

Prima dei PIEZO...parliamo di SCIENZA ELETTROLOGICA

Elettrologia è quella parte della fisica che comprende lo studio dei fenomeni relativi alle cariche elettriche in quiete (**elettrostatica**) e in movimento (**elettrocinetica**), dell'azione mutua fra correnti (**elettrodinamica**), delle masse magnetiche in quiete (**magnetostatica**) e delle interazioni tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici (**elettromagnetismo**).

L'elettrologia riguarda anche lo studio dei legami tra energia elettrica e chimica (**elettrochimica**) e della conduzione elettrica nel vuoto (**elettro-vuototecnica**), nei gas e nello stato solido (**elettronica**).

Fisica

Il campo dei fenomeni elettrici, magnetici ed elettromagnetici, studiati e analizzati con mezzi sempre più perfezionati, è in corso di continuo allargamento, pertanto qui ci limiteremo a un'esposizione elementare dello sviluppo storico e degli aspetti fondamentali dell'elettrologia, mentre data l'importanza teorica e applicativa dell'elettromagnetismo, dell'elettronica, dell'elettroacustica e delle altre branche specializzate queste vengono trattate sotto le rispettive pagine e capitoli, anche in una prossima espansione del sito.

Sotto il profilo storico moderno alcuni "grandi" sono i seguenti:

- André-Marie **Ampère**
- Guericke Von Otto
- Luigi **Galvani**
- Alessandro **Volta**
- Jesse **Ramsden**

Fin dall'antichità era noto che l'ambra gialla, per effetto dello strofinio, acquista la proprietà di attirare corpi leggeri, come pagliuzze, piume, ecc.

Questo comportamento è citato da vari autori greci, in particolare da **Talete di Mileto** (VI sec. a.C.).

Era anche nota la scarica elettrica provocata dalla torpedine che **Aristotele** consigliò per la cura della gotta. Gli antichi Indiani avevano invece riscontrato che alcuni cristalli riscaldati attirano le ceneri (**piroeletricità**).

Durante il medioevo non si ebbero ulteriori progressi in queste conoscenze fino al XVI secolo circa, quando l'inglese **William Gilbert (1544-1603)** riscontrò un **comportamento elettrico analogo a quello dell'ambra in diverse sostanze, come il vetro, la resina, lo zolfo e molte altre.**

Questi materiali furono chiamati **dielettrici**, cioè materiali isolanti.

I materiali nei quali non si riusciva a raccogliere l'elettricità, come ad esempio i metalli, si dissero per contrapposto **anelettrici**, cioè conduttori elettrici.

A William Gilbert si deve inoltre la distinzione tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici.

Otto Von Guericke (1602-1686) inventò la prima macchina elettrostatica, costituita da una sfera di zolfo posta in rotazione che veniva elettrizzata per strofinio dalle mani dello sperimentatore.

Mediante questo apparecchio, che permise di dare un indirizzo sperimentale alle ricerche sull'elettricità, **si ottenne la prima scarica elettrica**.

Stephen Gray (1670-1736) osservò che anche i conduttori potevano essere elettrizzati, purché fossero isolati, scoprì la conduzione elettrica ed eseguì la prima esperienza di trasporto di una carica a distanza, osservò inoltre l'**elettrizzazione per induzione** o influenza elettrostatica.

Successivamente questi risultati furono confermati da **Charles François du Fay** (1698-1739), che dimostrò la possibilità di elettrizzare tutti gli oggetti, compreso il corpo umano, e osservò, impiegando un pendolino elettrostatico formato da una sferetta di midollo di sambuco sospesa a un filo, **che il vetro e la resina acquistano, per sfregamento, elettricità contrarie**, denominate rispettivamente vetrosa (positiva) e resinosa (negativa).

Pieter Van Musschenbroek nel 1746, e quasi contemporaneamente Jürgen Von Kleist, costruirono i primi **condensatori elettrici** nella forma nota come "bottiglia di Leida", che consentirono di ottenere scariche elettriche di considerevole intensità.

Si perfezionarono anche le macchine elettrostatiche, fra le quali ricordiamo quelle di Hawksbee (1709) e di Winkler (1766) a cilindro di vetro e quella di Ramsden a disco di vetro (1768).

