerente di tutte le particelle finora scoperte. Le difficoltà consistono nell'unificare la meccanica quantistica, che è alla base del modello standard, e la teoria relativistica della gravitazione, che è una teoria classica, non basata cioè sulla quantizzazione dello spazio-tempo.

# **IL MODELLO STANDARD**

**LEPTONI**

**QUARK**

**CAMPI QUANTISTICI**

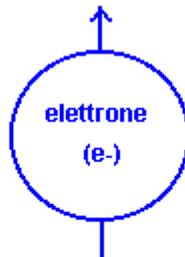
**ADRONI = QUARK + VETTORI DI CAMPO**

# LEPTONI

## LA PRIMA GENERAZIONE

spin = 1/2

Q = e-



SIMBOLO: e-

MASSA = 9,11 E-28 g = 0,000512 GeV/c<sup>2</sup> ≈ (1/1836) M<sub>p</sub>

spin = 1/2

Q = e+



SIMBOLO: e+

MASSA = 9,11 E-28 g = 0,000512 GeV ≈ (1/1836) M<sub>p</sub>

spin=1/2

Q = 0

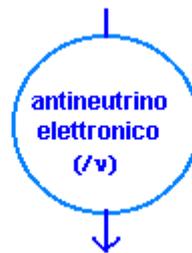


SIMBOLO:  $\nu_e$

MASSA  $\approx 0$

spin=1/2

Q = 0



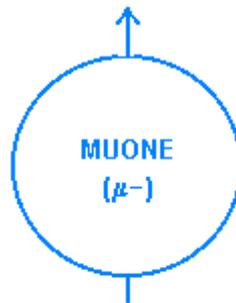
SIMBOLO:  $\bar{\nu}_e$

MASSA  $\approx 0$

## LA SECONDA GENERAZIONE

spin = 1/2

Q = e-



SIMBOLO:  $\mu^-$

MASSA = 0,106 GeV/c<sup>2</sup> ≈ 212 Me

spin = 1/2

Q = e+



SIMBOLO:  $\mu^+$

MASSA = 0,106 GeV/c<sup>2</sup> ≈ 212 Me

spin=1/2

Q = 0



SIMBOLO:  $\nu_{\mu}$

MASSA  $\approx 0$

spin=1/2

Q = 0



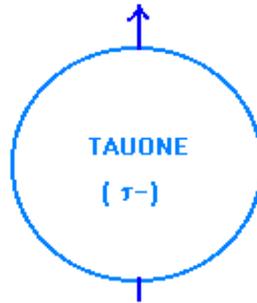
SIMBOLO:  $\bar{\nu}_{\mu}$

MASSA  $\approx 0$

## LA TERZA GENERAZIONE

spin=1/2

Q = e-



SIMBOLO:  $\tau^-$

MASSA = 1,7 Gev  $\approx$  3400 Me

spin=1/2

Q = e+



SIMBOLO:  $\tau^+$

MASSA = 1,7 Gev  $\approx$  3400 Me

spin=1/2

Q = 0



SIMBOLO:  $\nu_{\tau}$

MASSA  $\approx 0$

spin=1/2

Q = 0



SIMBOLO:  $\bar{\nu}_{\tau}$

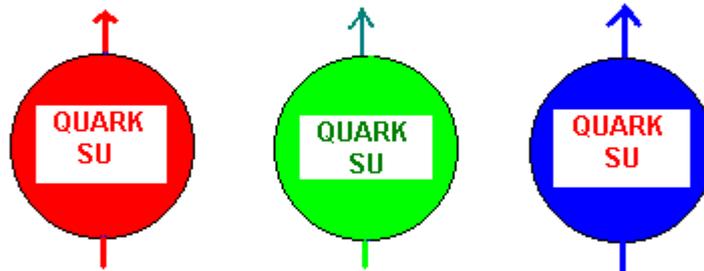
MASSA  $\approx 0$

# QUARK

## LA PRIMA GENERAZIONE

### QUARK SU (UP)

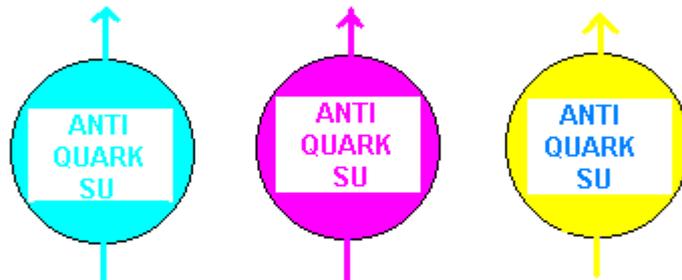
SIMBOLO :  $u$   
SAPORE: UP  
SPIN :  $1/2$



COLORI: ROSSO VERDE BLU  
CARICA ELETTRICA :  $+ (2/3) e$

### ANTIQUARK SU (ANTIUP o ANTISU)

SIMBOLO :  $\bar{u}$   
ANTISAPORE: ANTISU  
SPIN :  $1/2$



ANTICOLORI: ANTIROSSO ANTIVERDE ANTIBLU  
CARICA ELETTRICA :  $- (2/3) e$

**QUARK GIU'  
(DOWN)**

**SIMBOLO : d  
SAPORE: DOWN  
SPIN : 1/2**



**COLORI: ROSSO VERDE BLU  
CARICA ELETTRICA : - (1/3) e**

**ANTIQUARK GIU'**

**SIMBOLO :  $\bar{d}$  (ANTIDOWN o ANTIGIU')  
ANTISAPORE: ANTIDOWN  
SPIN : 1/2**



**ANTICOLORI: ANTIROSSO ANTIVERDE ANTIBLU  
CARICA ELETTRICA : + (1/3) e**

## LA SECONDA GENERAZIONE

### QUARK STRANO (STRANGE)

**SIMBOLO :**  $s$   
**SAPORE:** STRANGE  
**SPIN :**  $1/2$



**COLORI:** ROSSO VERDE BLU  
**CARICA ELETTRICA :**  $-(1/3) e$

### ANTIQUARK STRANO

**SIMBOLO :**  $\bar{s}$  (ANTISTRANGE o ANTISTRANO)  
**ANTISAPORE:** ANTISTRANGE  
**SPIN :**  $1/2$



**ANTICOLORI:** ANTIROSSO ANTIVERDE ANTIBLU  
**CARICA ELETTRICA :**  $+(1/3) e$

**QUARK INCANTATO  
(CHARM)**

**SIMBOLO : c**  
**SAPORE: CHARM**  
**SPIN : 1/2**



**COLORI: ROSSO VERDE BLU**  
**CARICA ELETTRICA : + (2/3) e**

**ANTIQUARK INCANTATO**

**SIMBOLO :  $\bar{c}$  (ANTI INCANTATO o ANTICHARM)**  
**ANTISAPORE: ANTICHARM**  
**SPIN: 1/2**



**ANTICOLORI: ANTIROSSO ANTIVERDE ANTIBLU**  
**CARICA ELETTRICA : - (2/3) e**

## LA TERZA GENERAZIONE

### QUARK BASSO (BOTTOM)

**SIMBOLO : b**  
**SAPORE: BOTTOM**  
**SPIN : 1/2**



**COLORI: ROSSO VERDE BLU**  
**CARICA ELETTRICA : - (1/3) e**

### ANTIQUARK BASSO (ANTIBASSO o ANTIBOTTOM)

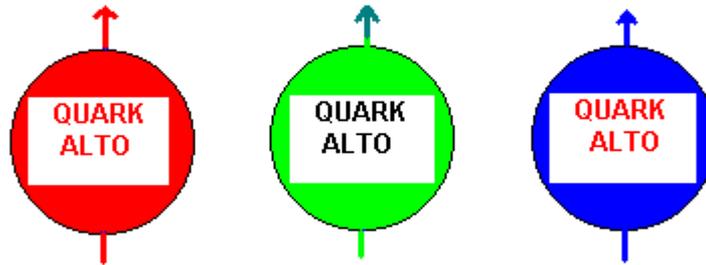
**SIMBOLO :  $\bar{b}$**   
**ANTISAPORE: ANTIBOTTOM**  
**SPIN: 1/2**



**ANTICOLORI: ANTIROSSO ANTIVERDE ANTIBLU**  
**CARICA ELETTRICA : + (1/3)e**

**QUARK ALTO  
(TOP)**

**SIMBOLO : t  
SAPORE: TOP  
SPIN : 1/2**



**COLORI: ROSSO VERDE BLU  
CARICA ELETTRICA : + (2/3) e**

**ANTIQUARK ALTO  
(ANTITOP o ANTIALTO)**

**SIMBOLO :  $\bar{t}$   
ANTISAPORE: ANTITOP  
SPIN: 1/2**



**ANTICOLORI: ANTIROSSO ANTIVERDE ANTIBLU  
CARICA ELETTRICA : -(2/3) e**

# I VETTORI DEI CAMPI QUANTISTICI

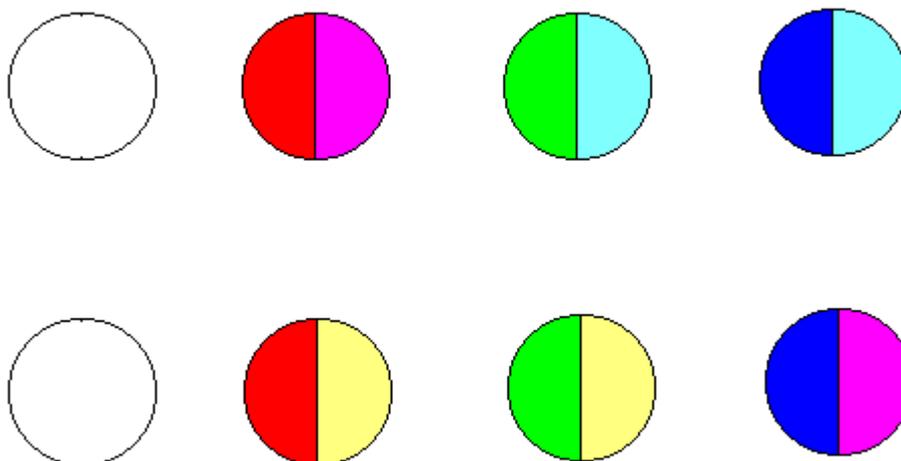
**GLUONI: BOSONI VETTORIALI  
(CON SPIN = 1)**

**VETTORI DELLA FORZA SUBNUCLEARE FORTE**

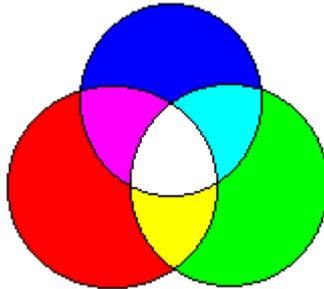
**TIPI DI GLUONI: 2 INCOLORI E 6 BICOLORI**

**COPPIE DI CARICHE DI COLORE DEI GLUONI BICOLORI**

**ROSSO-ANTIVERDE , ROSSO-ANTIBLU ,  
VERDE-ANTIROSSO , VERDE-ANTIBLU ,  
BLU-ANTIROSSO, BLU-ANTIVERDE ,**



## **LE LEGGI DELLA SINTESI CROMATICA PER IL CAMPO GLUONICO:**

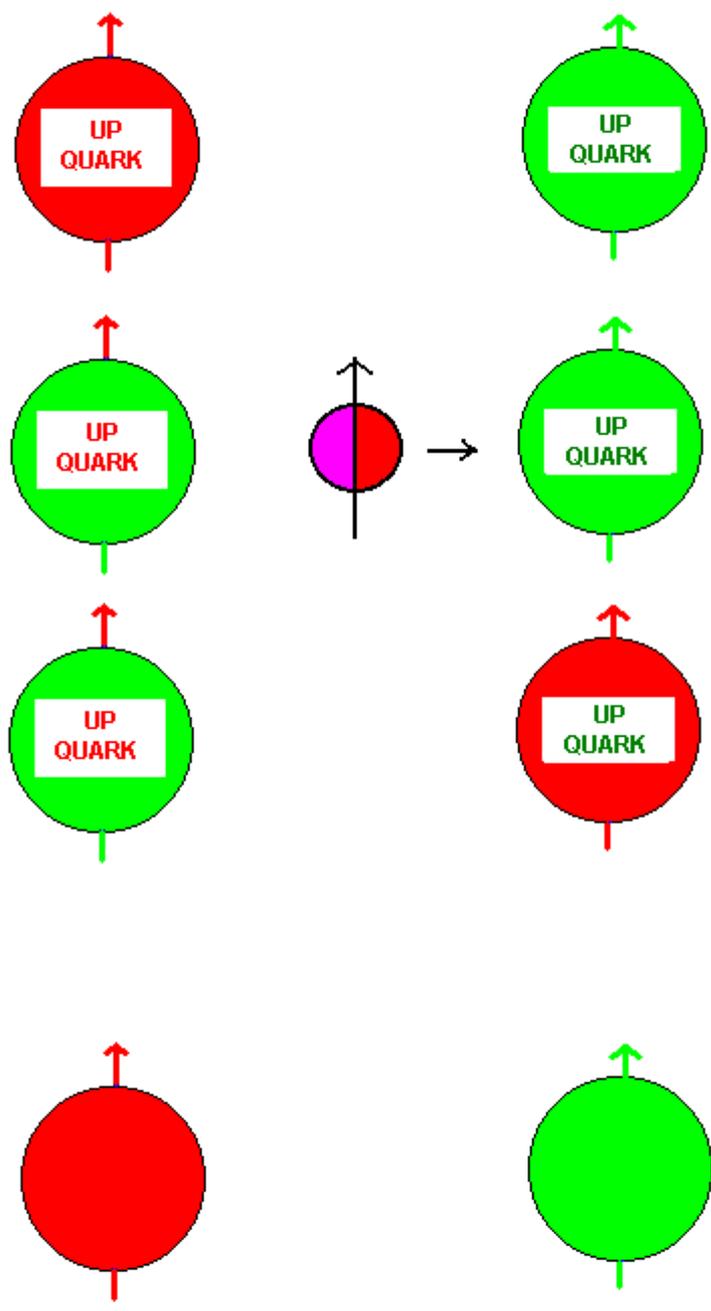


**ANTIROSSO = AZZURRO (CIANO) = VERDE + BLU**  
**ANTIVERDE = PORPORA (MAGENTA) = ROSSO + BLU**  
**ANTIBLU = GIALLO = ROSSO + VERDE**  
**ROSSO + VERDE + BLU = INCOLORE (BIANCO)**  
**ANTIROSSO + ROSSO = INCOLORE**  
**ANTIVERDE + VERDE = INCOLORE**  
**ANTIBLU + BLU = INCOLORE**

**SCAMBIO DI UN GLUONE ROSSO-ANTIVERDE TRA DUE QUARK:**

**IL QUARK ROSSO CHE EMETTE IL GLUONE SI TRASFORMA IN QUARK VERDE**

**IL QUARK VERDE CHE ASSORBE IL GLUONE SI TRASFORMA IN QUARK ROSSO**



# PIONI: BOSONI SCALARI (SPIN = 0)

## I VETTORI DELLA FORZA SUBNUCLEARE FORTE

### (INTERAZIONE RESIDUA) TRA NUCLEONI

#### (PROTONE E NEUTRONE)

#### TIPI: POSITIVO, NEGATIVO, NEUTRO

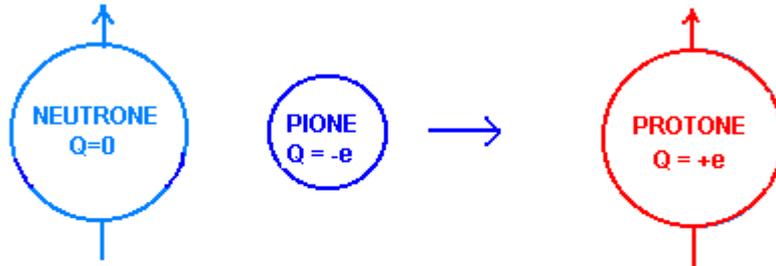
FORZA SUBNUCLEARE FORTE (ATTRATTIVA)  
TRA PROTONE, GENERATA DALLO SCAMBIO  
DI UN PIONE VIRTUALE NEUTRO



FORZA SUBNUCLEARE FORTE (ATTRATTIVA)  
TRA PROTONE E NEUTRONE, GENERATA  
DALLO SCAMBIO DI UN PIONE VIRTUALE  
POSITIVO



FORZA SUBNUCLEARE FORTE (ATTRATTIVA)  
TRA NEUTRONE E PROTONE, GENERATA  
DALLO SCAMBIO DI UN PIONE VIRTUALE  
NEGATIVO

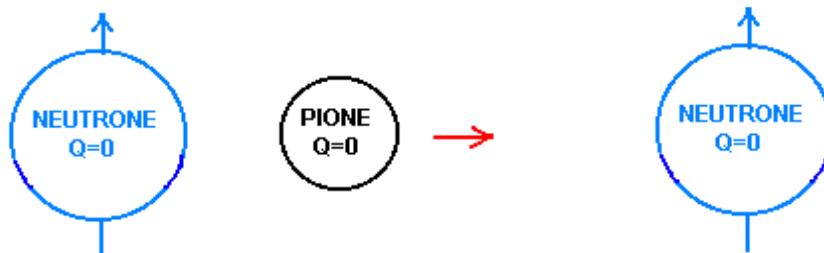


NEUTRONE CHE SI TRASFORMA  
IN UN PROTONE EMETTENDO  
UN PIONE VIRTUALE NEGATIVO

PROTONE CHE SI TRASFORMA  
IN UN NEUTRONE ASSORBENDO  
UN PIONE VIRTUALE NEGATIVO

LA VIOLAZIONE DEL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL' ENERGIA DURANTE  
IL TRANSITO DEL PIONE VIRTUALE NEGATIVO DAL NEUTRONE AL PROTONE , E'  
CONSENTITA ,PURCHE' ESSA SIA COMPATIBILE CON IL PRINCIPIO DI  
INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG

FORZA SUBNUCLEARE FORTE (ATTRATTIVA)  
TRA NEUTRONI , GENERATA DALLO SCAMBIO  
DI UN PIONE VIRTUALE NEUTRO



NEUTRONE CHE  
EMETTE UN PIONE  
VIRTUALE NEUTRO

NEUTRONE CHE  
ASSORBE UN PIONE  
VIRTUALE NEUTRO

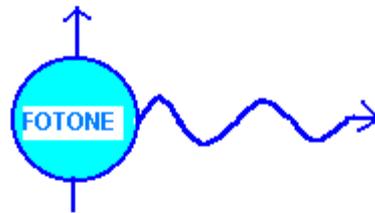
LA VIOLAZIONE DEL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA  
DURANTE IL TRANSITO DEL PIONE VIRTUALE NEUTRO DA UN NEUTRONE  
ALL' ALTRO, E' CONSENTITA , PURCHE' ESSA SIA COMPATIBILE CON IL  
PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG

## FOTONE : BOSONE VETTORIALE (SPIN = 1)

### IL VETTORE DELLA FORZA ELETTRICITÀ TRA PARTICELLE DOTATE DI CARICA ELETTRICA

spin = 1

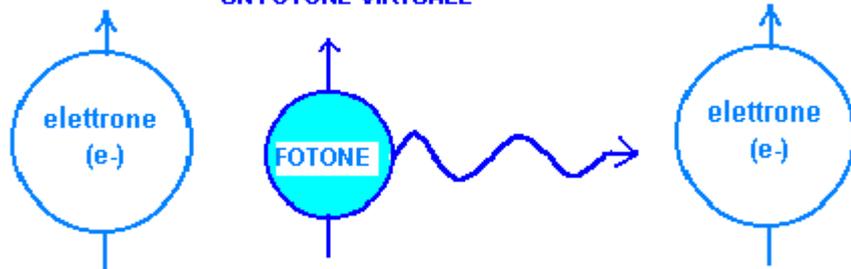
Q = 0



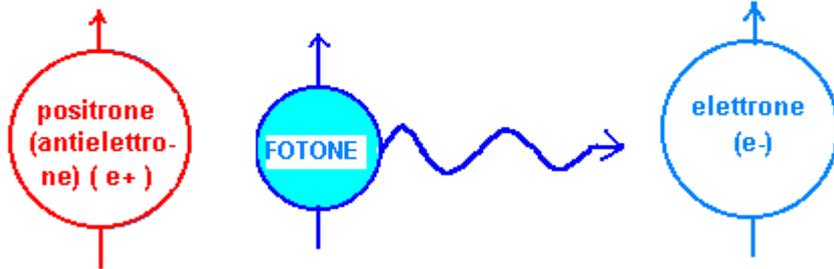
SIMBOLO:  $\gamma$

MASSA = 0

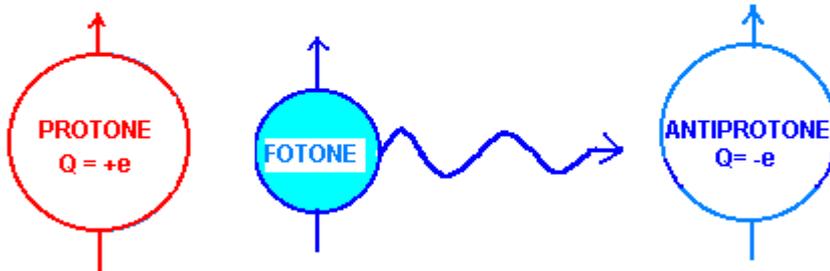
FORZA ELETTRICA REPULSIVA  
GENERATA DALLO SCAMBIO DI  
UN FOTONE VIRTUALE



FORZA ELETTRICA ATTRATTIVA  
GENERATA DALLO SCAMBIO DI  
UN FOTONE VIRTUALE



FORZA ELETTRICA ATTRATTIVA  
GENERATA DALLO SCAMBIO DI  
UN FOTONE VIRTUALE



**FORZA ELETTROMAGNETICA GENERATA DALLO  
SCAMBIO DI UN FOTONE VIRTUALE**

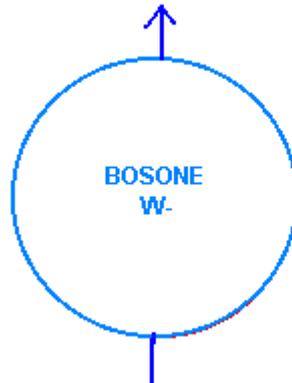


## BOSONI VETTORI PESANTI (SPIN = 1)

### I VETTORI DEL CAMPO QUANTISTICO ELETTRODEBOLE (POSITIVO E NEGATIVO), Z (NEUTRO)

spin = 1

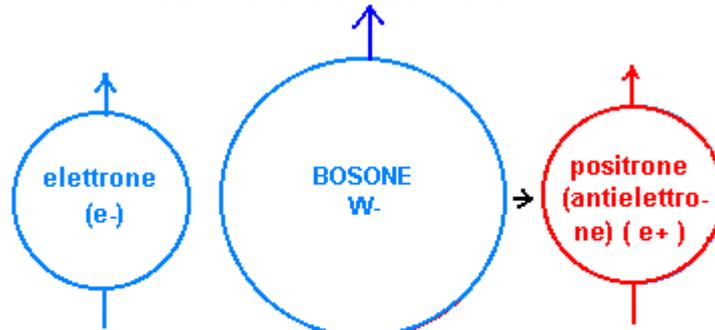
Q = -e



SIMBOLO:  $W^-$

MASSA = 79,5 Gev  $\approx$  84,736 Mp

FORZA SUBNUCLEARE ELETTRODEBOLE  
GENERATA DALLO SCAMBIO DI UN  
BOSONE VIRTUALE  $W^-$  TRA UN  
ELETTRONE ED UN POSITRONE

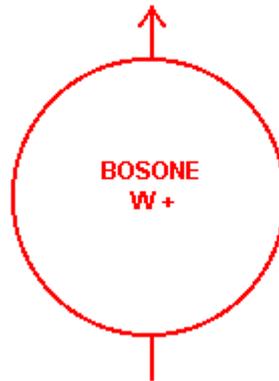


ELETTRONE CHE EMETTE UN BOSONE  
VIRTUALE  $W^-$  TRASFORMANDOSI IN  
UN NEUTRINO ELETTRONICO.

POSITRONE CHE ASSORBE UN BOSONE  
VIRTUALE  $W^-$  TRASFORMANDOSI IN  
UN NEUTRINO ELETTRONICO .

spin = 1

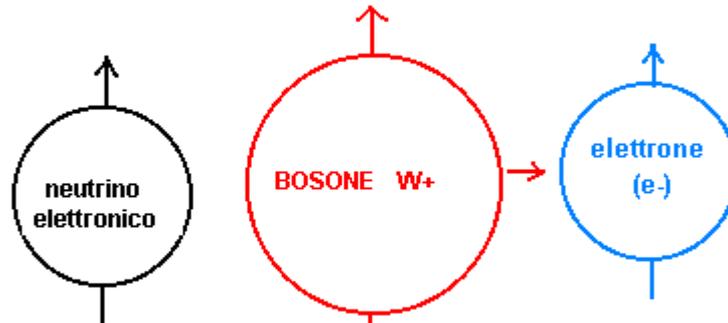
Q = +e



SIMBOLO: W+

MASSA = 79,5 Gev  $\approx$  84,736 Mp

FORZA SUBNUCLEARE ELETTRODEBOLE  
GENERATA DALLO SCAMBIO DI  
UN BOSONE VIRTUALE W+ TRA  
UN ELETTRONE ED UN NEUTRINO  
ELETTRONICO



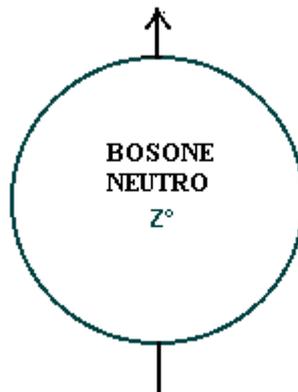
NEUTRINO ELETTRONICO CHE  
EMETTE UN BOSONE VIRTUALE W+  
TRASFORMANDOSI IN UN  
ELETTRONE.

ELETTRONE CHE ASSORBE UN BOSONE  
VIRTUALE W+ TRASFORMANDOSI IN  
UN NEUTRINO ELETTRONICO.

LE PARTICELLE INTERAGISCONO TRASFORMANDOSI L'UNA NELL'ALTRA.

