

23. FORZE E CAMPI

23.1. Introduzione

Le leggi della meccanica newtoniana forniscono strumenti idonei per prevedere in ogni istante la posizione e la velocità di un corpo, quando siano note, oltre alle condizioni iniziali, la massa del corpo e le forze che agiscono su di esso in ogni istante (vedi ad esempio il metodo numerico ed il metodo grafico di integrazione).

Per questo Pierre Simon de Laplace (1749-1827), esaltando le capacità predittive della Meccanica, affermava che se in un sistema di corpi sono note le forze in gioco e le condizioni iniziali, risulta possibile conoscere il passato, il presente e il futuro di ogni corpo del sistema. Così infatti egli scriveva nel 1814:

«Dobbiamo dunque considerare lo stato presente dell'Universo come l'effetto del suo stato anteriore e come la causa del suo stato futuro. Un'Intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze da cui è animata la natura e la collocazione rispettiva degli esseri che la compongono, se per di più fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'Universo e dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi. Lo spirito umano offre, nella perfezione che ha saputo dare all'astronomia, un pallido esempio di quest'Intelligenza. Le sue scoperte in meccanica e in geometria, unite a quelle della gravitazione universale, l'hanno messa in grado di abbracciare nelle stesse espressioni analitiche gli stati passati e quelli futuri del sistema del mondo».

L'ipotesi di Laplace fa riferimento a un contesto filosofico denominato **determinismo**, secondo cui ogni avvenimento nell'Universo deve essere necessariamente causato da un altro, ad esso antecedente, secondo precise concatenazioni di cause ed effetti. La fisica contemporanea non si basa più su un'impostazione di tipo deterministico, poiché le teorie interpretative della termodinamica e, più ancora, la formulazione della meccanica quantistica, hanno decretato i limiti di tale impostazione. L'ipotesi deterministica tuttavia, può essere accettata nell'ambito di validità delle leggi di Newton.

Si è già sottolineato come, per poter utilizzare la dinamica newtoniana, occorra conoscere *in ogni istante ciascuna delle forze agenti* su ognuno dei corpi presi in considerazione.

La relazione, se esiste, che permette di determinare per ogni istante t e per ogni possibile posizione \mathbf{r} , la forza \mathbf{F} agente su un corpo puntiforme, verrà denominata **espressione analitica** $\mathbf{F} = \mathbf{F}(\mathbf{r}, t)$ della forza \mathbf{F} . Poiché la conoscenza dell'espressione analitica di una forza è di fondamentale importanza per comprendere e prevedere le modalità con cui avvengono i fenomeni, per lungo tempo i fisici teorici si sono posti l'obiettivo di individuare l'espressione analitica delle forze con cui i corpi interagiscono. Fino al secolo scorso questa ricerca si è orientata essenzialmente verso lo studio delle forze rilevabili a livello macroscopico, mentre più recentemente sono state prese in considerazione anche forze agenti a livello microscopico.

Oggi si può dire che il comportamento degli oggetti che ci circondano può essere ricondotto a livello macroscopico all'azione di due sole forze, quella **gravitazionale** e quella **elettromagnetica** e, a livello microscopico all'azione, oltre che di quella **elettromagnetica**, di altre due forze, chiamate rispettivamente forza **nucleare forte** (o forza **forte**) e forza **nucleare debole** (o forza **debole**). Queste quattro forze sono considerate **fondamentali** in quanto la spiegazione di tutti i fenomeni che avvengono in natura si può ricondurre ad esse solo.

A prima vista, le forze che ci circondano sembrano essere molto più numerose delle quattro forze fondamentali. Ciò dipende dal fatto che è solo quando si è arrivati a possedere una conoscenza approfondita dei fenomeni, che diventa possibile, al di là delle differenti modalità con cui le forze sembrano agire e dei differenti effetti che sembrano produrre, individuarne le caratteristiche comuni. Ad esempio, la forza che tende a riportare in condizione di equilibrio una barra metallica compressa viene chiamata forza elastica. La forza elastica tuttavia non è una forza fondamentale; essa è una manifestazione macroscopica delle forze repulsive microscopiche, di tipo elettromagnetico, agenti tra gli elettroni degli atomi forzatamente avvicinati.

I fisici del nostro secolo stanno lavorando alle cosiddette **teorie di grande unificazione** che ipotizzano come alcune di queste forze fondamentali, se non tutte e quattro, possano essere considerate differenti manifestazioni di una stessa forza. In particolare è stata sviluppata una teoria, che poi ha trovato riscontro sperimentale, secondo cui la forza elettromagnetica e quella debole sono manifestazioni di un'unica forza chiamata **elettrodebole**. Questi sforzi rivolti allo sviluppo di teorie che conducono ad una descrizione della realtà la più unitaria possibile hanno trovato nel concetto di **campo**, piuttosto che in quello di forza, il loro migliore interprete. Senza esso, James Clerk Maxwell (1831-1879), ad esempio, non avrebbe potuto operare

l'unificazione tra luce ed elettromagnetismo. Nei prossimi paragrafi vedremo cosa si intende per **campo** occupandoci in particolare del **campo gravitazionale** e del **campo elettrico**.