Benjamin Franklin (1706-1790) scoprì il potere delle punte, utilizzandolo come mezzo protettivo contro le scariche atmosferiche (parafulmine).

Nel 1754 l'inglese **John Canton** (1718-1772) realizzò l'**elettrizzazione per induzione elettrostatica**. Contemporaneamente si cominciavano a delineare le teorie relative a questi fenomeni, William Watson (1715-1787) nel 1746 e Franklin nel 1750 avanzarono l'ipotesi che lo sfregamento non "creasse" l'elettricità, bensì ne modificasse la distribuzione fra i due corpi a contatto: uno perde e l'altro acquista cariche elettriche (principio di conservazione della carica).

I primi studi quantitativi si devono a **Coulomb** (1736-1806) il quale, mediante la sua bilancia di torsione, misurò le forze di attrazione e repulsione elettrostatica, constatando che si tratta di azioni di intensità inversamente proporzionale al quadrato della distanza (1785). Egli inoltre scoprì che l'elettrizzazione interessa gli strati superficiali dei conduttori. I risultati sperimentali di Coulomb, inquadrati analiticamente da S. de **Laplace** (1749-1827), J. B. **Biot** (1774-1862), da F. **Gauss** (1777- 1855) e da D. Poisson (1781-1840), segnarono il coronamento dell'elettrostatica.

Gli ulteriori perfezionamenti in questo campo hanno portato alla realizzazione di macchine elettrostatiche più efficaci, come quelle di Wimshurst (1832-1903) e di **Van de Graaff** (1935) e di elettrometri particolarmente sensibili.

Dopo la scoperta di **Luigi Galvani** (1737- 1798), che nel 1790 mostrò come, mettendo a contatto mediante un archetto metallico i nervi lombari e i muscoli della gamba di una rana scorticata si osservavano notevoli contrazioni dinamiche, **Alessandro Volta** (1745-1827) avanzò l'ipotesi che questo comportamento fosse dovuto a corrente elettrica prodotta dalla forza elettromotrice esistente nel contatto fra il metallo dell'archetto e le soluzioni elettrolitiche. Osservando poi che le contrazioni erano più intense quando l'archetto era formato da due metalli di natura diversa, riuscì a definire esattamente il fenomeno della **forza elettromotrice di contatto fra metalli** e stabilì la distinzione fra conduttori di prima e di seconda specie, rispettivamente metalli e soluzioni elettrolitiche.

La celebre controversia sorta fra questi due scienziati portò **Alessandro Volta**, dopo lunghe e metodiche ricerche, alla scoperta della pila nel 1800. Prese così l'avvio un nuovo campo d'indagini, **la SCIENZA ELETTRODINAMICA, cioè la scienza elettrica che si occupa del movimento di cariche elettriche nei conduttori**.

Si stabilirono progressivamente anche le leggi fisiche che governano il comportamento delle correnti elettriche e nel 1827 Georg Simon **Ohm** (1787-1854) determinò la relazione che lega la tensione fra due punti di un circuito e l'intensità di corrente che l'attraversa, definendo la resistenza elettrica.

Rudolf Kohlrausch (1809-1858) definì successivamente la resistività (1848) e Gustav Robert **Kirchhoff** (1824-1887) le cui formule sono molto studiate dagli elettrotecnici, definì il comportamento elettrico di una rete comunque complessa formata da maglie e nodi.

Charles Wheatstone (1802-1875) ideò nel 1844 il ponte che porta il suo nome per la misura delle resistenze.

James Prescott **Joule** (1818-1889) studiò gli effetti termici della corrente elettrica e formulò nel 1841 la legge che esprime la relazione fra la corrente che percorre un circuito e la potenza dissipata in calore.

Già nella seconda metà del XVIII secolo si era tentato di stabilire un legame tra fenomeni elettrici e magnetici, ma solo nel 1820 Hans Christian **Oersted** (1777-1851) scoprì che una corrente elettrica devia un ago magnetizzato e André Marie **Ampère** (1775-1836) riscontrò il medesimo effetto nel caso di due correnti gettando le basi dell'**elettrodinamica**.