spin = 1

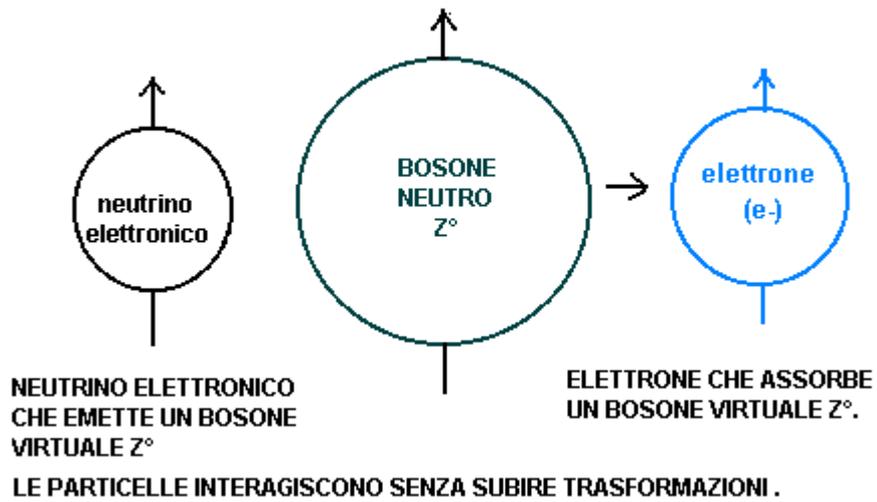
Q = 0



SIMBOLO : Z°

MASSA = 90 Gev ~ 95,76 Mp

FORZA SUBNUCLEARE ELETTRODEBOLE  
GENERATA DALLO SCAMBIO DI UN  
BOSONE VIRTUALE Z°



# **LE PRINCIPALI COMBINAZIONI ADRONICHE DEL MODELLO STANDARD**

**I PRINCIPALI MESONI**

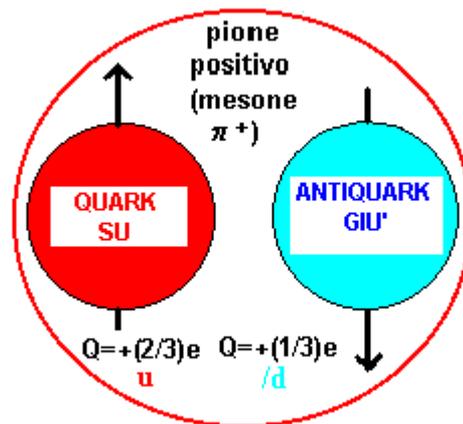
**I PRINCIPALI BARIONI**

# I PRINCIPALI MESONI

## PIONI

spin=0

$Q = +e$

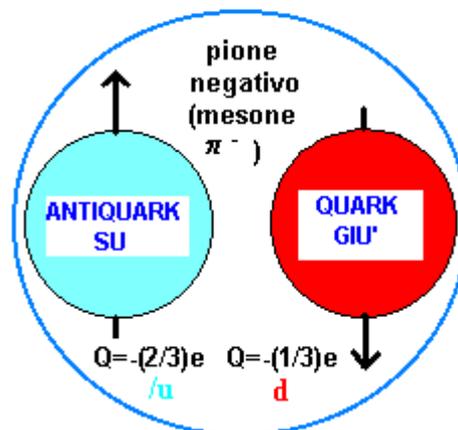


SIMBOLO:  $\pi^+$

MASSA = 0,14 Gev  $\approx$  0,149 Mp

spin=0

$Q = -e$

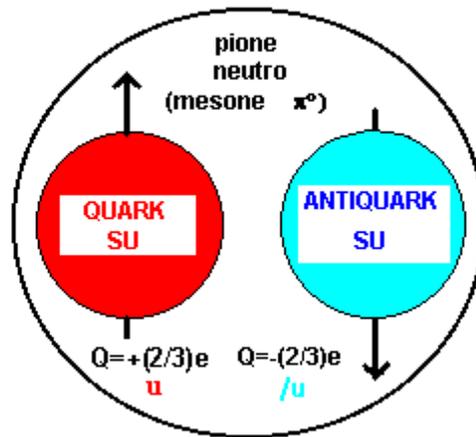


SIMBOLO:  $\pi^-$

MASSA = 0,14 Gev  $\approx$  0,149 Mp

spin=0

Q = 0



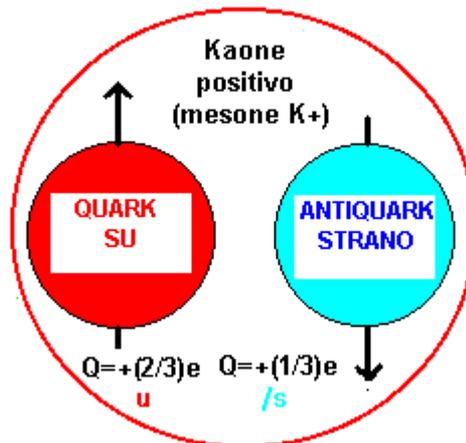
SIMBOLO:  $\pi^0$

MASSA = 0,135 Gev  $\sim$  0,143 Mp

## KAONI

spin=0

Q = +e

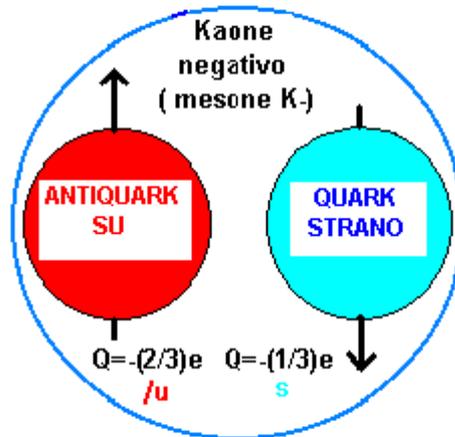


SIMBOLO:  $K^+$

MASSA = 0,494 Gev  $\sim$  0,526 Mp

spin=0

Q=-e

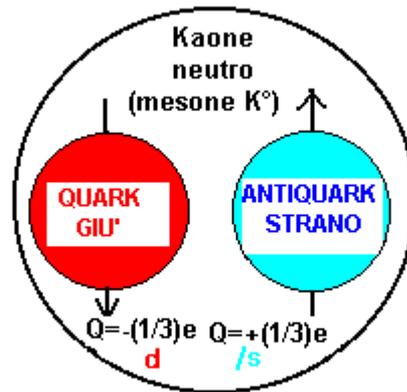


SIMBOLO: K-

MASSA = 0,494 Gev  $\approx$  0,526 Mp

spin = 0

Q = 0



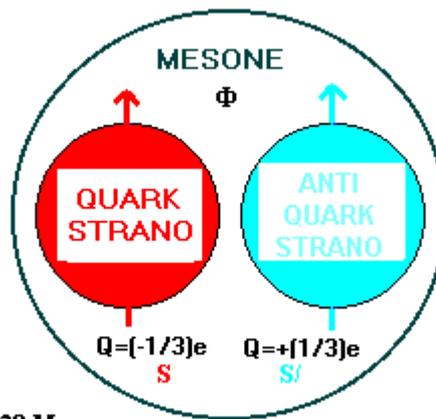
SIMBOLO: K<sup>0</sup>

MASSA = 0,494 Gev  $\approx$  0,526 Mp

## MESONE PHI

SPIN = 1

Q = 0



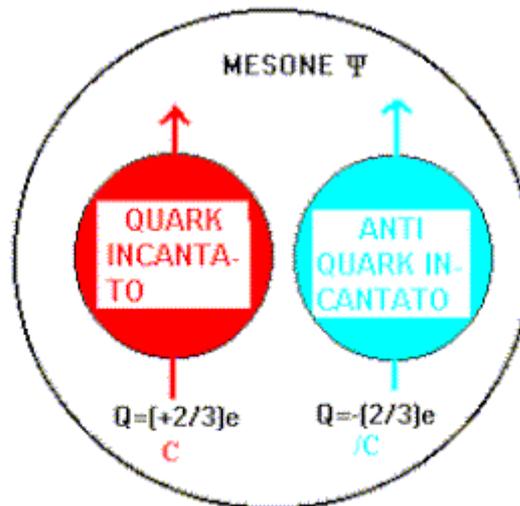
SIMBOLO:  $\phi$

MASSA  $\sim$  1,06 Gev  $\sim$  1,129 Mp

## MESONE PSI

SPIN = 1

Q = 0



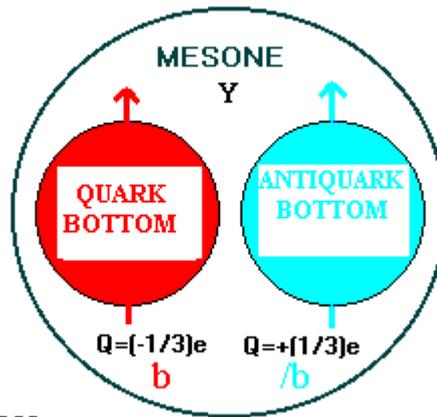
SIMBOLO:  $\psi$

MASSA  $\sim$  3,095 Gev  $\sim$  3,298 Mp

## MESONE Y

SPIN = 1

Q = 0



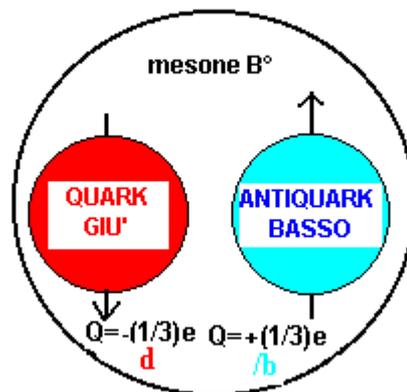
SIMBOLO: Y

MASSA  $\sim 10 \text{ Gev} \sim 10,65 \text{ Mp}$

## MESONI B

spin = 0

Q = 0

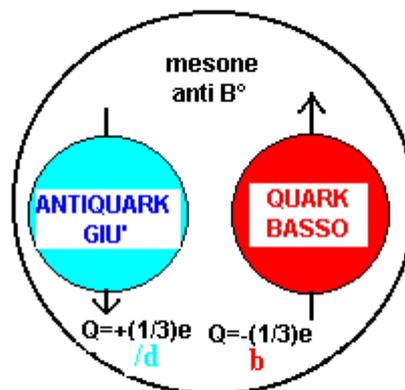


SIMBOLO: B<sup>0</sup>

MASSA = 5,29 Gev ~ 5,63 Mp

spin = 0

Q = 0



SIMBOLO: B<sup>0</sup>-

MASSA = 5,29 Gev/c ~ 5,63 Mp

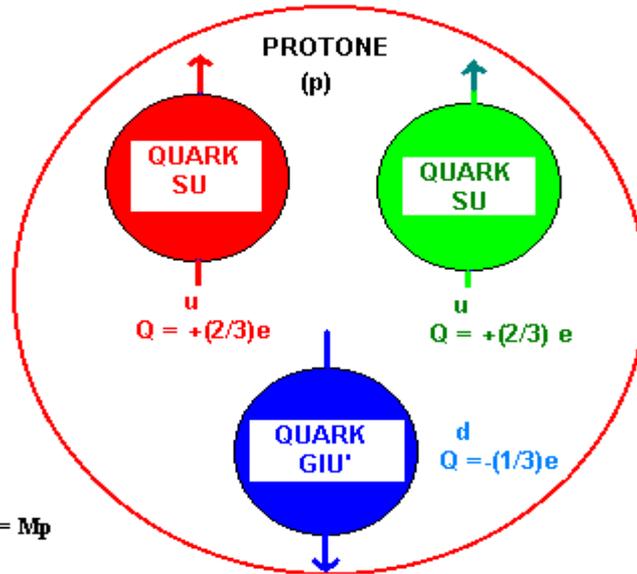
# I PRINCIPALI BARIONI

## NUCLEONI

SPIN = 1/2

SIMBOLO: p

MASSA = 0,9382 Gev = Mp

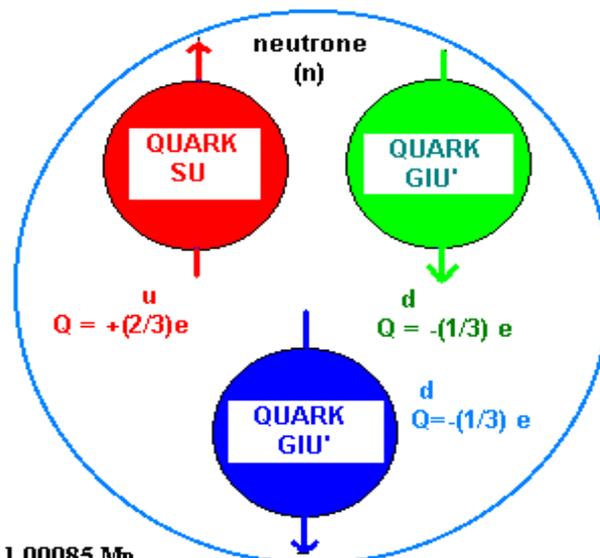


Q = +e

SPIN = 1/2

SIMBOLO: n

MASSA = 0,939 Gev = 1,00085 Mp

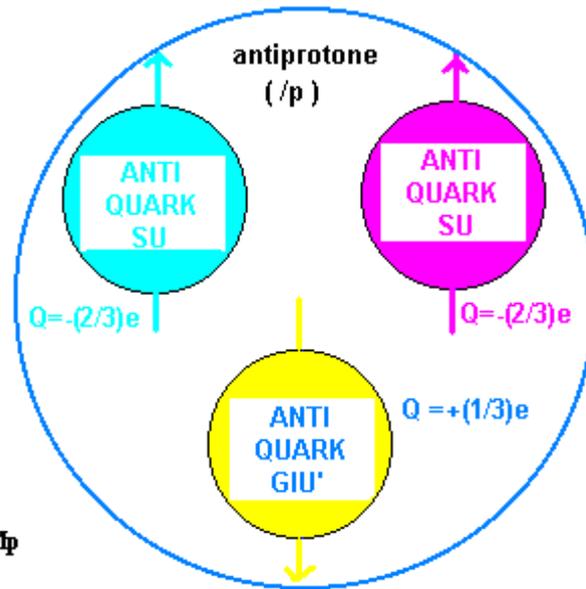


Q = 0

## ANTINUCLEONI

SPIN = 1/2

Q = -e

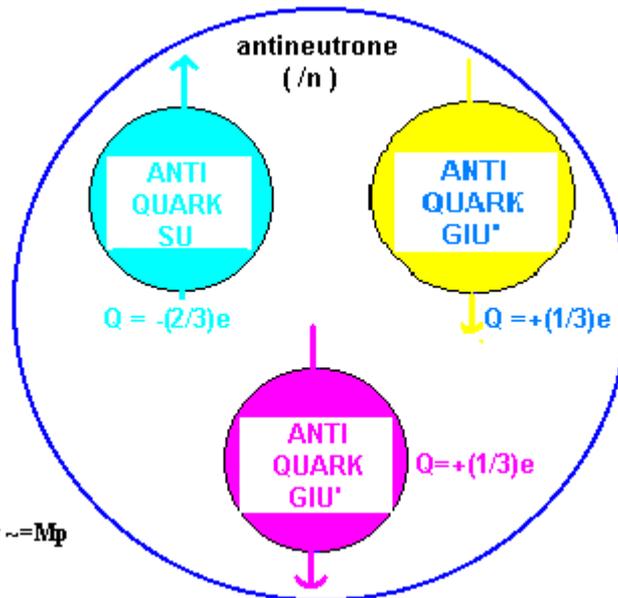


SIMBOLO:  $\bar{p}$

MASSA = 0,9382 Gev =  $M_p$

SPIN = 1/2

Q = 0



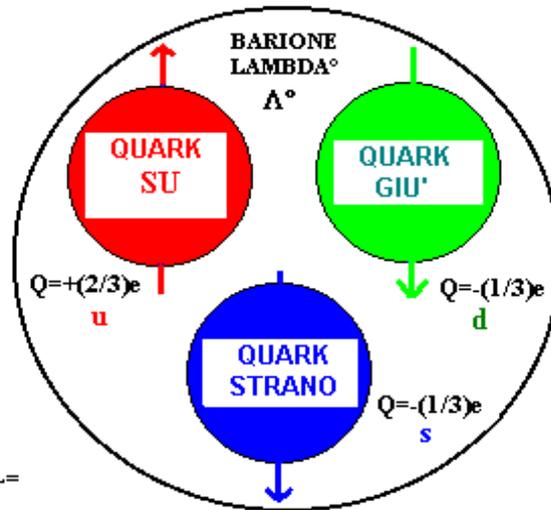
SIMBOLO:  $\bar{n}$

MASSA = 0,9395 Gev  $\approx M_p$

## ALCUNI IPERONI

SPIN: 1/2

$Q = 0$

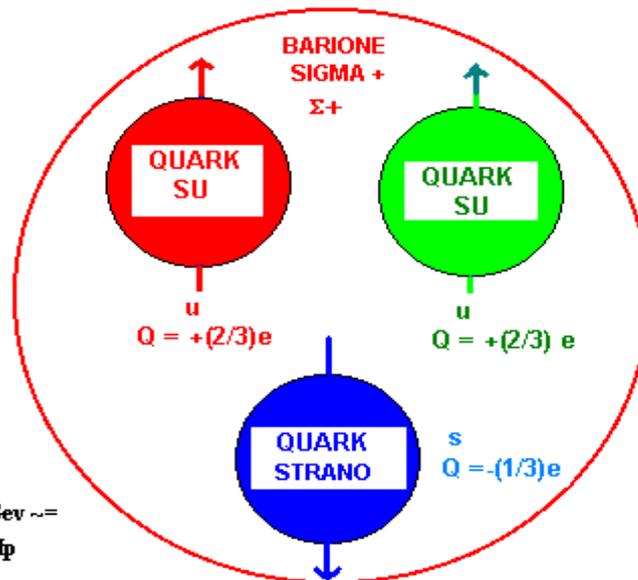


SIMBOLO:  $\Lambda^0$

MASSA = 1,116 Gev  $\approx$   
 $\approx$  1,116 Mp

SPIN = 1/2

$Q = +e$

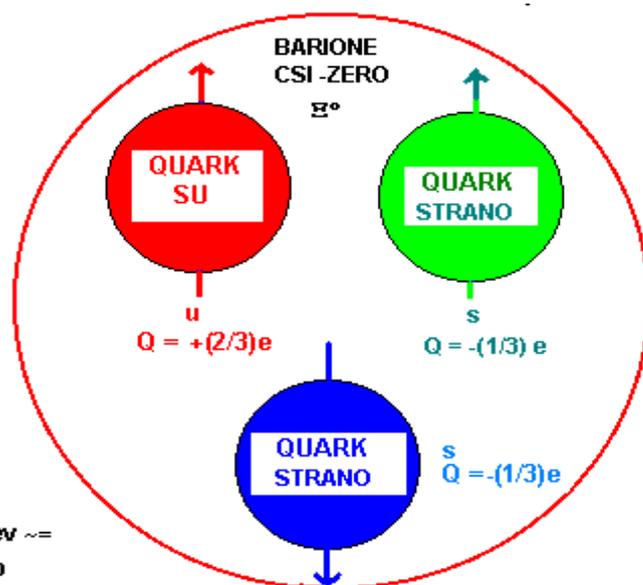


SIMBOLO:  $\Sigma^+$

MASSA = 1,189 Gev  $\approx$   
 $\approx$  1,267 Mp

SPIN = 1/2

Q = 0

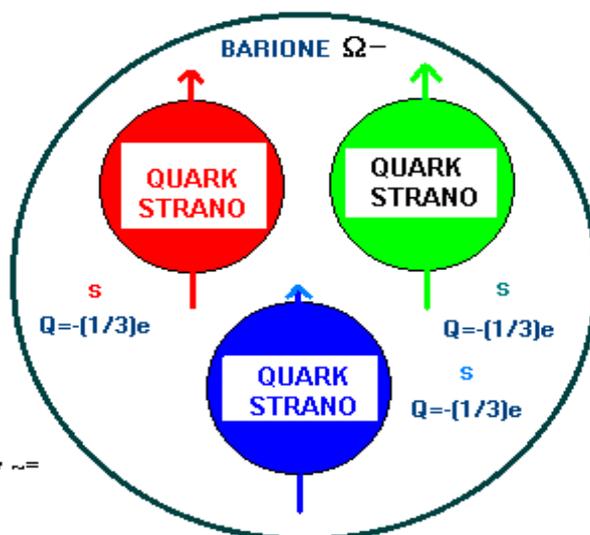


SIMBOLO:  $\Sigma^0$

MASSA = 1,315 Gev  $\approx$   
 $\approx$  1,399 Mp

SPIN : 3/2

Q = -e



SIMBOLO:  $\Omega^-$

MASSA = 1,67 Gev  $\approx$   
 $\approx$  1,78 Mp

# MEMORANDUM

## **ANTIPROTONE**

Antiparticella del protone scoperta dal fisico italiano Emilio Segrè nel 1955 all'università di California (Berkeley), bombardando un bersaglio metallico con protoni da 6,2 GeV prodotti da un sincrotrone.

Ha una carica elettrica negativa uguale, in modulo, a quella del protone ed una massa uguale a quella protonica.

## **ELETTRONE**

Particella fondamentale scoperta nel 1897 dal fisico inglese Joseph John Thomson (premio Nobel per la Fisica 1906) attraverso esperimenti sulla scarica elettrica nei gas rarefatti.

Thomson, studiando gli effetti combinati di campi elettrici e magnetici sui raggi catodici, cioè sugli elettroni, riuscì a determinare il rapporto  $e/m$  tra la carica elettrica  $e$  e la massa  $m$  dell'elettrone.

La misura della carica elettrica (negativa) posseduta dall'elettrone,

( $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) fu effettuata nel 1909 dal fisico statunitense Millikan in una serie di delicatissime esperienze effettuate con microscopiche gocce d'olio elettrizzate con raggi X. L'elettrone è soggetto alle interazioni deboli ed elettromagnetiche.

## **FOTONE**

Quanto (quantum) di energia elettromagnetica  $E=hf$ , dove  $h$  è la costante universale di Planck ed  $f$  è la frequenza dell'onda elettromagnetica, introdotto nell'ambito della primitiva teoria dei quanti da Albert Einstein per spiegare l'effetto fotoelettrico, che consiste nell'emissione di elettroni da parte di un metallo colpito dalla radiazione luminosa.

Nell'ambito dell'elettrodinamica quantistica (Dirac, 1928), che si basa sull'applicazione della teoria della relatività speciale alla meccanica quantistica, per descrivere il comportamento delle particelle cariche, la forza attrattiva o repulsiva tra due cariche elettriche è generata dallo scambio di un fotone, cioè di un pacchetto di energia elettromagnetica generato violando il principio di conservazione dell'energia, in quanto un sistema avente un'energia totale pari all'energia associata alla massa a riposo complessiva delle particelle, si trasforma in un sistema avente un'energia totale maggiore, tenendo conto della generazione di un fotone con energia  $E = hf$ .

Perciò il fotone deve essere un fotone virtuale, affinché non sia rivelabile la violazione della legge di conservazione dell'energia. I fotoni associati alla radiazione luminosa (o

X o  $\gamma$ ), hanno massa a riposo nulla e si muovono alla velocità della luce, trasportando energia e quantità di moto.

Appartengono alla famiglia dei vettori di forza e sono dei bosoni, in quanto dotati di spin pari a 1.

## **MESONI**

Particelle di massa maggiore di quella dell'elettrone, appartenenti alla famiglia degli adroni, in quanto sono soggetti sia all'interazione forte che a quella elettro-debole.

L'ipotesi dell'esistenza di una particella di massa intorno a 200 volte quella elettronica fu avanzata nel 1935 dal fisico giapponese Yukawa, per fornire una spiegazione dell'interazione forte tra due nucleoni (protoni e neutroni) nei nuclei atomici.

Per analogia con l'interpretazione dell'interazione elettromagnetica tra due particelle cariche, fornita dalla teoria dell'elettrodinamica quantistica e basata sullo scambio di un fotone (quanto di energia elettromagnetica), Yukawa ipotizzò lo scambio di un mesone ( $\pi$ ) tra due neutroni (mesone neutro) o tra un neutrone ed un protone (mesone carico), ammettendo una violazione del principio di conservazione della massa e dell'energia per un intervallo di tempo compatibile con il principio d'indeterminazione di Heisenberg.

Una delle formulazioni di detto principio equivale infatti ad affermare che, quanto maggiore sia l'errore sperimentale  $\Delta E$  associato alla misura dell'energia di una particella, tanto minore debba essere la durata  $\Delta t$  della misura, con legge di proporzionalità inversa:  $\Delta E \cdot \Delta t \sim h/(2\pi)$ . Pertanto, essendo  $\Delta E = mc^2$  l'energia relativistica associata alla massa  $m$  del mesone virtuale creato ed  $R = c \cdot \Delta t$  il raggio d'azione stimato (range) delle forze nucleari ( $\sim 2 \cdot 10^{-13}$  cm), si ha:  $mc^2 \cdot (R/c) \sim h/(2\pi)$ ;  $m \sim h/(2\pi Rc) \sim 193$  masse elettroniche.

Una particella con massa intorno a 200 volte la massa dell'elettrone fu scoperta nel 1938 da Anderson e Neddermeyer studiando gli sciami delle particelle secondarie prodotte dai raggi cosmici.

Erroneamente tale particella fu identificata con la particella di Yukawa fino al 1947, quando Powell ed Occhialini scoprirono il vero mesone  $p$ , che fa parte della radiazione cosmica e decade producendo il "mesone" di Anderson e Neddermeyer ed un neutrino.

Dal 1947 si sa che il mesone  $\pi$ , che è soggetto all'interazione forte e determina le interazioni tra nucleoni, ha una massa pari a circa 270 masse elettroniche, ed è ben distinto, essendo un adrone, dal "mesone" scoperto nel 1938, il quale appartiene invece alla famiglia dei leptoni, soggetti all'interazione elettrodebole.

Allo pseudomesone di Anderson è stato dato il nome di muone ( $\mu$ ). Dopo il 1947 furono scoperti nella radiazione cosmica altri mesoni, sia carichi che neutri, i mesoni K, detti kaoni, con masse intorno a 960 masse elettroniche.

I kaoni, poichè evidenziano delle anomalie connesse alle varie modalità di decadimento in particelle meno pesanti, vengono definiti kaoni strani, cioè dotati di una nuova categoria tipica del mondo delle particelle subnucleari: la stranezza.

## **NEUTRINO**

Particella fondamentale la cui esistenza fu ipotizzata nel 1933 dal fisico svizzero Wolfgang Pauli per spiegare la variabilità dell'energia cinetica degli elettroni emessi dai nuclei soggetti al decadimento radioattivo di tipo  $\beta$ .

Pauli postulò l'esistenza di una particella priva sia di massa che di carica elettrica, che possa rendere conto del fatto che gli elettroni emessi sono caratterizzati da energie cinetiche comprese tra zero ed un valore massimo.

Ammettendo l'esistenza del neutrino si giustifica per il decadimento  $\beta$  la validità dei principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto: infatti, se si postula che i neutrini vengano emessi con velocità opposte a quelle degli elettroni e con energie cinetiche tali che sommate a quelle degli elettroni diano una somma costante, si giustificano immediatamente le modalità osservate sperimentalmente per il decadimento  $\beta$ .

Essendo ritenuta nulla la massa dei neutrini, si deve ammettere che essi si muovano con la velocità della luce, come i fotoni.

Esistono tre tipi di neutrini con le rispettive antiparticelle, associati rispettivamente all'elettrone, al muone ed al leptone  $\tau$ .

I neutrini appartengono alla famiglia dei leptoni e sono soggetti alla sola interazione debole.

## **NEUTRONE**

Particella scoperta dal fisico inglese Chadwick nel 1932, il quale fornì una nuova interpretazione degli esperimenti effettuati da Bothe e Becker (1930) e dai coniugi francesi Joliot - Curie (1932) bombardando bersagli di boro e di berillio con le particelle  $\alpha$  (nuclei di elio) emesse dal radio.

Le prove teorico-sperimentali prodotte da Chadwick evidenziarono la presenza del neutrone nei nuclei atomici, che anteriormente al 1932 si riteneva fossero costituiti da protoni ed elettroni.

Il neutrone è privo di carica elettrica ed ha una massa circa uguale a quella del protone. Appartiene alla famiglia degli adroni ed è soggetto pertanto sia alle interazioni forti che a quelle deboli ed elettromagnetiche.

Il neutrone ed il protone vengono entrambi definiti nucleoni, in quanto costituiscono i nuclei atomici.

## **POSITRONE (O POSITONE)**

Antiparticella dell'elettrone (elettrone positivo), scoperta nel 1932 dal fisico statunitense Anderson e successivamente (1933) dai fisici Blackett (inglese) ed Occhialini.

La scoperta del positrone, la prima antiparticella identificata sperimentalmente a seguito della formulazione della meccanica quantistica relativistica da parte del fisico inglese Dirac (1928), fu effettuata studiando con camere a nebbia (di Wilson), in presenza di un campo magnetico, le coppie elettrone-positrone (particella-antiparticella) generate in

placchette bersaglio, di piombo, da fotoni gamma presenti nei raggi cosmici. Furono osservate per la prima volta traiettorie circolari specularmente simmetriche (con opposti raggi di curvatura), descritte in un campo magnetico da coppie di particelle di uguale massa e carica elettrica opposta. Il positrone è soggetto alle interazioni deboli ed elettromagnetiche (interazioni elettrodeboli) e fa parte della prima famiglia dei leptoni.

## **PROTONE**

Particella ritenuta elementare fino a trent'anni fa, quando si ottennero nei laboratori internazionali di fisica delle alte energie, europei e statunitensi, le prime conferme sperimentali della validità del modello teorico a quark proposto nel 1964 dal fisico statunitense Gell Mann.

Il protone, che costituisce il nucleo dell'atomo di idrogeno, ha una carica elettrica positiva uguale, in modulo, a quella dell'elettrone, ed una massa circa 1840 volte maggiore di quella elettronica.

Il protone appartiene alla famiglia degli adroni ed è soggetto pertanto sia alle interazioni forti che a quelle deboli ed elettromagnetiche.

# LE LEGGI DEL MONDO FISICO

## ***RIFLETTIAMO SULLE ESPERIENZE QUOTIDIANE PER SPIEGARE CON PAROLE SEMPLICI E CON QUALCHE FORMULA LE LEGGI SCRITTE DA DIO NELLA STRUTTURA DEL MONDO FISICO***

### ***LA PRIMA LEGGE DELLA DINAMICA (PRINCIPIO D'INERZIA DI GALILEI-NEWTON)***

"Un corpo, non sottoposto a forze, mantiene indefinitamente il suo stato di quiete o di moto rettilineo ed uniforme (con velocità costante)".

Se teniamo presente che l'inerzia dei corpi, cioè la loro attitudine a mantenere invariato il loro stato di quiete o di moto rettilineo ed uniforme è tanto maggiore quanto maggiore è la loro massa, cioè la quantità di materia che li caratterizza, deduciamo che questo principio è una conseguenza diretta dell'inerzia, che nel sistema internazionale di unità di misura si esprime in chilogrammi.

Sulla Terra l'effetto della forza di gravità può essere neutralizzato facendo muovere i corpi su un piano orizzontale rigido e liscio, con caratteristiche tali da consentire di attenuare notevolmente gli effetti delle forze di attrito, che tendono ad ostacolare il moto.

Per verificare che un corpo in moto rettilineo, se non è soggetto a forze, continua a muoversi in linea retta con velocità costante, potremmo fare alcune prove con alcune biglie d'avorio, come quelle che si adoperano per giocare a biliardo, facendole muovere su superfici orizzontali, rigide e di differente levigatezza.

Cercando di imprimere alle biglie la stessa velocità iniziale in tutte le prove, potremmo rilevare che lo spazio percorso prima dell'arresto è tanto più grande quanto più levigata è la superficie.

Per esempio, potremmo rilevare che la distanza di arresto, a parità di velocità iniziale, è maggiore se si esegue l'esperienza su una lastra orizzontale di marmo, rispetto alla distanza di arresto su una superficie orizzontale rigida rivestita di stoffa, che presenta un attrito maggiore.

Si deduce, estrapolando i risultati sperimentali, che il moto rettilineo non cesserebbe mai se si potessero eliminare completamente tutte le resistenze passive che si oppongono al moto, cioè le forze d'attrito nel punto di contatto tra biglia e superficie e le forze aerodinamiche (resistenza dell'aria).

Un'astronave è il laboratorio ideale per la verifica del principio d'inerzia, poichè in essa il peso dei corpi è neutralizzato dall'accelerazione centrifuga del moto orbitale.

Per rendercene conto, pensiamo agli astronauti che fanno esperimenti di meccanica in assenza di gravità, imprimendo ai corpi che "galleggiano" nella navicella spaziale, piccole spinte che producono moti rettilinei con velocità costante fino al momento dell'impatto dei corpi con le pareti della navicella.

Nel XVII secolo Galilei, facendo rotolare i corpi su un piano inclinato liscio, che gli consentiva di ridurre notevolmente il valore dell' accelerazione di gravità ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) per eseguire agevolmente gli esperimenti, rilevava variazioni di velocità sempre più piccole al diminuire dell'inclinazione del piano.

Ebbe così l'intuizione geniale di prevedere, nel caso del piano orizzontale liscio, il mantenimento indefinito dello stato di moto rettilineo ed uniforme di un corpo, nelle condizioni ideali di eliminazione di tutte le forze, svincolandosi definitivamente dalla fisica di Aristotele, il quale, senza ricorrere ad alcun esperimento, sentenziò che occorre sempre una forza per mantenere il moto rettilineo ed uniforme di un corpo.

### ***L'IMPULSO DI UNA FORZA E LA QUANTITÀ DI MOTO DI UN CORPO***

L'impulso di una forza è una grandezza fisica vettoriale, caratterizzata cioè da un numero e da una direzione orientata, ed è definita, se la forza è costante, dal prodotto  $I = F t$  della forza per l' intervallo di tempo  $t$  durante il quale essa agisce su un corpo.

Se, per esempio, ad un corpo viene applicata una forza costante di 3 kg-peso in un intervallo di tempo di 10 secondi, l'impulso della forza è pari a 30 kg-peso x sec.

L'impulso della forza è in sostanza un vettore parallelo e concorde con la forza, ed ha un valore (modulo) proporzionale al tempo durante il quale la forza agisce.

La quantità di moto di un corpo è una grandezza fisica vettoriale, parallela alla velocità, ed ha un modulo  $P = m V$  direttamente proporzionale sia alla massa  $m$  del corpo, che alla sua velocità  $V$ .

Se, per esempio, un autotreno da trenta tonnellate si muove alla stessa velocità di un' auto da una tonnellata, il primo possiede una quantità di moto trenta volte maggiore di quella dell' auto.

Una forza applicata ad un corpo in movimento, lo accelera se è parallela e concorde in verso con il vettore velocità, oppure se forma con esso un angolo minore di  $90^\circ$ , lo decelera se è invece parallela e discorde in verso con il vettore velocità, oppure se forma con esso un angolo maggiore di  $90^\circ$ .

Mentre nel primo caso aumentano la velocità e la quantità di moto, in quanto il corpo viene accelerato nel verso della velocità iniziale, nel secondo caso invece la velocità e la quantità di moto diminuiscono, in quanto il corpo viene decelerato nel verso della velocità iniziale, finché non si fermerà per essere subito dopo accelerato nella direzione e nel verso della forza.

Pertanto una o più forze applicate ad un corpo, sostituibili con la relativa risultante, hanno come effetto una variazione della velocità e della quantità di moto del corpo.

### ***LA SECONDA LEGGE DELLA DINAMICA***

#### ***(LEGGE DI GALILEI-NEWTON)***

Per la seconda legge della dinamica, se una o più forze costanti, sostituibili con la relativa risultante  $F$ , agiscono su un corpo in movimento per un dato intervallo di tempo

t, l'impulso I della forza o della risultante delle forze uguaglia la variazione della quantità di moto del corpo, in relazione allo stesso intervallo di tempo:

$$I = F t = P_{\text{finale}} - P_{\text{iniziale}} = m (V_{\text{finale}} - V_{\text{iniziale}}).$$

Questa fondamentale legge della natura, scoperta da Galileo Galilei ed enunciata matematicamente da Newton dopo l'introduzione del calcolo differenziale, che fu inventato, indipendentemente, da Newton e Leibnitz, è nota come secondo principio della dinamica, e comprende come caso particolare il principio d'inerzia.

Se, per esempio, si applicasse ad un corpo inizialmente fermo o in moto rettilineo uniforme, una forza costante di 10 kg-peso per 5 secondi, ottenendo un certo aumento della quantità di moto, si potrebbe verificare che, ripetendo l'esperimento con lo stesso corpo e con una forza costante di 30 Kg-peso, si otterrebbe nello stesso intervallo di tempo una variazione della quantità di moto tripla della precedente.

Poichè la quantità di moto di un corpo varia sia al variare della velocità, sia se la massa del corpo aumenta o diminuisce durante il moto, la seconda legge della dinamica, enunciata attraverso la variazione della quantità di moto, è valida anche nei casi particolari in cui un corpo acquista o cede materia durante il moto, come accade nel caso di un missile, la cui massa al momento del lancio, quando i serbatoi sono pieni di combustibile e di comburente (idrogeno e ossigeno liquidi), è maggiore della massa relativa alla fase finale del volo, quando i serbatoi sono quasi vuoti.

Nei casi più comuni, quando la massa del corpo rimane costante durante il moto, la seconda legge della dinamica si può esprimere attraverso la variazione della velocità nell'intervallo di tempo durante il quale il corpo subisce l'azione della forza o della risultante delle forze.

Se teniamo presente che l'accelerazione media di un corpo in moto si definisce come il rapporto tra la variazione di velocità dello stesso e l'intervallo di tempo che si considera, possiamo enunciare la seconda legge della dinamica affermando che l'accelerazione acquisita da un corpo sotto l'azione di una forza F o della risultante delle forze esterne applicate ad esso, è parallela e concorde con la forza o con la risultante delle forze, ed ha un valore inversamente proporzionale alla massa del corpo, cioè si dimezza se raddoppia la massa del corpo, mantenendo costante la forza, e raddoppia se invece si dimezza la massa del corpo:  $a = F / m$ .

Infatti, se consideriamo un intervallo di tempo di un secondo

( $t = 1$ ), l'impulso I della forza costante F, essendo dato dal prodotto di F per il tempo t, uguaglia F in valore, direzione e verso.

D'altra parte, la variazione di velocità  $V_{\text{finale}} - V_{\text{iniziale}}$  uguaglia in valore, direzione e verso l'accelerazione a.

Pertanto la seconda legge del moto, per un corpo avente massa m, si può esprimere dicendo che forza ed accelerazione sono direttamente proporzionali:  $F = m a$ , oppure  $F / a = m$ .

Per la verifica di questa legge fondamentale potremmo giocare a bigliardo adoperando biglie di massa differente: cercando di imprimere con la stecca sempre la stessa forza, potremmo rilevare, in intervalli di tempo uguali, variazioni di velocità inversamente

proporzionali alla massa delle biglie.

Questa legge, enunciata da Galilei sulla base di osservazioni sperimentali, fu espressa matematicamente da Newton in termini di variazioni della quantità di moto  $P = MV$ , utilizzando il formalismo del calcolo differenziale :  $F = d(MV)/dt$ , essendo  $d(MV)$  la variazione infinitesima della quantità di moto e  $dt$  un intervallo temporale infinitesimo.