23.2. Il concetto di campo

La descrizione dei fenomeni in termini di forza può essere affiancata da una differente descrizione formulata in termini di **campo**.

L'esigenza di fornire una descrizione dei fenomeni alternativa a quella basata sul concetto di forza, sorse inizialmente in connessione con la necessità di ampliare ai corpi estesi le leggi del moto formulate per i corpi puntiformi.

L'operazione non è per nulla facile: in prima approssimazione si potrebbe dire che qualunque corpo esteso sia costituito da un'infinità di corpi puntiformi, ma la traduzione matematica di questo concetto diventerebbe possibile solo scrivendo un'infinità di equazioni, una per ognuno dei corpi puntiformi che lo costituiscono.

Inoltre, nell'operazione di suddivisione di un corpo continuo in elementi di volume sempre minore, risulta difficile spiegare l'interazione tra le particelle infinitesime delle quali si suppone costituito il corpo, se non si dispone di un qualche modello per spiegare come le caratteristiche con cui si manifestano i fenomeni dipendano dalle proprietà continue della materia.

Fu il matematico svizzero Eulero (1707-1783), all'interno dei suoi studi di idrodinamica a riprendere il problema (che aveva già tenuto impegnato Newton per oltre vent'anni), della trasformazione delle equazioni del moto dal discreto al continuo. In questa logica, emerse *per la prima volta* il concetto di **campo**, come strumento per associare ad ognuno dei punti di un corpo, un'equazione che descrivesse il valore assunto da una grandezza in un determinato istante.

Il concetto di campo quindi, fu inizialmente sviluppato all'interno della meccanica dei fluidi, ma fu poi formalizzato solo nel secolo XIX con la scoperta delle leggi dell'elettromagnetismo.

Non è possibile, a questo punto del corso, analizzare più approfonditamente l'insieme dei problemi che, concretamente, portarono ad ipotizzare prima e a sviluppare poi, una descrizione dei fenomeni in termini di campo. Si può solo accennare al fatto che, nello studio dei fenomeni elettromagnetici (onde elettromagnetiche), in un primo tempo si ritenne necessario un mezzo materiale che, come l'aria per il suono o l'acqua per le onde materiali, permettesse alle onde elettromagnetiche di propagarsi (onde luminose, raggi X, raggi U.V., onde radio, raggi I.R.). D'altra parte, poiché esso non sembrava immediatamente rilevabile, si ipotizzò l'esistenza di un **etere** cui vennero attribuite tutte e sole quelle proprietà che avrebbero consentito proprio il propagarsi delle onde elettromagnetiche. Dapprima l'etere fu pensato come qualcosa di materiale e la ricerca fu finalizzata a evidenziarne e a rivelarne le caratteristiche di cui si era supposto fosse dotato. In seguito, divenne sempre meno importante occuparsi della sua natura e sempre più importante utilizzarne gli attributi matematici nella descrizione dei fenomeni. Quando poi, con la teoria della relatività, il concetto di etere si rivelò del tutto superfluo, si venne progressivamente affermando una descrizione dell'interazione a distanza in termini di campo.

In generale, si dice che in una regione è presente un campo, se ad ogni suo punto è possibile associare una grandezza fisica il cui valore è funzione della posizione e del tempo.

In altri termini, una grandezza H è un campo quando ad ogni punto di una certa regione, individuato dal vettore posizione \mathbf{r} è possibile associare, in ogni istante t , un valore $H = H(\mathbf{r}, t)$. La grandezza H può essere sia scalare che vettoriale; di conseguenza esistono campi scalari e campi vettoriali. Per esempio a ogni punto di una determinata regione, si associa in ogni istante, un valore di temperatura $T = T(\mathbf{r}, t)$, si definisce un **campo termico** che è un campo scalare. Analogamente, se in un certo istante, è possibile associare ad ogni punto di una certa zona la velocità dei venti si ottiene un **campo di velocità** che, ovviamente, è un campo vettoriale).

Una descrizione in termini di campo piuttosto che in termini di forza, elimina la necessità di occuparsi del modo in cui due corpi possano interagire istantaneamente a distanza, perché è al campo che ognuno di essi crea, che si attribuisce il ruolo di "mediatore" dell'interazione. In un certo senso quindi, il campo costituisce lo strumento moderno e sofisticato di cui si sono dotati coloro che ritengono impossibile

un'azione a distanza senza la presenza di alcun mezzo interposto. Infatti, pur sfrondata di tutti gli attributi inizialmente attribuiti all'etere, il campo ne conserva la funzione di garantire la trasmissione dell'interazione.

23.3. Il campo gravitazionale

In base alla legge di gravitazione universale, due corpi di massa m_1 e m_2 posti a distanza r l'uno dall'altro, interagiscono gravitazionalmente con una forza \mathbf{F}_g il cui modulo è dato da:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{23.1}$$

Questa stessa situazione può essere descritta affermando che ciascuna delle due masse genera nello spazio circostante una non meglio identificata "perturbazione", cui si dà il nome di campo gravitazionale.