Jean Baptiste Biot e Félix Savart (1791-1841) misurarono il campo magnetico prodotto dalla corrente. Pierre-Simon de Laplace ne dedusse una legge elementare e, nel 1822, **Ampère** formulò la legge generale del fenomeno: egli, assimilando un solenoide a un magnete, pose le basi dell'**elettromagnetismo**.

A Michael **Faraday** (1791-1867) si deve la scoperta del fenomeno dell'**induzione elettromagnetica** nel 1831, fenomeno sul quale si basa la trasformazione dell'energia elettrica in lavoro meccanico. L'interpretazione matematica di questo fenomeno venne data da Franz Ernst Neumann (1798-1895), che si servì della nozione di potenziale, e fu successivamente completata e verificata sperimentalmente da Wilhelm **Weber** (1804-1891), **Kirchhoff** e Helmholtz. Nel 1820 François Arago (1786-1853) magnetizzò un ago d'acciaio mediante una corrente elettrica e nel 1876 Henry Augustus Rowland (1848-1901) osservò che un ago magnetizzato devia per azione di un disco rotante che porta una carica elettrica, dimostrando così **l'identità fra elettricità statica ed elettricità dinamica**.

Nel 1882 James Alfred **Ewing** (1855-1935) scoprì **l'isteresi magnetica** a seguito delle esperienze di Emil **Warburg** (1846-1931). James Clerk **Maxwell** (1831- 1879), infine, formulò le equazioni generali del campo elettromagnetico giungendo a una sintesi completa di tutta l'elettrologia.

Elettrostatica

Esistono molti corpi, detti dielettrici o isolanti (vetro, resina, ebanite, zolfo) che si elettrizzano per strofinio, acquistano cioè una carica elettrica localizzata nella zona di sfregamento.

La carica elettrica posseduta da un corpo può essere di due tipi differenti, si è convenuto di chiamare positiva quella che si accumula sul vetro strofinato e negativa quella che si osserva sulla resina. Esistono altri procedimenti elementari per elettrizzare un corpo qualsiasi, per esempio mettendolo a contatto con un oggetto carico (elettizzazione per contatto). Analogamente avvicinando un corpo carico **A** a un corpo **B** inizialmente neutro, si manifesta nella parte di **B** più vicina ad **A** una carica di segno opposto a quella di **A**, mentre la parte più lontana acquista una carica dello stesso segno, allontanando A da B questa elettrizzazione scompare (**elettizzazione per influenza o effetto di induzione elettrostatica**).

In alcuni corpi, detti conduttori, si può isolare durante il processo d'influenza la carica elettrica di un solo segno, per esempio tagliando a metà il conduttore **B** e allontanando le due parti, **in questo caso l'elettizzazione rimane anche quando cessa il fenomeno dell'influenza**.

Le forze che si esercitano tra le cariche elettriche in equilibrio sono descritte dalla legge di Coulomb: due cariche elettriche puntiformi dello stesso segno o di segno opposto si respingono o si attraggono con una forza che è inversamente proporzionale alla loro distanza e direttamente proporzionale al prodotto delle cariche, inoltre la forza che si esercita tra due cariche non dipende dalla presenza di altre cariche.

Il campo di forza generato da una carica elettrica è conservativo: in altri termini, il lavoro compiuto da una carica elettrica che si muove da un punto **A** a un punto **B** non dipende dalla traiettoria seguita, ma solo dalle posizioni iniziale e finale della carica. Si può allora definire in ogni punto P dello spazio una funzione **V(P)** detta potenziale, tale che il lavoro compiuto da una carica **q** che si muove da A a B è così calcolabile: **W = q [V (A) — V (B)]**.

La conoscenza del potenziale **V** di un campo elettrostatico permette di determinare la forza elettrostatica che si esercita su una carica qualsiasi e precisamente si può dimostrare che il vettore **E = - grad V**, detto intensità del campo elettrico, rappresenta la forza che il campo esercita sulla carica elettrica unitaria.

Il problema fondamentale dell'elettrostatica consiste nel trovare il potenziale di una data distribuzione di cariche elettriche. Per esempio con procedimenti elementari si può verificare che il potenziale è costante all'interno di un conduttore elettricamente carico e quindi l'intensità del campo elettrico è nulla. Nei punti esterni vicini al conduttore il vettore **E** è perpendicolare alla superficie del conduttore e il suo valore è dato dal teorema di Coulomb: teorema di elettrostatica il quale stabilisce che l'intensità del campo elettrico in un punto infinitamente vicino alla superficie di un conduttore è proporzionale alla densità di carica della superficie in quel punto: la costante di proporzionalità dipende dalle unità di misura usate.