Se è nota la legge di variazione della forza  $F$  in funzione del tempo, della velocità e delle coordinate del corpo su cui essa agisce, la formula di Newton costituisce l'equazione differenziale del moto, cioè l'equazione fondamentale che consente di determinare, con metodi analitici o numerici, note la posizione e la velocità iniziali, la velocità del corpo in funzione del tempo, e quindi le coordinate del corpo in funzione del tempo.

Se, in particolare, sul corpo non agisce alcuna forza, la quantità di moto  $P = MV$  e la velocità  $V$  si mantengono costanti, in base al principio d'inerzia.

Come ulteriore esempio applicativo consideriamo il moto di un veicolo, ferroviario o stradale, in curva.

In questo caso, la forza che impedisce al veicolo di uscire dalla curva nella direzione della tangente ad essa, è, nel caso del treno, la forza centripeta (diretta verso il centro della curva), esercitata dalle rotaie; nel caso di un'auto, invece, la forza centripeta è costituita dalla risultante delle forze di attrito (aderenza) tra pneumatici e fondo stradale.

In entrambi i casi, essendo la velocità costante in valore, ma non in direzione, in quanto essa è diretta, in ogni punto della curva, secondo la tangente ad essa, la corrispondente variazione di velocità (e quindi l'accelerazione centripeta) è diretta verso il centro della curva, in ogni punto di essa.

Pertanto, indicando con  $F$  la forza centripeta esercitata dai binari o dall'attrito tra pneumatici e fondo stradale, si ottiene l'equazione che lega  $F$  alla velocità ed al raggio  $R$  della curva:  $F = ma = mV^2/R$ , dove l'espressione  $a = V^2/R$  indica l'accelerazione centripeta.

Dalla formula si deduce che, nel caso dell'auto, data una certa aderenza minima tra pneumatici e fondo stradale, dipendente dalle condizioni di esso (asfalto asciutto, bagnato o sdruciolevole), quanto minore è il raggio della curva, cioè quanto più stretta è la curva, tanto più piccola deve essere la velocità, per evitare che la minima forza centripeta disponibile (minima forza d'attrito),  $F_{min}$ , non sia sufficiente a mantenere il moto in curva.

Se questa condizione non fosse soddisfatta, il guidatore perderebbe il controllo dell'auto, che finirebbe fuori strada lungo la tangente alla curva.

Se invece si considera il moto in curva di un veicolo a due ruote, per garantire la stabilità in curva bisogna aggiungere alla forza centripeta dovuta all'aderenza tra pneumatici e fondo stradale, anche la componente orizzontale della forza di reazione del fondo stradale (obliqua rispetto al suolo) sul veicolo (bicicletta o motocicletta), che il guidatore abbia provveduto ad inclinare di un certo angolo verso l'interno della curva.

In questo caso, la componente verticale della forza di reazione del fondo stradale uguaglia il peso del veicolo e del passeggero, mentre la componente orizzontale

fornisce la forza centripeta aggiuntiva, necessaria per evitare che il veicolo vada a finire fuori strada lungo la tangente alla curva. Per lo stesso motivo le piste dei velodromi ed il piano di appoggio delle rotaie ferroviarie devono risultare inclinate, in curva, di un angolo tanto maggiore quanto maggiore è la velocità massima.

### **LA TERZA LEGGE DELLA DINAMICA (PRINCIPIO DI AZIONE E REAZIONE DI NEWTON)**

La terza legge della dinamica, nota come principio di azione e reazione, fu enunciata da Newton, ed afferma che: "Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria". Questo principio esprime che la forza che un corpo esercita su un secondo corpo è sempre uguale e di verso opposto a quella che il secondo corpo esercita sul primo.

Numerosi sono gli esempi di applicazione di questo principio:

- 1) Quando camminiamo, la forza (azione) che i nostri piedi esercitano all'indietro sul suolo, è sempre uguale e contraria a quella (reazione) che il suolo esercita sui nostri piedi, e che ci consente di muoverci in avanti;
- 2) L'elica di una nave o di un elicottero esercita una forza (azione), rispettivamente sull'acqua o sull'aria, uguale e contraria alla forza (reazione) che l'acqua o l'aria esercitano rispettivamente sulla nave, facendola avanzare, o sull'elicottero, equilibrandone il peso;
- 3) Un missile esercita una forza (azione) sui gas infuocati che escono dagli ugelli dei suoi motori a reazione, uguale e contraria a quella (reazione) che i gas infuocati esercitano sul missile, facendolo avanzare;
- 4) I pneumatici di un veicolo esercitano, nei punti di contatto col suolo, delle forze (di azione) dirette all'indietro, uguali e contrarie alle forze di attrito (di reazione) che il suolo esercita sui pneumatici, impedendone lo slittamento e facendo avanzare il veicolo;
- 5) Un'arma da fuoco, lanciando il proiettile, esercita su di esso una forza (azione), uguale e contraria (reazione) a quella che il proiettile esercita sull'arma da fuoco provocandone il rinculo.

Esempi: Quando si verifica un urto tra due corpi, uno dei due corpi esercita sull'altro una forza, di azione, uguale e contraria a quella di reazione che esso subisce da parte dell'altro corpo.

Le forze di azione e reazione agiscono sempre nella stessa direzione ed hanno versi opposti.

Un altro esempio di forze di azione e reazione ci viene fornito dalle forze di attrazione gravitazionale tra due masse, per esempio tra il Sole ed un pianeta: il Sole attrae un pianeta con una forza gravitazionale uguale e contraria a quella con cui esso viene attratto dal pianeta.

E' evidente che, essendo la massa del Sole molto maggiore di quella del pianeta, l'accelerazione subita dal Sole è molto più piccola di quella subita dal pianeta.

Una situazione analoga si verifica nel caso delle forze attrattive o repulsive tra cariche elettriche.

Un altro esempio ci viene fornito dalla forza centripeta, forza di azione, che fa muovere di moto circolare uniforme un corpo legato ad una mano con un filo, e dalla forza centrifuga, forza di reazione, che la mano subisce da parte del corpo che ruota.

## **LA LEGGE DI GRAVITAZIONE UNIVERSALE**

L'intuizione dell' universalità della legge di gravitazione, cioè della forza attrattiva che agisce tra due corpi, si deve a Newton.

Secondo un notissimo aneddoto, tale geniale intuizione fu originata dal brusco risveglio di Newton colpito in testa da una mela, mentre era beatamente addormentato sotto un albero.

Aneddoto a parte, Newton pensò all'esistenza di un' unica forza, la forza gravitazionale, responsabile sia della caduta libera dei corpi sulla Terra, sia del moto orbitale della Luna attorno alla Terra e dei pianeti attorno al Sole, pervenendo così all' unificazione delle leggi della meccanica terrestre e della meccanica celeste.

Per forza di gravità s'intende la forza di attrazione gravitazionale tra due masse qualsiasi ,  $M_1$  ed  $M_2$ , poste ad una distanza  $R$  l'una dall'altra.

L'intensità della forza di gravità è direttamente proporzionale al prodotto delle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza :  $F = G M_1 M_2 / R^2$ .

La costante di proporzionalità  $G$  è la costante di gravitazione universale, che si può determinare sperimentalmente misurando la debolissima forza gravitazionale con cui si attraggono due masse di valore noto, poste ad una data distanza.

Essendo straordinariamente piccola la costante  $G$ , che fu determinata sperimentalmente per la prima volta da Lord Cavendish nel 1798, utilizzando una speciale bilancia di torsione da lui stesso inventata per eseguire una misura così delicata ( $G \sim 6,67 \cdot 10^{-11}$  newton.metro<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>),

risulta altrettanto piccola la forza attrattiva tra due masse, anche se queste sono abbastanza grandi (centinaia di chilogrammi) .

La notevole intensità della forza di gravità che attrae i corpi verso il centro della Terra, si spiega considerando la grandissima massa terrestre, misurata per la prima volta da Lord Cavendish, dopo avere determinato il valore di  $G$ .

Poichè la Terra può essere considerata, in prima approssimazione , come una sfera massiccia con raggio medio  $R_T \sim 6400$  km e densità uniforme, è lecito assumere che l'accelerazione di gravità  $g$  di un corpo qualsiasi in caduta libera da un' altezza non molto grande ( $< 1$  km) rispetto a  $R_T$  ( $g =$  forza di gravità  $F$  agente su un corpo di massa  $m / m = F/m = (GmM_T/R_T^2)/m = GM_T/R_T^2 \sim 9,8$  metri/secondo<sup>2</sup>),

sia praticamente costante e pari a quella prodotta da una massa puntiforme  $M_T$  posta ad una distanza media  $R_T$  dai corpi in caduta libera.

Il valore della massa terrestre è  $M_T = g R_T^2 / G \approx 6 \cdot 10^{24}$  kg

( 6 milioni di miliardi di miliardi di chilogrammi).

Pertanto, i corpi su cui si possano ritenere trascurabili gli effetti di tutte le altre forze, cadono liberamente, in prossimità della superficie terrestre, con un' accelerazione il cui valore non dipende dalla loro massa, in quanto la forza di gravità, che determina la loro caduta, è direttamente proporzionale alla loro massa.

Questa proprietà è valida soltanto per la forza di gravità, che è proporzionale ad una speciale "carica fondamentale della natura" di cui è dotata tutta la materia: la massa gravitazionale, che è la massa che genera i fenomeni gravitazionali e coincide numericamente con la massa inerziale.

Si tenga presente che la massa inerziale (inerzia) è invece quella che si oppone all'accelerazione prodotta da una forza.

### **LA LEGGE DI GALILEI SULLA CADUTA DEI GRAVI**

Le celebri esperienze sulla caduta dei gravi, effettuate da Galileo operando sia dalla sommità della torre di Pisa, sia utilizzando il piano inclinato, lo portarono a dedurre l' indipendenza del valore dell' accelerazione di gravità

( $g \approx 9,8$  metri/secondo<sup>2</sup>) dalla massa  $M$  del corpo in caduta libera, qualora si possano ritenere trascurabili gli effetti prodotti dalle forze aerodinamiche (resistenza dell'aria).

Quando infatti gli esperimenti sulla caduta libera dei gravi vengono effettuati nel vuoto, per esempio lasciando cadere due corpi con masse diverse in un tubo di vetro dal quale sia stata estratta l'aria mediante una pompa (il cosiddetto tubo di Newton), si verifica l'uguaglianza dei tempi di caduta libera nel campo di gravità.

Ricordiamo in proposito l'esperimento eseguito sulla superficie lunare dagli astronauti statunitensi di una delle prime missioni Apollo.

In quell'occasione, dopo avere riscontrato l' uguaglianza dei tempi di caduta libera di due corpi con masse diverse nel vuoto dell' ambiente lunare, esclamarono: "Avevi ragione Signor Galileo".

Possiamo rendercene conto lasciando cadere da un' altezza  $H$  di qualche metro due sferette aventi lo stesso raggio e masse diverse, per esempio una sferetta di ferro ed un' altra di materiale plastico, e verificando l'uguaglianza dei tempi di caduta libera  $T_c$ .

Essendo il moto delle sferette naturalmente accelerato, cioè con accelerazione costante  $g$ , si ha:  $H = (1/2) g T_c^2$ , da cui si ottiene  $T_c$  estraendo la radice quadrata di  $(2H/g)$ .

Dalla verifica dell' uguaglianza dei tempi di caduta libera, si deduce l'identità dell'accelerazione di gravità per i due corpi.

Se invece, per evidenziare l'effetto della resistenza dell'aria, si ripetesse l'esperimento utilizzando due sfere aventi la stessa massa, ma raggi molto diversi, per esempio con rapporto 1/10, si rileverebbe un tempo di caduta sensibilmente maggiore per la sfera più grande, la quale, avendo una superficie 100 volte maggiore, sarebbe soggetta ad una resistenza aerodinamica 100 volte maggiore, e quindi cadrebbe con una minore

accelerazione di gravità.

In questo caso non si può applicare il principio di Galileo dell' indipendenza dell'accelerazione di caduta libera dalla massa del corpo, poichè questo, diversamente da quanto si verifica nel vuoto, è soggetto sia alla forza di gravità che alla resistenza aerodinamica.

### ***A ricordo del passaggio della cometa Hale Bopp***

Ghiaccio vagante nel cielo,  
luce siderale carica di mistero,  
diffondi la tua chioma d'argento  
messaggera di eternità.

Pellegrina solitaria del cosmo,  
affascini chi ti scorge nelle notti serene  
e si annulla nella tua  
immagine che sa d'infinito.

Tremila anni ad ogni tuo passaggio.

Ti videro genti oggi estinte,  
ti vediamo noi una volta sola,  
simbolo del nostro limite,  
silente calendario dell'eternità.

***By Webmaster***

### ***IL PRINCIPIO DI RELATIVITA' DI GALILEO***

Galileo, considerando la proporzionalità diretta tra la forza applicata ad un corpo e l'accelerazione da questo acquisita, ed il caso limite del principio d'inerzia, che afferma la persistenza di un corpo nello stato di quiete o di moto rettilineo ed uniforme nel caso in cui si annulli la forza risultante che agisce sul corpo, si convinse che il moto rettilineo ed uniforme del sistema di riferimento non modifica le leggi della meccanica.

Infatti, se si eseguono esperimenti di meccanica (per es. caduta libera di gravi, misura del periodo di oscillazione di un pendolo, ecc.) a bordo di un veicolo, di una nave o di un aereo che si muovano in linea retta con velocità costante, in assenza di irregolarità del moto, quali oscillazioni o brusche deviazioni dalla traiettoria rettilinea, non si riscontra alcuna differenza rispetto agli esperimenti eseguiti in un sistema di riferimento in quiete rispetto al suolo.

Ciò equivale a dire che eseguendo esperimenti di meccanica non è possibile per un

osservatore mettere in evidenza il moto rettilineo ed uniforme del proprio sistema di riferimento (veicolo, nave o aereo).

Se invece il moto del sistema di riferimento è accelerato, mediante esperimenti di meccanica è possibile misurarne l'accelerazione.

Per esempio, se si misurasse il periodo di oscillazione di un pendolo ideale (semplice), costituito da una piccola massa appesa ad un sottile filo di lunghezza  $L$ , all'interno di un ascensore in salita con accelerazione  $a$ , si troverebbe il valore  $T_s = 2\pi$  radice quadrata di  $[L/(g + a)]$ , inferiore al valore  $T_o = 2\pi$  radice quadrata di  $(L/g)$  che si otterrebbe se l'ascensore fosse fermo o si muovesse di moto rettilineo ed uniforme.

Dalla formula  $a = (4 \pi^2 L / T_s^2) - g$  si potrebbe ottenere il valore dell'accelerazione  $a$  del sistema di riferimento non inerziale (l'ascensore).

Infatti, per il principio di equivalenza, il moto accelerato dell'ascensore modificerebbe il moto del pendolo, come se si verificasse un aumento dell'accelerazione di gravità dal valore  $g$  al valore  $g + a$ .

Se invece l'ascensore scendesse con accelerazione  $a$ , si misurerebbe un periodo  $T_d = 2\pi$  radice quadrata di  $[L/(g - a)]$ , maggiore del valore  $T_o$  misurato con l'ascensore fermo.

Il principio di relatività di Galileo afferma pertanto che le leggi della meccanica rimangono invariate nel passaggio da un sistema di riferimento fisso rispetto al suolo ad un altro in moto rettilineo ed uniforme rispetto al primo, oppure, in generale, nel passaggio da un sistema inerziale ad un altro, dove per sistema inerziale si intende un sistema di riferimento nel quale un corpo, non sottoposto a forze, se è in quiete rimane in quiete, oppure, se si muove in linea retta con velocità costante, mantiene indefinitamente il suo stato di moto, finché non venga applicata ad esso una forza che, accelerandolo, ne modifichi il moto.

### ***IL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA DI EINSTEIN (TRA MOTI ACCELERATI E CAMPI GRAVITAZIONALI)***

Il fatto che i tempi di caduta libera dei corpi nel vuoto, per effetto della forza di gravità, siano indipendenti dalla massa (legge di Galilei), indusse Albert Einstein, nel contesto della sua teoria della relatività generale (teoria della gravitazione), a pensare che l'accelerazione  $g$  acquisita da un corpo sottoposto ad un campo gravitazionale sia fisicamente indistinguibile dall'accelerazione  $a$  acquisita dal corpo per effetto di un moto accelerato del sistema di riferimento.

Il principio einsteiniano di equivalenza consiste appunto nel considerare l'impossibilità di distinguere, mediante

esperimenti fisici di qualsiasi tipo, gli effetti prodotti dalla gravità da quelli prodotti da un moto accelerato del sistema rispetto al quale si rileva il moto di un corpo.

Il principio di equivalenza può essere verificato in un modo molto semplice disponendo di una bilancia a molla del tipo di quelle utilizzate per pesare gli alimenti per scopi dietetici.

Basta osservare che un incremento dello spostamento dell'indice sulla scala graduata, o del valore visualizzato dal display, se si tratta di una bilancia elettronica, possono essere determinati sia da un aumento del peso posto sul piatto della bilancia, sia da un opportuno moto accelerato impresso ad essa.

Per esempio, un aumento di  $n$  grammi del peso indicato dalla bilancia, può essere ottenuto sia ponendo un ulteriore pesodi  $n$  grammi sul piatto, sia lasciando invariato il peso ed imprimendo alla bilancia uno spostamento verso l'alto con accelerazione  $a$ , che equivalga ad un peso aggiuntivo di  $n$  grammi.

In questo esempio la deformazione della molla della bilancia, oppure, se questa è elettronica, la deformazione subita dal sensore di forza, sono identiche nelle due situazioni sperimentali, indicando appunto che l'accelerazione verso l'alto impressa alla bilancia, che rappresenta il sistema di riferimento accelerato, produce lo stesso effetto (deformazione) di un incremento di peso sul piatto.

L'equivalenza delle due situazioni sperimentali dipende dal fatto che sia la forza di gravità (forza -peso)  $P = Mg$ , sia la forza d'inerzia  $F = -M_1 a$  che agisce sulla massa posta sul piatto della bilancia, determinando un aumento "virtuale" del peso, sono entrambe direttamente proporzionali alla massa, cioè, rispettivamente, alla massa gravitazionale  $M$  o alla massa inerziale  $M_1$ .

Il segno negativo della forza d'inerzia dipende dal fatto che l'accelerazione impressa verso l'alto alla bilancia, ha verso opposto rispetto alla forza di gravità.

Viene pertanto applicata alla molla (o al sensore) una forza aggiuntiva (di reazione) uguale e contraria a  $F$ , per effetto del moto accelerato del sistema di riferimento (bilancia).

Una conseguenza fondamentale del principio di equivalenza è l'uguaglianza della massa gravitazionale  $M$ , cioè della "carica gravitazionale" di un corpo, e della massa inerziale  $M_1$ , cioè dell'attitudine di un corpo ad opporsi all'azione acceleratrice di una forza, come è stato sempre dimostrato sperimentalmente attraverso parecchie delicatissime misure, la prima delle quali fu eseguita da Newton.

Newton poté osservare che, utilizzando uno speciale pendolo avente come massa pendolare una piccola sfera cava nella quale egli inseriva volta per volta un materiale diverso, si otteneva sempre lo stesso periodo a parità di peso del materiale introdotto, il che significava che l'identità delle masse gravitazionali dei vari materiali implicava l'identità delle rispettive masse inerziali.

L'identità di valore tra massa inerziale e massa gravitazionale fu verificata da Eötvös nel 1909 (con la precisione di una parte su un miliardo), utilizzando una speciale bilancia di torsione, e da H. Dicke negli anni '70, con una precisione di una parte su 100 miliardi.

La verifica sperimentale dell'identità tra massa inerziale massa gravitazionale fornì ad Einstein la base su cui costruire la teoria della relatività generale, nell'ambito della quale, in un sistema di riferimento qualsiasi, un campo gravitazionale è indistinguibile da un moto accelerato del sistema di riferimento, oppure può essere sempre compensato da un opportuno moto accelerato del sistema di riferimento, in modo tale che un

osservatore che faccia parte del sistema di riferimento considerato non si accorga dell'esistenza di un campo gravitazionale.

Un ulteriore esempio di applicazione del principio di equivalenza si ottiene considerando un astronauta all'interno di una navicella spaziale orbitante attorno alla Terra, alla Luna o ad un altro corpo celeste.

In questo caso il sistema di riferimento per l'astronauta è costituito dalla navicella spaziale, che possiede un' accelerazione centripeta uguale all'accelerazione di gravità, in ogni punto dell'orbita.

Si dice comunemente che l'astronauta opera in assenza di gravità, mentre in realtà la forza gravitazionale esercitata sull'astronauta dal corpo celeste è esattamente compensata, in ogni punto dell'orbita, dalla reazione centrifuga (forza d'inerzia) dovuta al moto orbitale, per cui, essendo nulla la forza risultante che agisce sull'astronauta, vale la prima legge della dinamica (principio d'inerzia).

In modo equivalente si può dire che, poichè sia l' astronauta che la navicella spaziale sono sottoposti alla stessa accelerazione di gravità, risulta nulla la loro accelerazione relativa (cioè la differenza tra le loro accelerazioni rispetto alla Terra); di conseguenza tra astronauta e navicella spaziale non si esercita alcuna forza, come quando un ascensore, per la rottura della fune portante, precipita in caduta libera determinando una temporanea "assenza di gravità" per le malcapitate persone a bordo .

Pertanto l'astronauta, se non sapesse di trovarsi in orbita attorno ad un corpo celeste, potrebbe pensare di trovarsi in una regione dello spazio priva di campi gravitazionali.

Il principio di equivalenza evidenzia che la forza di gravità si distingue dalle altre forze universali (elettromagnetica, debole e forte) proprio perchè essa è intimamente legata alla curvatura dello spazio-tempo, che a sua volta è determinata dalla distribuzione e dal moto della materia esistente in una data regione dell' universo , in base alla teoria della relatività generale.

### ***IL TEOREMA DELLE FORZE VIVE (TEOREMA LAVORO-ENERGIA)***

Quando applichiamo una forza  $F$  ad un corpo di massa  $M$  in quiete o in moto con velocità  $V_0$ , per esempio quando spingiamo un' auto ferma, con il cambio in folle, su un tratto stradale orizzontale, il corpo acquista un' accelerazione

$a = F/M$  , per effetto della quale la velocità aumenta con continuità dal valore iniziale  $V_0$  al valore finale  $V$ , per tutto il tempo durante il quale viene applicata la forza  $F$ .

Durante la fase di accelerazione viene compiuto sul corpo un lavoro a spese della diminuzione dell' energia biochimica immagazzinata nei nostri muscoli.

Se, per esempio, spingiamo un'auto di massa  $M$  per un tratto di strada di lunghezza  $s$ , applicando una forza  $F$  di intensità costante , eseguiamo un lavoro  $L = F \times s$  .

Se la forza  $F$  vale 50 Kg-peso =  $50 \times 9,8$  N (newton) = 490 N e l'auto si sposta di 10 metri, il lavoro compiuto è

$50 \times 10 \text{ kgm (chilogrammetri)} = 500 \text{ kgm}$  , equivalenti a

$9,8 \times 500 \text{ J (joule)} = 4900 \text{ J}$ .

Il lavoro fatto dalla forza  $F$  equivale alla variazione dell'energia cinetica (o di moto) del

corpo, avendo definito come energia cinetica  $K$  ( o forza viva) di un corpo di massa  $M$  che si muove con velocità  $V$  il semiprodotto della massa per il quadrato della velocità:

$$K = (1/2) M V^2 .$$

Il teorema delle forze vive (o teorema lavoro-energia) afferma appunto che il lavoro fatto da una o più forze agenti su un corpo uguaglia la variazione (aumento o diminuzione) dell'energia cinetica del corpo:

$L$  (lavoro) =  $F$  (forza) x  $s$  (spostamento) =  $K$  (energia cinetica finale) -  $K_0$  (energia cinetica iniziale).

Se la forza o le forze applicate favoriscono il moto, vengono definite motrici, in quanto determinano un aumento della velocità e dell'energia cinetica del corpo. Se invece la forza o le forze ostacolano il moto, come la resistenza dell'aria, che rallenta il moto di un veicolo, o come le forze d'attrito esercitate dai freni, che si oppongono al moto del veicolo trasformandone l'energia cinetica in calore, si parla di forze resistenti, in quanto determinano una diminuzione della velocità e dell'energia cinetica del corpo.

### **IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA QUANTITA' DI MOTO**

Il terzo principio della dinamica implica che nei sistemi costituiti da due o più corpi valga la legge di conservazione della quantità di moto, se è nulla la risultante delle forze esterne che agiscono sul sistema.

Se  $F$  (risultante delle forze esterne) = 0, risulta nulla la variazione della quantità di moto totale ( $dP_{totale}$ ) del sistema per unità di tempo:  $d(P_{totale})/dt = F = 0$  ; pertanto si mantiene costante la quantità di moto totale  $P = P_1 + P_2 + P_n$  del sistema, mentre possono variare, per effetto delle forze interne al sistema, le quantità di moto dei singoli corpi, che si compensano a due a due.

Se consideriamo, per esempio, i fenomeni dinamici che si verificano in un'arma da fuoco durante l'espulsione del proiettile, ci rendiamo conto che le uniche forze agenti sono le forze interne dovute alla pressione dei gas in espansione, generati dallo sparo.

Si tratta di forze di azione e reazione, aventi la stessa intensità e versi contrari: se definiamo forza di azione quella che lancia il proiettile attraverso la canna dell'arma, la forza di reazione è quella che il proiettile espulso esercita sull'arma, causandone il rinculo.

L' unica forza esterna che agisce sul sistema è la gravità, che tuttavia non influenza sensibilmente il fenomeno durante l'espulsione del proiettile , in quanto le forze impulsive generate dallo sparo sono molto più intense di quelle gravitazionali.

Durante e subito dopo lo sparo, il moto del proiettile, se ci limitiamo a considerare la parte iniziale della sua traiettoria parabolica, ha una velocità tale che risulta trascurabile l'effetto simultaneo della sua caduta libera, ed acquista una quantità di moto in avanti pari all'impulso delle forze di espansione dei gas nella canna dell'arma, mentre questa, per effetto della forza di reazione esercitata dal proiettile, acquista una quantità di moto uguale e contraria a quella del proiettile. Pertanto la somma delle due quantità di moto, nulla prima dello sparo, rimane tale durante lo sparo, cioè si conserva.

Si tenga presente che neppure le forze interne d'attrito tra proiettile e canna alterano la quantità di moto totale del sistema, poichè, essendo forze di azione e reazione, determinano variazioni uguali e contrarie della quantità di moto del proiettile e dell'arma.

In un sistema formato da due o più corpi, per esempio nel sistema solare, bisogna considerare come forze interne le forze di attrazione reciproche tra tutte le possibili coppie di corpi: Sole-pianeta, pianeta-pianeta, pianeta-satellite, Sole-satellite e satellite-satellite.

Poichè tutte queste forze, uguali e contrarie a due a due, determinano variazioni uguali e contrarie della quantità di moto, ci rendiamo conto che la somma delle quantità di moto di tutti i corpi del sistema si mantiene costante.

Pertanto il sistema solare si muove nello spazio come se fosse un corpo puntiforme, con una massa pari alla massa complessiva del Sole, dei pianeti e dei satelliti, sottoposto a tutte le possibili forze interne attrattive, di azione e reazione, che si annullano a due a due dando una forza risultante nulla, ed a tutte le forze di attrazione gravitazionale esercitate sul sole, sui pianeti e sui satelliti dai corpi celesti esterni al sistema solare.

Poichè dalle misure astronomiche risulta che il sistema solare si muove di moto rettilineo uniforme verso la costellazione di Ercole, con la velocità di circa 20 Km/sec, bisogna ammettere che sia praticamente nulla, in media, la risultante delle forze gravitazionali esercitate da tutti gli altri corpi celesti esterni ad esso (galassie, quasar e buchi neri), che si possono considerare, in prima approssimazione, disposti simmetricamente rispetto al sistema solare.

Dall'annullamento della risultante delle forze esterne al sistema solare deriva la conservazione della sua quantità di moto totale.

La posizione del suddetto corpo puntiforme si identifica con quella del centro di massa del sistema solare, che a sua volta si può considerare coincidente, in prima approssimazione, con il centro del Sole, essendo la massa solare oltre 700 volte maggiore di quella di tutti gli altri corpi del sistema solare messi insieme.

Teniamo presente che il centro di massa di un sistema di corpi è quel particolare punto il cui moto è determinato soltanto dalle forze esterne applicate al sistema, e nel quale si può immaginare che sia concentrata tutta la massa del sistema.

La posizione del centro di massa dipende dalla massa e dalla posizione di ciascun corpo, cioè dal modo in cui la massa dei corpi è distribuita nello spazio.

Per esempio, se consideriamo una sbarra metallica ai cui estremi siano fissate due masse uguali, il centro di massa, per simmetria, si trova nel punto medio della sbarra.

Se invece una delle due masse è doppia dell'altra, il centro di massa si trova dalla parte della massa doppia, ad una distanza da essa pari ad un terzo della lunghezza della sbarra.

Se, in particolare, consideriamo il moto della Terra nella sua orbita ellittica intorno al Sole, la quantità di moto della Terra, cioè il prodotto della sua massa per la velocità, che è sempre tangente all'orbita, aumenta quando la Terra, avvicinandosi al Sole, viene accelerata verso di esso (tende a cadere verso il Sole) per effetto della forza di attrazione gravitazionale, nello stesso modo in cui viene accelerato un corpo in caduta

libera sulla Terra, ed invece diminuisce quando la Terra, allontanandosi dal Sole, viene decelerata dalla forza di attrazione gravitazionale, nello stesso modo in cui, sulla Terra, viene decelerato un corpo lanciato verticalmente.

Per il terzo principio della dinamica, anche il Sole viene accelerato o decelerato da forze di attrazione gravitazionale uguali e contrarie a quelle che esso esercita sulla Terra; pertanto anche le variazioni di quantità di moto della Terra e del Sole risultano uguali e contrarie, senza che venga alterata la quantità di moto totale del sistema solare. Tuttavia, essendo la massa del Sole oltre 300.000 volte maggiore di quella terrestre, le variazioni di velocità subite dal Sole per effetto della Terra sono oltre 300.000 volte minori di quelle subite dalla Terra per effetto del Sole, cosicché l'orbita descritta dal centro della sfera solare intorno al centro di massa del sistema solare, che è interno al Sole, si riduce ad un'ellisse il cui asse maggiore (circa 1.000 km) è oltre 300.000 volte minore di quello dell'orbita terrestre (circa 300.000.000 di km).

Pertanto, avendo il Sole un diametro di circa 1.400.000 km, il suo centro, per effetto della sola attrazione terrestre, cioè non considerando, per semplicità, le masse e le forze attrattive di tutti gli altri corpi del sistema solare, si muove descrivendo un'orbita ellittica, assimilabile, in prima approssimazione, ad una circonferenza del raggio di circa 500 km, attorno al centro di massa del sistema Sole-Terra, che è interno alla sfera solare.

Considerazioni analoghe possono essere fatte per tutti gli altri pianeti del sistema solare. Se consideriamo infine l'universo, che è il più grande sistema isolato concepibile, in quanto non si può ammettere, per la stessa definizione di universo, che esso sia soggetto a forze esterne, si deduce che la sua quantità di moto totale è costante, in quanto tutte le forze sono forze interne al sistema.

## ***LA SECONDA LEGGE DELLA DINAMICA DEI SISTEMI MATERIALI IN MOTO ROTATORIO***

Per enunciare questa legge fondamentale della natura bisogna definire il momento di una forza ed il momento risultante di un sistema di forze.

Se consideriamo il semplice esempio di una sbarra libera di ruotare in un piano verticale attorno ad un asse orizzontale passante per uno dei suoi estremi, e teniamo presente che, se la sbarra è omogenea, cioè tutta fatta dello stesso materiale, la forza peso si può considerare applicata nel suo baricentro, cioè nel suo punto medio, ci rendiamo subito conto che l'equilibrio stabile della sbarra si può ottenere soltanto quando essa si dispone verticalmente.

Essa infatti non è altro che un pendolo fisico (non ideale) che, quando non oscilla, raggiunge la posizione di equilibrio stabile soltanto quando si dispone verticalmente, con il baricentro giacente lungo la verticale abbassata dall'asse orizzontale di rotazione. Infatti, soltanto in tale posizione la forza peso non ha momento rispetto all'asse di rotazione e non può determinare alcuna rotazione; pertanto la sbarra, se non oscilla e si trova già nella posizione di equilibrio stabile, vi rimane indefinitamente, fino a quando

essa non venga fatta oscillare applicandole per un brevissimo intervallo di tempo una forza che abbia momento rispetto all'asse di rotazione.

Affinchè la suddetta forza abbia momento rispetto all'asse di rotazione, occorre che essa sia caratterizzata da un "braccio di leva" rispetto ad esso, occorre cioè che la direzione della forza applicata non passi per l'asse di rotazione.

La distanza tra l'asse di rotazione e la retta (linea d'azione) che rappresenta la direzione della forza è il "braccio" della forza rispetto all'asse di rotazione.