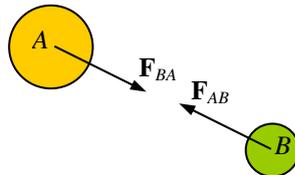


Fig. 23.1. La forza con cui interagiscono i corpi A e B, dipende da entrambi i corpi infatti

$$\mathbf{F}_{BA} = -\mathbf{F}_{AB} \text{ e } F_{BA} = F_{AB} = G \frac{m_A m_B}{r^2} .$$

Ciò significa, più precisamente, che ad ogni punto di una determinata zona deve essere possibile associare in ogni istante un vettore, che stabiliremo di indicare con \mathbf{g} .

Pur nella sua genericità questo tipo di descrizione è concettualmente molto diversa da quella formulata in termini di forza: in quest'ultima, infatti, sono **entrambe** le masse che interagiscono vicendevolmente e contemporaneamente; e non ha quindi senso distinguere chi subisce l'azione da chi la esercita (Fig. 23.1).

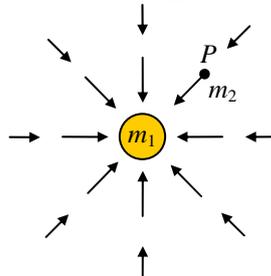


Fig. 23.2. Il vettore campo gravitazionale \mathbf{g} disegnato in alcuni punti nello spazio circostante m_1 .

Quando si utilizza una descrizione in termini di campo, invece, è la **singola** massa ad essere considerata sorgente del campo gravitazionale (Fig. 23.2). Il fatto che la *perturbazione* sia di natura non meglio specificata, non è importante: la si ritiene infatti sufficientemente individuata dalla conoscenza del vettore \mathbf{g} .

Più precisamente, se nell'equazione [23.1] si dividono entrambi i membri per m_2 si ottiene:

$$\frac{F_g}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2} \tag{23.2}$$

in cui **la quantità al secondo membro dipende dalla distanza r tra m_1 e m_2 , ma non dalla massa m_2** . Ponendo:

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{F}_g}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \tag{23.3}$$

in cui $\hat{\mathbf{r}}$ è il versore orientato dalla massa m_2 verso la massa m_1 , si definisce una grandezza vettoriale $\mathbf{g}(\mathbf{r}, t)$, chiamata **vettore campo gravitazionale** che in ogni istante t dipende dal punto P , a distanza r dalla massa m_1 , in cui si colloca la massa di prova m_2 , ma non dalla massa m_2 (Fig.23.2).

Se infatti la [23.2] viene riscritta, utilizzando la [23.3], nella forma:

$$\mathbf{F}_g = m_2 \mathbf{g} \tag{23.4}$$

è evidente che \mathbf{F}_g va intesa come la forza che il campo \mathbf{g} esercita sulla massa m_2 .

È importante osservare che il valore di \mathbf{g} non dipende dalla particolare massa m utilizzata per misurarlo. Se infatti, nella [23.4] si utilizzasse invece di una massa m_2 una massa $m' = 20 m_2$ essa sarebbe sottoposta ad una forza $\mathbf{F}'_g = 20\mathbf{F}_g$ e il vettore:

$$\mathbf{g}' = \frac{\mathbf{F}'_g}{m'} \tag{23.5}$$

risulterebbe identico al vettore \mathbf{g} .

Dalla [23.4] è evidente che il vettore campo gravitazionale ha le dimensioni di una accelerazione, ossia:

$$[g] = [L \cdot T^{-2}] . \tag{23.6}$$

La stessa descrizione, naturalmente, può essere ripetuta per la massa m_2 : in questo caso m_2 diventa la massa “sorgente” del campo gravitazionale e m_1 la massa “di prova” che ne subisce gli effetti. Naturalmente, quando in una certa regione sono presenti più masse m_1, m_2, \dots, m_n ad ognuna di esse va attribuita la proprietà di generare un campo gravitazionale $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_n$.

Il campo \mathbf{g} complessivamente prodotto dalla distribuzione delle n masse m_i ($1 \leq i \leq n$) gode, essendo un campo di forze, della proprietà di essere la somma vettoriale dei campi \mathbf{g}_i che ognuna delle singole masse produrrebbe, in assenza delle altre: esso si comporta cioè in accordo con il **principio di sovrapposizione**.

In simboli:

$$\mathbf{g} = \sum_i \mathbf{g}_i \tag{23.7}$$

Se, per esempio, si vuol conoscere il campo prodotto da due masse m_1 e m_2 poste a distanza r l'una dall'altra, in un punto P che dista r_1 da m_1 e r_2 da m_2 (Fig. 23.3), conviene prima calcolare i campi \mathbf{g}_1 e \mathbf{g}_2 che ciascuna delle due masse produrrebbe in P singolarmente, e in seguito utilizzare il principio di sovrapposizione per calcolare il campo risultante in P , ossia:

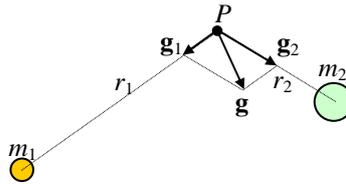


Fig.23.3. Il campo gravitazionale \mathbf{g} nel punto P è la somma vettoriale dei campi gravitazionali \mathbf{g}_1 e \mathbf{g}_2 prodotti in P singolarmente da m_1 e m_2 .

$$\mathbf{g}(P) = \mathbf{g}_1(P) + \mathbf{g}_2(P) . \tag{23.8}$$

Il fatto che per il campo gravitazionale sia valido il principio di sovrapposizione, rende particolarmente comoda una descrizione dei fenomeni in termini di campo. Infatti, anche se non è nota la particolare distribuzione di masse che ha prodotto un determinato campo gravitazionale, la conoscenza del vettore \mathbf{g} permette, tramite la [23.4] di calcolare la forza gravitazionale \mathbf{F}_g cui sarà soggetto, in ogni punto del campo, qualunque corpo di massa nota m .