La Teoria del potenziale

Esiste una teoria matematica, nota come teoria del potenziale, relativa alle forze che si esercitano tra cariche elettriche in quiete, formalmente analoga a quella che descrive la magnetostatica e la forza d'attrazione newtoniana.

Le equazioni fondamentali dell'elettrostatica sono:

$$\text{rot } E = 0, \text{div } D = \rho.$$

Esse costituiscono un caso particolare delle equazioni di Maxwell (Elettromagnetismo), da queste due equazioni si ricava l'**equazione di Poisson**, per il potenziale elettrostatico **V**:

$$\Delta V = - \rho/\epsilon$$

dove $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Delta è l'operatore di Laplace. Ogni problema di elettrostatica è riconducibile alla ricerca di una soluzione dell'equazione precedente che soddisfi determinate condizioni al contorno.

Elettrocinetica, il movimento delle cariche elettriche

Il movimento ordinato delle cariche elettriche si ottiene di solito mediante l'applicazione di un campo elettrico. In molti solidi e liquidi, come i metalli e le soluzioni elettrolitiche, la densità di corrente **J** è proporzionale all'intensità del campo elettrico **E** applicato:

$J = \sigma E$	σ è la conducibilità elettrica del mezzo
----------------	--

Da questa relazione si può ricavare **la legge di Ohm per le correnti** di conduzione che stabilisce la relazione di proporzionalità esistente tra intensità di corrente e differenza di potenziale, **questa proprietà non è tuttavia universalmente valida. Per esempio in moltissimi semiconduttori tale relazione non è lineare, inoltre se il conduttore non è isotropo, come certi cristalli, la conducibilità σ dipende dalla direzione di **J** e non è più uno scalare ma diventa un tensore.**

Nota : In matematica un Tensore è un insieme di quantità dipendenti da uno o più indici associate ai punti di uno spazio euclideo o riemanniano (in particolare ai punti di una regione dello spazio fisico) che si trasformano in modo particolare quando si effettua un cambiamento di coordinate.

Esistono il tensore del secondo ordine, il tensore simmetrico e antisimmetrico, covariante, contravariante, il tensore di Kronecker e di Ricci.

Il concetto di tensore è una generalizzazione della nozione elementare di vettore che si è rivelata di estrema utilità per esprimere proprietà geometriche o leggi fisiche in maniera indipendente dal sistema di coordinate di riferimento utilizzato.

Il valore delle componenti V_i ($i = 1, 2, 3$) di un dato vettore ordinario lungo i tre assi (x_1, x_2, x_3) di un sistema di coordinate cartesiane dipende ovviamente dall'orientamento del sistema di coordinate: scegliendo un altro sistema di riferimento (x_1, x_2, x_3) il valore V_i delle tre componenti cambia, tuttavia il modulo e la direzione del vettore rimangono invariati.

Quel che è importante nella nozione di vettore non è il fatto che esso ha delle componenti di dato valore, ma piuttosto che le sue componenti si trasformano in un dato modo nel cambiamento di coordinate ed è proprio questo modo di trasformarsi che assicura che il modulo e la direzione del vettore rimangono costanti. In termini precisi la legge di trasformazione delle componenti V_i di un vettore è

