

Dal Quark al Quasar

Pensieri di Fisica, sulla Natura e sull'Universo

Campi e onde: la luce

Domenica 15 gennaio 2006

Caro Amico,

abbandoniamo per un po' di tempo l'argomento che ha costituito il tema delle nostre epistole precedenti, ovvero la Meccanica Quantistica, per rivolgerci ad un altro tema che so che ti sta a cuore, e che tra l'altro ci permetterà di tornare su un'idea a cui avevamo solo accennato in passato senza averla approfondita: il tema della luce. Anche esso apre un'infinità di spunti di riflessione, per la scoperta di cose nuove e intriganti, e ci coinvolgerà nuovamente per un certo numero di epistole. Come sempre, la promessa è quella di discutere di idee ed esperimenti, lasciando "dietro le quinte" tutto l'apparato matematico che sarebbe necessario per affrontare l'argomento in maniera completa, ma senza rinunciare al rigore dell'esposizione e senza scadere nella banalità della trattazione.

In realtà, prima di parlare della luce, facciamo un salto indietro nel tempo, al XVII secolo, quando Newton stava formulando, oltre che i rudimenti del calcolo infinitesimale (in concorrenza con Leibniz, e forse un po' in ritardo rispetto a lui), anche la sua teoria della gravitazione universale. La formulazione da lui proposta, ricca e affascinante, introduceva però uno schema interpretativo sconcertante: due masse gravitazionali (ad esempio il Sole e la Terra) si attraggono reciprocamente (per via di quella che chiamiamo *forza di gravità*) attraverso un meccanismo di *azione a distanza*. Siamo abituati a pensare che per trasmettere una forza ad un corpo sia necessario un *contatto* materiale, o diretto, o attraverso un mezzo che possa trasferire questa forza: ad esempio col piede colpiamo la palla (contatto diretto), con la mazza da golf colpiamo la pallina (la mazza da golf fa da tramite tra la nostra mano e la pallina). Il fatto che una forza possa essere trasmessa da un corpo ad un altro senza che avvenga un contatto è una cosa della quale abbiamo sì esperienza diretta (pensiamo a due calamite che si respingono o si attraggono a seconda di come sono orientati i loro poli), ma che mantiene in sé un'aura di mistero. Newton stava sfidando quello che allora era il buon senso comune (e 2000 anni di filosofia prima di lui) dicendo che due masse gravitazionali potevano scambiarsi una forza, *istantaneamente*, e *a distanza*, senza che vi fosse contatto meccanico tra di esse.

Inutile dire che anche quando questo schema interpretativo ha iniziato ad essere accettato ha comunque lasciato dietro di sé un senso generale di insoddisfazione. Nei centocinquanta anni successivi la Meccanica ha subito una profonda e ricca riformulazione (che sfocerà nella Meccanica Analitica, della quale ci occuperemo senz'altro in futuro), che ha permesso di sostituire il concetto di *azione a distanza* con un altro, più ricco, più generale e più aperto a sviluppi teorici successivi: quello di *campo*.

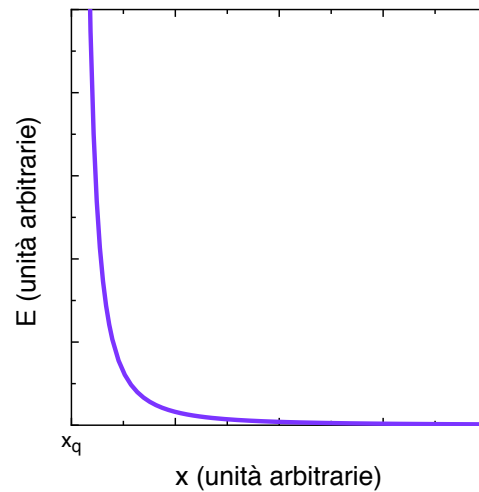
Definire l'idea di *campo* è una delle cose più difficili di tutta la Fisica. Benché esso matematicamente sia ben definito e abbia delle proprietà molto interessanti e fondamentali, qui vogliamo cercare di capire quale sia il suo significato fisico. Possiamo dire, per iniziare, che esso è una *proprietà dello spazio*. Quando Newton pensava all'attrazione gravitazionale tra Sole e Terra immaginava uno spazio tridimensionale (che oggi sappiamo essere dotato di proprietà molto particolari, ad esempio quello di avere una *metrica*, ovvero la possibilità di misurare in esso delle distanze, ma torneremo ad occuparci di questo quando parleremo di Teoria Generale della Relatività) dotato di sole proprietà geometriche (in particolare era dotato di un'estensione infinita in tre direzioni ortogonali). Nessun'altra proprietà era di competenza dello spazio, che era solo un contenitore per il Sole e la Terra, che interagivano reciprocamente scambiandosi una forza con un'azione a distanza. La formulazione analitica della Meccanica ha permesso di soppiantare il concetto di azione a distanza arricchendo la struttura dello spazio tridimensionale in cui sono immersi i corpi. Esso, infatti, è dotato non solo di proprietà geometriche, ma anche di proprietà fisiche che prendono il nome generico di *campi*. Un campo è quindi una proprietà dello spazio che viene modificata da un corpo fisico immerso in esso dotato di certe caratteristiche. Ad esempio il Sole ha la caratteristica di essere dotato di una massa, e in virtù di questo modifica la proprietà *campo gravitazionale* dello spazio in cui è immerso, *istantaneamente* e *ovunque* (secondo Newton); la Terra, trovandosi in un punto del medesimo spazio, ed essendo anch'essa dotata di una massa, avvertirà nel punto in cui si trova non già un'azione a distanza dovuta al Sole, ma un certo *valore* (in realtà è un *vettore*, ma qui ora non ci interessa) per la proprietà *campo gravitazionale*, e l'interazione tra la massa della Terra e il campo gravita-