Se, per esempio la forza applicata ha l'intensità di 1 kg-peso  $\approx 9,8$  N (newton) e la sua linea d'azione dista 10 cm = 0,1 m dall'asse di rotazione, il momento  $M$  della forza  $F$  si ottiene moltiplicando l'intensità della forza per il braccio  $b = 0,1$  m :

$M = F b = 1 \times 0,1 = 0,1$  kg-peso x metro, oppure:

$M = F b = 9,8 \times 0,1 = 0,98$  N . m (newton x metro).

Quando la sbarra oscilla, il momento della forza peso  $P$  rispetto all'asse di rotazione è dato dal prodotto  $M = P b$  del peso per il braccio, che in questo caso coincide con la distanza tra l'asse di rotazione e la retta verticale passante per il baricentro.

Il momento della forza peso è proporzionale a tale distanza, si annulla quando il baricentro si trova sotto l'asse di rotazione , in quanto in tale posizione il braccio è nullo, e cambia segno quando la sbarra oltrepassa la posizione di equilibrio, in cui il braccio è nullo.

Successivamente, la sbarra, completata l'oscillazione, tende a ritornare nella posizione di equilibrio e la oltrepassa, continuando ad oscillare fino a quando le forze di attrito non ne abbiano dissipato tutta l'energia cinetica fino a farla fermare nella posizione di equilibrio.

Se ad un corpo rigido libero di ruotare attorno ad un asse vengono applicate diverse forze, il momento totale (momento risultante) agente sul corpo si ottiene sommando tutti i momenti delle forze che tendono a farlo ruotare in un verso e sottraendo tutti i momenti che tendono a farlo ruotare nel verso opposto.

Nel moto rotatorio il momento svolge un ruolo analogo a quello della forza nel moto traslatorio (moto di un corpo che non ruota attorno ad un proprio asse), in quanto produce un moto rotatorio accelerato, cioè un' accelerazione angolare rispetto all'asse di rotazione.

In pratica, per valutare l'effetto rotatorio (momento torcente) di un sistema di forze, indipendentemente dal braccio di ciascuna di esse rispetto all'asse di rotazione, si considera il momento di una coppia di forze parallele, aventi la stessa intensità e versi opposti, che siano equivalenti al sistema di forze (coppia risultante).

Il momento di una coppia viene definito senza considerare il braccio di ciascuna delle due forze rispetto all'asse di rotazione, ma calcolando il prodotto della loro intensità per la distanza tra le loro linee d'azione, che è il braccio della coppia.

Se si sa che la coppia motrice (momento torcente) sviluppata da un motore di qualsiasi tipo ha il valore di 100 kg-peso x metro, significa che le due forze antiparallele che la costituiscono possono avere ciascuna l'intensità di 50 kg-peso ed un braccio di 2 m, oppure l'intensità di 500 kg-peso ed un braccio di 0,2 m= 20 cm, oppure una qualsiasi coppia di fattori forza x braccio che dia un prodotto di 100 kg-peso x metro.

In modo equivalente si può dire che il momento della coppia generata dal motore può essere equilibrato dal momento di una forza di 1000 kg-peso applicata tangenzialmente ad una distanza di 0,1 m = 10 cm dall'asse di rotazione, per esempio utilizzando una puleggia con un raggio di 10 cm, dotata di una gola e di una fune per applicare la forza equilibrante in verso tale da tendere a bloccare la rotazione dell'albero motore.

In alternativa, il momento della coppia motrice potrebbe essere equilibrato dal momento di una forza di 100 kg-peso, applicata tangenzialmente mediante un fune ancorata alla gola di una puleggia con raggio di 1 metro.

In altri termini, vale la ben nota regola d'oro derivante dalla teoria della leva di Archimede: la forza  $F$  che bisogna applicare ad un corpo rigido libero di ruotare attorno ad un asse per ottenere un momento che possa equilibrare una coppia motrice  $C$  applicata al corpo rigido,

è inversamente proporzionale al braccio di leva  $b$  :

$$C = F b ; F = C/b.$$

La regola d'oro afferma che quanto minore è l'intensità della forza  $F$  impiegata, tanto maggiore deve essere la distanza (braccio  $b$ ) del punto di applicazione della forza dall'asse di rotazione.

Se consideriamo che la lunghezza  $s$  dell'arco di circonferenza descritto dal punto di applicazione della forza, per una rotazione di  $n$  radianti, è direttamente proporzionale al braccio  $b$ , che coincide con il raggio  $r$  della puleggia ( $s = b n$ ), ci rendiamo conto che il lavoro meccanico  $L$  che deve essere fatto per equilibrare l'effetto della coppia motrice  $C$  è  $L = F.s = F b n$ , e che pertanto, essendo il cammino  $s$  inversamente proporzionale alla forza applicata  $F$ , il vantaggio che si ottiene con la riduzione dell'intensità della forza che deve essere applicata, si paga con lo svantaggio derivante dal maggiore cammino richiesto.

Un' analoga regola d'oro vale per il cambio di velocità di un' auto, la cui struttura deriva dal perfezionamento del cambio di velocità inventato da Leonardo da Vinci.

## ***I Esempio***

Il cambio di velocità di un' auto è un convertitore di coppia che consente di utilizzare la potenza meccanica generata dal motore nelle condizioni più adatte al carico meccanico che si ha nelle varie condizioni di guida (partenza, marcia in salita, marcia in discesa, retromarcia, marcia in rettilineo ad alta velocità con basso carico meccanico).

Se  $P$  è la potenza sviluppata dal motore, con il cambio si può trasmettere alle ruote motrici di un' auto, a seconda delle esigenze di marcia, una coppia motrice massima  $C_{\max}$  con una velocità angolare minima  $\omega_{\min}$  ( $P = C_{\max} \omega_{\min}$ ), oppure una coppia motrice minima  $C_{\min}$  con una velocità angolare massima  $\omega_{\max}$  ( $P = C_{\min} \omega_{\max}$ ).

La regola d'oro in questo caso stabilisce che il vantaggio di disporre di un grande momento torcente (coppia) si paga con una minore velocità del veicolo.

Quando viene inserita una marcia bassa (I, II), mediante un opportuno sistema di ingranaggi si ottiene una riduzione del numero  $N_1$  dei giri al minuto (direttamente proporzionale a  $\omega$ ) ed una coppia  $C_1$  maggiore, necessaria per poter vincere sforzi moto grandi, a parità di potenza (P) sviluppata dal motore (partenza in salita, marcia in salita).

Se invece viene inserita una marcia alta (III, IV, V), si ottiene una coppia  $C_2$  minore aumentando il numero  $N_2$  dei giri, a parità di potenza sviluppata dal motore:  $C_1 N_1 = C_2 N_2 = P$ .

Nel moto rotatorio la grandezza fisica che determina l'attitudine di un sistema materiale rigido a resistere all'azione acceleratrice di un momento è il momento d'inerzia J (inerzia rotazionale), che dipende da come è distribuita la massa rispetto all'asse di rotazione, cioè dai quadrati delle distanze tra le masse che costituiscono il sistema e l'asse fisso di rotazione.

Se, per esempio, consideriamo una sbarra metallica avente massa M, lunghezza L, libera di ruotare intorno ad un asse fisso, se l'asse passa per il punto medio della sbarra, il momento d'inerzia è  $J = (1/12) ML^2$ ; se invece l'asse di rotazione passa per un estremo, il momento d'inerzia è 4 volte maggiore:  $J = (1/3) ML^2$ , in quanto gran parte della massa è più distante dall'asse di rotazione, il che determina una maggiore inerzia rotazionale.

Nel moto rotatorio la grandezza analoga alla quantità di moto di un corpo in moto traslatorio, è il momento angolare L o momento della quantità di moto, che si ottiene considerando la somma dei prodotti delle quantità di moto  $P_i = M_i V_i$  delle singole masse che compongono un sistema materiale per i bracci  $b_i$  rispetto all'asse di rotazione:

$$L = P_1 b_1 + P_2 b_2 + P_n b_n = M_1 V_1 b_1 + M_2 V_2 b_2 + + M_3 V_3 b_3.$$

Nel caso di un corpo rigido libero di ruotare attorno ad un asse fisso, il momento angolare L si ottiene moltiplicando il momento d'inerzia J (espresso in  $kg \cdot m^2$ ) per la velocità angolare  $\omega = 2\pi N/60$  (espressa in radianti/ secondo), dove N è il numero di giri/minuto:  $L = J \omega$ . L'analogia con la legge di Galilei-Newton  $F = dP/dt = M dV/dt = Ma$  ci consente di scrivere la seconda legge della dinamica per i corpi rigidi in rotazione attorno ad un asse fisso (II legge della dinamica rotazionale):  $M = dL/dt = J d\omega/dt = J\alpha$  ( $\alpha$  è l'accelerazione angolare del moto rotatorio).

Se, in particolare, il momento M delle forze esterne è costante, si ottiene un moto rotatorio con accelerazione costante, per il quale la variazione del momento angolare in un intervallo di tempo  $\Delta t$  è direttamente proporzionale al momento risultante M delle forze esterne che accelerano il corpo rigido:

$$M \Delta t = L_{\text{finale}} - L_{\text{iniziale}} = J (\omega_{\text{finale}} - \omega_{\text{iniziale}}).$$

## **Il Esempio**

Lo studio del moto di precessione di una trottola si studia applicando la II legge della dinamica rotazionale.

Ponendo una trottola in rapida rotazione, si nota che al diminuire della velocità di rotazione per effetto della resistenza dell'aria e delle forze di attrito che agiscono tra la punta della trottola ed il piano di appoggio, l'asse della trottola si inclina sempre più rispetto alla verticale descrivendo la superficie laterale di un cono, che prende il nome di cono di precessione.

La precessione dell'asse di una trottola è analoga al moto di precessione dell'asse di rotazione della Terra, che è inclinato di  $23^{\circ} 27'$  rispetto alla perpendicolare al piano dell'orbita (piano dell'eclittica) e compie un giro in circa 26000 anni (anno platonico), determinando il fenomeno della precessione degli equinozi, che consiste nel sistematico anticipo delle date degli equinozi rispetto a quelle dell'anno precedente.

Nel caso della trottola la precessione dell'asse di rotazione, che dopo un certo intervallo di tempo, più o meno lungo a seconda della maggiore o minore velocità iniziale di rotazione, determina inevitabilmente l'instabilità del moto, è dovuta al momento della forza-peso applicata al baricentro della trottola, calcolato rispetto al punto d'appoggio.

Questo momento perturbatore dà origine ad un piccolo momento angolare aggiuntivo, che agisce perpendicolarmente all'asse di rotazione e si somma vettorialmente al momento angolare principale, relativo all'asse di rotazione.

Pertanto l'asse è costretto a descrivere la superficie laterale di un cono di precessione, che diventa tanto più ampio quanto minore è la velocità di rotazione della trottola, fino a quando questa cessa di ruotare.

Nel caso della Terra, il moto precessionale è causato dalle forze gravitazionali esercitate dalla Luna e dal Sole sulla zona equatoriale della Terra, che risulta un po' schiacciata ai poli.

## **IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DEL MOMENTO ANGOLARE**

In un sistema materiale, per il terzo principio della dinamica, i momenti delle forze interne si annullano a due a due, in quanto si tratta di forze di azione e reazione che danno luogo a momenti uguali e contrari.

Pertanto, se è nullo il momento risultante  $M$  delle forze esterne, si annulla la variazione del momento angolare  $dL_{\text{totale}}/dt = M = 0$  per unità di tempo, ed il momento angolare totale rimane costante, cioè si conserva:

$$L_{\text{totale}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n = \text{costante}$$

(Principio di conservazione del momento angolare).

### ***I Esempio***

Se consideriamo il moto di un pianeta intorno al Sole, trascurando per semplicità i momenti delle forze gravitazionali degli altri pianeti, ci rendiamo conto che, essendo uguali e contrarie le forze interne di attrazione gravitazionale esercitate dal Sole sul pianeta e dal pianeta sul Sole, è nullo il loro momento risultante, e di conseguenza si

mantiene costante il momento angolare  $L = MVb$  associato al moto del pianeta lungo l'orbita ellittica.

Essendo  $b$  la distanza tra la tangente all'orbita ellittica (direzione della velocità orbitale) ed il Sole, che coincide con uno dei fuochi

dell'ellisse, la velocità orbitale  $V$  è inversamente proporzionale a  $b$ , che a sua volta cresce al crescere della distanza del pianeta dal Sole.

Pertanto la velocità orbitale del pianeta è minima in corrispondenza dell'afelio (punto di massima distanza dal Sole) e massima in corrispondenza del perielio (punto di minima distanza dal Sole).

Dalla conservazione del momento angolare del pianeta si deduce che l'area descritta dalla retta congiungente il pianeta con il Sole è direttamente proporzionale al tempo (II legge di Keplero, legge delle aree).

### **II Esempio**

Il principio di conservazione del momento angolare, applicato alle masse d'aria in rotazione, rende conto dei vortici associati a cicloni, trombe d'aria e trombe marine.

Infatti, poichè l'unica forza esterna agente su una massa d'aria in rotazione è quella di gravità, la quale, essendo diretta verticalmente, non ha momento rispetto all'asse verticale della massa d'aria in rotazione, ne consegue la conservazione del momento angolare.

Pertanto, se una massa d'aria rotante a bassa velocità viene spinta dalla differenza di pressione (gradiente barico) verso il centro dell'area ciclonica, la sua velocità angolare aumenta rapidamente avvicinandosi al centro della depressione, che corrisponde all'occhio del ciclone (centro del vortice).

Fenomeni analoghi si verificano nelle trombe d'aria e nelle trombe marine, le quali, a causa della fortissima depressione che si genera al centro del vortice, risucchiano tutto quanto venga a trovarsi lungo la loro traiettoria di distruzione.

Il principio di conservazione del momento angolare spiega, in particolare, la formazione del vortice che si osserva togliendo il tappo dallo scarico posto sul fondo di una vasca.

La velocità tangenziale  $V$  di una massa liquida  $M$  a distanza  $R$  dall'orifizio, aumenta in modo inversamente proporzionale al decrescere della distanza  $R$  :  $V_0 R_0 = V R$  .

Infatti, poichè la forza di gravità non ha momento rispetto all'orifizio, il momento angolare si conserva :

$$MV_0R_0 = MVR.$$

### **III Esempio**

Il funzionamento di un giroscopio e di una bussola giroscopica, che sono costituiti da un massiccio disco metallico rotante ad alta velocità ed in condizioni di attrito minimo in corrispondenza dei cuscinetti di cui è dotata la sospensione cardanica che lo sostiene, si spiega con il principio di conservazione del momento angolare.

Poichè l'attrito è trascurabile e la forza di gravità non ha momento rispetto all'asse di rotazione del giroscopio, in quanto la sua linea d'azione passa per baricentro del disco,

il momento angolare del disco si conserva, e siccome si tratta di una grandezza vettoriale, di cui si conservano modulo e direzione, l'asse del giroscopio rimane sempre orientato nella direzione iniziale, funzionando come bussola giroscopica.

#### **IV Esempio**

Il funzionamento di biciclette e motociclette si basa sul principio di conservazione del momento angolare.

Infatti, se il ciclista o il motociclista fanno in modo che la forza di gravità applicata al baricentro del sistema costituito dal guidatore e dal veicolo, non abbia momento rispetto ai punti d'appoggio tra le ruote e la strada (condizione di equilibrio instabile), il momento angolare del sistema rimane quasi costante in valore e direzione, tendendo a mantenere le ruote in un piano quasi verticale.

Diciamo quasi perchè, a causa delle forze d'attrito e della variabilità della coppia motrice applicata alle ruote in relazione alle condizioni di marcia, la velocità ed il momento angolare delle ruote sono soggetti a variazioni, che fanno variare l'inclinazione delle ruote rispetto al piano verticale.

#### **V Esempio**

Il principio di conservazione del momento angolare è essenziale per spiegare tanti altri fenomeni dinamici, quali, per esempio, le piroette delle ballerine e dei ginnasti.

Una ballerina, facendo perno su un piede e contraendo o distendendo gli arti superiori ed inferiori, è in grado di ruotare su se stessa con velocità angolare rispettivamente crescente o decrescente.

Infatti, la contrazione degli arti verso l'asse di rotazione della ballerina, determina un minore momento d'inerzia  $J$ , in quanto la massa è maggiormente distribuita in prossimità dell'asse di rotazione; quindi, mantenendosi quasi costante il momento angolare  $L = J\omega$ , la velocità angolare  $\omega$  aumenta.

Si verifica il contrario se la ballerina distende gli arti.

Se un sistema materiale è costituito da corpi che ruotano attorno ad un punto fisso e contemporaneamente sono dotati di un moto di rotazione intrinseca (ciascuno attorno al proprio asse), ed è nullo il momento risultante delle forze esterne al sistema, si conserva il momento angolare totale del sistema, definito dalla somma vettoriale dei momenti angolari intrinseci e dei momenti angolari di rotazione attorno al punto fisso.

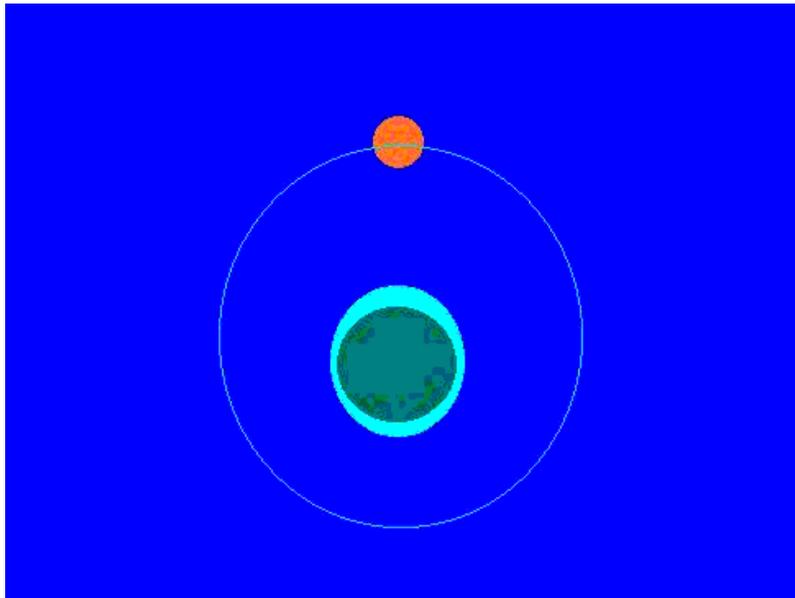
In questo caso si possono verificare non soltanto variazioni dei singoli momenti angolari di rotazione rispetto al punto fisso, ma anche conversioni di momento angolare intrinseco in momento angolare di rotazione rispetto al punto fisso, e viceversa, purchè la somma vettoriale di tutti i momenti angolari si mantenga costante.

#### **VI Esempio**

Con il principio di conservazione del momento angolare si spiega l'allontanamento della Luna dalla Terra per effetto dell'attrito delle maree.

Infatti l'effetto dell'attrazione gravitazionale lunare sulle acque marine determina una deformazione a simmetria ovale della superficie libera degli oceani, che segue il moto orbitale della Luna, che è circa 27,5 volte più lento del moto di rotazione della Terra attorno al proprio asse.

Il conseguente attrito tra le acque marine e la crosta terrestre determina una continua diminuzione della velocità angolare, dell'energia cinetica e del momento angolare rotazionale della Terra ed un conseguente aumento del suo periodo di rotazione (giorno) di circa 16 decimillesimi di secondo in un secolo.



La diminuzione del momento angolare di rotazione della Terra, per effetto del principio di conservazione del momento angolare totale del sistema Terra-Luna, viene compensata da un aumento del momento angolare orbitale della Luna, se si considerano trascurabili, in prima approssimazione, la variazione del momento angolare di rotazione della Luna attorno al proprio asse ed il valor medio del momento risultante delle forze esterne esercitate dal Sole e dagli altri pianeti.

Il momento angolare orbitale della Luna è dato dalla formula:

$$L_{\text{orbita lunare}} = M_{\text{lunare}} V_{\text{lunare}} R_{\text{Terra-Luna}} =$$

$$= M_{\text{lunare}} \omega_{\text{lunare}} R_{\text{Terra-Luna}}^2, \text{ dove } \omega_{\text{lunare}} = 2\pi/T_{\text{lunare}} \approx$$

$= 2\pi / (27,5 \text{ giorni} * 24 \text{ ore} * 3600 \text{ secondi})$  è la velocità angolare orbitale della Luna.

Pertanto la distanza  $R_{\text{Terra-Luna}}$  della Luna dalla Terra tende ad aumentare molto lentamente.

Gli specchi posti sulla Luna dagli astronauti delle missioni Apollo hanno consentito di determinare, mediante raggi laser, che la Luna si allontana dalla Terra di circa 1 centimetro l'anno.

Il principio di conservazione del momento angolare ha un'importanza fondamentale

anche per lo studio del microcosmo, nonostante le leggi fondamentali di Galilei-Newton non si possano più applicare alle particelle elementari subatomiche.

Infatti in fisica atomica, nucleare e subnucleare e nella teoria quantistica dei campi si considerano, oltre ai momenti angolari di rotazione (orbitali), anche i momenti angolari intrinseci delle particelle dotate di spin, cioè di un momento angolare intrinseco dovuto alla rotazione della particella attorno ad un proprio asse, anche se i principi della meccanica quantistica impediscono che i momenti angolari orbitali e di spin assumano qualsiasi valore, ma soltanto determinati valori (autovalori), in accordo con la quantizzazione delle grandezze fisiche dei sistemi del microcosmo.

## **L'ATTRITO**

Le forze di attrito sono forze resistenti, cioè forze che tendono ad opporsi allo strisciamento o al rotolamento di un corpo a contatto con un altro corpo.

Sono forze di contatto che agiscono tra le superfici di due corpi e sono dovute alle forze elettriche attrattive che si esercitano tra le molecole.

Se un corpo è fermo su un piano rigido orizzontale, si osserva che la minima intensità della forza orizzontale  $F_{o \text{ min}}$  che bisogna applicare ad esso per farlo in movimento è direttamente proporzionale all'intensità della forza verticale  $F_v$  che lo spinge contro il piano, e che è data dal suo peso  $P$  più una eventuale forza verticale aggiuntiva  $F'$  che lo preme contro il piano:

$$F_{o \text{ min}} = \mu_s F_v = \mu_s (P + F') .$$

Poichè il corpo non inizia a muoversi finchè la forza orizzontale applicata non supera  $F_{o \text{ min}}$ , si deduce che la forza d'attrito statico  $F_{as}$  che equilibra la forza applicata, cresce al crescere di questa ed assume l'intensità massima

$$F_{as \text{ max}} = \mu_s (P + F') .$$

Il coefficiente di proporzionalità  $\mu_s$  (minore di uno) tra le superfici è il coefficiente di attrito statico, dipende dalla natura delle superfici a contatto e diminuisce se esse sono lubrificate.

Non appena il corpo inizia a strisciare  $\mu_s$  viene sostituito dal coefficiente di attrito dinamico  $\mu_d$ , che è minore di quello statico.

Pertanto la forza di attrito dinamico  $F_{ad}$  che si esercita tra i corpi che strisciano è sempre minore di quella massima di attrito statico  $F_{as \text{ max}}$ .

## **Esempio**

Se un blocco del peso di 100 kg, appoggiato su un piano orizzontale, inizia a muoversi quando la forza orizzontale applicata ad esso assume il valore di 40 kg-peso, il coefficiente di attrito statico è  $\mu_s = 40/100 = 0,4$ .

Non appena l'intensità della forza applicata supera il valore di 40 kg-peso, il blocco

accelera.

Per farlo strisciare con velocità costante bisogna diminuire forza applicata, perchè la forza di attrito statico viene sostituita da quella di attrito dinamico (o cinetico)  $\mu_d$ .

Se si suppone che il coefficiente di attrito dinamico sia 0,25 , l'intensità della forza orizzontale che deve essere applicata per mantenere il blocco in moto uniforme è  $0,25 * 100 = 25$  kg-peso.

L'attrito che si manifesta tra due corpi che strisciano prende il nome di attrito radente, ed è minore dell'attrito volvente che si manifesta quando un corpo rotola su un altro; per questo motivo nelle macchine i cuscinetti a sfere sono più vantaggiosi dei cuscinetti basati su superfici lubrificate.

Nelle auto con motore a combustione interna è necessaria la lubrificazione continua dei cilindri, con olio in pressione, per evitare il grippaggio dei pistoni.

Gli ingranaggi di alcuni dispositivi meccanici, come il differenziale ed il cambio di velocità, sono immersi in olio per minimizzare l'attrito e garantire sicurezza di funzionamento.

Non sempre la presenza delle forze d'attrito, che dissipano energia meccanica in calore, è indesiderata:

- la frizione ed i freni delle auto sfruttano l'attrito radente;
- non potremmo camminare nè correre senza le forze di attrito tra le scarpe ed il suolo;
- un veicolo ferroviario o stradale non si potrebbe muovere senza le forze d'attrito, rispettivamente tra ruote e rotaie e tra pneumatici e fondo stradale;
- un'auto o una moto per percorrere una curva hanno bisogno di forze d'attrito (forze centripete) tanto più intense quanto maggiore è la velocità e quanto minore è il raggio della curva.

## **LA RESISTENZA IDRODINAMICA**

Un corpo muovendosi in un liquido è soggetto alle forze resistenti dovute all'attrito interno del liquido, che prende il nome di viscosità.

La viscosità di un liquido è dovuta alle forze elettriche attrattive tra le molecole e diminuisce al crescere della temperatura del liquido.

Il fatto che la viscosità di un olio decresca notevolmente al crescere della temperatura, spiega le difficoltà che si riscontrano nell'avviare il motore di un'auto quando la temperatura ambientale è molto bassa.

L'attrito interno del liquido e l'attrito tra questo e la superficie del corpo in movimento, determinano la resistenza idrodinamica (o viscosa) al moto, che è direttamente proporzionale alle dimensioni ed alla velocità del corpo.

Se il corpo si muove con una velocità maggiore di 2 m/s, la resistenza dipende dal quadrato della velocità (resistenza idraulica).

## **LA RESISTENZA AERODINAMICA**

Se un corpo si muove in un gas è soggetto ad una forza resistente, la resistenza del

mezzo o resistenza aerodinamica, che dipende dal quadrato della velocità del corpo, dalla densità del gas, dalla sezione trasversale del corpo, cioè dall' area della superficie proiettata dal corpo su un piano perpendicolare alla direzione della velocità e da un fattore di forma che dipende dalle caratteristiche geometriche (profilo aerodinamico) del corpo.

### **Esempi**

Nel caso di un corpo dotato di una superficie molto grande, per esempio un paracadute, la resistenza aerodinamica è così grande che la velocità di caduta si stabilizza intorno ad un valore costante, tanto minore quanto maggiore è la superficie del paracadute.

La resistenza aerodinamica  $R_a$  è direttamente proporzionale alla sezione trasversale  $S$  del paracadute, alla densità  $\rho$  dell'aria ed al quadrato della velocità  $V$ .

Raggiunto l'equilibrio tra la forza peso  $P = Mg$  e la resistenza aerodinamica  $R_a = C_r S \rho V^2$ , dove  $C_r$  è un coefficiente di proporzionalità che dipende dalla forma del corpo ed è analogo al ben noto coefficiente  $C_x$  che determina la resistenza aerodinamica che agisce su un' auto, si annulla la forza risultante che agisce sul corpo e vale il principio d'inerzia. Il corpo continua pertanto a cadere con una velocità costante  $V$  che si ottiene estraendo la radice quadrata del rapporto

$Mg/(C_r S \rho)$ .

La resistenza aerodinamica è sempre orientata perpendicolarmente alla sezione trasversale del corpo in moto.

La resistenza aerodinamica che agisce sull' alettone di un' auto di formula uno o quella che agisce sulle ali di un aereo, quando la superficie mobile è disposta obliquamente rispetto alla direzione di moto, si può scomporre in due componenti:

la componente verticale, che nel caso dell'auto di formula 1 agisce verso il basso, aumentando l'aderenza tra i pneumatici e la pista;

nel caso dell' aereo invece è diretta verso l'alto e costituisce la cosiddetta portanza alare, che deve superare il peso dell'aereo affinché questo possa decollare;

la componente orizzontale che si oppone al moto in entrambi i casi, contrastando la forza propulsiva.

Nel caso di un' auto la resistenza aerodinamica relativa alla sezione trasversale della carrozzeria, determina la massima velocità di marcia, per una data potenza massima erogata dal motore.

Infatti, al crescere della velocità, la resistenza aerodinamica, sommata alla resistenza dell'auto al rotolamento, che è proporzionale al peso ed al coefficiente di attrito volvente tra pneumatici e fondo stradale, tende ad equilibrare la massima forza propulsiva, fino a quando si annulla l'accelerazione, ed il veicolo marcia a velocità costante, per il principio d'inerzia.

Se un'auto ha una sezione trasversale  $S = 1,5 \text{ m}^2$ , considerando la densità dell'aria  $\rho = 1,29 \text{ Kg/m}^3$ , una velocità massima  $V_{\text{max}} = 130 \text{ Km/h} \approx 36,11 \text{ m/s}$ , un valore  $C_x = 0,2$ , un peso  $P = 1000 \text{ kg}$ -peso ed un coefficiente di attrito volvente  $C_v = 0,01$ , si

ottengono i seguenti valori:

Resistenza aerodinamica  $R_a = C_x \rho S V_{\max}^2 = 0,2 \times 1,29 \times 1,5 \times 36,11^2 = 504,62 \text{ N} = 504,62/9,8 = 51,49 \text{ kg-peso}$ .

La resistenza al rotolamento è data da:

$R_v = C_v P = 0,01 \times 1000 = 10 \text{ kg-peso}$ .

Pertanto, alla velocità massima di 130 km/h il motore deve sviluppare una potenza massima pari al prodotto della forza resistente complessiva  $R_t = R_a + R_v = 51,49 + 10 = 61,49 \text{ kg-peso}$  per la velocità  $V_{\max}$ :

$P_{\max} = R_t V_{\max} = 61,49 \times 36,11 \text{ kg-peso} \times \text{m/s} = 2220,4/75 \text{ CV} = 29,6 \text{ CV}$  (1 Cv = 75 kg-peso x m/s) .

La potenza necessaria per vincere la resistenza aerodinamica vale

$P_a = R_a V_{\max} = 51,49 \times 36,11 \sim 1859,3 \sim 24,79 \text{ CV}$ ,

mentre quella necessaria per vincere la resistenza al rotolamento vale

$P_v = R_v V_{\max} = 10 \text{ kg-peso} \times 36,11 \sim 361,1 \sim 4,814 \text{ CV}$ .

Le simulazioni al computer e le prove aerodinamiche eseguite nelle gallerie del vento delle fabbriche automobilistiche, servono ad ottimizzare la forma della carrozzeria per sfruttare nel miglior modo possibile la potenza del motore in relazione alla massima velocità ottenibile.

## **IL PRINCIPIO DI PASCAL**

Il principio di Pascal (filosofo e matematico francese , 1623- 1662) è fondamentale per la statica dei fluidi (liquidi e gas), che sono caratterizzati da una grandissima mobilità delle molecole, dovuta al fatto che le forze elettriche attrattive tra di esse risultano molto minori rispetto a quelle che caratterizzano la struttura cristallina.

Per enunciare il principio di Pascal occorre riferirsi alle proprietà fondamentali dei fluidi.

Mentre i liquidi hanno una piccolissima comprimibilità ed assumono la forma del recipiente che li contiene, mantenendo costante il proprio volume, i gas invece sono facilmente comprimibili e per effetto delle debolissime forze attrattive tra le molecole (forze di Van der Waals) e delle elevate velocità di agitazione termica, si espandono fino ad occupare tutto il volume del contenitore, esercitando una pressione sulle pareti di questo.

Come possiamo definire la pressione di un fluido ?

E' la forza che agisce perpendicolarmente su una qualsiasi superficie unitaria che sia a contatto con esso, e si misura in unità di forza per unità di superficie :  $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$  (newton/metro quadrato = Pascal) ;  $\text{kg-peso/cm}^2$  ; atmosfera =  $1,033 \text{ kg-peso/cm}^2$  .

Poichè la pressione è definita dal rapporto  $p = F/S$  tra la forza F che agisce perpendicolarmente ad una superficie e l'area S di essa, se si conosce il valore della pressione in un dato punto del liquido, si può ricavare la forza  $F = p S$  che agisce perpendicolarmente ad una superficie S .

Se infatti consideriamo un liquido in equilibrio in un recipiente, le forze di pressione che il liquido esercita su tutte le pareti, per la III legge della dinamica sono uguali e contrarie a quelle esercitate dalle pareti sul liquido.

Queste forze di reazione, se non fossero perpendicolari alle pareti del recipiente, farebbero fluire il liquido parallelamente ad esse, per la grande mobilità delle molecole. Pertanto si deduce che le forze dovute alla pressione di un fluido agiscono sempre perpendicolarmente alle pareti del contenitore e ad una qualsiasi superficie posta all'interno del liquido, indipendentemente dall'orientamento di essa.