$$\bar{V}_i = V_j \frac{\partial x^j}{\partial \bar{x}^i}$$

dove si intende che gli indici ripetuti (uno in alto l'altro in basso) vanno sommati da 1 a 3. La formula precedente può essere considerata come la definizione di un vettore: essa non dipende dal tipo di vettore usato o dal valore delle singole componenti, ma unicamente dal modo di trasformarsi delle componenti nel cambiamento di variabile. Tale definizione può essere automaticamente estesa nella stessa forma a spazi di dimensione n qualsiasi (si intende che in questo caso la somma sugli indici ripetuti va fatta da 1 a n) e a sistemi di coordinate curvilinee. Poiché nella definizione adottata non rimane alcun riferimento alla struttura geometrica dello spazio, la nozione di vettore si può estendere non solo agli spazi euclidei, ma anche a una generica varietà riemanniana di dimensioni qualsiasi. Se moltiplichiamo tra loro in tutte le maniere possibili le n componenti di un vettore si ottengono n^2 quantità dipendenti da due indici che si trasformano in maniera determinata rispetto a una data trasformazione di coordinate; per definizione un qualsiasi insieme di n^2 quantità che si trasformano come i prodotti delle componenti di un vettore costituisce un tensore del secondo ordine T_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$). La formula di trasformazione di questo tensore per il cambiamento di coordinate x_i in \bar{x}_j è:

$$\bar{T}_{ij} = T_{hl} \frac{\partial x^h}{\partial \bar{x}^i} \frac{\partial x^l}{\partial \bar{x}^j}$$

In modo analogo si possono definire i tensori di ordine più elevato come insiemi di quantità dipendenti da tre o più indici che si trasformano come i prodotti di tre o più componenti di un vettore. I vettori e i tensori considerati finora sono detti tensori covarianti; si possono analogamente definire dei vettori e dei tensori con un tipo diverso di componenti, dette contravarianti, che si indicano con indici in alto. Il modo di trasformarsi delle componenti contravarianti di un vettore è dato dalla formula:

$$V^i = V_j \frac{\partial x^i}{\partial \bar{x}^j}$$

Il più generale tensore è quindi un insieme di quantità dipendente da r indici covarianti (in basso) e s indici contravarianti (in alto) che si trasforma come il prodotto diretto di r vettori covarianti e s vettori contravarianti.

Analogamente a quel che si fa nel calcolo vettoriale, si possono definire diverse operazioni sui tensori: si può innanzi tutto definire la somma algebrica di due tensori dello stesso ordine come il tensore che ha per componenti la somma delle componenti dei due addendi:

$$C_M^J = A_M^J + B_M^J$$

Un'altra operazione è la composizione di tensori o saturazione degli indici: se si moltiplicano tra loro le componenti di due tensori arbitrari A e B aventi rispettivamente un indice covariante e un indice contravariante uguali e si sommano i prodotti rispetto a tale indice si ottiene un altro tensore con due indici di meno:

$$C_j = A_j^i B_i$$

In particolare saturando l'indice di un vettore covariante

$$A_j$$

con un vettore contravariante

$$B^i$$

si ottiene uno scalare, cioè una quantità invariante rispetto a ogni trasformazione del sistema di riferimento:

$$S = A_j B^j$$

Nella contrazione si effettua la saturazione degli indici su uno stesso tensore di forma mista (cioè con indici covarianti e contravarianti); il tensore così ottenuto è detto tensore contratto.

Se le componenti di un tensore non cambiano permutando in tutti i modi possibili un dato gruppo di indici, il tensore si dice simmetrico rispetto a tali indici come ad esempio per il tensore metrico fondamentale **g_{ij}** che definisce le proprietà geometriche di ogni spazio di Riemann è un tensore simmetrico del secondo ordine.

Altri tensori simmetrici del secondo ordine di grande importanza per la fisica sono il tensore degli sforzi e quello delle tensioni (vedere anche STRESS e STRAIN). Un'importanza particolare ha il tensore misto del secondo ordine

$$\delta_j^i$$

detto simbolo o tensore di Kronecker: il valore delle sue componenti è sempre lo stesso in ogni sistema di riferimento, esso è legato al tensore metrico fondamentale dalla relazione ancora

$$\delta_j^i = g^{ik} g_{kj}$$

Un altro tensore di grande utilità, costruito con il tensore metrico **g_{ij}**, è il tensore di Ricci: questo tensore è di ordine uguale alle dimensioni dello spazio ed è antisimmetrico rispetto ad ogni coppia di indici, cioè cambia segno permutando tra loro due indici, perciò le componenti con almeno due indici uguali sono nulle, le componenti covarianti con indici tutti diversi valgono (il segno + si sceglie quando la permutazione degli indici è di classe pari rispetto alla permutazione fondamentale 1,2, ..., n, altrimenti si sceglie il segno meno). Nello spazio euclideo tridimensionale tale tensore si indica con il simbolo **T_{eijk}**

$$T_{eijk}$$

e le componenti non nulle valgono ± 1 . Altri tensori di grande importanza nella geometria riemanniana sono descritti nella voce TENSORIALE della fisica moderna.