zione nel punto dello spazio in cui essa si trova (e che nel nostro Universo a due corpi è dovuto al Sole) fa sì che la Terra sia sottoposta ad una forza diretta verso il Sole. Naturalmente siccome anche la Terra ha una sua massa, anch'essa, *istantaneamente e ovunque* (sempre nell'approssimazione di Newton), modifica la proprietà *campo gravitazionale* dello spazio, e anche il Sole pertanto avvertirà la presenza della Terra non già direttamente, ma attraverso la perturbazione del campo gravitazionale da essa causato, e con un meccanismo analogo subirà una forza diretta verso la Terra. Con questo schema interpretativo si rimpiaccia il meccanismo di azione a distanza usato per la prima volta da Newton.

È chiaro che si tratta di un modello assunto valido a priori. Nel formulare la Meccanica si decide, per ragioni di comodità (dovute anche alla potenza degli strumenti matematici che stanno dietro questi concetti), che i campi siano lo schema interpretativo più adatto per l'interpretazione teorica dei fenomeni sperimentali, e sarà naturalmente la correttezza dell'analisi teorica e la sua aderenza coi dati sperimentali a portarci a mantenere questo schema interpretativo senza sostituirlo con un altro più efficace.

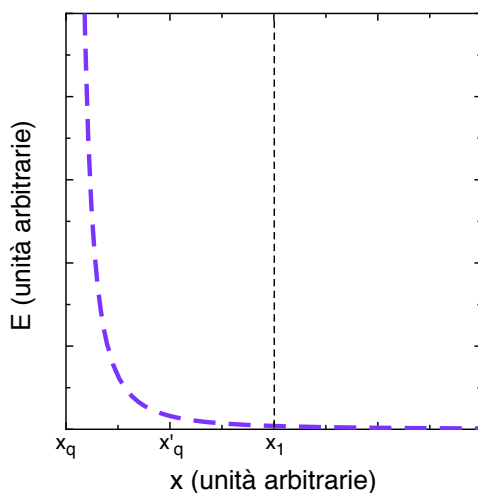
La potenza e la versatilità del concetto di campo, insieme con l'accuratezza con cui permette di descrivere i risultati sperimentali, hanno fatto sì che esso sia diventato un concetto ubiquitario in tutta la Fisica anche contemporanea, facendolo uscire dai confini della Meccanica in cui è nato, e facendolo ad esempio entrare entro quelli dell'elettromagnetismo di cui, finalmente, iniziamo a parlare.

In maniera assolutamente analoga a quella con cui descriviamo l'interazione gravitazionale tra due corpi celesti possiamo descrivere l'interazione elettrostatica tra due particelle elettricamente cariche. Nella figura qui di fianco, ad esempio, possiamo vedere una particella elettricamente carica q trovarsi nel punto x_q . Lo spazio dovrebbe essere tridimensionale, ma per ragioni di semplicità di rappresentazione lo semplifichiamo in uno spazio ad una sola dimensione, lineare. Nel grafico è rappresentato il *campo elettrico E* (talvolta anche detto *elettrostatico*) generato dalla particella q nello spazio circostante. Esso è dato dalla seguente espressione, che ne individua il modulo (essendo \mathbf{E} un vettore, la direzione sarà radiale rispetto alla particella q e il verso sarà, convenzionalmente, in allontanamento da q se essa ha carica elettrica positiva e in avvicinamento se essa a carica elettrica negativa):