Facciamo un esempio, sapendo che in prossimità della superficie terrestre il vettore \mathbf{g} è orientato verso la Terra ed ha modulo $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ si può prevedere che un corpo di massa $m = 100 \text{ kg}$ sarà sottoposto a una forza gravitazionale, (chiamata usualmente forza-peso), equidiretta ed equiversa al vettore \mathbf{g} di modulo pari a 981 N. Si osservi che nell'effettuare questo calcolo non si sono dovute minimamente considerare le cause per cui il vettore \mathbf{g} ha quel determinato valore.

In generale il vettore campo gravitazionale in un punto P qualsiasi dello spazio è definito come:

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{F}_g}{m} \tag{23.9}$$

dove con \mathbf{F}_g si intende la forza gravitazionale risultante (generata cioè da tutte le masse circostanti) e m la massa di prova.

23.4. Le linee di forza del campo gravitazionale

Si è detto che il campo gravitazionale è un campo vettoriale: ciò significa che ad ogni punto di una regione in cui una massa sorgente M crea un campo gravitazionale, deve essere associato un vettore $\mathbf{g} = \frac{\mathbf{F}_g}{m}$ dato dal rapporto tra la forza gravitazionale cui è soggetta una qualsiasi massa collocata in quel punto e la massa stessa (se $m_i = m_g$, \mathbf{g} esprime l'accelerazione cui sarà sottoposta una qualsiasi massa m collocata in quel punto).

In Fig. 23.4 viene fornita una rappresentazione dei vettori accelerazione con cui si muoverebbe una massa m per effetto del campo gravitazionale creato da M . In essa i vettori \mathbf{g}_i , diretti come la retta che congiunge M con m , sono orientati verso M perché l'accelerazione deve

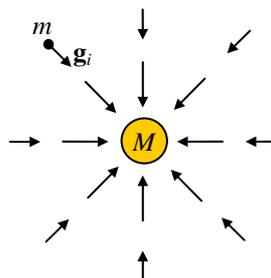


Fig. 23.4. Rappresentazione dei vettori accelerazione cui sarebbe sottoposta una massa m per effetto del campo gravitazionale creato da M .

essere equiversa alla forza, e hanno lunghezza decrescente perché il modulo del campo è inversamente proporzionale al quadrato della distanza da M .

È possibile fornire una rappresentazione ancora più sintetica delle caratteristiche del campo gravitazionale creato da una massa, introducendo un nuovo strumento: le **linee di forza** o **linee di campo**.

Esse sono linee continue e orientate, caratterizzate dalla proprietà che la tangente in ogni loro punto fornisce la direzione e il verso del campo gravitazionale in quel punto (Fig. 23.5).

Dalla definizione di linee di forza, deriva immediatamente che **due linee di forza non possono mai intersecarsi**: se ciò avvenisse, infatti, nel punto di intersezione il campo gravitazionale non sarebbe più definito in maniera univoca (Fig. 23.6).

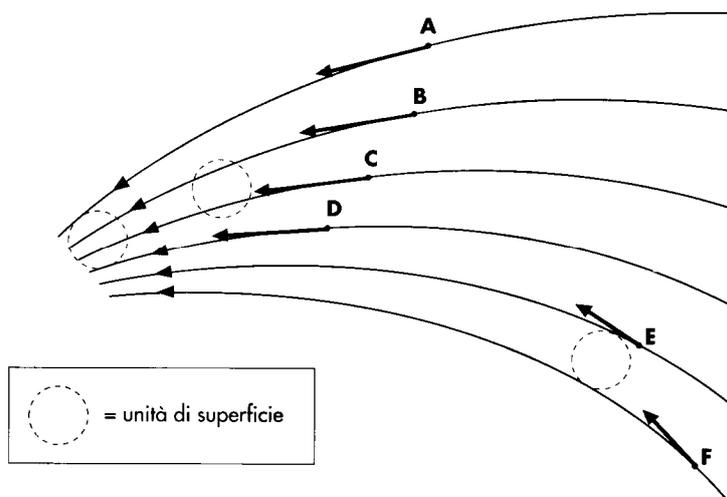


Fig. 23.5. Le linee di forza sono linee orientate, tali che la tangente in ogni loro punto definisce la direzione e il verso del campo in quel punto. Inoltre la loro densità, ossia il numero delle linee di forza per unità di superficie disposta perpendicolarmente alla direzione del campo, è proporzionale all'intensità del campo.

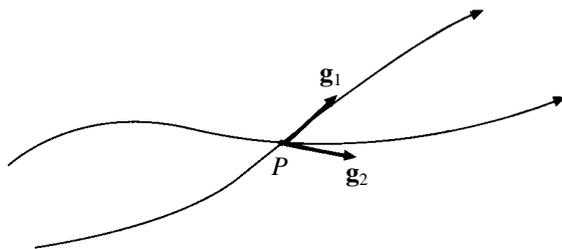


Fig. 23.6. Due linee di forza non possono mai intersecarsi, perché nel punto di intersezione il campo non sarebbe definito univocamente.