La pressione di un gas racchiuso in un contenitore è conseguenza dei continui urti delle molecole contro le pareti di esso, ed aumenta al crescere della temperatura, in quanto l'energia cinetica molecolare è direttamente proporzionale alla temperatura assoluta (in gradi Kelvin) del gas.

Le forze elettriche che agiscono tra le mobilissime molecole di un fluido rendono possibile la trasmissione uniforme di una pressione esercitata in un punto qualsiasi di esso a tutta la massa fluida, senza diminuzioni di intensità.

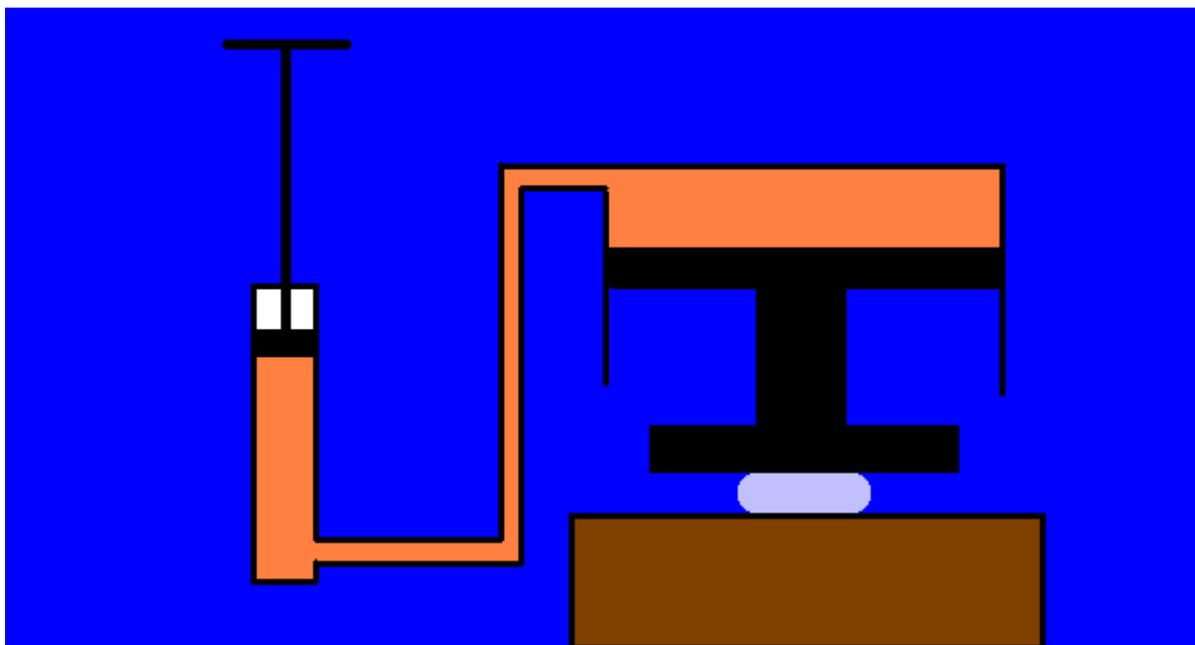
In questo consiste il principio di Pascal, che afferma che se un fluido è racchiuso in un recipiente e viene aumentata la pressione in punto qualsiasi del fluido, l'aumento di pressione si trasmette inalterato a tutto il fluido ed alle pareti del recipiente.

### ***Esempi***

Se un liquido riempie un cilindro dotato di un pistone che esercita pressione sul liquido, l'abbassamento del pistone produce un aumento di pressione che si trasmette inalterato a tutto il liquido ed alle pareti del cilindro.

Un'importante applicazione di questo principio riguarda il sistema frenante di un'auto, che consente di applicare alle pinze ed alle ganasce dei freni la forza esercitata dal piede del guidatore, utilizzando un liquido sotto pressione che trasmette inalterato l'aumento di pressione causato dall'abbassamento dello stantuffo collegato al pedale.

Ricordiamo inoltre il funzionamento dei sistemi oleodinamici utilizzati nelle macchine operatrici (escavatori, bulldozer) e quello delle presse idrauliche, che consentono di esercitare sui pezzi meccanici in lavorazione forze di parecchie tonnellate disponendo di forze motrici molto più piccole.



PRESSA OLEODINAMICA

Se un pistone con una superficie di  $10 \text{ cm}^2$  viene spostato di  $100 \text{ cm}$  in un cilindro pieno d'olio, sotto l'azione di una forza di  $5 \text{ kg}$ -peso, trasmettendo un aumento di pressione di  $50$  atmosfere ad un pistone con una superficie di  $1 \text{ m}^2 = 10000 \text{ cm}^2$ , viene esercitata sul pistone grande una forza  $10000/10 = 1000$  volte maggiore ( $5$  tonnellate), mentre il relativo spostamento è  $1000$  volte minore ( $1 \text{ mm}$ ) di quello subito dal pistone piccolo.

Il lavoro fatto dal pistone piccolo  $L = 5 \text{ kg-peso} \times 1 \text{ metro} = 5$  chilogrammetri, è circa uguale al lavoro fatto dal pistone grande sull'oggetto in lavorazione (principio del torchio idraulico), se si ritiene trascurabile il lavoro che si trasforma in calore a causa delle forze d' attrito e della viscosità dell'olio.

### **IL PRINCIPI DI ARCHIMEDE E DI STEVINO**

Il principio di Archimede è una conseguenza diretta del fatto che la pressione idrostatica che si genera in un liquido per effetto della forza di gravità, dipende dalla densità e dalla profondità del liquido.

Se consideriamo infatti un liquido in equilibrio statico in un recipiente, la pressione idrostatica  $p$  in un punto qualsiasi del liquido ad una profondità  $h$  rispetto alla superficie libera del liquido è data dalla formula  $p = p_0 + \rho g h$  (principio di Stevino), nella quale  $\rho$  è la densità del liquido,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $p_0$  è la pressione atmosferica che agisce sulla superficie libera del liquido.

Si osserva che  $\rho g h$  è il peso per unità di superficie che si ha alla base di una colonna di liquido di altezza  $h$ , e che la pressione idrostatica, che è sempre diretta

perpendicolarmente alla superficie su cui agisce, dipende soltanto dalla profondità  $h$ .  
Il principio di Archimede stabilisce che un corpo immerso in un liquido o in un gas subisce una spinta  $S$  dal basso verso l'alto pari al peso del volume  $V$  di fluido spostato:  
 $S = \rho Vg$ .

La spinta di Archimede è data dalla risultante di tutte le forze che il fluido esercita sulla superficie del corpo per effetto della pressione idrostatica (o aerostatica nel caso di un gas).

In condizioni di assenza di gravità, per esempio in un' astronave in orbita attorno ad un pianeta o ad un satellite, manca la pressione idrostatica; pertanto la spinta di Archimede è nulla.

Un corpo immerso in un liquido galleggia se la spinta idrostatica supera il peso del corpo.

In questo caso la risultante delle forze idrostatiche spinge il corpo verso la superficie libera del liquido, finchè la spinta dovuta alla parte immersa non uguaglia il peso del corpo.

Navi, sottomarini, mongolfiere e dirigibili funzionano in base al principio di Archimede. Un sottomarino, espellendo o immettendo acqua nei suoi compartimenti stagni, è in grado di controllare la differenza tra la spinta idrostatica ed il peso, rispettivamente quando debba risalire in superficie o quando debba immergersi.

Esso è anche in grado, raggiunta la profondità prestabilita, di rimanere a profondità costante, facendo in modo che la spinta uguagli il peso.

Una mongolfiera è soggetta ad una forza ascensionale pari alla differenza tra la spinta aerostatica  $S$  ed il peso:

$F_a = S - P = \rho_{ef} Vg - \rho_{ic} Vg$ , dove  $\rho_{ef}$  è la densità dell'aria esterna (fredda),  $\rho_{ic}$  è la densità dell'aria interna (calda) e  $V$  è il volume dell'involucro.

Quando il pilota della mongolfiera aumenta l'apertura della valvola del gas, determina un aumento di temperatura dell'aria calda, con una diminuzione della densità  $\rho_{ic}$  e quindi del peso di questa.

Pertanto la forza ascensionale aumenta.

Durante la discesa viene ridotto il flusso del gas per determinare una diminuzione di temperatura, che implica un aumento della densità dell'aria calda sufficiente a fare in modo che il peso superi la spinta aerostatica, determinando un' accelerazione verso il basso.

## **IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA MASSA**

Il principio di conservazione della massa, formulato nel 1789 dal chimico Lavoisier e già espresso da Lucrezio nel poema "*De rerum natura*", consiste nel considerare costante ed indistruttibile la quantità di materia presente in natura: in un sistema qualsiasi e, per estensione, nell'universo, la quantità totale di materia è sempre la stessa; la materia può subire trasformazioni fisico-chimiche, ma non si distrugge ("*in natura nulla si distrugge, tutto si trasforma*").

## **Esempio**

La combustione di carbone (C) o gas metano (CH<sub>4</sub>) è una reazione chimica tra il carbonio o il metano e l'ossigeno, che è il comburente.

I prodotti di reazione sono costituiti, nel caso del carbone, da ossido di carbonio (CO) ed anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), nel caso del metano da anidride carbonica e vapore acqueo (CH<sub>4</sub> + 2 O<sub>2</sub> -> CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> O).

Se pesassimo il combustibile (carbone o metano) ed il comburente (ossigeno) ed i gas prodotti dalla combustione, potremmo verificare che la massa complessiva dei prodotti di reazione è sempre uguale alla massa complessiva dei reagenti, trascurando, in prima approssimazione, la piccolissima quantità di massa dei reagenti che si trasforma in calore per il principio relativistico di equivalenza tra massa ed energia.

## **LA PROPAGAZIONE DEL CALORE**

L'energia termica si può trasmettere da un corpo ad un altro in tre modi: per conduzione, per convezione, per irraggiamento.

### **PROPAGAZIONE TERMICA PER CONDUZIONE**

Sappiamo che quando due corpi a temperature diverse vengono messi direttamente a contatto, in tutti i punti della superficie di contatto il calore passa dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico, cioè finché entrambi i corpi non abbiano assunto in tutti i punti la stessa temperatura, corrispondente ad uguali valori medi dell'ampiezza delle oscillazioni armoniche e quindi dell'energia di agitazione termica di tutti gli atomi dei due corpi.

Se invece il contatto ha luogo attraverso uno o più strati di altri materiali, il trasferimento di calore da un corpo all'altro avviene indirettamente, attraverso le oscillazioni armoniche degli atomi dei materiali interposti.

La legge che consente di calcolare la quantità di calore  $\Delta Q$  che passa nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  attraverso uno strato di materiale di spessore  $\Delta x$  ed area  $S$ , tra le cui facce esista una differenza di temperatura  $\Delta T$ , si può esprimere con la relazione:

$\Delta Q = - (k S \Delta T / \Delta x) \Delta t$ , dove  $k$  è una costante di proporzionalità che prende il nome di conducibilità termica del materiale, per la quale riportiamo due valori sperimentali tipici:

per il rame (buon conduttore termico)

$$k = 0,92 \text{ (calorie/secondo)/[(cm}^2\text{)(}^\circ\text{C/cm)]};$$

per il cemento (cattivo conduttore termico)

$$k = 0,002 \text{ (calorie/secondo)/[(cm}^2\text{)(}^\circ\text{C/cm)]}.$$

Pertanto l'intensità  $I_{th}$  della corrente termica di conduzione (flusso di calore espresso in

calorie/sec) attraverso lo strato è data da:

$$I_{th} = \Delta Q / \Delta t = - kS (\Delta T / \Delta x).$$

Il rapporto incrementale  $\Delta T / \Delta x$  prende il nome di gradiente termico (dal latino "*gradus*" , passo), in quanto esprime la variazione di temperatura per unità di spessore, valutata in funzione di  $\Delta T$  e del *passo*  $\Delta x$  , all'interno del materiale conduttore.

Il segno meno serve a compensare il segno negativo della variazione (diminuzione) di temperatura  $\Delta T$  nel verso del flusso di calore, che è diretto dai punti a temperatura maggiore a quelli a temperatura minore.

I metalli sono i migliori conduttori termici grazie al contributo degli elettroni liberi, la cui energia di agitazione termica si aggiunge a quella associata alle oscillazioni degli atomi della struttura cristallina.

I gas sono caratterizzati da valori della conducibilità termica da 10000 a 100000 volte minori rispetto ai metalli.

### **Esempio**

Il flusso termico attraverso una lastra di rame con superficie

$S = 1 \text{ m}^2 = 10000 \text{ cm}^2$  e spessore  $\Delta x = 2 \text{ cm}$  , tra le cui facce sia mantenuta una differenza di temperatura  $\Delta T = - 50 \text{ }^\circ\text{C}$  è pari a:

$$I_{th} = \Delta Q / \Delta t = - KS (\Delta T / \Delta x) = - 0,92 \times 10000 \times (-50/2) = 230000 \text{ calorie/secondo} .$$

Se si considera invece una lastra di cemento con la stessa superficie e lo stesso spessore, il flusso termico si riduce a

$$I_{th} = \Delta Q / \Delta t = - KS (\Delta T / \Delta x) = - 0,002 \times 10000 \times (-50/2) = 500 \text{ calorie/secondo} .$$

## **PROPAGAZIONE TERMICA PER CONVEZIONE**

La propagazione del calore per convezione si basa sui moti convettivi (dal latino *convehere* = trasportare) di un fluido dalle zone a temperatura maggiore verso quelle a temperatura minore; il fenomeno consiste infatti nel trasferimento di calore, dalle zone più calde a quelle meno calde, mediante spostamenti di materia.

Come semplice esempio di propagazione del calore per convezione, consideriamo il riscaldamento dell'acqua contenuta in una pentola posta su un fornello.

L'acqua, riscaldandosi in prossimità del fondo della pentola e subendo così una diminuzione di densità, per il principio di Archimede tende a salire, cedendo calore all'acqua fredda in superficie, e subito dopo, avendo subito un aumento di densità a seguito della cessione di calore, discende verso il fondo del recipiente per dare inizio ad un nuovo ciclo di riscaldamento-raffreddamento-riscaldamento.

In tal modo, grazie ai continui moti convettivi, il calore si propaga a tutta l'acqua contenuta nella pentola.

I venti e le correnti marine sono causati da moti convettivi, rispettivamente, dell'aria e dell'acqua, dovuti alle differenze di temperatura determinate dall'assorbimento della radiazione solare.

Nel caso dei venti, sulle zone calde della superficie terrestre, per effetto della minore

densità dell'aria e di conseguenti moti convettivi ascensionali, si formano aree di bassa pressione (aree cicloniche), verso le quali si dirige l'aria fredda, più densa, proveniente dalle zone anticicloniche (con temperatura minore e pressione maggiore).

In modo analogo, le correnti marine sono dovute a moti convettivi prodotti dalle differenze di salinità e di temperatura tra masse d'acqua a profondità diverse.

Sui moti convettivi si basa il funzionamento degli impianti di riscaldamento domestici che utilizzano termosifoni.

L'acqua circola nei tubi per convezione naturale, per effetto della differenza di temperatura esistente tra la caldaia ed i radiatori.

Sui moti convettivi dell'aria si basa il funzionamento dei dissipatori termici (radiatori) utilizzati nei motori termici, nei frigoriferi, nei condizionatori e nelle apparecchiature elettroniche.

Il flusso di calore ceduto all'ambiente per convezione naturale è direttamente proporzionale alla superficie radiante ed alla differenza di temperatura esistente tra il radiatore e l'ambiente.

## **PROPAGAZIONE TERMICA PER IRRAGGIAMENTO**

Tutti i corpi con temperatura superiore allo zero assoluto ( $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $t = - 273,16 \text{ }^\circ\text{C}$ ) emettono energia sotto forma di onde elettromagnetiche (energia radiante) con lunghezza d'onda variabile con continuità nella banda compresa tra l'infrarosso lontano e la luce visibile.

Le onde elettromagnetiche che costituiscono la radiazione termica sono emesse dalla materia per effetto delle oscillazioni delle cariche elettriche atomiche e molecolari dovute all'agitazione termica.

Poichè, come dimostrò Larmor, una carica elettrica soggetta ad un moto accelerato irradia onde elettromagnetiche, l'accelerazione dei moti oscillatori atomici e molecolari implica l'emissione di energia elettromagnetica.

Si verifica che la potenza radiante emessa per unità di superficie (potere emissivo totale), considerando l'intera banda delle lunghezze d'onda misurabili, è data dalla legge di Stefan:  $E \text{ (watt/m}^2\text{)} = e \sigma T^4$ , dove  $e (< 1)$  è una costante (coefficiente di emissione) che dipende dalla superficie radiante,  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ }^\circ\text{C}^4)$  è una costante di proporzionalità e  $T$  è la temperatura assoluta ( $^\circ\text{K}$ ).

Se  $e = 1$ , si tratta di un emettitore ideale (corpo nero), caratterizzato dal massimo potere emissivo.

Se  $t=1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T=1000 + 273,16=1273,16 \text{ }^\circ\text{K}$ ,

$E=1 \times 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1273,16^4=149763,78 \text{ W/m}^2$ .

## **IL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA ED I PRINCIPI DELLA TERMODINAMICA**

Il principio di conservazione dell'energia è, unitamente ai principi fondamentali di conservazione della quantità di moto e del momento angolare, una legge fondamentale

della natura, valida universalmente sia nel mondo fisico macroscopico che nel microcosmo.

E' un principio unificatore che lega tutti i fenomeni fisici e fornisce una visione unitaria ed integrata di tutte le teorie fisiche, dalla meccanica celeste, alla meccanica quantistica, alla teoria quantistica dei campi, al modello standard.

L'enunciazione di questo principio risale al XIX secolo, e si deve a diversi studiosi, alcuni dei quali non si occupavano di fisica:

Julius Robert Mayer (medico tedesco, 1814-1878),

James Prescott Joules (industriale inglese, 1818-1889),

Hermann von Helmholtz (fisiologo tedesco, 1821-1894).

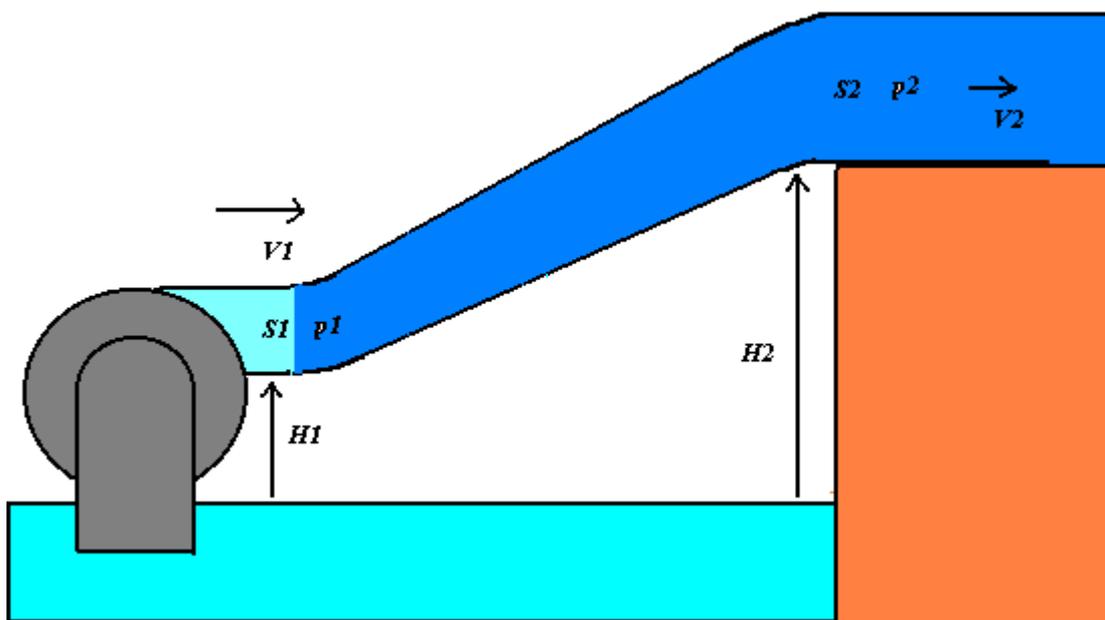
Questi studiosi, indipendentemente l'uno dall'altro, contribuirono per vie diverse alla comprensione di questa fondamentale legge naturale:

Mayer attraverso osservazioni attinenti alla fisiologia umana;

Joule eseguendo con diversi metodi la misura dell' equivalente meccanico del calore (determinò che una piccola caloria, che è la quantità di calore che deve essere fornita alla massa di 1 grammo d' acqua per aumentarne la temperatura di 1°C, equivale ad un' energia meccanica di circa 4,18 joule);

Helmholtz rendendosi conto (1847) per primo che tutte le forme di energia (cinetica, potenziale, elettrica, termica, chimica) sono equivalenti.

### **Esempio**



**ELETTROPOMPA CHE RIEMPIE UN SERBATOIO ALLA QUOTA  $H_2$**

Applichiamo il principio di conservazione dell'energia ad un liquido incompressibile e non viscoso di densità  $\rho$ , che fluisce in un tubo obliquo a sezione variabile, caratterizzato dalla sezione minima  $S_1$  alla quota  $H_1$  e dalla sezione massima  $S_2$  alla quota  $H_2$ .

Se  $p_1$  è la pressione del liquido in corrispondenza di  $S_1$  e  $p_2$  quella in corrispondenza di  $S_2$ , il lavoro fatto dalla forza di pressione  $F_1 = p_1 S_1$ , diretta verso destra ed esercitata dal liquido che si trova a sinistra di  $S_1$  sul liquido che entra nel tubo è  $F_1 d_1 = p_1 S_1 d_1$  per lo spostamento  $d_1$  verso destra, mentre il lavoro fatto dal liquido che esce dal tubo contro il liquido che si trova a destra di  $S_2$  è  $F_2 d_2 = p_2 S_2 d_2$  per lo spostamento  $d_2$  verso destra.

L'applicazione del teorema lavoro-energia (delle forze vive) al volume di liquido  $S_1 d_1 = S_2 d_2$ , consiste nell'uguagliare il lavoro netto  $L = p_2 S_2 d_2 - p_1 S_1 d_1$  che viene eseguito sulla massa liquida  $m = \rho S_1 d_1 = \rho S_2 d_2$ , alla somma degli aumenti  $\Delta U$  e  $\Delta K$ , rispettivamente dell'energia potenziale gravitazionale

$\Delta U = \rho S_2 d_2 g H_2 - \rho S_1 d_1 g H_1$  e dell'energia cinetica

$$\Delta K = (1/2) \rho S_2 d_2 V_2^2 - (1/2) \rho S_1 d_1 V_1^2 :$$

$$L = \Delta U + \Delta K.$$

Ordinando opportunamente i termini si ottiene:

$$\begin{aligned} p_1 S_1 d_1 + (1/2) \rho S_1 d_1 V_1^2 + \rho S_1 d_1 g H_1 &= \\ = p_2 S_2 d_2 + (1/2) \rho S_2 d_2 V_2^2 + \rho S_2 d_2 g H_2 . \end{aligned}$$

Dividendo ambo i membri per  $S_1 d_1 = S_2 d_2$ , si ottiene il teorema di Bernoulli, che equivale al principio di conservazione dell'energia meccanica totale applicato ad un liquido o ad un gas :

$$p_1 + (1/2) \rho V_1^2 + \rho g H_1 = p_2 + (1/2) \rho V_2^2 + \rho g H_2 = \text{costante}.$$

Il teorema di Bernoulli afferma che in un punto qualsiasi del tubo a sezione variabile, si mantiene costante l'energia meccanica totale di un volume unitario di liquido, data dalla somma della pressione  $p_1$ , della pressione dinamica (o cinetica)  $(1/2) \rho V^2$  (energia cinetica per unità di volume) e della pressione idrostatica (energia potenziale gravitazionale per unità di volume)  $\rho g H$ .

Tenendo conto che, con riferimento alla massa di liquido

$m = \rho S_1 d_1 = \rho S_2 d_2$  che passa nel tubo nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ , la velocità, per il concetto di portata volumetrica ( $P = SV$  in  $\text{m}^3/\text{s}$ ) è inversamente proporzionale alla sezione del tubo ( $S_1 d_1 = S_2 d_2$ ;  $S_1 V_1 \Delta t = S_2 V_2 \Delta t$ ), si deduce in particolare che, se il tubo è orizzontale ( $H_1 = H_2$ ), dovendo la velocità aumentare dove la sezione diminuisce e dovendo risultare costante la somma delle pressioni, nella strozzatura la pressione  $p$  diminuisce.

Viceversa, dove la sezione aumenta, la velocità diminuisce e la pressione aumenta.

Se  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  (densità dell'acqua),

$V_1 = 25,36 \text{ m/s}$ ,  $S_1 = 100 \text{ cm}^2$ ,  $H_1 = 2 \text{ m}$ ,

$p_1 = 3 \text{ atmosfere} = 3 \times 1,013 \times 10^5 \text{ newton/m}^2 = 3,039 \times 10^5 \text{ newton/m}^2$ ,

$S_2 = 200 \text{ cm}^2$ ,  $H_2 = 5,2 \text{ m}$ ,

$p_2 = 5 \text{ atmosfere} = 5,065 \times 10^5 \text{ newton/m}^2$ , la velocità  $V_2$  assume il valore che si ottiene dall'equazione:

$$3,039 \times 10^5 + 0,5 \times 1000 \times 625 + 1000 \times 9,81 \times 2 =$$

$$= 5,065 \times 10^5 + 0,5 \times 1000 \times V_2^2 + 1000 \times 9,81 \times 5,2 ;$$

$$3,039 \times 10^5 + 0,5 \times 1000 \times 625 + 1000 \times 9,81 \times 2 - 5,065 \times 10^5 - 1000 \times 9,81 \times 5,2 =$$
$$0,5 \times 1000 V_2^2 ;$$

$$500 V_2^2 = (3,039 - 5,065) \times 10^5 + 1000 \times 9,81 \times (2 - 5,2) +$$

$$0,5 \times 1000 \times 625 = -202600 - 31392 + 312500 \approx 78508 .$$

$V_2 = \text{radice quadrata di } (78508/500) = \text{radice quadrata di } 157 \approx 12,5 \text{ m/s}.$

La portata volumetrica è  $P = S_1 V_1 = S_2 V_2 = 100 \times 10^{-4} \times 25 \text{ m/s} \approx 0,25 \text{ m}^3/\text{s}.$

Osserviamo che la velocità  $V_2$  è praticamente uguale a  $V_1/2$ , poichè  $S_2 = 2S_1$ .

L'aumento di 2 atmosfere della pressione  $p$  del liquido e l'aumento di energia potenziale gravitazionale del liquido, per unità di volume, relativo all'aumento di quota di 3 m, si ottengono a spese della minore energia cinetica del liquido per unità di volume, cioè a spese della minore della pressione dinamica  $(1/2) \rho V^2$ .

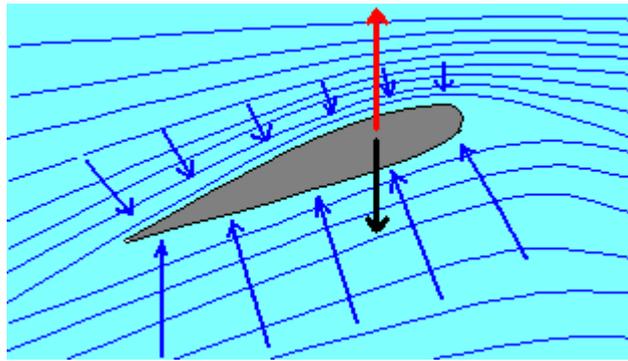
### **Altri esempi applicativi del teorema di Bernoulli**

1) Se ci troviamo a bordo di un'auto ferma e passa a breve distanza da noi un'auto a velocità sostenuta, avvertiamo una temporanea spinta laterale che tende a far avvicinare la nostra auto a quella in transito.

Infatti, per il teorema di Bernoulli l'aumento della velocità dell'aria nello spazio compreso tra le auto, che si comporta come la strozzatura di un tubo, determina una diminuzione di pressione rispetto a quella atmosferica e di conseguenza il temporaneo avvicinamento di un'auto all'altra.

2) L'ala di un aereo è soggetta ad una spinta aerodinamica verso l'alto (portanza), che è tanto maggiore quanto maggiore è la differenza tra la pressione sotto l'ala e quella al di sopra di essa.

Poichè la differenza di pressione è tanto maggiore quanto maggiore è la velocità dell'aereo, si deduce che la faccia superiore dell'ala si comporta come la strozzatura di un tubo, come si può rilevare studiando il comportamento aerodinamico di un modello dell'ala utilizzando la galleria del vento.



## FORZE AERODINAMICHE AGENTI SULL'ALA DI UN AEREO

LE LINEE DI CAMPO DELLA VELOCITA' SI ADDENSANO  
SULLA PARTE SUPERIORE DEL PROFILO, DOVE  
LA PRESSIONE E' MINORE E LA VELOCITA' E' MAGGIORE

Se infine il liquido è viscoso, bisogna tenere conto della quantità di calore che si sviluppa per unità di volume a causa dell'attrito interno.

### ***Il primo principio della termodinamica***

Dall' enunciazione del principio di conservazione dell' energia deriva il primo principio della termodinamica, che non è altro che un particolare enunciato riferito a tutti quei fenomeni che implicano la trasformazione di lavoro meccanico, elettrico o magnetico in calore, cioè in energia termica e, e di calore in lavoro, con le limitazioni stabilite per i motori termici dal

### ***secondo principio della termodinamica.***

Il primo principio della termodinamica, esprimendo il principio di conservazione dell'energia per i fenomeni termici, impedisce la realizzazione del cosiddetto *perpetuum mobile* del primo tipo, cioè di una macchina termica che produca lavoro senza assorbire calore.

### ***Esempi applicativi del primo principio della termodinamica:***

## TRASFORMAZIONI INTEGRALI DI LAVORO IN CALORE

- 1) La trasformazione in calore del lavoro meccanico dovuto alle forze di attrito, per esempio nei freni di un' auto o di un convoglio ferroviario;
- 2) La trasformazione in calore del lavoro meccanico fatto piantando un chiodo in un pezzo di legno o piegando più volte un' asta metallica;
- 3) La trasformazione in calore del lavoro fatto da un generatore per far passare la corrente elettrica in un conduttore metallico (termosifoni, scaldabagni, cucine e forni elettrici);
- 4) La trasformazione in calore del lavoro fatto per comprimere un gas.

## **TRASFORMAZIONI DI CALORE IN LAVORO MECCANICO:**

### **Esempi**

1) Riscaldamento di un gas a pressione costante  $p$  in un cilindro dotato di un pistone di sezione  $S$ , libero di muoversi e sottoposto ad una forza costante (dovuta alla forza esercitata dalla pressione atmosferica e ad eventuali altre forze costanti applicate al pistone) :  $Q = L + \Delta U$  , dove  $Q$  è la quantità di calore assorbita dal gas,

$L = F \times \Delta h = p \times S \times \Delta h = p \times \Delta V$  è il lavoro fatto dal gas che si espande a pressione costante con un aumento di volume  $\Delta V$ ,

$\Delta U = U_{\text{finale}} - U_{\text{iniziale}}$  è l'aumento di energia interna del gas che si riscalda.

La formula  $Q = L + \Delta U$  esprime l' enunciato del primo principio della termodinamica.

2) Trasformazione in lavoro meccanico  $Q = L$  della quantità di calore

$Q = Q_a - Q_b$  , che nel ciclo termodinamico di una macchina termica è data dalla differenza tra la quantità di calore  $Q_a$  che essa assorbe da una sorgente di calore ad alta temperatura  $T_a$

(- calore fornito dalla combustione della miscela aria-benzina in un motore a scoppio o da quella della miscela aria-gasolio in un motore Diesel;

-calore generato dalla combustione di carbone, gas naturale, olio minerale oppure dalla fissione nucleare, nel caso di una turbina a vapore)

e la quantità di calore  $Q_b$  che essa cede ad una sorgente di calore a bassa temperatura  $T_b$  , attraverso lo scarico ed il radiatore, o attraverso il condensatore, che , nel caso di una centrale termica o nucleare, richiede l' acqua del mare o di un fiume per il raffreddamento delle turbine a vapore.

L' impossibilità pratica di trasformare in lavoro meccanico tutto il calore  $Q_a$  fornito dalla sorgente termica ad alta temperatura, è stabilita dal secondo principio della termodinamica, formulato nel XIX secolo in modi diversi , ma equivalenti, da Lord Kelvin (William Thomson) e da Rudolph Clausius (fisico tedesco, 1822 - 1888), considerati i fondatori della termodinamica, assieme all' ingegnere francese Sadi Carnot (1796-1832) , il quale nel 1824, studiando il rendimento delle macchine termiche reali, si convinse che il loro rendimento

(rapporto  $\rho = L/Q_a = (Q_a - Q_b)/ Q_a = (T_a - T_b)/T_a = 1 - T_b/T_a$  ) non può mai superare il rendimento di una macchina termica ideale (macchina di Carnot) operante tra le stesse temperature  $T_a$  e  $T_b$ , espresse in gradi kelvin ( $T \text{ } ^\circ \text{K} = t \text{ } ^\circ \text{C} + 273,16$ ).