La proprietà più importante dei tensori, che ne giustifica il diffuso impiego nella geometria e nella fisica è che, se due tensori dello stesso ordine hanno le stesse componenti in un dato sistema di coordinate, essi sono uguali in ogni altro sistema di coordinate; è chiaro allora che, se una legge fisica o una proprietà geometrica è espressa come uguaglianza di due tensori, tale legge o tale proprietà non dipende dal sistema di riferimento utilizzato ma esprime una proprietà intrinseca del sistema fisico o dello spazio geometrico considerato.

L'equazione di continuità per la corrente,

$$\text{div } \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0,$$

che esprime la conservazione della carica elettrica, permette di stabilire che in assenza di cariche variabili nel tempo la densità di corrente è un vettore solenoidale, cioè $\text{div } J = 0$. Questa proprietà della corrente unita alla legge di Ohm permette di ricavare i principi di Kirchhoff che costituiscono le leggi fondamentali dei circuiti. Il passaggio della corrente in un conduttore è accompagnato da diversi fenomeni, come la produzione di calore (effetto Joule), fenomeni magnetici che verranno trattati in seguito e processi elettrolitici (ELETTROLISI).

Elettrodinamica

Il Campo creato da una corrente

Si può osservare che in prossimità di un circuito percorso da una corrente di intensità i si manifesta un campo magnetico del quale possiamo calcolare l'intensità H sommando vettorialmente le intensità elementari dH prodotte nel punto M dai diversi elementi del circuito, come $PP' = dl$. Il vettore dH è normale, in M , al piano MPP' . Il suo senso è dato dalla regola dell'uomo di Ampère: un osservatore posto in P sul circuito in modo che la corrente gli entri dai piedi e gli esca dalla testa e rivolto verso M vede il vettore diretto verso la sua sinistra. Il valore numerico di H è dato dalla prima legge di Laplace che riguarda l' ELETTRROMAGNETISMO.

In particolare per un conduttore rettilineo indefinito percorso da una corrente di intensità i , il vettore H è parallelo al piano perpendicolare al conduttore e il suo modulo H è dato nel sistema SI dalla legge di Biot e Savart:

$$H = \frac{1}{2\pi} \frac{i}{R'}$$

dove R è la distanza del conduttore dal punto M .

In base a ciò si può definire il magnete equivalente al circuito: esso è il magnete fittizio che produrrebbe nel generico punto M un campo magnetico di intensità uguale a quella ora calcolata; si può altresì facilmente calcolare il suo momento magnetico, per lo meno nel caso dei circuiti di forma consueta.

(Vedere anche le tecniche della BOBINA e del SOLENOIDE)

Quando la corrente i varia, anche il corrispondente valore di H , in un punto dato, varia. Una corrente sinusoidale produce in ogni punto M una intensità H sinusoidale in fase con la corrente.

Azione di un campo su una corrente

Un circuito percorso da una corrente i , e posto in un campo magnetico esterno, è soggetto a un sistema di forze, dette forze di Laplace, che si può valutare sia sostituendo il circuito con il magnete equivalente, sia calcolando la forza $d\mathbf{f}$ applicata a ogni elemento di linea del circuito; il vettore è normale al piano definito da e dall'induzione \mathbf{B} , il suo verso può essere definito mediante la regola delle tre dita della mano sinistra (Fleming): se si dispongono il pollice, l'indice e il medio della mano sinistra in posizioni mutuamente ortogonali, il vettore risulta diretto secondo la direzione indicata dal pollice quando l'indice e il medio sono rivolti rispettivamente nelle direzioni individuate da B e dalla corrente lungo il circuito; il valore numerico della forza è dato dalla **seconda legge di Laplace**:

Quando il circuito è libero di spostarsi le forze di Laplace compiono un certo lavoro \mathcal{L} dato da $\mathcal{L} = i(\varphi_2 - \varphi_1)$ relazione in cui \mathcal{L} è misurato in joule, i in ampère; φ_1 e φ_2 sono i flussi di induzione (in weber) concatenati con il circuito prima e dopo lo spostamento. Le correnti di convezione producono gli stessi fenomeni magnetici delle correnti di conduzione e subiscono gli stessi effetti in presenza di un campo magnetico esterno. In particolare una carica elettrica puntiforme q con velocità u immersa in un campo magnetico di induzione B è sottoposta a una forza F nota come forza di Lorentz, che vale $F = qu \wedge \mathbf{B}$; se inoltre è presente un campo elettrico E , la forza totale che si esercita sulla carica q è $F = q(E + u \wedge \mathbf{B})$.