In Fig. 23.7 sono rappresentate le linee di forza del campo gravitazionale creato da una massa M : esse sono linee orientate verso la massa M , dirette in modo che la tangente in ogni loro punto fornisca la direzione del campo gravitazionale in quel punto, e tali che la loro densità (ossia il numero di linee di forza per unità di superficie perpendicolare alla direzione del campo) sia proporzionale all'intensità del campo gravitazionale.

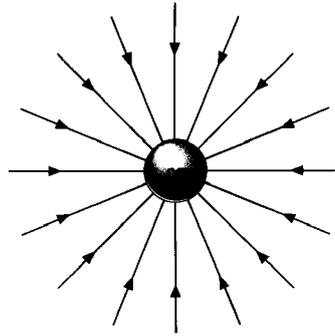


Fig. 23.7. Linee di forza del campo gravitazionale creato da una massa isolata M .

Quest'ultima proprietà consente, quando si disponga del diagramma delle linee di forza, di avere una percezione immediata dell'andamento di un campo gravitazionale: dove infatti le linee si addensano si avrà un campo gravitazionale più intenso, dove si diradano, meno intenso. Il numero delle linee di forza che viene disegnato è scelto in modo tale che **il numero delle linee che attraversano l'unità di superficie, disposta perpendicolarmente alla direzione del campo, sia, in ogni punto, proporzionale al valore dell'intensità del campo in quel punto** (Fig. 23.5). Questo criterio è stato suggerito da Michael Faraday (1791-1877) e le linee di forza tracciate con questa regola forniscono tutte le informazioni che sono necessarie per individuare il vettore \mathbf{g} in ogni generico punto P dello spazio: la **direzione** e il **verso** di \mathbf{g} sono dati dalla direzione e dal verso della tangente in P alla linea di forza che passa per esso o nelle sue immediate vicinanze; la sua **intensità** è proporzionale al rapporto tra il numero N delle linee di forza che attraversano una superficie S_{\perp} (avente centro in P e disposta perpendicolarmente alla direzione delle linee di forza) e l'area della superficie

$$\text{stessa } A_{\perp}: g \propto \frac{N}{A_{\perp}}.$$

In Fig. 23.8 sono rappresentate le linee di forza del campo gravitazionale prodotto da alcune semplici distribuzioni di masse.

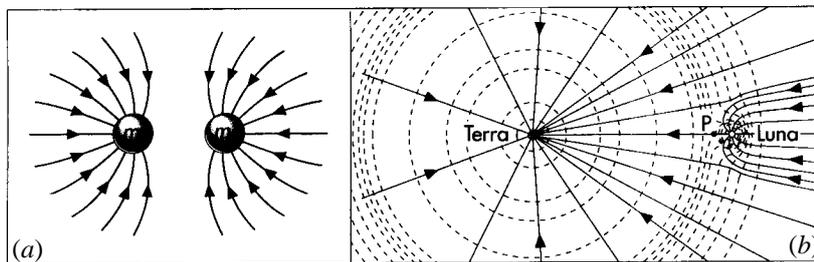


Fig. 23.8. (a) Linee di forza del campo gravitazionale prodotto da due masse uguali. (b) Linee di forza del campo gravitazionale prodotto dalla Terra e dalla Luna. In P il campo gravitazionale prodotto dalla Terra e dalla Luna è nullo.

Tra tutti i possibili campi gravitazionali, ve ne è uno particolarmente semplice ed importante: il **campo gravitazionale uniforme**^(†). In prossimità della superficie terrestre tutti i corpi sono soggetti ad accelerazioni di gravità praticamente identiche; in tali zone il campo gravitazionale terrestre può essere considerato uniforme, cioè caratterizzato in ogni punto da vettori di uguale modulo, direzione e verso. In un campo uniforme le linee di forza, evidentemente, sono rette parallele alla direzione del campo (Fig. 23.9) ed esse vanno tracciate a distanza uguale l'una dall'altra, proprio per indicare, secondo il criterio di Faraday, che l'intensità del campo ha ovunque lo stesso valore.

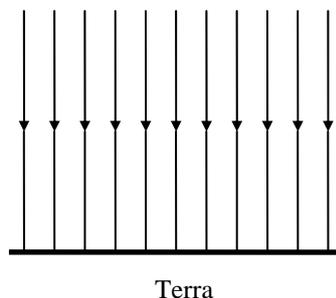


Fig. 23.9. In prossimità della superficie terrestre il campo gravitazionale della Terra si può considerare uniforme in quanto qui tutti i corpi sono soggetti ad accelerazioni di gravità identiche.

È importante sottolineare che le linee di forza, pur essendo un utile strumento per visualizzare le caratteristiche del campo gravitazionale creato da una o più masse, non hanno assolutamente nulla di reale: un campo gravitazionale cioè, non è costituito da linee di forza, anche se il suo andamento complessivo è rappresentabile attraverso esse.

^(†) Un campo si dice **uniforme** quando non varia al variare delle coordinate spaziali, mentre si dice **costante** quando non varia nel tempo.