Lord Kelvin, basandosi su considerazioni termodinamiche e considerando che tutti i tentativi di costruire una macchina termica che utilizzasse una sola sorgente di calore a temperatura costante, erano stati vani, enunciò il secondo principio affermando l' impossibilità di costruire una tale macchina termica.

### **Il secondo principio della termodinamica**

Il secondo principio della termodinamica è una legge naturale che impedisce di sfruttare illimitatamente e completamente le immense riserve di energia termica immagazzinate

negli oceani e nel sottosuolo (il cosiddetto *perpetuum mobile* del secondo tipo), in quanto è sempre inevitabile trasferire una consistente quantità di calore ad una sorgente a temperatura minore, cioè all' ambiente in cui opera la macchina termica.

In altri termini, il secondo principio della termodinamica stabilisce che per trasformare in modo continuativo calore in lavoro è sempre necessario disporre di un salto termico e quindi di due sorgenti termiche a temperature diverse.

Si può dimostrare che la formulazione del secondo principio della termodinamica secondo Clausius è equivalente a quella di Lord Kelvin.

Clausius affermò che è impossibile costruire un frigorifero ideale, cioè un frigorifero che trasferisca calore da un corpo ad un altro a temperatura maggiore, senza impiegare lavoro meccanico.

In modo equivalente si può dire che il secondo principio della termodinamica stabilisce il verso di propagazione naturale del calore, da un corpo ad una data temperatura ad un altro a temperatura minore.

Per invertire il flusso naturale del calore bisogna impiegare lavoro meccanico.

Il rendimento  $\rho = L/Q_a = (Q_a - Q_b)/Q_a$  di alcuni tipi di macchine termiche reali (macchine a vapore, motori a combustione interna, turbine a vapore) assume, in media, i seguenti valori pratici:

Motori a scoppio (ciclo Otto) :  $\rho = 25\%$  ;

Motori a ciclo Diesel :  $\rho = 32\%$  ;

Turbine a vapore (ciclo Rankine) :  $\rho = 40\%$ .

Questi bassi valori del rendimento termodinamico implicano la cessione all' ambiente di una notevole quantità di calore che, a meno che non venga utilizzato per produrre energia elettrica o per riscaldare ambienti, è preziosa energia sprecata, anzi destinata ad incrementare artificialmente la temperatura dell' aria e dell'acqua di raffreddamento con rilevanti danni per l' ambiente.

Questo fenomeno negativo fa parte del principio di degradazione dell' energia, che afferma che l' energia termica ad alta temperatura ottenuta a spese di forme di energia più pregiate (chimica, nucleare), per il secondo principio della termodinamica implica sempre notevoli sprechi nel processo termodinamico di conversione che si utilizza per ottenere energia meccanica, in quanto viene sempre prodotta energia termica a bassa temperatura, che è impossibile riconvertire integralmente in energie più nobili.

Ne consegue, pur valendo sempre il principio di conservazione dell' energia (I principio della termodinamica), una sempre crescente indisponibilità di energia, che può essere compresa ricorrendo al classico esempio delle due masse d' acqua, aventi temperature tali da consentirne l' utilizzazione come sorgenti termiche per far funzionare una macchina termica e ricavare energia meccanica.

Se invece le due masse d' acqua vengono mescolate ottenendo, raggiunto l' equilibrio termico, una sola sorgente termica a temperatura intermedia rispetto a quelle iniziali, pur essendo rispettato il principio di conservazione dell' energia, in quanto il calore acquisito dalla massa d' acqua fredda è uguale a quello ceduto dalla massa d' acqua calda, non è più possibile utilizzare l' unica massa d'acqua a temperatura uniforme per

far funzionare una macchina termica.

L' esempio evidenzia che nel processo irreversibile di traferimento del calore dalla massa calda a quella fredda, è aumentato il disordine del sistema, che è misurato attraverso una grandezza termodinamica importantissima, l'entropia.

Nell'universo , caratterizzato da processi termodinamici irreversibili, come la propagazione del calore da un corpo caldo a un corpo freddo, l'entropia aumenta sempre, pur conservandosi l' energia totale, in tutte le sue forme.

Ecco perchè il secondo principio della termodinamica si può enunciare anche, seguendo Clausius, come principio dell'aumento dell'entropia.

Quando avviamo il motore di un' auto, anche se l' entropia della macchina termica non cambia, perchè essa sfrutta un ciclo termodinamico reale, cioè un insieme di trasformazioni irreversibili (espansioni e compressioni) che riportano il motore nello stato iniziale, tuttavia l' entropia dell'ambiente , e quindi dell'universo, aumenta sempre.

Se si pensasse di costruire una macchina termica ideale (di Carnot) con un rendimento del 100% ,

$\rho = L/Q_a = (Q_a - Q_b)/ Q_a = (T_a - T_b)/T_a = 1 - T_b/T_a = 1$  per  $T_b = 0$ , bisognerebbe raffreddare il condensatore della macchina alla temperatura dello zero assoluto ( $T_b = 0$  °K).

### ***Il terzo principio della termodinamica***

A prescindere dalle notevolissime difficoltà pratiche che si incontrerebbero per realizzare una tale macchina, bisogna tenere presente che è impossibile realizzarla per il terzo principio della termodinamica (principio di Nernst, che afferma che quanto più ci si avvicina allo zero assoluto ( $t = - 273$  °C , corrispondente a  $T = 0$  °K), anche di qualche milionesimo di grado kelvin, tanto più difficile è abbassare ulteriormente la temperatura. In altri termini, non è possibile raggiungere la temperatura dello zero assoluto con un numero finito di trasformazioni termodinamiche.

Questa legge naturale è collegata direttamente al comportamento della materia allo zero assoluto, secondo i principi della meccanica quantistica, la quale , per il principio di indeterminazione di Heisenberg , impedisce di localizzare esattamente una particella elementare della quale sia nota esattamente la quantità di moto.

Pertanto a tutti gli stati quantici del punto zero compete un' energia minima , detta appunto energia del punto zero, ma non nulla.

Si dice, alternativamente, che al punto zero tutti gli stati hanno la stessa entropia.

### ***I CAMPI ELETTRICI***

Il fulmine ha sempre esercitato sugli uomini un fascino particolare, un misto di paura e di stupore per le colossali forze che la natura libera durante i temporali.

Sin dai tempi più remoti la luce bluastra dei lampi ed il fragore lacerante dei tuoni sono stati associati dalle varie culture popolari a misteriose forze di origine divina liberate contro l' uomo come per evidenziare il divario abissale di potenza tra il divino e l'

umano.

Per i Greci i fulmini venivano scagliati da Zeus contro l' uomo resosi colpevole di offese gravi nei confronti degli dei.

Col progredire della conoscenza, gli uomini cominciarono a rendersi conto della fisicità dei fenomeni elettrici naturali, ed in particolare, in tempi più vicini a noi, a partire dal XVII secolo cominciarono ad occuparsi dei fenomeni elettrici con atteggiamento speculativo e non più superstizioso.

In particolare l' inglese Gilbert, medico della regina Elisabetta I, condusse i primi studi sui fenomeni elettrostatici, e si rese conto delle proprietà elettriche di vari corpi, come , per esempio, il vetro, di attrarre pezzettini di sostanze di vario tipo, dopo essere stati strofinati con un panno o con una pelliccia.

Il fenomeno era stato già osservato per l'ambra (in greco *elektron*) nell'antica Grecia.

Gilbert poté così stabilire che le cariche elettriche acquisite da due corpi elettrizzati per strofinio, sono sempre di tipo diverso, una positiva ed una negativa.

I fenomeni di elettrizzazione prodotti inizialmente per diletto nei salotti, utilizzando macchine elettrostatiche a strofinio, si trasformarono a poco a poco da giochi di società in esperimenti scientifici, finché il fisico francese Coulomb, nella seconda metà del XVIII secolo, giunse all' enunciazione della legge che porta il suo nome, relativa alla forza attrattiva o repulsiva che agisce tra due cariche elettriche puntiformi, rispettivamente di segno opposto o dello stesso segno, matematicamente analoga a quella di gravitazione universale enunciata da Newton.

All' elettrostatica diedero notevoli contributi gli inglesi Benjamin Franklin e Michel Faraday, le cui ricerche, al di là dei notevoli risultati conseguiti, portarono rispettivamente alle invenzioni del parafulmine e dello schermo elettrostatico (gabbia di Faraday).

Con l' invenzione della pila di Volta (1800) ebbero inizio gli studi sulle correnti elettriche e sui loro effetti (termico, magnetico e chimico), e continuarono a progredire fino alla formulazione delle celebri equazioni dell' elettromagnetismo da parte del fisico scozzese Clerk Maxwell (seconda metà del XIX secolo), che fornirono per la prima volta una visione teorica completa di tutti i fenomeni elettrici e magnetici .

La carica elettrica è una delle tante caratteristiche che differenziano le particelle fondamentali della materia, e può essere considerata come un particolare "sapore" della materia, in quanto esistono sia particelle neutre, cioè prive di carica elettrica, che particelle cariche positivamente o negativamente, dotate cioè di "sapori" diversi.

Questo particolare attributo della materia è all'origine di tutti i fenomeni elettrici, magnetici ed elettromagnetici, ed è la sorgente dei rispettivi campi di forze.

Che significa campo? Per comprenderlo possiamo riferirci anzitutto ad un campo scalare.

Che cos'è un campo scalare ? Un semplice esempio può essere quello della dipendenza della temperatura o della pressione barometrica dalle coordinate geografiche della località considerata.

In entrambi i casi si tratta di grandezze fisiche di tipo scalare, cioè definibili attraverso un numero che ne esprime la misura rispetto ad una certa unità, e poichè la temperatura

o la pressione dipendono dal punto che si considera, si parla rispettivamente di campo termico e di campo barico.

Se invece consideriamo una grandezza fisica vettoriale, per esempio la forza di gravità che agisce su una massa posta sulla superficie terrestre al livello del mare, dobbiamo specificare come variano l'intensità e la direzione della forza peso al variare della latitudine e della longitudine del luogo: ai Poli il peso è maggiore che all'Equatore, perchè nel primo caso, annullandosi la distanza tra la massa e l'asse di rotazione della Terra, si annulla la forza centrifuga dovuta alla rotazione terrestre, che tende ad alleggerire il corpo, mentre nell'altro caso è massimo l'alleggerimento dovuto alla forza centrifuga, essendo massima la distanza tra la massa e l'asse di rotazione terrestre; di conseguenza il peso risulterà minore di quello misurato ai poli.

Ovviamente, nelle località comprese tra l'Equatore ed i Poli, la forza di gravità risulta compresa tra i due casi estremi precedenti; pertanto su tutta la superficie terrestre la forza peso che si misura al livello del mare si può rappresentare mediante un campo vettoriale.

## LA LEGGE DI COULOMB

La forza attrattiva o repulsiva tra due cariche elettriche puntiformi è descritta in fisica classica dalla legge di Coulomb, in base alla quale la forza, attrattiva se le cariche sono discordi e repulsiva se hanno lo stesso segno, è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza  $R$  che separa: per esempio, se due cariche elettriche puntiformi e discordi  $Q_1$  e  $Q_2$ , poste alla distanza di 1 cm l'una dall'altra, si attraggono con una forza di intensità  $F$ , altre due cariche  $Q_1'$  e  $Q_2'$ , 10 volte maggiori, saranno soggette ad una forza attrattiva  $F'$  100 volte maggiore di  $F$ .

Se invece, mantenendo costante il prodotto delle cariche, la distanza  $R$  che le separa diventa doppia o tripla, la forza attrattiva diventa rispettivamente un quarto ed un nono della forza  $F$ :

$F = (K Q_1 Q_2) / R^2$ , dove  $K$  è una costante di proporzionalità (costante di Coulomb).

La legge di Coulomb si basa, come quella di attrazione universale di Newton, sul classico principio dell'azione a distanza, in base al quale una carica elettrica posta in un mezzo qualsiasi (olio, aria, vuoto) attrae o respinge istantaneamente e direttamente un'altra carica senza

l'intervento di alcun supporto fisico che trasmetta la forza tra le due cariche.

Questo principio domina tutta la fisica prerelativistica, ed implica che si consideri istantanea l'azione della forza coulombiana, il che corrisponde ad assumere infinita la velocità con la quale si producono i suoi effetti.

Bisogna considerare che già prima dell'avvento (1905) della teoria della relatività di Albert Einstein, i fisici si resero conto che il modello dell'azione a distanza, istantanea e diretta, non era fisicamente accettabile, e cominciarono a pensare al campo elettrico come intermediario fisico di questa interazione: in base a questo modello una carica

elettrica in quiete genera nello spazio circostante un campo elettrico, ed un'altra carica non viene attratta o respinta istantaneamente, ma con un ritardo pari al rapporto tra la distanza  $R$  tra le cariche ed una velocità finita pari a quella della luce nel vuoto, che è pari a 300000 Km/sec.

L'altra carica subisce l'attrazione o la repulsione non direttamente dalla prima carica, ma esclusivamente attraverso il campo elettrico, che si comporta come un vero e proprio mezzo fisico che consente la propagazione dell'interazione, che pertanto non è più considerata "a distanza", ma risultante da tantissime azioni elementari contigue, definite in ogni punto dello spazio e dovute al campo elettrico generato dalla prima carica.

Ovviamente, ed in modo simmetrico, si può ribaltare il fenomeno considerando la forza attrattiva tra le cariche dovuta al campo elettrico generato dalla seconda carica e "sentito" dalla prima.

L'intensità del campo elettrico generato da una carica elettrica in un punto qualsiasi dello spazio si determina misurando la forza che agisce su una piccolissima carica elettrica positiva, utilizzata come carica di prova e posta nel punto che si considera, e dividendo l'intensità della forza per il numero che esprime in coulomb la misura della carica di prova.

Se, per esempio si desidera misurare l'intensità del campo elettrico generato da una carica di  $Q$  coulomb in tutti i punti distanti  $R$  metri dalla carica, che per semplicità si considera puntiforme, bisogna porre in uno qualsiasi di detti punti una carica di prova  $q$ , per esempio positiva, quanto più piccola possibile, per evitare che il campo elettrico prodotto da  $Q$  sia modificato sensibilmente dal campo elettrico prodotto da  $q$ , e misurare con un dinamometro sensibilissimo l'intensità della forza coulombiana (espressa in newton,  $N$ ) agente su  $q$ .

Per ottenere l'intensità del campo elettrico nei punti considerati basta dividere l'intensità della forza coulombiana per la grandezza (in coulomb) della carica di prova.

Pertanto l'intensità, la direzione ed il verso del campo elettrico a simmetria sferica generato dalla carica  $Q$  si ottengono dalla formula  $E = F / q = KQ/(R^2)$ .

Se, per esempio, in un punto alla distanza di 0,6 m da  $Q$  la forza  $F$  ha l'intensità di 15 mN (millesimi di newton) e la carica di prova  $q$ , positiva, ha il valore di 5 mC (5 millesimi di Coulomb), il campo elettrico ha l'intensità  $E = 15 \times 10^{-3} : 5 \times 10^{-3} = 3 \text{ N/C} = 3 \text{ V/m}$ , ed è un vettore diretto da  $Q$  verso  $q$  se  $Q$  è positiva (forza repulsiva), in verso opposto (forza attrattiva) se  $Q$  è negativa, ed ha la stessa intensità in tutti i punti di una sfera di 0,6 m di raggio avente il centro in  $Q$ .

L'espressione dell'intensità  $E$  del campo elettrico si ottiene facilmente, nel caso del campo elettrico generato da una carica puntiforme  $Q$ , in un punto distante  $R$  da essa:

$$E = F / q = (KQq/R^2) / q = KQ/R^2.$$

## **IL LAVORO DELLE FORZE ELETTRICHE**

Quando si considerano cariche elettriche che si spostano nel vuoto, nell'aria, in un metallo o in una soluzione acquosa di un acido, di una base o di un sale (una soluzione elettrolitica contenente ioni positivi e negativi), sotto l'azione di un campo elettrico

costante nel tempo, è più semplice considerare differenze di energia potenziale elettrostatica per calcolare variazioni di energia cinetica e quindi di velocità.

Si tratta di un problema analogo a quello di un corpo che si muove sul terreno subendo l'azione della forza di gravità: per esempio, se con un calcio imprimiamo ad una palla da football una certa velocità iniziale su un terreno in salita, a poco a poco la velocità andrà diminuendo sotto l'azione della forza di gravità, la cui componente lungo il piano inclinato è diretta in senso contrario alla velocità, finché la palla non si fermerà dopo aver percorso un tratto di lunghezza tanto maggiore quanto maggiore sarà stata la velocità inizialmente impressa.

La palla si fermerà quando la differenza di quota tra il punto di arresto ed il punto di lancio sarà tale che la corrispondente differenza di energia potenziale gravitazionale uguagli l'energia cinetica iniziale  $K = (1/2) m V^2$  impressa dal calciatore, dove  $m$  è la massa della palla.

Questo si verifica perché il campo gravitazionale, come quello elettrico, è un campo conservativo: cioè il lavoro fatto dalla forza di gravità su una massa in moto su un piano inclinato dipende soltanto dal dislivello tra il punto iniziale e quello finale, e si calcola moltiplicando la forza peso  $P$  in N (Newton) per la differenza di quota  $(H_2 - H_1)$  in metri.

Poiché la forza peso  $P$  si ottiene moltiplicando la massa  $m$  in kg per l'accelerazione di gravità  $g$  (circa  $9,8 \text{ m/s}^2$  al suolo ed a  $45^\circ$  di latitudine), che rappresenta il campo gravitazionale terrestre, il lavoro negativo  $L$  (in joule) fatto dalla forza di gravità, che decelera la palla, è dato dall'espressione:

$L = - P (H_2 - H_1) = - m g (H_2 - H_1) = m g H_1 - m g H_2$  dove l'espressione  $m g H$  è l'energia potenziale gravitazionale della massa  $m$  posta ad un' altezza  $H$  rispetto al suolo, ed  $L$  uguaglia la differenza tra l'energia potenziale gravitazionale iniziale e quella finale.

Se, per esempio si considera una sfera avente una massa di  $0,7 \text{ Kg}$ , e con un calcio le si imprime una velocità tale da farle raggiungere un'altezza  $H_2 = 1,5 \text{ m}$  in corrispondenza dell'istante di arresto, tenendo conto che alla base del piano inclinato  $H_1 = 0$ , il campo gravitazionale compie un lavoro, negativo in quanto si oppone al moto, dato da

$L = -0,7 \times 9,8 \times 1,5 = - 10,29 \text{ J}$  e pari, in valore assoluto, all'energia cinetica  $K = (1/2) m V^2$  impressa inizialmente alla sfera.

L'espressione  $g H$  è l'energia potenziale gravitazionale per unità di massa, cioè il cosiddetto potenziale gravitazionale  $U = g H$ , proporzionale alla quota  $H$ .

Pertanto il lavoro  $L$  si può anche calcolare moltiplicando la massa  $m$  per la differenza di potenziale gravitazionale

$$U_1 - U_2 = g (H_1 - H_2) ;$$

$$L = m (U_1 - U_2).$$

Analogamente, se consideriamo, per esempio, il campo elettrico costante  $E$  generato mediante una batteria di pile o di accumulatori i cui poli siano collegati ad un

condensatore, formato da due lamine metalliche parallele (armature), separate nell'aria da una distanza  $d$  piccola rispetto alle loro dimensioni, otteniamo un campo elettrico uniforme, avente cioè le linee di forza parallele e l'intensità costante in tutti i punti compresi tra le due lamine.

In questo caso particolare, analogo a quello del campo gravitazionale in prossimità della superficie terrestre, il potenziale elettrostatico in un punto alla distanza  $x$  dalla lamina collegata al polo negativo, cioè l'energia potenziale elettrostatica per unità di carica elettrica, si esprime con  $V = E x$ ; con questa convenzione si assume  $V_1 = 0$  sulla lamina negativa e  $V_2 = E d$  sulla lamina positiva.

Considerando che in questo caso la differenza di potenziale elettrostatico  $V_2 - V_1$  tra le lamine uguaglia la f.e.m. (forza elettromotrice in volt) della batteria, se impieghiamo una batteria con f.e.m. di 12 V e la distanza  $d$  tra le lamine (armature) del condensatore è pari a 1 mm = 0,001 m, l'intensità del campo elettrico uniforme tra le armature è  $E = (V_2 - V_1) / d = 12 : 0,001 = 12.000 \text{ V/m} = 12.000 \text{ N/C}$ , che corrisponde ad una forza di 12.000 N (newton) agente su un corpo dotato di una carica unitaria ( 1 coulomb).

Se, per esempio, si suppone di introdurre in questo campo elettrico uniforme, in prossimità dell'armatura collegata al polo negativo della batteria, una piccolissima sferetta di materiale isolante (con raggio molto minore di  $d$ ) dotata di una carica elettrica negativa  $q$  di 10 mC (0,01 C), essa si sposterà sotto l'azione di una forza  $F$  data dal prodotto di  $q$  per  $E$ , cioè  $F = E q = 12.000 \times 0,01 = 120 \text{ N}$ , dai punti a potenziale minore verso i punti a potenziale maggiore, ed il lavoro  $L$  compiuto dal campo elettrico sulla sferetta, sarà numericamente uguale all'aumento dell' energia cinetica  $K$  di essa nel tratto  $d$  tra le lamine, e si otterrà moltiplicando  $q = 0,01 \text{ C}$  per la differenza di potenziale  $V_1 - V_2 = 0 - 12 \text{ V} = - 12 \text{ V}$ :

$$L = q (V_1 - V_2) = -0,01 \times (0 - 12) = 0,12 \text{ J (joule)} =$$

$$= K_{\text{finale}} - K_{\text{iniziale}} .$$

Se la carica  $q$  fosse positiva e si trovasse inizialmente in corrispondenza della lamina positiva, si sposterebbe verso la lamina negativa, cioè dai punti a potenziale maggiore verso quelli a potenziale minore, ed il lavoro  $L$  sarebbe dato da:

$$L = q (V_1 - V_2) = 0,01 \times (12 - 0) = 0,12 \text{ J} = K_{\text{finale}} - K_{\text{iniziale}} .$$

Il valore del potenziale elettrostatico non è definito in modo univoco, perchè contiene sempre, come quello gravitazionale, una costante arbitraria che si elimina quando si considera la differenza di potenziale tra due punti, che è invece importantissima dal punto di vista fisico, in quanto ci consente, con considerazioni basate sul principio di conservazione dell' energia, di calcolare le variazioni dell'energia cinetica, e quindi della velocità di un corpo carico che si muova sotto l'azione delle forze elettriche dovute al campo.

La differenza fisica fondamentale tra il campo gravitazionale e quello elettrico consiste nel fatto che, mentre l'accelerazione  $a$  acquisita da un corpo carico sottoposto ad un campo elettrico, è inversamente proporzionale alla massa  $m$  del corpo, a parità di carica

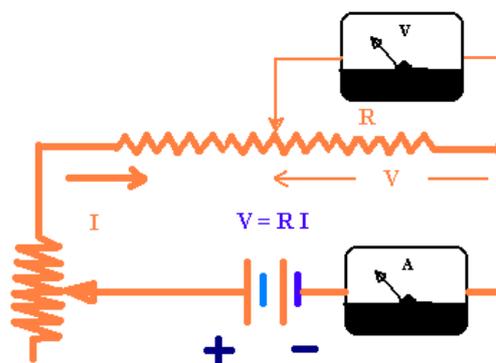
elettrica  $q$ , cioè  $a$  diventa un mezzo o un terzo, se la massa rispettivamente è doppia o tripla, nel caso del campo gravitazionale  $g$  invece, per il principio di Galileo, tutti i corpi, indipendentemente dalla loro massa, subiscono la stessa accelerazione, in quanto la forza peso  $P$  è direttamente proporzionale alla massa del corpo:  $P = m g$  ;  $a = P/m = m g / m = g$ .

Nella situazione sperimentale considerata in precedenza, del campo elettrico uniforme generato dalle armature di un condensatore piano, a mano a mano che un corpo con carica negativa si allontana dalla lamina negativa muovendosi verso la lamina positiva, la sua energia potenziale elettrostatica diminuisce, mentre la sua energia cinetica aumenta, e si mantiene costante, in ogni punto della traiettoria tra le armature, la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale elettrostatica.

Questo si verifica, in modo analogo, nel caso di un corpo che si muova nel campo gravitazionale terrestre passando da una quota ad un'altra, maggiore o minore, e rispettivamente perdendo energia cinetica ed acquistando energia potenziale gravitazionale, o viceversa, acquistando energia cinetica e perdendo energia potenziale gravitazionale.

Il fatto che la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale si mantenga costante durante il moto, sia nel caso di un corpo carico sottoposto ad un campo elettrico, sia nel caso di un corpo sottoposto ad un campo gravitazionale, esprime il principio di conservazione dell'energia meccanica totale, valido per ogni campo conservativo: si osserva cioè una continua conversione dell'energia di moto (energia cinetica) in energia di posizione (energia potenziale gravitazionale o energia potenziale elettrostatica):  $K_1 + qV_1 = K_2 + qV_2 = \text{costante}$ .

## LE LEGGI DI OHM E DI JOULE



Ohm scoprì la legge fondamentale dei circuiti elettrici per analogia con il fenomeno della propagazione del calore per conduzione.

Come il flusso di calore  $Q/t = KS(T_1-T_2)/L$  (calorie/secondo) che passa attraverso uno strato di materiale conduttore di lunghezza  $L$ , tra le cui sezioni estreme, di area  $S$ , esista una data differenza di temperatura  $T_1-T_2$  (con  $T_1>T_2$ ), è direttamente proporzionale al salto termico  $T_1-T_2$ , analogamente l'intensità di corrente  $I=Q/t$  (carica elettrica/unità di tempo) che passa attraverso un filo conduttore di lunghezza  $L$  e sezione  $S$ , è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale

$V_1-V_2$  applicata al conduttore:  $I=k S (V_1-V_2)/L$ , dove  $k$  è una costante (conduttività specifica), che dipende dal materiale conduttore.

Il verso convenzionale dell'intensità di corrente  $I$  è lo stesso del flusso termico, dai punti a potenziale maggiore ( $V_1$ ) ai punti a potenziale minore ( $V_2$ ).

In realtà, pur valendo tuttora tale convenzione, stabilita prima della scoperta dell'elettrone, oggi sappiamo che il verso effettivo dell'intensità di corrente in un conduttore coincide con il verso del moto degli elettroni, che, essendo dotati di carica elettrica negativa, si muovono dai punti a potenziale minore verso quelli a potenziale maggiore.

Riscrivendo la legge di Ohm nella forma

$V_1-V_2 = I [L/(Sk)] = I R$ , si evidenzia la costante di proporzionalità diretta  $R$  tra  $I$  e  $V_1$  e  $V_2$ , che è la resistenza elettrica del conduttore.

$R=L/(Sk)$  è a sua volta direttamente proporzionale alla lunghezza del conduttore ed inversamente proporzionale alla sua sezione.

Il passaggio della corrente elettrica in un conduttore implica un lavoro fatto dal campo elettrico che accelera le cariche che costituiscono la corrente.

Questo lavoro, a causa della resistenza  $R$ , si trasforma in calore per effetto Joule.

Infatti uno dei tanti metodi utilizzati per determinare sperimentalmente l'equivalente meccanico del calore (numero di joule corrispondenti ad una piccola caloria) o l'equivalente termico del lavoro (numero di piccole calorie corrispondenti ad un joule) consiste nel misurare con un voltmetro, un amperometro ed un cronometro l'energia elettrica

$W = V I t = R I t = V^2 t/R$  (effetto Joule) che si converte in calore in un resistore  $R$  nel tempo  $t$ , e contemporaneamente nel misurare con un calorimetro, attraverso l'incremento di temperatura  $(T_2-T_1)$  subito nel tempo  $t$  da una data massa  $M$  di liquido calorimetrico (acqua o olio minerale) con calore specifico  $c$  [calorie/(grammo °C)], la quantità di calore  $Q = M c (T_2-T_1)$  sviluppata dal resistore per effetto Joule.

Il rapporto tra le due misure fornisce il rapporto di equivalenza tra joule e calorie : 4,18 Joule/caloria (0,24 calorie/joule).

## **I CAMPI MAGNETICI**

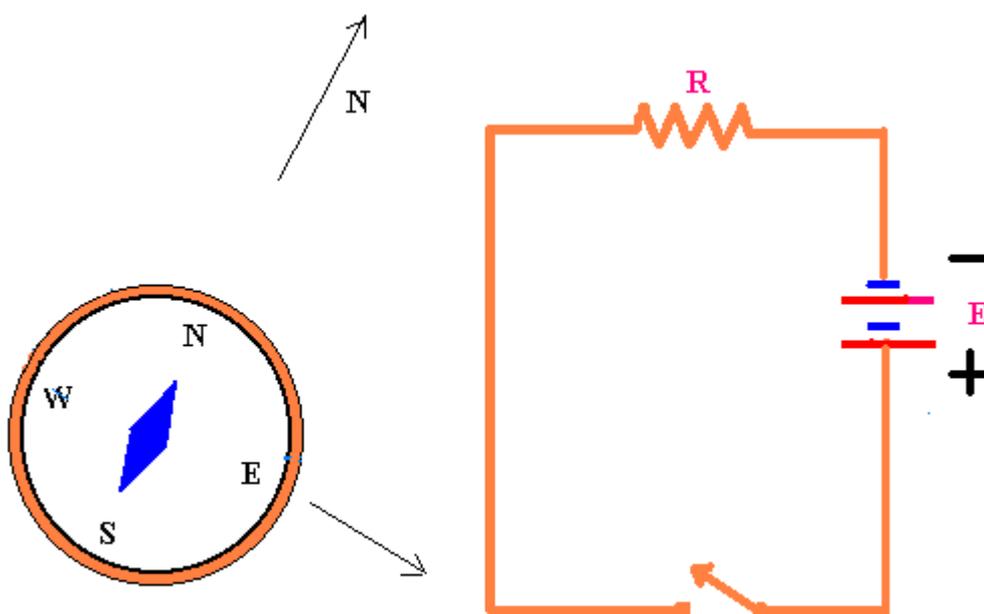
Già nell'antica Grecia (VI secolo a. C.) si conosceva la proprietà della magnetite (pietra di Magnesia), che è un minerale di ferro (ossido di ferroso-ferrico), di attrarre la limatura di ferro comportandosi da calamita (o magnete) naturale.

Un ago magnetico è una sottilissima barretta di acciaio che è stata magnetizzata avvicinandole un pezzo di magnetite, ed è imperniata in modo tale da potere ruotare senza attrito in un piano orizzontale, fino a raggiungere, dopo una serie di oscillazioni, la posizione di equilibrio coincidente con la direzione ed il verso del campo magnetico terrestre.

Tenendo presente che la Terra si comporta come un magnete il cui asse forma con l'asse terrestre un angolo intorno a  $11^\circ$  ed attraversa la superficie terrestre in due punti, i poli magnetici Nord e Sud, vicini ai rispettivi poli geografici, per convenzione si denomina polo Nord dell' ago quello rivolto verso il polo Nord magnetico nella posizione di equilibrio, mentre il polo Sud dell'ago è quello rivolto al polo Sud magnetico.

La bussola, la cui invenzione viene fatta risalire addirittura ai Cinesi, e che fu introdotta nel mondo occidentale intorno al XII secolo fornisce un chiaro esempio dell' azione del campo magnetico terrestre su un ago magnetico.

Un ago magnetico è inoltre un sensibilissimo rivelatore di campi magnetici: ricordiamo in proposito le celebri esperienze del fisico danese Oersted,



che nel 1820 scoprì che un circuito percorso dalla corrente elettrica continua generata da una batteria di pile, posto in prossimità di un ago magnetico, lo fa deviare dalla sua posizione di equilibrio nel campo magnetico terrestre.

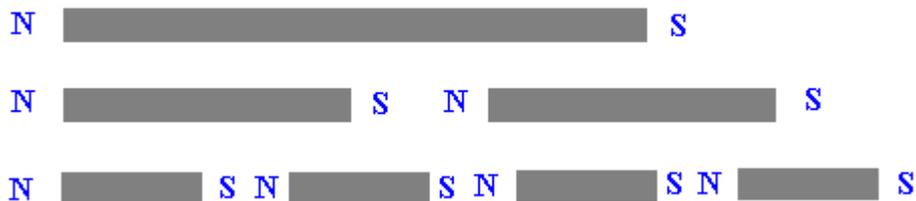
Poichè lo stesso effetto si osserva se all'ago magnetico viene avvicinata una calamita, si deduce che un circuito elettrico genera nello spazio circostante un campo magnetico, ed è pertanto equivalente ad un magnete, come fu dimostrato dal fisico francese Ampere (teorema di equivalenza), poco tempo dopo la scoperta di Oersted.