Interazioni tra correnti

Le formule precedenti conservano la loro validità anche quando il campo magnetico esterno è creato da una corrente; in realtà, da questo punto di vista, non vi è differenza fra un campo prodotto da un magnete e quello prodotto da una corrente. In questo caso è più logico, però, parlare di azioni mutue fra i due circuiti; si possono calcolare queste azioni partendo dall'espressione dell'energia dei due circuiti: $W = Mi_1i_2$ ove i_1 e i_2 sono le intensità delle due correnti e M il coefficiente di mutua induzione espresso in henry.

L'esperienza di Ampère consente di applicare le stesse considerazioni nel caso molto particolare di azione di una corrente su se stessa quando si utilizza un circuito deformabile (il circuito tende a disporsi in modo da abbracciare la massima superficie possibile) o quando il circuito è alimentato con corrente variabile (appare nel circuito una corrente indotta che si sovrappone alla corrente principale).

In questi casi si sostituisce la quantità M con il coefficiente di autoinduzione L .

Elettrodinamica

L' **elettrodinamica** è la porzione dell'elettrologia che studia le forze ponderomotrici generate dal campo elettromagnetico e in particolare le azioni meccaniche che si esercitano tra due conduttori percorsi da corrente.

Mentre l'**Elettrodinamica relativistica classica** è la parte dell'elettrodinamica che studia le interazioni fra campi elettromagnetici e particelle cariche con velocità vicine a quella della luce. Lo studio di questi fenomeni è di grande importanza negli acceleratori di particelle ad alta energia e nei tubi a vuoto ad alta tensione.

L'**Elettrodinamica quantistica** è invece parte della teoria quantistica dei campi che studia le interazioni della radiazione elettromagnetica con la materia, formulata principalmente da Richard Phillips **Feynman** e Julian Schwinger verso il 1948.

Interazioni fondamentali in Fisica.

In ogni processo di interazione fra particelle cariche e fotoni si può distinguere uno stato iniziale con un certo numero di particelle caratterizzate da opportuni numeri quantici e uno stato finale formato in generale con altre particelle e altri numeri quantici. L'elettrodinamica quantistica fornisce un metodo per calcolare la probabilità che un certo stato iniziale si evolva in un dato stato finale.

Questo metodo consiste nello sviluppo perturbativo di questa probabilità in serie di potenze rispetto alla costante di accoppiamento elettromagnetica $e^2/\hbar c$ (dove e è la carica dell'elettrone, $\hbar = h/2\pi$ la costante di Planck razionalizzata, e c la velocità della luce nel vuoto). Ogni termine di questo sviluppo è calcolabile direttamente e può essere associato a un processo elementare in cui le particelle cariche interagiscono scambiandosi fotoni il cui numero dipende dall'ordine del termine perturbativo. I fotoni che vengono emessi e riassorbiti durante l'interazione sono detti *fotoni virtuali* perché non compaiono nello stato iniziale o finale del processo.

Questo tipo di calcolo è stato applicato per valutare con un alto grado di precisione la struttura fine dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno. L'elettrodinamica quantistica prevede inoltre, in ottimo accordo con l'esperienza, che il momento magnetico intrinseco dell'elettrone **sia leggermente superiore al valore convenzionale di un magnetone di Bohr.**

Sul modello dell'elettrodinamica quantistica sono state sviluppate altre teorie quantistiche dei campi che permettono di descrivere, almeno qualitativamente, le principali proprietà di molte particelle elementari. La tecnica dello sviluppo in serie di tipo perturbativo, tuttavia, non si può applicare nei casi in cui la costante di accoppiamento sia molto grande, come per esempio nel caso del campo nucleare, dove è circa pari a 1. In questa situazione, infatti, i termini di ordine superiore della serie tendono all'infinito, rendendo apparentemente inutile l'applicazione della teoria quantistica dei campi per la comprensione dei fenomeni di interazione. Tuttavia da uno studio più accurato di queste infinite si può intravedere la possibilità di eliminarle, considerando nella teoria le fluttuazioni quantistiche del campo gravitazionale.