23.5. Il campo elettrostatico

Con una operazione del tutto analoga a quella effettuata per passare da una descrizione dell'interazione gravitazionale in termini di forza a una in termini di campo, e per superare le stesse difficoltà di ordine concettuale relative all'azione a distanza, è conveniente dare una descrizione delle interazioni elettriche in termini di campo invece che di forza.

Se nell'equazione:

$$F_{el} = k_{el} \frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{23.10}$$

che esprime il modulo della forza elettrostatica con cui interagiscono due cariche puntiformi q_1 e q_2 , poste a distanza r l'una dall'altra, si dividono entrambi i membri per q_2 , si ottiene:

$$\frac{F_{el}}{q_2} = k_{el} \frac{q_1}{r^2} \tag{23.11}$$

in cui il termine a destra dipende dalla distanza tra q_1 e q_2 , ma non dalla carica q_2 .

Ponendo:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_2} = k_{el} \frac{q_1}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \tag{23.12}$$

in cui $\hat{\mathbf{r}}$ è il versore orientato da q_1 a q_2 , Si definisce una grandezza campo, chiamata **vettore campo elettrico**, che, in ogni istante, dipende dal punto in cui si colloca la carica di prova q_2 , ma non dalla carica q_1 (Fig. 23.10).

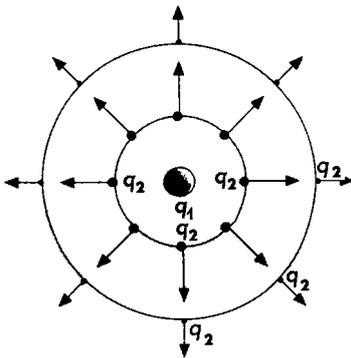


Fig. 23.10. Il campo elettrico creato da una carica q_1 , dipende dalla distanza r tra q_1 e la carica di prova q_2 , ma non dalla carica q_2 .

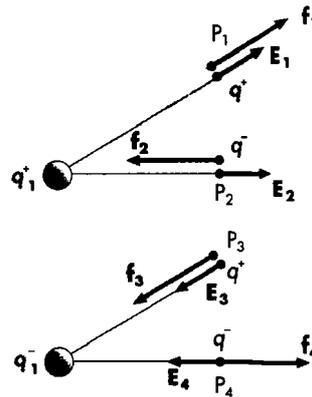


Fig. 23.11. L'equazione $\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$ consente di affermare che \mathbf{F} ed \mathbf{E} sono equidiretti ed equiversi se q_2 è una carica positiva, ma equidiretti e di verso opposto se q_2 è una carica negativa.

Nel Sistema Internazionale il vettore intensità di campo elettrico si misura in newton al coulomb (simbolo: N/C).

Poiché, usando la [23.12], la [23.10] può essere scritta nella forma:

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} \tag{23.13}$$

si può affermare che \mathbf{F} è la forza cui sarà sottoposta una carica q , per effetto del campo elettrostatico \mathbf{E} creato da q_1 .

Se q è una carica positiva, i vettori \mathbf{F} ed \mathbf{E} sono equidiretti ed equiversi, se invece q è negativa il verso di \mathbf{F} sarà opposto a quello di \mathbf{E} (Fig. 23.11). Poiché per convenzione si è stabilito che il verso di \mathbf{E} sia quello della forza che la carica che genera il campo esercita su una carica positiva, si avrà che le linee di forza del campo elettrostatico saranno orientate verso l'interno o l'esterno a seconda che la carica che genera il campo sia negativa o positiva (Fig. 23.12).

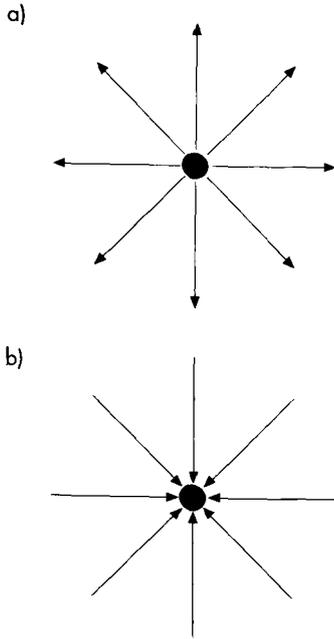


Fig. 23.12. (a) Linee di forza del campo elettrostatico generato da una carica positiva. (b) Linee di forza del campo elettrostatico generato da una carica negativa.

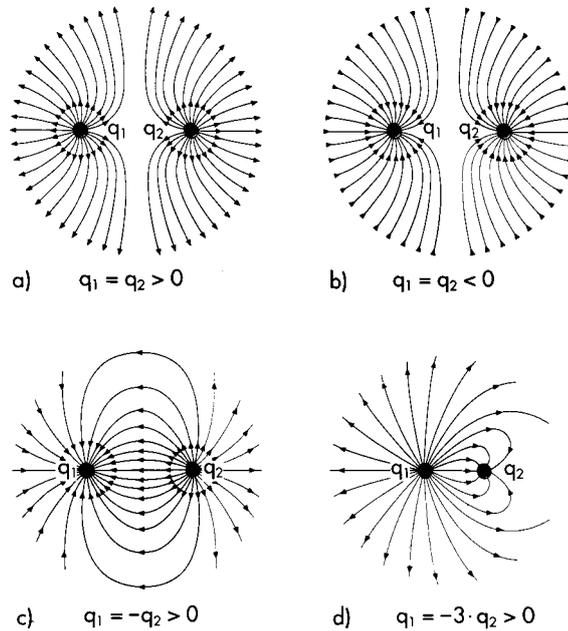


Fig. 23.13. Linee di forza del campo elettrostatico generato da alcune semplici distribuzioni di cariche puntiformi. Si osservi che nei punti vicini a una delle cariche l'intensità del campo elettrico è circa uguale a quella del campo che la carica genererebbe singolarmente.