Per visualizzare un campo magnetico basta della limatura di ferro:

se una calamita viene posta sotto un foglio di cartoncino sul quale sia stata distribuita della limatura di ferro, questa si dispone secondo tante linee curve chiuse, le cosiddette linee di forza del campo magnetico, che si addensano in corrispondenza delle estremità della calamita (poli); si ottiene così uno spettro magnetico, che visualizza l'andamento del campo magnetico nello spazio circostante la calamita.

In modo analogo possono essere visualizzate le linee di forza magnetiche associate ad un circuito elettrico qualsiasi: un circuito rettilineo, una spira conduttrice oppure un avvolgimento ad elica (detto solenoide o bobina) composto da tante spire collegate in serie e percorse dalla stessa corrente.

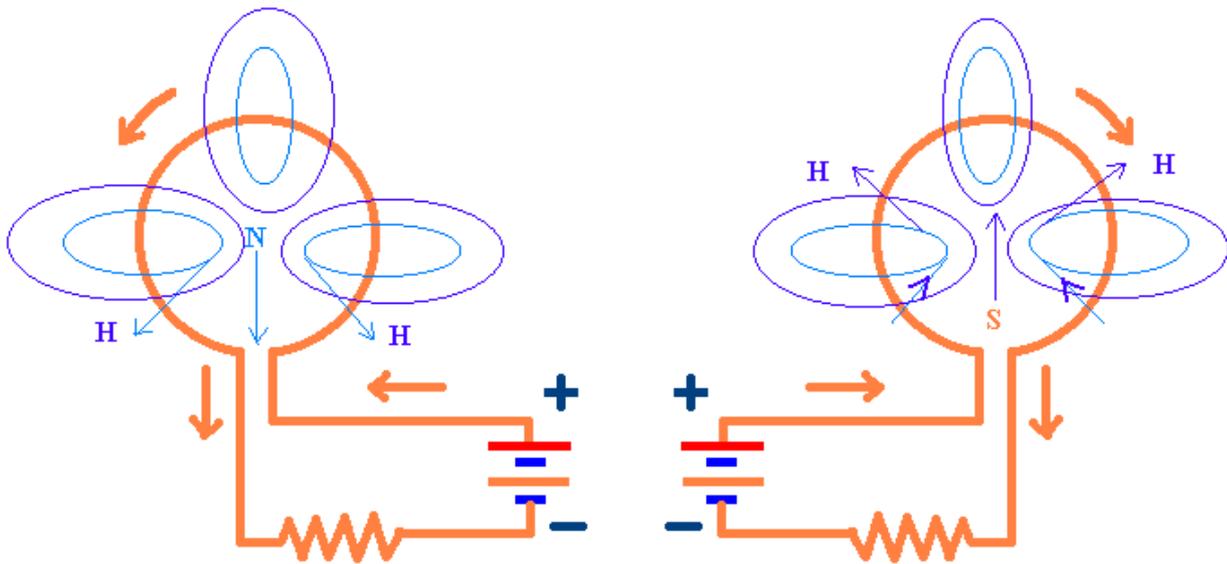
La differenza fondamentale tra le linee di forza del campo magnetico e quelle del campo elettrico consiste nel fatto che le linee di forza magnetiche sono sempre chiuse, non hanno cioè né inizio né fine, come dimostra la classica esperienza della calamita spezzata.



Spezzando in più parti una calamita è impossibile separare il polo Nord da quello Sud, il che dimostra che, a differenza di quanto si verifica con le cariche elettriche, non esistono poli magnetici isolati.

Nel caso del campo elettrico, invece, le linee di forza del campo generato da una carica puntiforme sono, per convenzione, uscenti radialmente dalla carica, se essa è positiva, convergenti nella carica, se essa è negativa.

In pratica lo spettro magnetico relativo a ciascuno dei suddetti circuiti si può ottenere disponendo della limatura di ferro su un cartoncino attraversato dal conduttore o dalle spire conduttrici.



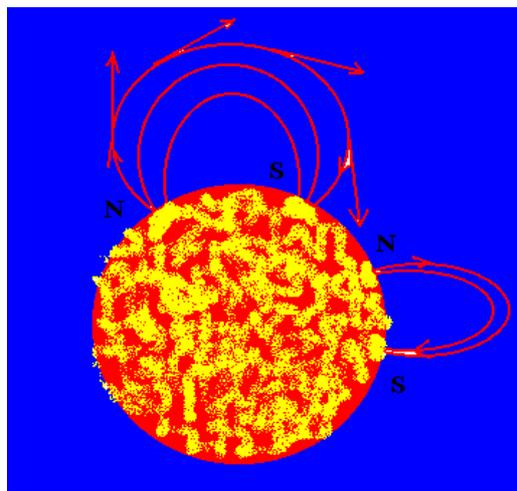
In particolare, l'intensità  $H$  del campo magnetico generato dalla corrente elettrica che passa in un filo rettilineo molto lungo rispetto alla distanza tra di esso ed il punto in cui si misura il campo magnetico, è direttamente proporzionale all'intensità di corrente  $I$  (in ampere) ed inversamente proporzionale alla distanza  $d$  (in metri) del punto dal filo:  $H = k I / d$  (legge di Biot e Savart), (in amperspire per metro, Asp/m) dove  $k = 0,1592$  amperspire/ampere è una costante di proporzionalità che dipende dalle unità di misura adottate nel sistema internazionale delle unità di misura; in questo caso le linee di forza del campo magnetico sono delle circonferenze concentriche giacenti in piani perpendicolari al filo e centrate su di esso.

Nel caso di una spira circolare di raggio  $R$  (in metri), il campo magnetico al centro della spira è diretto perpendicolarmente al piano di essa, e la sua intensità  $H$  (in Asp/m) è direttamente proporzionale all'intensità di corrente  $I$  (in ampere) ed inversamente proporzionale al raggio  $R$  ( $K = 0,5$  amperspire/ampere):  $H = K I / R$ .

Nel caso di un solenoide rettilineo composto da  $N$  spire di raggio molto minore della lunghezza  $L$  percorse da una corrente di intensità  $I$ , il campo magnetico è diretto lungo l'asse del solenoide e la sua intensità  $H$  (in Asp/m) è data da:  $H = N I / L$ .

Il campo magnetico generato dal solenoide è uniforme, ha cioè lo stesso valore all'interno di esso, e le sue linee di forza sono parallele all'asse di simmetria.

## **LA LEGGE DI AMPERE (TEOREMA DELLA CIRCUITAZIONE MAGNETICA)**



Le formule riportate derivano dall'applicazione della legge di Ampere, nota anche come teorema della circuitazione del campo magnetico, che afferma che un circuito elettrico genera un campo magnetico le cui linee di forza sono percorsi chiusi, tali che, se si calcola la somma di tanti prodotti elementari infinitesimi, del tipo  $H_i \times d\mathbf{l}_i$ , dove  $d\mathbf{l}_i$  è uno spostamento infinitesimo tangente alla linea di forza e  $H_i$  è il relativo valore dell'intensità del campo magnetico, facendo tendere all'infinito il numero di tali prodotti, si trova un valore (integrale di linea o circuitazione) pari all'intensità di corrente  $I$  che passa nel circuito.

Se, in casi particolari, le linee di forza magnetiche evidenziano una simmetria rispetto al circuito, come avviene nel caso molto semplice del filo rettilineo che genera il campo magnetico  $H = K I / R$ , le cui linee di forza sono circonferenze concentriche di raggio  $R$ , si ottiene:

$$H \times 2\pi R = I ; \quad H = I / (2\pi R) = 0,1592 \times I / R.$$

Tutti i campi magnetici, sia macroscopici, cioè generati da circuiti elettrici e magneti permanenti (calamite), sia microscopici, cioè generati dai moti orbitali degli elettroni negli atomi e dal momento angolare intrinseco delle particelle subatomiche (spin), sono sempre generati da cariche elettriche in moto rispetto all'osservatore che rileva sperimentalmente la presenza del campo, e quindi da correnti elettriche macroscopiche o microscopiche.

L'ipotesi che anche il campo generato dai magneti permanenti sia dovuto a correnti microscopiche, formulata da Ampere, ha trovato brillante conferma dopo la scoperta dello spin dell'elettrone e dell'associato momento magnetico elementare (magnetone di Bohr).

### **Esempi**

1) il pennello elettronico che produce l'immagine sullo schermo del cinescopio di un

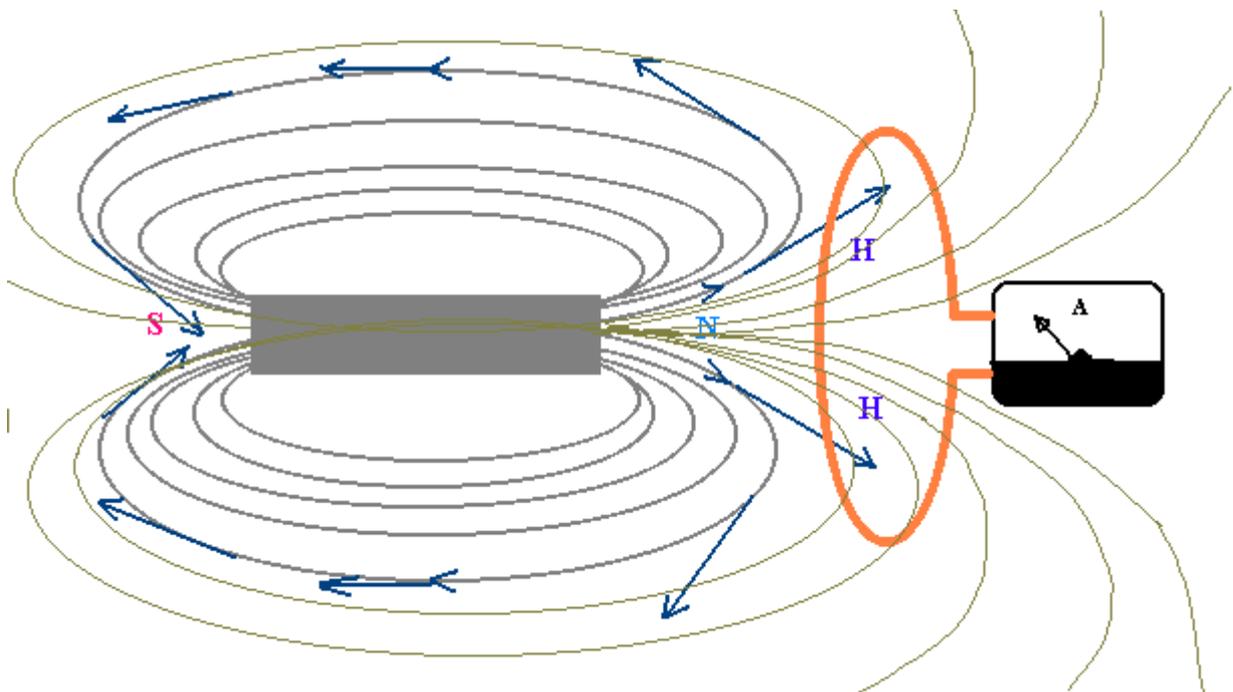
televisore o di un monitor, genera un campo magnetico analogo a quello generato da un filo rettilineo percorso dalla corrente;

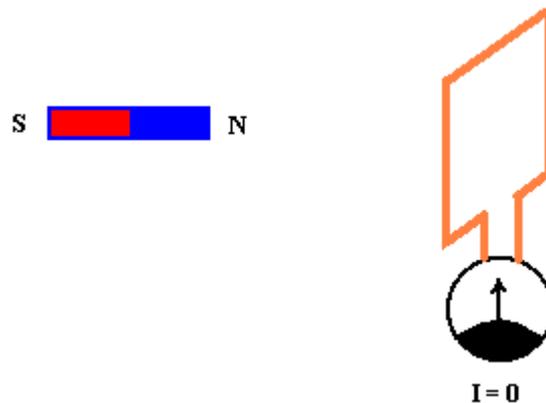
2) Un fascio di particelle cariche (elettroni, mesoni, protoni, ioni) che ruotano a velocità prossime a quelle della luce in un sincrotrone (acceleratore circolare di particelle elementari) genera un campo magnetico analogo a quello generato da una spira coincidente con la traiettoria circolare imposta alle particelle dal potente campo magnetico che agisce perpendicolarmente al fascio.

### **LA LEGGE DI FARADAY-NEUMANN (LEGGE DI INDUZIONE ELETTROMAGNETICA)**

Nel 1831 Michel Faraday scoprì che un circuito elettrico di qualsiasi tipo, anche non comprendente generatori elettrici (dinamo, alternatori, alimentatori, batterie di pile o di accumulatori), ma soltanto componenti passivi (resistori, solenoidi e condensatori, che assorbono energia elettrica), diventa sede di una forza elettromotrice indotta ogni qualvolta esso venga attraversato dalle linee di forza di un campo magnetico variabile.

In sostanza questa legge afferma che facendo variare in funzione del tempo il flusso magnetico concatenato ad un circuito elettrico, cioè il numero delle linee di forza del campo magnetico che attraversano il circuito, si genera nel circuito una tensione elettrica indotta di origine elettromagnetica, come se fosse inserito nel circuito uno speciale generatore elettrico la cui forza elettromotrice sia direttamente proporzionale alla variazione del numero delle linee di forza magnetiche per unità di tempo.





La variazione temporale del flusso magnetico concatenato al circuito si può verificare con diverse modalità:

1) spostando un magnete permanente (calamita), un elettromagnete (elettrocalamita) o un altro circuito elettrico (inducente) percorso da corrente rispetto al circuito elettrico indotto.

In questo caso si dice che le linee di forza magnetiche vengono "tagliate" dal circuito;

2) mantenendo fermi il magnete permanente, l'elettromagnete o il circuito elettrico inducente rispetto al circuito elettrico indotto e facendo variare il contorno di quest'ultimo, in modo tale da determinare una variazione della superficie attraversata dalle linee di forza magnetiche; 3) mantenendo fermi il magnete permanente, l'elettromagnete o il circuito elettrico inducente rispetto al circuito elettrico indotto ed avvicinando o allontanando dal circuito indotto pezzi di materiali ferromagnetici (ferro, acciaio, cobalto, nichel, materiali ferritici, leghe ferromagnetiche (Al-Ni-Co)), cioè materiali con elevata permeabilità magnetica, capaci di intensificare, magnetizzandosi, il campo magnetico esistente;

4) facendo variare, mediante un resistore variabile (reostato) o in qualsiasi altro modo, l'intensità di corrente nell'elettromagnete o nel circuito elettrico inducente, mantenuti fermi rispetto al circuito elettrico indotto;

5) Aprendo o chiudendo il circuito dell'elettromagnete o il circuito elettrico inducente.

Analizzando i dati sperimentali relativi a fenomeni fisici apparentemente molto diversi, Neumann espresse la legge d'induzione elettromagnetica con la formula :

$E = - \Delta\Phi/\Delta t$  , dove E è la forza elettromotrice indotta (f.e.m.) ,  $\Delta\Phi$  è la variazione del flusso magnetico concatenato al circuito elettrico indotto e  $\Delta t$  è la durata della variazione.

Quanto più rapida è la variazione del flusso magnetico, tanto maggiore è la forza elettromotrice indotta.

Così si spiegano tutti i fenomeni osservati, indipendentemente dalle modalità con cui ha luogo la variazione del flusso magnetico.

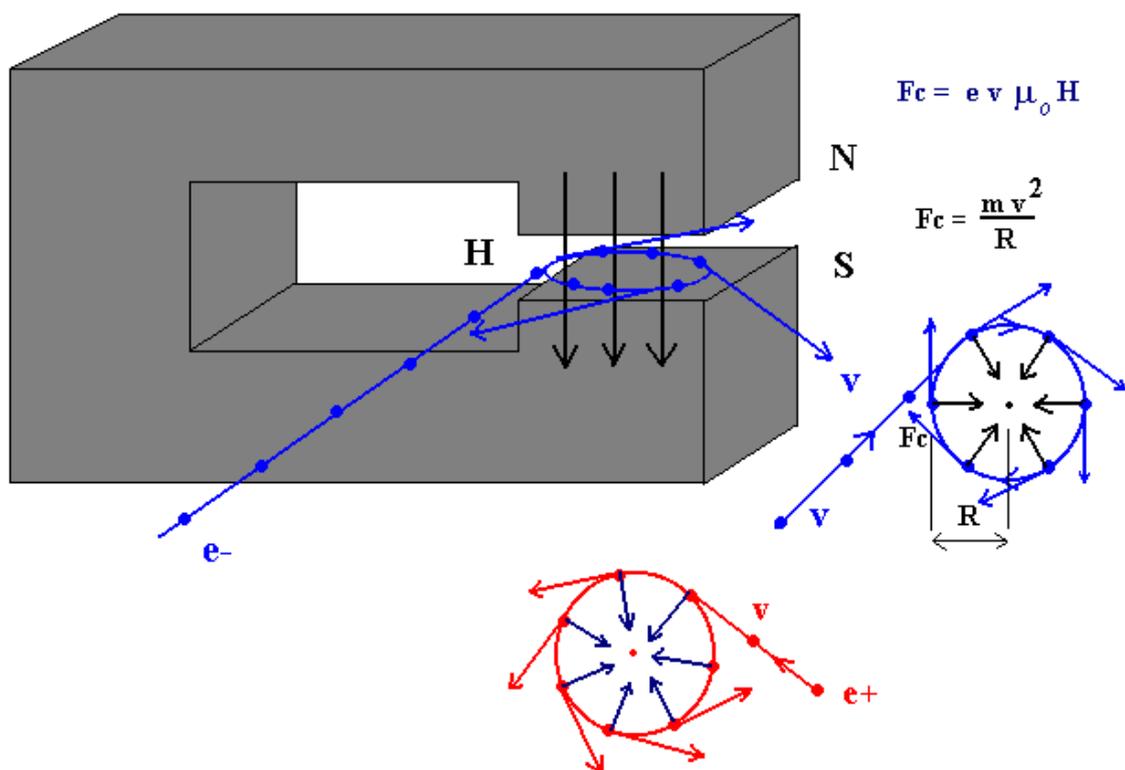
Se il circuito indotto è aperto, agli estremi di esso, finché il flusso magnetico varia in funzione del tempo, si può misurare il valore della f.e.m. indotta, mentre è nulla l'intensità della corrente indotta, essendo il circuito interrotto.

Se invece il circuito indotto è chiuso, si genera in esso una corrente indotta  $I = E/R$ , che si ottiene applicando la legge di Ohm, cioè dividendo il valore della f.e.m. indotta  $E$  per la resistenza ohmica  $R$  del circuito.

Il segno meno fu introdotto da Lenz per esprimere il fatto sperimentale che la corrente indotta ha sempre verso tale da opporsi alla causa che l'ha generata.

Per esempio, se la corrente indotta è causata dall'avvicinamento di un magnete o di un circuito inducente al circuito indotto, la corrente indotta circola in un verso tale da generare un campo magnetico con polarità Nord-Sud tali da tendere ad respingere il magnete o il circuito inducente.

### **FORZE ELETTROMAGNETICHE (DI LORENTZ) SU CARICHE ELETTRICHE IN MOTO IN CAMPI MAGNETICI**



Quando una carica elettrica si muove con velocità  $v$  in un campo magnetico di intensità  $H$ , è soggetta ad una forza (di Lorentz) perpendicolare al piano individuato dalle linee di forza del campo magnetico e dalla linea di moto (direzione istantanea della velocità),

con un'intensità data dalla formula:  $F = k q v H$ , dove  $k$  è una costante di proporzionalità che dipende dal materiale in cui si muove la carica e dal sistema di unità di misura utilizzato (nel sistema internazionale M.K.S.A. e nel vuoto (in pratica anche nell'aria),  $k$  coincide con la cosiddetta permeabilità magnetica del vuoto  $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$  Henry/metro).

La forza di Lorentz agisce sia sugli elettroni in moto nei circuiti elettrici (gli elettroni che costituiscono la corrente elettrica) sia su qualsiasi particella carica in moto nell'aria o nello spazio vuoto.

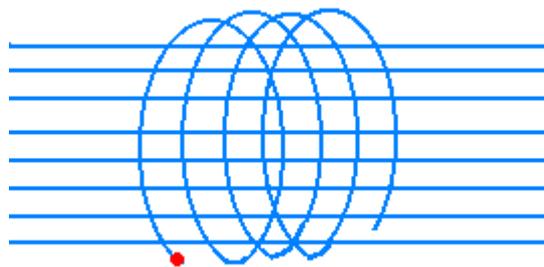
Se una particella carica si muove con una velocità perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico, la forza di Lorentz costituisce la forza centripeta che fa deviare continuamente la particella dalla linea istantanea di moto, in modo tale che la traiettoria sia una circonferenza giacente in un piano perpendicolare alle linee di forza del campo magnetico.

Se, in generale, una particella carica si muove con una velocità in direzione obliqua rispetto alle linee di forza del campo magnetico, la componente della velocità in direzione perpendicolare al campo magnetico determina l'intensità della forza di Lorentz, mentre la componente della velocità nella direzione del campo magnetico, fa traslare con velocità costante il piano della traiettoria circolare.

Pertanto, per il principio galileiano della composizione dei moti, la particella carica descrive un moto elicoidale (a spirale) avente per asse la direzione del campo magnetico.

### ***Alcuni esempi***

Il flusso delle particelle del vento solare (protoni ed elettroni di alta energia) interagisce con il campo magnetico terrestre, che, per effetto della forza di Lorentz, le costringe a descrivere traiettorie a spirale lungo le linee di forza dirette dal polo magnetico Nord al polo magnetico Sud.



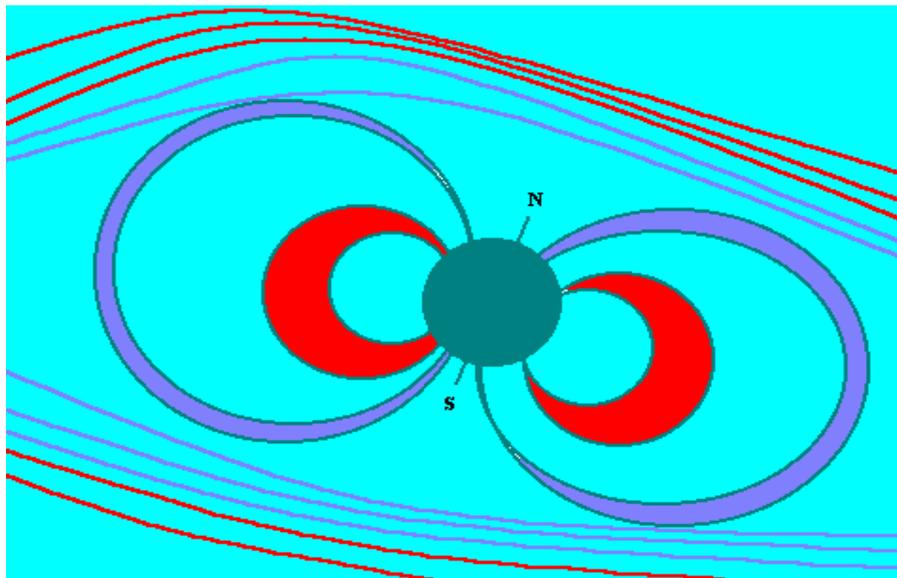
Pertanto elettroni e protoni vengono intrappolati dal campo magnetico terrestre dando origine alle due fasce radioattive di Van Allen, rilevate nel 1958 dai primi satelliti artificiali statunitensi (serie Explorer).

In tal modo si costituisce uno schermo biologico naturale che attenua fortemente il flusso delle particelle ionizzanti solari che investono la superficie terrestre.

L'interazione delle particelle del vento solare con il campo magnetico terrestre è responsabile delle aurore polari che si osservano in coincidenza con notevoli aumenti periodici dell'attività solare (macchie solari e tempeste magnetiche).

Negli acceleratori circolari di particelle elementari (ciclotroni, elettrosincrotroni, protosincrotroni ed anelli di accumulazione), la forza di Lorentz generata dall'interazione delle particelle cariche con intensi campi magnetici, determina il raggio  $R$  della traiettoria circolare e quindi le dimensioni dell'acceleratore in funzione della massa  $M$  e della carica  $q$  delle particelle e dell'intensità  $H$  del campo magnetico:

(forza centripeta =  $MV^2/R$ ) = (forza di Lorentz =  $k qVH$ );



$R = MV/(kqH)$ , dove  $k$  è la costante di proporzionalità della legge di Lorentz.

Pertanto sono necessari campi magnetici intensissimi, generati da magneti superconduttori mantenuti a bassissima temperatura (qualche decina di gradi Kelvin) per ridurre le dimensioni ed il costo degli acceleratori, compatibilmente con le altissime energie (1000 Gev) da ottenere.

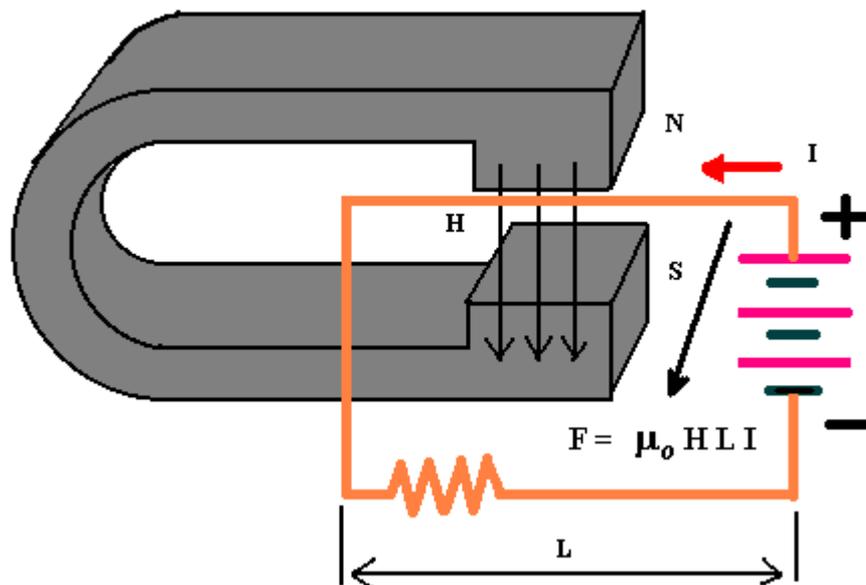
Gli acceleratori circolari in funzione al CERN di Ginevra ed al FERMILAB di Chicago hanno circonferenze di alcune decine di km.

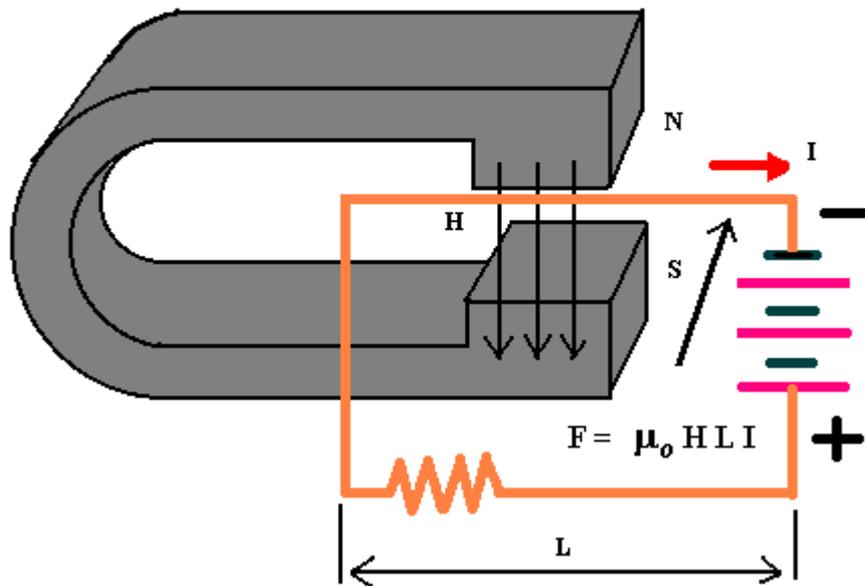
### **FORZE ELETTROMAGNETICHE SU CIRCUITI ELETTRICI SOGGETTI A CAMPI MAGNETICI**

La forza di Lorentz che agisce sugli elettroni che costituiscono la corrente elettrica in un conduttore, determina la forza macroscopica che agisce sul conduttore quando esso è immerso in un campo magnetico di intensità  $H$ .

La forza magnetica  $F = k I L H$  è diretta perpendicolarmente al piano individuato dal filo e dalla direzione del campo magnetico ed ha intensità proporzionale all'intensità di corrente  $I$ , alla lunghezza  $L$  del conduttore ed all'intensità  $H$  del campo magnetico (  $k$  è la costante di proporzionalità della formula di Lorentz).

La trasformazione dell'energia elettrica in energia meccanica in un motore elettrico è possibile grazie al fatto che le forze elettromagnetiche che agiscono sui conduttori dell'avvolgimento del rotore per effetto del campo magnetico generato dallo statore, generano altrettante coppie di forze la cui risultante costituisce la coppia motrice sviluppata dalla macchina elettrica.





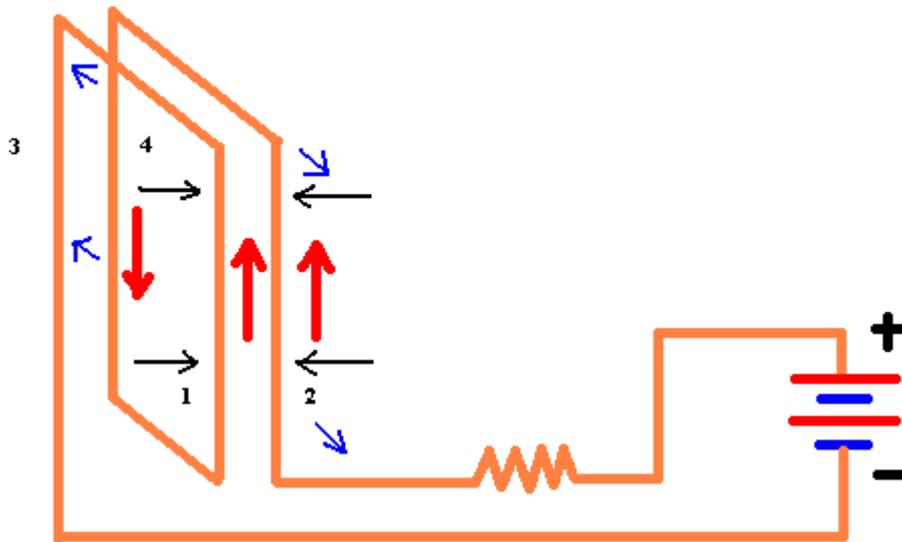
## **FORZE ELETTROMAGNETICHE (ELETTRODINAMICHE) TRA CIRCUITI ELETTRICI**

Anche le forze elettrodinamiche macroscopiche che agiscono tra i conduttori di un circuito elettrico (per esempio tra le spire degli avvolgimenti di elettromagnete, di un motore elettrico, di una dinamo, di un alternatore o di un trasformatore) sono dovute, a livello microscopico, alla forza di Lorentz agente sugli elettroni di conduzione.

Tali forze, che si possono sempre ridurre ad una forza risultante e ad una coppia risultante, sono descritte dalle leggi di Ampere.

Nel caso particolarmente semplice di due conduttori rettilinei e paralleli, di lunghezza  $L$ , percorsi dalle correnti di intensità  $I_1$  e  $I_2$ , posti nel vuoto (in pratica, anche nell'aria) alla distanza  $d$  l'uno dall'altro, la forza elettrodinamica è direttamente proporzionale al prodotto delle intensità di corrente  $I_1$  e  $I_2$  ed alla lunghezza  $L$ , ed inversamente proporzionale alla distanza  $d$ :

$F = k I_1 I_2 L / (2\pi d)$ , dove  $k$  è la costante di proporzionalità della legge di Lorentz.



Se, in particolare, i due conduttori sono percorsi dalla stessa corrente (spire di un avvolgimento), la forza elettrodinamica dipende dal quadrato dell'intensità di corrente).

### **L'ELETTROMAGNETISMO DI MAXWELL**

La legge di Ampere fu generalizzata da Maxwell, il quale, esclusivamente con elaborazioni fisico-matematiche, dedusse che un campo magnetico variabile può essere generato, oltre che da una corrente che fluisce in un circuito elettrico, anche da un campo elettrico variabile presente nello spazio vuoto, privo di cariche elettriche e di circuiti elettrici.

Per analogia con il campo magnetico generato da cariche in moto nel vuoto e da circuiti elettrici, Maxwell introdusse le cosiddette "correnti di spostamento" nei dielettrici (isolanti), associate a campi elettrici variabili nel tempo.

Pertanto, come esistono linee di forza magnetiche concatenate ad un circuito elettrico, così esistono anche linee di forza magnetiche concatenate ad un campo elettrico variabile.