La prima infinitezza appare, nell'elettrodinamica classica, nel calcolo della massa propria dell'elettrone δm che è dovuta all'inerzia di un elettrone in moto prodotta dall'interazione del campo dell'elettrone con se stesso, e che è data dalla differenza fra la massa "nuda" dell'elettrone m_0 che l'elettrone avrebbe se esso potesse annullare la propria carica e la massa fisica m effettiva dell'elettrone carico. La massa propria alla quale Lorentz attribuirà il valore $\delta m = e^2/r$ tende linearmente all'infinito per r (raggio dell'elettrone) tendente a zero (elettrone puntiforme).

Anche in elettrodinamica quantistica la massa propria δm risultò una quantità infinita, di natura quadratica prima, come risultò da un calcolo di I. Waller usando l'equazione di Dirac; di natura logaritmica poi, come risultò da un calcolo condotto da V. Weisskopf, usando la teoria dei positoni:

$$\frac{\delta m}{m} = \frac{3 e^2}{\hbar c 2\pi} \lim_{r \rightarrow 0} \ln \frac{1}{rm} + \text{termini finiti}$$

dove m è la massa dell'elettrone, \hbar la costante di Planck, c la velocità della luce. Ma la massa propria dell'elettrone non è la sola singolarità che appare usando le soluzioni perturbative dell'elettrodinamica quantistica; usando i diagrammi di Feynman, F. J. Dyson dimostrò che anche un'altra grandezza, la carica propria δe , è una infinitezza di natura logaritmica.

Il metodo dei diagrammi di Feynman ha permesso di dimostrare che tutti gli infiniti possono essere assorbiti nei parametri fisici "rinormalizzati": se la teoria non è costruita opportunamente, però, il numero dei parametri risulta infinito.

Le teorie in cui è sufficiente un numero finito di parametri sono state chiamate "rinormalizzabili". Il criterio della rinormalizzabilità riduceva significativamente l'ambito delle teorie accettabili: l'elettrodinamica quantistica rispondeva a questo criterio e risultò molto soddisfacente (fra i suoi successi, il calcolo con grande precisione del momento magnetico dell'elettrone e di altre grandezze), al punto da diventare il modello di una buona teoria fisica.

A partire dagli anni Sessanta, cominciarono a presentarsi molti fenomeni nuovi, che non si inquadravano nella teoria: le risonanze barioniche, per esempio, strutture a vita molto breve, e le particelle strane, dalla vita un po' più lunga, che sono generate in **coppie particella-antiparticella** da interazioni forti, ma decadono singolarmente mediante interazioni deboli. Inizialmente non si trovò modo di descrivere le interazioni deboli e quelle forti con una teoria normalizzabile; la soluzione venne dalla riflessione di Feynman, Gell-Mann, Weinberg e altri sulle cosiddette *teorie di gauge* e sulla simmetria, e dalla dimostrazione, fornita da Hooft nel 1971, della rinormalizzabilità di teorie di gauge con rottura spontanea della simmetria, come quella formulata da Glashow, Weinberg e Salam, denominata SU(2) U(1), per la quale le interazioni deboli sono dovute allo scambio di particelle W e Z. Questo risultato fornì una chiave di interpretazione che permise di mettere al loro posto numerosi tasselli teorici già emersi nel corso degli anni Sessanta, ma in modo del tutto slegato e frammisti a molte altre idee dimostratesi inadeguate. Nasce da questo clima la **cromodinamica quantistica**, che descrive le interazioni forti in termini di interazioni tra quark e gluoni. I gluoni in questa teoria hanno lo stesso ruolo che ha il fotone nell'elettrodinamica. Il passo successivo è stato il tentativo di creare una *teoria di grande unificazione*, in grado di unificare in un unico contesto teorico l'elettrodinamica e le teorie delle interazioni deboli e forti.