Ciò comporta, come viene mostrato in Fig. 23.13, che le linee del campo elettrostatico creato da alcune semplici distribuzioni di carica, abbiano una configurazione differente a seconda del segno delle cariche che generano il campo.

Come nel caso del campo gravitazionale, la conoscenza dell'intensità del campo elettrico in un punto permette di prevedere il valore della forza cui sarebbe sottoposta una carica di valore noto posta in quel punto, senza dover minimamente tener conto delle cause che fanno sì che il campo \mathbf{E} abbia quel particolare andamento.

Se, per esempio, si sa che in un punto di un tubo catodico di un apparecchio televisivo il campo elettrico \mathbf{E} ha modulo 10^4 N/C, è possibile affermare che un elettrone di carica $q = -e = -1.602 \times 10^{-19}$ C, sarebbe sottoposto, in quel punto, a una forza \mathbf{F} di modulo $F = eE = 1.602 \times 10^{-15}$ N.

Proprio come nel caso del campo gravitazionale, l'estensione ai corpi reali, e quindi di dimensioni finite, delle leggi che descrivono l'andamento del campo elettrico prodotto da cariche puntiformi, non è scontato, e va verificato caso per caso.

Dal punto di vista teorico è sempre possibile utilizzare il principio di sovrapposizione, cioè determinare il campo elettrico prodotto in un punto P da un corpo carico di dimensioni finite, come somma vettoriale dei campi elettrici prodotti in P da ognuna delle cariche puntiformi in cui la carica complessiva del corpo può essere scomposta. Da un punto di vista operativo, come sempre, le cose sono un poco più complicate, anche perché il comportamento dei corpi in presenza di un campo elettrico, non è sempre lo stesso, come avviene per le masse, ma varia a seconda che i corpi siano *conduttori*, *semiconduttori*, o *isolanti*.

Ciò comporta l'introduzione di ulteriori complicazioni nel modello delle interazioni elettriche che verranno trattate organicamente all'inizio dell'elettromagnetismo (campi statici).

In generale il vettore campo elettrico in un punto P qualsiasi dello spazio è definito come:

$$\mathbf{E}_P = \frac{\mathbf{F}_{el}}{q} \quad [23.13]$$

dove con F_{el} si intende la forza elettrica risultante (generata cioè da tutte le cariche circostanti) e q la carica di prova.

Problemi di fine capitolo

[Costanti fisiche: $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C; $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg; $m_p = m_n = 1.67 \times 10^{-27}$ kg]

23.1. Che valore ha il campo gravitazionale ad una altezza di 160 km sulla superficie della Terra? Quale sarà la forza gravitazionale agente, a quella altezza, su un corpo di massa 10 kg? A quale accelerazione sarà soggetto lo stesso corpo di 10 kg?

23.2. Il Sole e la Luna sono allineati rispetto alla Terra, come in Fig. A:

(a) quanto vale il campo gravitazionale prodotto dalla Luna e dal Sole nel centro della Terra?



Fig. A

(b) quanto vale il campo gravitazionale prodotto dalla Terra e dal Sole nel centro della Luna?

23.3. Sapendo che la Terra ha una massa di 5.98×10^{24} kg e la Luna di 7.35×10^{22} kg calcolare a quale distanza della Terra è nullo il campo gravitazionale originato dalle due masse (si trascurino gli effetti gravitazionali dovuti agli altri corpi celesti).

23.4. Domanda non facile: perché la Luna è così importante per le maree sulla Terra, mentre il Sole no?

23.5. Rappresentare con un grafico la funzione $g = g(h)$ dove g è il modulo del campo gravitazionale e h è l'altezza rispetto al suolo terrestre ($0 < h < 50 \times 10^7$ m).

23.6. Come è possibile suddividere una carica elettrica Q presente su una sfera in due, tre, ..., n parti uguali?

23.7. Quanti elettroni in eccesso sono necessari per avere su una sferetta una carica negativa di 2 C?

23.8. Qual è l'ordine di grandezza del rapporto tra la forza di repulsione coulombiana e la forza di attrazione newtoniana tra due protoni in un nucleo di ferro? Si assuma una distanza di 4.00×10^{-15} m.

23.9. Quali devono essere l'intensità e la direzione di un campo elettrico perché faccia equilibrio al peso di (a) un elettrone; (b) una *particella alfa* (nucleo di elio).

23.10. Nei vertici A e B del triangolo equilatero ABC mostrato nella Fig. B sono poste le cariche $Q_A = -2 \times 10^{-6}$ C e $Q_B = -2 \times 10^{-6}$ C. Calcolare l'intensità del campo elettrico risultante nel punto C , disegnandone direzione e verso.