Maxwell, sulla base dei principi fondamentali che governano i fenomeni elettrici e magnetici (legge di Coulomb, legge di Ampere e legge di Faraday-Neumann), riuscì ad elaborare la sua teoria dei fenomeni elettromagnetici, fornendo una geniale ed elegante trattazione unitaria dei fenomeni elettrici e magnetici, attraverso quattro equazioni fondamentali (equazioni di Maxwell), espresse sia in forma differenziale, cioè riferite a zone spaziali infinitesime interessate dai fenomeni elettromagnetici, sia in forma integrale, più comprensibile e più adatta alla descrizione dei fenomeni elettromagnetici osservabili in laboratorio.

La prima equazione, equivalente al teorema di Gauss, è ricavabile partendo dalla legge

di Coulomb, ed esprime che il flusso del campo elettrico (numero delle linee di forza del campo elettrico) uscente da una superficie chiusa contenente una o più cariche elettriche, è direttamente proporzionale alla somma algebrica di tutte le cariche elettriche positive e negative, in quiete, poste in determinati punti dello spazio racchiuso dalla superficie considerata.

Per esempio, se si considerano, in particolare, una sfera o una superficie cilindrica contenenti cariche elettriche, è possibile, attraverso la prima equazione di Maxwell, calcolare l'intensità del campo elettrostatico generato dalle cariche, sia all'interno che all'esterno della superficie considerata.

La seconda equazione si riferisce alla proprietà caratteristica del campo magnetico, le cui linee di forza sono sempre chiuse, in quanto non esistono poli magnetici isolati.

Pertanto, se si considera una superficie chiusa all'interno della quale siano posti dei magneti o dei circuiti elettrici, il numero delle linee di forza magnetiche uscenti è sempre uguale al numero di quelle entranti, poiché le linee di forza che hanno origine all'interno della superficie rientrano sempre nella superficie terminando negli stessi punti in cui hanno origine.

La terza equazione corrisponde alla legge d'induzione elettromagnetica (di Faraday-Neumann), che implica sempre l'esistenza di un campo elettrico variabile lungo un percorso chiuso qualsiasi (circuiti elettrici o linee chiuse tracciate nello spazio vuoto) attraversato dalle linee di forza di un campo magnetico variabile in funzione del tempo.

La quarta equazione corrisponde alla generalizzazione della legge di Ampere per il campo magnetico generato sia da cariche elettriche in moto nel vuoto, nei liquidi, nei gas e nei conduttori (correnti elettriche) che da "correnti di spostamento", cioè da campi elettrici variabili nel tempo.

Pertanto esiste sempre un campo magnetico lungo un percorso chiuso (nella materia o nello spazio vuoto) che sia attraversato da cariche elettriche in moto (correnti elettriche) o dalle linee di forza di un campo elettrico variabile nel tempo.

Il risultato più importante della teoria elettromagnetica di Maxwell consiste nel fatto che le quattro equazioni del campo elettromagnetico implicano l'esistenza di onde elettromagnetiche che si propagano nello spazio vuoto con una velocità pari a quella della luce (300000 Km/s), trasportando energia e quantità di moto di natura elettromagnetica.

Da questo risultato Maxwell fu indotto ad enunciare la natura elettromagnetica di tutti i fenomeni luminosi (teoria elettromagnetica della luce).

La sua intuizione fu brillantemente confermata verso la fine del XIX secolo dai brillanti esperimenti di Hertz sulle onde elettromagnetiche (onde hertziane).

Hertz riuscì a produrre con le onde elettromagnetiche fenomeni di riflessione, rifrazione, interferenza, diffrazione e polarizzazione analoghi a quelli che si producono con le onde luminose.

## ***I CAMPI ELETTROMAGNETICI E LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE***

Come la massa è la sorgente del campo gravitazionale, così la carica elettrica è la sorgente del campo elettromagnetico.

Come una massa modifica la struttura dello spazio-tempo, generando un campo gravitazionale, così una qualsiasi carica elettrica ferma o in moto nel sistema di riferimento dell'osservatore, modifica la struttura dello spazio-tempo, generando un campo elettromagnetico, costituito dall'intima unione, stabilita dalle equazioni di Maxwell, di un campo elettrico e di un campo magnetico.

Consideriamo alcuni casi particolari:

### **1) Campo elettrico stazionario (campo elettrostatico)**

Se uno o più corpi carichi di elettricità sono in quiete rispetto al sistema di riferimento, l'osservatore, misurando con uno speciale dinamometro le forze elettriche che agiscono su piccoli corpi carichi (cariche di prova), rileva un campo elettrostatico, cioè un campo elettrico stazionario, caratterizzato da intensità e verso indipendenti dal tempo.

### **2) Campo magnetico stazionario (campo magnetostatico)**

Se uno o più corpi carichi di elettricità si muovono in linea retta con velocità costante, l'osservatore, servendosi di un piccolo ago magnetico o di un magnetometro, rileva un campo magnetostatico (campo magnetico stazionario, caratterizzato da intensità e verso indipendenti dal tempo).

### **3) Campo elettromagnetico non stazionario (campo elettrico non stazionario + campo magnetico non stazionario)**

Se infine uno o più corpi carichi di elettricità si muovono di moto accelerato nel sistema di riferimento dell'osservatore, questi, adoperando un misuratore di campo, può rilevare l'intensità del campo elettromagnetico generato dal moto accelerato dei corpi carichi.

Il campo elettromagnetico è costituito da un campo elettrico e da un campo magnetico, entrambi variabili nel tempo e perpendicolari tra loro, che si propagano nello spazio con la velocità della luce trasportando energia elettromagnetica.

Pertanto, considerare un campo elettromagnetico come campo esclusivamente elettrico (elettrostatico), esclusivamente magnetico (magnetostatico) o elettromagnetico non stazionario, dipende unicamente dal moto dei corpi carichi rispetto al sistema di riferimento dell'osservatore.

### ***Due esempi:***

#### **I esperimento concettuale**

Se due auto potessero muoversi su un rettilineo, mantenendo costantemente, istante per istante, la stessa velocità e la stessa accelerazione, ciascun guidatore, dopo aver caricato di elettricità statica la carrozzeria ed avere posto all'esterno dell'auto la sonda del proprio strumento di misura, rileverebbe il campo esclusivamente elettrostatico generato dall'altra auto, poichè in tali condizioni di moto, risulterebbero nulle l'accelerazione e la

velocità relative di un'auto rispetto all'altra.

Ciascun guidatore rileverebbe infatti, nel proprio sistema di riferimento, la carica elettrica in quiete dovuta all'altra auto, con il relativo campo elettrostatico.

Ovviamente, un osservatore fermo sul ciglio della strada, rileverebbe un campo elettromagnetico risultante dalla somma vettoriale dei campi elettromagnetici generati dalle due auto, le quali irradierebbero nello spazio circostante, a spese della propria energia cinetica, energia e quantità di moto elettromagnetiche sotto forma di onde in una banda di frequenze e lunghezze d'onda dipendente dal moto delle cariche.

Le onde elettromagnetiche sono costituite da onde del campo elettrico e del campo magnetico oscillanti in piani perpendicolari (piani di polarizzazione), che passano per le rette (di propagazione) congiungenti la posizione istantanea della carica in moto con il punto di osservazione.

Larmor dimostrò, partendo dalle equazioni di Maxwell, che la potenza irradiata da una carica elettrica mobile con accelerazione  $a$ , è direttamente proporzionale al quadrato dell'accelerazione (formula di Larmor).

Un importante esempio applicativo della formula di Larmor si ottiene considerando l'energia elettromagnetica irradiata sotto forma di raggi X dall'impatto degli elettroni sullo schermo di un tubo a raggi catodici (es.: cinescopio di un monitor o di un televisore).

Gli elettroni, dopo essere stati accelerati da differenze di potenziale molto elevate, fino a qualche decina di kV, fino ad acquisire velocità intorno al 40% della velocità della luce, nell'impatto contro lo schermo fluorescente, vengono energicamente decelerati, emettendo gran parte della loro energia sotto forma di raggi X, tanto più penetranti quanto maggiore è la tensione acceleratrice.

I raggi X vengono in gran parte assorbiti dal materiale che costituisce lo schermo, mentre il resto dell'energia cinetica acquisita dagli elettroni serve ad eccitare gli atomi della sostanza che emette luce, generando l'immagine.

L'intensità di un'onda elettromagnetica è direttamente proporzionale al quadrato dell'intensità del campo elettrico (o al quadrato dell'intensità del campo magnetico, che a sua volta è proporzionale a quella del campo elettrico), si misura in  $W/m^2$ , ed è dovuta alla somma delle potenze specifiche (per unità di superficie) associate al campo elettrico ed al campo magnetico.

Nel caso delle onde elettromagnetiche piane, alle quali sono assimilabili le onde elettromagnetiche a simmetria sferica, a grande distanza dalla sorgente), l'intensità si può determinare con un misuratore di campo elettromagnetico, o misurando con un wattmetro per radiofrequenza la potenza elettromagnetica assorbita da uno schermo di area nota posto perpendicolarmente alla direzione di propagazione.

L'intensità di un'onda elettromagnetica corrisponde al modulo  $S$  del vettore di Poynting ( $S = k EH$ ), che è direttamente proporzionale alle intensità dei campi  $E$  e  $H$ , è sempre perpendicolare al piano determinato dai campi elettrico e magnetico e fornisce la direzione ed il verso di propagazione delle onde elettromagnetiche.

### **I esperimento concettuale**

Supponiamo invece che un'auto, carica di elettricità statica, proceda su un rettilineo con velocità costante.

In questo caso il guidatore di un'altra auto, ferma sul ciglio della strada, rileverebbe sia il campo elettrostatico che il campo magnetostatico generati dall'auto in transito.

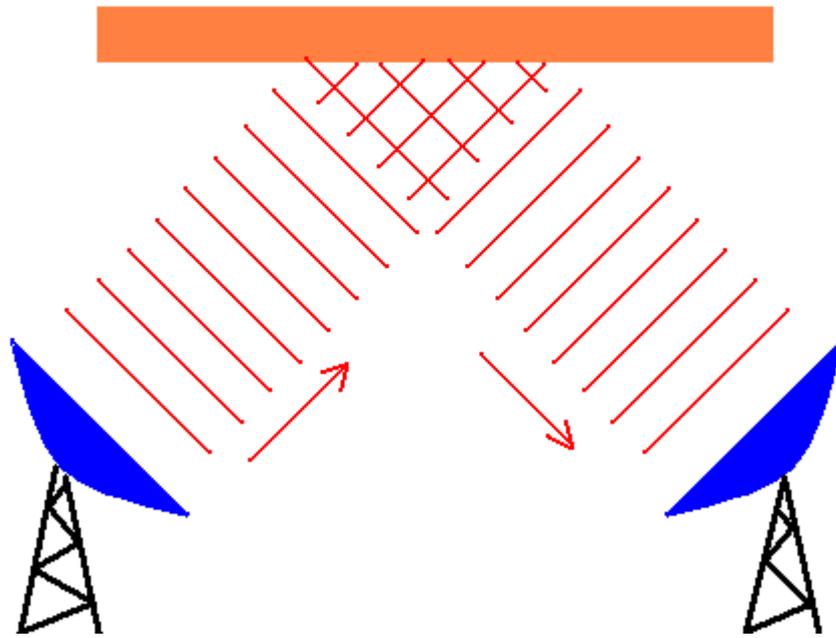
Infatti la carica elettrostatica dovuta all'altra auto, muovendosi in linea retta e con velocità costante, equivale ad una corrente elettrica di intensità costante, che genera un campo magnetico stazionario (magnetostatico), analogo a quello prodotto da un filo rettilineo percorso dalla corrente elettrica.

Se, in particolare, anche l'auto ferma fosse carica di elettricità statica, il guidatore dell'auto in moto rettilineo uniforme rileverebbe sia il campo elettrostatico che quello magnetostatico generati dall'auto ferma.

Infatti, nel sistema di riferimento dell'auto in moto, l'auto ferma si muove con una velocità uguale e contraria ed equivale, essendo carica di elettricità, ad una corrente elettrica di intensità costante che genera un campo magnetico stazionario.

### **LE LEGGI DI RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**

Le onde hertziane (radioonde), differiscono dalle onde luminose soltanto per la lunghezza d'onda (da qualche millimetro a qualche chilometro per le onde hertziane e da 400 nanometri a 750 per la luce visibile) e per la frequenza (da un centinaio di KHz (chilohertz) a qualche decina di gigahertz per le radioonde e da 400000 a 750000 (GHz) gigahertz per le onde della luce visibile). Vengono riflesse da una superficie conduttrice, come si verifica per un raggio di luce riflesso da uno specchio, seguendo la stessa legge, in base alla quale l'angolo di incidenza, formato dalla direzione del raggio luminoso incidente o da quella delle onde hertziane incidenti con la retta perpendicolare alla superficie riflettente, è sempre uguale all'angolo di riflessione, formato dalla direzione del raggio luminoso riflesso o da quella delle onde hertziane riflesse con la predetta perpendicolare.



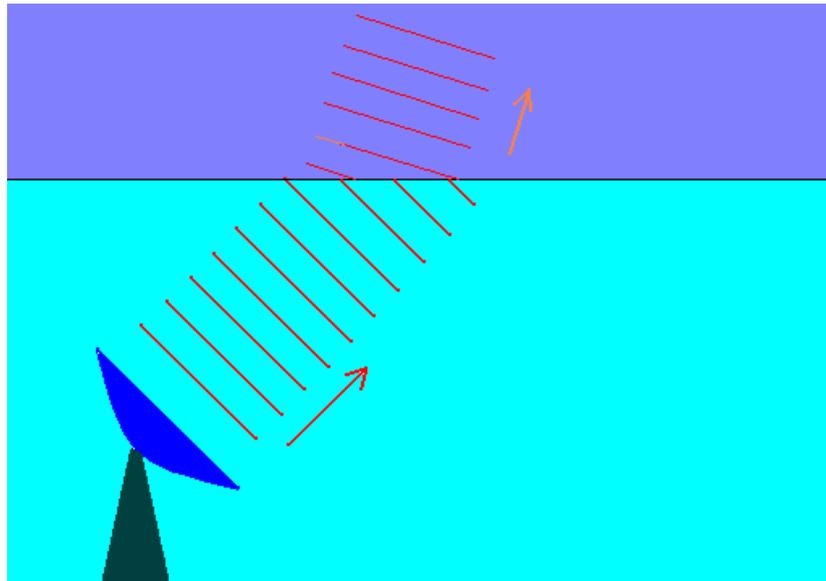
L'applicazione più nota della riflessione delle onde hertziane si ha nel radar, che consente ad un aereo o ad un natante o ad un missile di rilevare e visualizzare a distanza masse metalliche di qualunque tipo, costituite da altri natanti o velivoli o da bersagli da colpire.

Speciali radar meteorologici consentono inoltre, mediante la riflessione degli impulsi di energia elettromagnetica da parte delle nubi temporalesche, di individuare in anticipo le perturbazioni in arrivo.

Per la riflessione delle onde elettromagnetiche non è necessario che la superficie riflettente abbia una conducibilità elettrica elevata: basta considerare che è possibile visualizzare altrettanto bene ostacoli corrispondenti a rilievi e che mediante echi radar è possibile misurare con sufficiente precisione la distanza tra la Luna e la Terra e tra questa ed i pianeti più vicini.

La riflessione delle onde hertziane da parte degli strati ionizzati (di Heaviside) dell'alta atmosfera terrestre (ionosfera), rende possibile la propagazione a grandi distanze di alcune bande di radioonde (onde lunghe, medie e corte), sia pure con attenuazione variabile nell'arco della giornata, per effetto della variabilità della concentrazione degli atomi ionizzati in funzione dell'intensità della radiazione solare.

Le onde hertziane, come le onde luminose che attraversano mezzi ottici con differenti indici di rifrazione, subiscono il fenomeno della rifrazione, che consiste nella variazione della direzione di propagazione nel passaggio attraverso strati atmosferici con temperature diverse, caratterizzati da indici di rifrazione diversi.



Se si tiene presente che l'indice di rifrazione di un mezzo dielettrico non opaco, che consenta cioè la propagazione delle onde elettromagnetiche (sia hertziane che luminose) con modesto assorbimento, è definito dal rapporto  $n = c/v$  tra la velocità della luce nel vuoto (300000 km/s) e la velocità  $v$  della luce nel mezzo, si comprende che se un mezzo è più rifrangente di un altro, è caratterizzato da una minore velocità di propagazione, che implica una variazione nella direzione di propagazione, in base alla legge della rifrazione (di Snell), che afferma che la direzione di propagazione di un'onda elettromagnetica, nel passaggio da un mezzo ad un altro, varia in modo tale che si mantenga costante il rapporto  $(\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2) = v_1 / v_2 = n_2 / n_1$  tra il seno dell'angolo  $\alpha_1$  di incidenza, formato cioè dall'onda incidente con la perpendicolare alla superficie di separazione tra i due mezzi, ed il seno dell'angolo  $\alpha_2$  di rifrazione, formato dall'onda rifratta con la predetta perpendicolare.

Se aumenta l'inclinazione  $\alpha_1$  dell'onda incidente, aumenta anche l'angolo  $\alpha_2$ , in modo tale che il rapporto dei loro seni sia sempre pari al rapporto diretto delle velocità di propagazione  $v_1$  e  $v_2$ , che è uguale al rapporto inverso degli indici di rifrazione.

Le leggi della riflessione e della rifrazione si spiegano con il principio enunciato per la propagazione luminosa dal matematico francese Fermat, il quale affermò che un raggio luminoso percorre sempre il cammino corrispondente al minimo tempo di percorrenza. La soluzione di questo problema di ricerca del tempo minimo è compatibile con i risultati sperimentali e con un principio di economia insito nelle leggi della natura, che, tra tutte le soluzioni possibili, favoriscono sempre quelle che minimizzano la durata e l'energia con cui si svolgono i fenomeni fisici (principio della minima azione).

## **LA POLARIZZAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE**

Il campo elettrico ed il campo magnetico di un raggio di luce emesso da una sorgente luminosa ordinaria, cioè non polarizzata, vibrano in tutti i possibili piani passanti per il

raggio.

Si ha cioè una distribuzione casuale di tutti i possibili orientamenti delle coppie di campi elettrici e magnetici ortogonali tra loro.

E' tuttavia possibile ottenere da una sorgente luminosa ordinaria luce polarizzata, facendo propagare la luce non polarizzata attraverso particolari cristalli naturali (quarzo, calcite, tormalina) o materiali sintetici (polaroidi) in modo tale che vengano trasmesse soltanto le oscillazioni del campo elettrico e del campo magnetico parallele al piano di polarizzazione caratteristico del cristallo, in quanto il cristallo è un materiale che non presenta le stesse proprietà ottiche in tutte le direzioni (materiale anisotropo).

In pratica un cristallo polarizzatore, selezionando un determinato piano di vibrazione del campo elettrico, fornisce onde luminose caratterizzate tutte dalla stessa direzione di vibrazione del campo elettrico e quindi, anche del campo magnetico, che è sempre perpendicolare a quello elettrico.

Nel caso delle onde herztiane il piano di polarizzazione coincide con il piano, verticale o orizzontale, passante per il conduttore irradiante che costituisce l'antenna trasmittente. Esempio: Le antenne televisive, siano esse trasmittenti o riceventi, sono costituite da tante barrette parallele tra loro, giacenti in un piano verticale o orizzontale, che costituisce il piano di polarizzazione.

Ovviamente, affinché l'energia elettromagnetica venga captata dall'antenna ricevente con il massimo rendimento, è necessario che il relativo piano di polarizzazione sia parallelo a quello dell'antenna trasmittente, altrimenti si utilizzerebbe soltanto la componente del campo elettrico dell'onda captata lungo il piano di polarizzazione dell'antenna ricevente, con un'intensità decrescente fino a zero al crescere, da 0 a 90°, dell'angolo tra i piani delle due antenne.

## ***L'INTERFERENZA DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE***

Due antenne radio alimentate dallo stesso trasmettitore e distanziate tra loro si comportano come due sorgenti coerenti di onde elettromagnetiche, che irradiano cioè onde elettromagnetiche che presentano un ritardo costante (differenza di fase costante) le une rispetto alle altre.

Per effetto di questo ritardo, una stazione ricevente molto distante dalle antenne, riceve la somma vettoriale dei due campi elettromagnetici, che corrisponde ad un campo elettromagnetico risultante la cui intensità varia periodicamente al variare della posizione della stazione ricevente rispetto alle antenne trasmittenti.

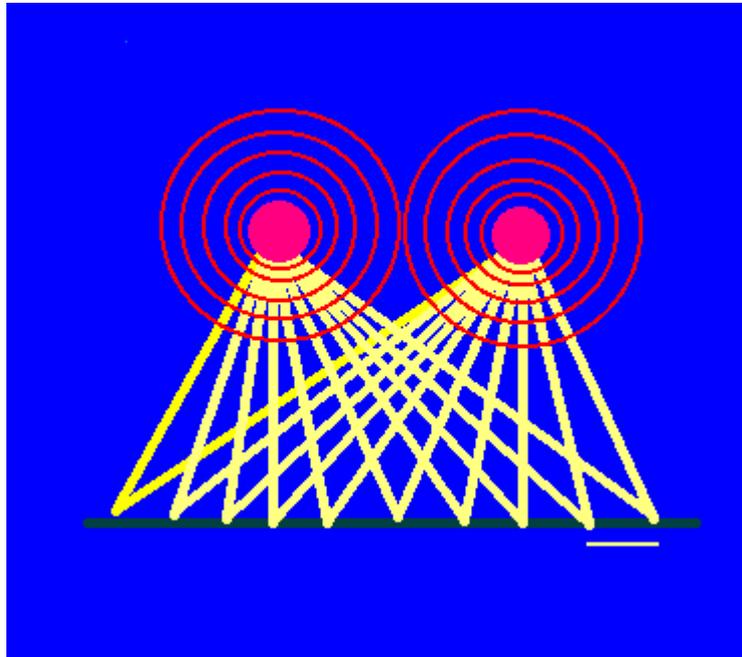
Si verifica in questo caso un fenomeno di interferenza tra le onde elettromagnetiche irradiate dalle due antenne.

L'interferenza produce valori massimi del campo elettrico (interferenza costruttiva), pari al doppio del campo dovuto ad una sola antenna in tutti i punti tali che la differenza delle loro distanze rispetto alle due antenne sia pari ad un numero intero di lunghezze d'onda, intendendosi per lunghezza d'onda (periodo spaziale) lo spazio  $\lambda = c T = c/f$  percorso dall'onda durante il periodo T (inverso della frequenza f) di oscillazione del

campo elettrico.

Se invece si considerano tutti i punti tali che la differenza delle loro distanze dalle antenne sia pari ad un numero dispari di semilunghezze d'onda, si ha interferenza distruttiva ed ivi il campo elettromagnetico risultante si annulla.

L'interferenza produce pertanto una distribuzione di energia elettromagnetica che varia periodicamente in funzione della distanza.



Questi fenomeni di affievolimento ed intensificazione del campo si verificano in particolare nella ricezione a grande distanza delle onde corte (onde con lunghezza compresa tra 10 e 100 metri) riflesse dagli strati ionosferici.

In tal caso i punti della ionosfera nei quali avviene la riflessione delle onde, si comportano come tante sorgenti coerenti i cui contributi interferiscono distruttivamente o costruttivamente al variare della distanza della stazione ricevente (fenomeni di fading).

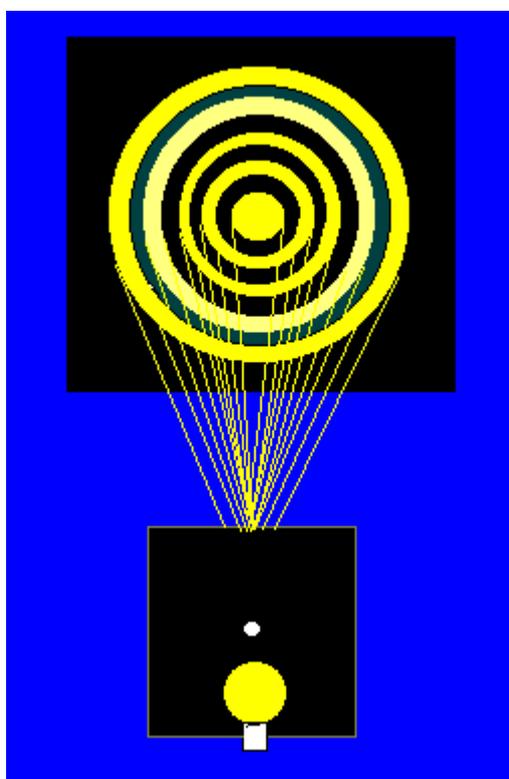
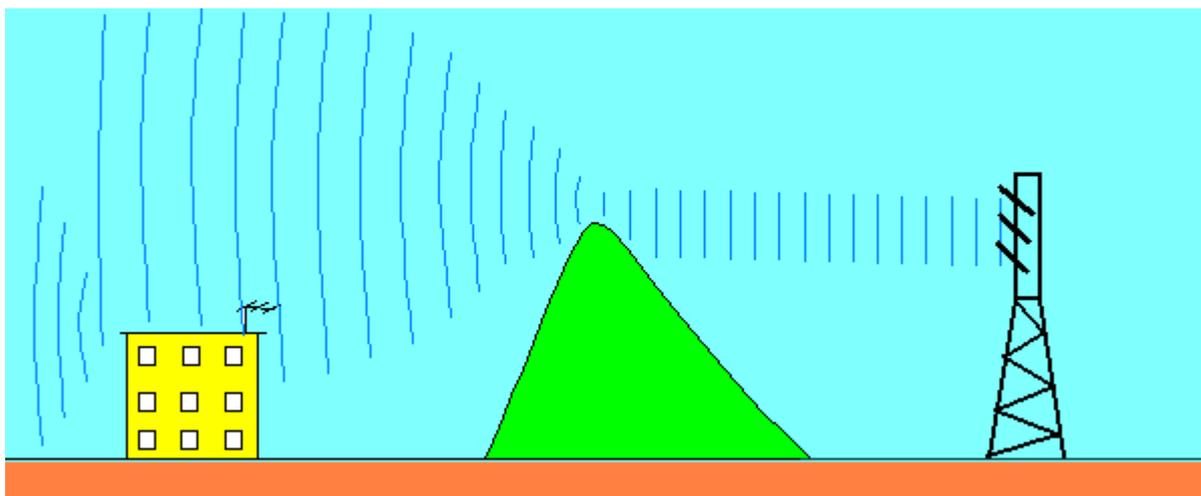
L'interferenza delle onde luminose si ottiene con dispositivi ottici particolari, in quanto le sorgenti luminose ordinarie generano tante onde luminose elementari incoerenti tra loro, che sono emesse senza coordinamento temporale dai singoli atomi.

Per esempio, si possono ottenere fenomeni di interferenza su una superficie piana con luce monocromatica riflessa da due specchi opportunamente inclinati tra loro.

Si osserva in tal caso un sistema di massimi e minimi di intensità luminosa (frange di interferenza).

Oggi il metodo più usato per ottenere facilmente l'interferenza delle onde luminose utilizza la luce dei LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), dispositivi funzionanti in base ai principi dell'elettronica quantistica, che emettono onde luminose coerenti sia spazialmente che temporalmente, cioè con differenza di fase costante tra loro.

## LA DIFFRAZIONE DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE



Quando un'onda elettromagnetica viene diffusa da un ostacolo o si propaga attraverso un'apertura di dimensioni comparabili con la sua lunghezza d'onda, subisce il fenomeno della diffrazione, che si spiega con il principio di Huygens-Fresnel, in base al quale tutti i punti dell'apertura o dell'ostacolo che si trova sulla linea di propagazione dell'onda, diventano a loro volta sorgenti di onde sferiche elementari, che diffondono l'energia dell'onda elettromagnetica in tutte le direzioni comprese nella semisfera avente nel suo centro l'ostacolo o la fenditura.

Le onde sferiche elementari interferiscono tra loro dando origine ad una distribuzione di energia elettromagnetica che presenta periodicamente dei massimi e dei minimi al

variare dell'angolo formato dalla direzione iniziale di propagazione con la generica direzione che si considera (con un angolo compreso tra  $0^\circ$  e  $180^\circ$ ).

Nel caso della diffrazione di un raggio luminoso monocromatico attraverso una piccolissima apertura, circolare o rettangolare, di dimensioni comparabili con la lunghezza d'onda e praticata in uno schermo opaco, si può osservare su uno schermo scuro un sistema di frange di diffrazione, rispettivamente circolari o rettangolari, che corrispondono a massimi e minimi dell'intensità luminosa.

Dalla misura della distanza tra la frangia centrale ed una delle frange successive si può ricavare, in base alla distanza tra l'immagine di diffrazione ed il piano della fenditura, la lunghezza d'onda della radiazione luminosa.

Se si opera invece con luce bianca, si osservano sistemi di frange iridescenti dovute ai diversi massimi di luce prodotti dalle radiazioni di diversa lunghezza d'onda.

I fenomeni di diffrazione che si ottengono inviando su un cristallo o un sottile fascio di raggi X, che sono onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa tra alcuni centesimi e qualche decimo di nanometro, si ottengono su una lastra fotografica frange di diffrazione che consentono di ricavare informazioni sulla struttura dei cristalli e delle molecole (diffrattometria a raggi X).

Infatti i raggi X che vengono diffusi in tutte le direzioni dai singoli atomi di un cristallo o di una molecola, interferiscono costruttivamente soltanto in determinate posizioni angolari rispetto al fascio incidente, consentendo di ricostruire la simmetria che caratterizza la disposizione degli atomi.

## **L'EFFETTO DOPPLER**

Nel 1842 il fisico austriaco Johann Christian Doppler evidenziò un fenomeno caratteristico delle onde acustiche, successivamente esteso alle onde elettromagnetiche. L'effetto Doppler consiste nel fatto che la frequenza apparente del suono percepito da una persona che si trovi in moto relativo rispetto ad una sorgente sonora, dipende dalla velocità relativa tra sorgente ed osservatore.

Infatti, quando siamo investiti dalle onde acustiche emesse dalla sirena di un'auto in transito, percepiamo un aumento di frequenza durante la fase di avvicinamento ed una diminuzione di frequenza durante la fase di allontanamento.

La frequenza massima viene percepita quando l'auto transita davanti a noi.

Un' analoga variazione della frequenza del suono percepito si verifica se la sorgente sonora è ferma e l'osservatore è in movimento.

Ovviamente la frequenza del suono emesso dalla sorgente sonora è sempre la stessa.

Varia soltanto la lunghezza delle onde acustiche che ci arrivano dalla sorgente in moto o quella delle onde acustiche che ci investono quando ci avviciniamo alla sorgente ferma o quando ci allontaniamo da essa.

Gli incrementi ed i decrementi della lunghezza d'onda determinati dal moto relativo tra sorgente ed osservatore, corrispondono rispettivamente a decrementi ed incrementi della frequenza apparente, cioè quella percepita dall'osservatore.

Nel caso delle onde elettromagnetiche, che, a differenza delle onde acustiche, si

propagano anche nello spazio vuoto, la formula dell'effetto Doppler diventa molto semplice .

Se con  $F'$  si indica la frequenza delle radioonde o delle onde luminose percepite dall'osservatore in moto relativo rispetto alla sorgente con velocità  $V$  e con  $F$  la frequenza effettiva dell'onda emessa dalla sorgente, si ha:

$F' = F (1 + v/c)$  ,se l'osservatore e la sorgente si avvicinano (aumento di frequenza);

$F' = F (1 - v/c)$ , se l'osservatore e la sorgente si allontanano.

I corrispondenti valori della lunghezza d'onda apparente  $\lambda'$  ,per velocità relative piccole rispetto alla velocità della luce ( $v/c \lll 1$ ) sono dati dalle formule:  $F' = c/\lambda'$  ;  $F = c/\lambda$  ;

$c/\lambda' = (c/\lambda) (1 + V/c)$  ;  $1/\lambda' = (1/\lambda) (1 + V/c)$ ;

$\lambda = \lambda'(1 + V/c)$ ;  $\lambda' = \lambda/(1+V/c) \approx \lambda (1-V/c)$  ,se l'osservatore e la sorgente si allontanano;

$\lambda' = \lambda/(1-V/c) \approx \lambda (1+V/c)$  , se l'osservatore e la sorgente si avvicinano.

L'effetto Doppler trova un'importante applicazione in cosmologia per la determinazione della velocità di allontanamento delle altre galassie rispetto alla nostra, attraverso la misura del cosiddetto "Doppler red shift", cioè dello spostamento verso il rosso (aumento della lunghezza d'onda) delle righe spettrali emesse dall' idrogeno delle galassie lontane.

Infatti, conoscendo attraverso l'analisi spettroscopica la lunghezza d'onda effettiva  $\lambda'$  di una determinata riga spettrale dell'idrogeno, dalla misura della lunghezza d'onda apparente  $\lambda$  della stessa riga spettrale emessa dall'idrogeno galattico, si calcola la velocità di allontanamento  $V$ .