23.11. Due cariche puntiformi $+q$ e $-4q$ sono poste, rispettivamente, nei punti A e B ad una distanza d :

(a) determinare direzione, verso ed intensità del campo elettrico nel punto medio di AB ;

(b) dimostrare che il campo elettrico è nullo nel punto C appartenente alla retta AB e distante d da A ;

(c) determinare direzione, verso ed intensità del campo elettrico nel punto D posto sulla retta passante per B e perpendicolare alla retta AB , alla distanza $2d/\sqrt{3}$ da A .

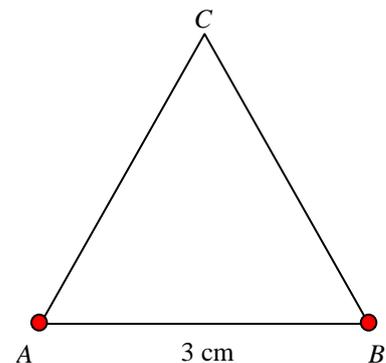


Fig. B

23.12. Una gocciolina di olio di densità 0.822 g/cm³, portante una piccola carica e avente raggio uguale 3×10^{-5} cm, viene posta tra due placche distanti tra loro 0.5 cm. Calcolare la carica della gocciolina, sapendo che essa rimane in equilibrio quando fra le placche è presente un campo elettrico $E = 2.8 \times 10^3$ N/C. [R. 3.2×10^{-19} C]

23.13. Un elettrone che si muove con una velocità $v_0 = 5.0 \times 10^6$ m/s viene sparato all'interno di un campo elettrico uniforme di intensità 1.0×10^3 N/C, nella stessa direzione e verso (il campo gravitazionale è trascurabile): quale sarà l'accelerazione dell'elettrone?

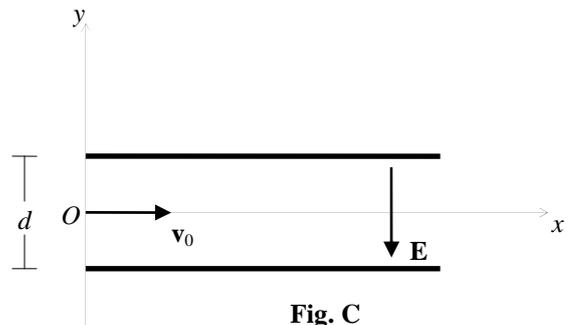
23.14. Nella Fig. C è mostrato un protone di massa m_p e carica e , iniettato, nel punto O , perpendicolarmente ad un campo uniforme \mathbf{E} , con velocità \mathbf{v}_0 e nel vuoto:

(a) se ne descriva il moto (ovviamente nella regione interna alle piastre cariche) trovando anche l'equazione della traiettoria (si trascuri la forza peso).

(b) chiamando deflessione lo spostamento verticale del protone, cioè l'ordinata della posizione del protone; conoscendo:

$$E = 1.2 \times 10^4 \text{ N/C}, v_0 = 2.6 \cdot 10^7 \text{ m/s}, L = 1.5 \text{ cm},$$

(c) si calcoli la deflessione prodotta dal campo elettrico sul protone all'uscita dalle piastre.



23.15. Tra due lamine parallele caricate di segno opposto e

distanti 4 cm si stabilisce un campo elettrico di intensità $E = 4.0 \times 10^4 \text{ N/C}$. Un elettrone si stacca dalla lamina carica negativamente nel medesimo istante in cui un protone si stacca da quella positiva: (a) A quale distanza dalla lamina positiva essi si incrociano? (b) In che rapporto stanno le rispettive velocità quando essi urtano le lamine opposte?

23.16. Un elettrone viene posto in un campo elettrico uniforme di intensità $E = 2.0 \times 10^{-3} \text{ N/C}$ e lasciato libero. Dire come si muove l'elettrone. Dopo 5 ms il campo viene bruscamente invertito e la sua intensità aumentata di un fattore 10^3 . A partire da questo istante calcola dopo quanto tempo l'elettrone inverte il moto e la distanza che percorre in questo intervallo di tempo.

23.17. Nel modello di Bohr dell'atomo di idrogeno si considera che l'elettrone descriva un'orbita circolare intorno al protone che costituisce il nucleo. Il raggio dell'orbita è $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$. Qual è il periodo di rivoluzione dell'elettrone attorno al protone?

23.18. Un elettrone, una particella alfa, un neutrone ed un protone vengono sparati con la stessa velocità iniziale in un campo elettrico di intensità E , generato da due piastre parallele caricate uniformemente con cariche di segno opposto e di lunghezza L . Sapendo che v_0 è perpendicolare alle linee di forza del campo elettrico e trascurando le interazioni gravitazionali confronta la deflessione verticale operata dal campo sulle 4 particelle considerate dopo che esse hanno attraversato la regione tra le due piastre, ordinandole, poi, in base alla deflessione subita.

23.19. Dire, giustificando, tramite quali forze possono interagire: (a) un protone ed un neutrone; (b) un elettrone ed un neutrone; (c) un elettrone ed un protone.