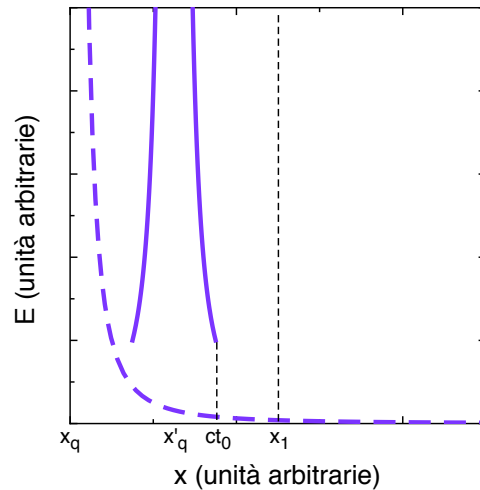


$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x - x_q)^2}$$

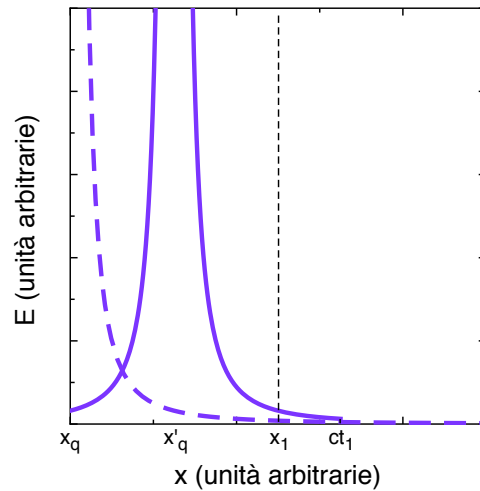
dove ϵ_0 è una costante naturale (che prende il nome di *costante dielettrica* o *permittività dielettrica* del vuoto) che vale circa $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$, mentre $(x - x_q)^2$ è la distanza di un generico punto x dello spazio dal punto x_q in cui si trova la carica q . Ora immaginiamo di poter spostare *istantaneamente* la particella q dal punto x_q al punto x'_q . Poniamoci il problema di determinare quanto vale il campo elettrico in un certo punto x_1 che rappresentiamo nella figura qui di fianco, insieme con la nuova posizione della particella q e l'andamento del campo elettrico *precedente* allo spostamento della particella. È naturale che non dovremo fare altro che traslare la curva che rappresenta il campo elettrico di modo che sia centrata su x'_q anziché su x_q , ma il bello del concetto di campo, rispetto a quello di azione a distanza, è che è più generale, e anche se lo spostamento della particella q è avvenuto istantaneamente, possiamo generalizzare il problema e assumere che la proprietà *campo elettrico* aggiorni il suo valore nello spazio non già istantaneamente, ma richieda un certo tempo affinché la perturbazione si *propaghi*. Chiamiamo c la velocità a cui si propaga nello spazio la perturbazione del campo elettrico, e poniamoci ad un istante di tempo t_0 (misurato a partire dall'istante $t = 0$ in cui abbiamo spostato la particella q) tale per cui $ct_0 < (x_1 - x'_q)$.



La situazione è rappresentata nella figura qui di fianco. La curva tratteggiata rappresenta ancora il campo elettrico che la particella aveva generato nello spazio quando si trovava in x_q , mentre la linea continua rappresenta il campo elettrico dovuto alla particella che ora si trova in x'_q . Se però, come dicevamo, il campo elettrico ha una velocità di propagazione c , allora all'istante t_0 solo le regioni di spazio che distano *al massimo* ct_0 da x'_q sentiranno il nuovo valore del campo elettrico. Il punto che si trova in x_1 ancora sarà caratterizzato dallo stesso valore di campo elettrico che aveva prima dello spostamento di q , perché in x_1 la perturbazione del campo elettrico ancora non è arrivata. Solo per tempi t_1 tali per cui $ct_1 > (x_1 - x'_q)$ anche il punto in x_1 avvertirà, tramite il mutato valore del campo elettrico, lo spostamento di q in x'_q come indicato nell'altra figura qui a destra.



Ecco un primo vantaggio dell'adottare il concetto di campo rispetto a quello di azione a distanza: diventa molto più semplice generalizzare la descrizione del problema ammettendo anche la possibilità che una variazione delle proprietà della *sorgente* del campo (in questo caso un suo spostamento) si *propaghi* a tutto lo spazio non istantaneamente, ma con una certa velocità. La possibilità offertaci da questo strumento concettuale di prendere in considerazione questa eventualità è fondamentale, perché sperimentalmente si verifica in effetti che nel caso elettromagnetico (ma anche in quello gravitazionale) la velocità di propagazione di un campo non è infinita, ma assume un valore finito di circa $2.9979 \cdot 10^8$ m/s (che poi sono quei *circa* 300.000 km/s che tutti conosciamo come valore della velocità della luce nel vuoto). Perché il campo elettrico (e anche quello gravitazionale, ma il perché di questo siamo costretti a trattarlo un'altra volta) si propaga proprio a questa velocità e non ad un'altra? Una risposta non c'è, è un dato sperimentale. La velocità della luce nel vuoto c è una delle *costanti universali*; essa potrebbe, in linea di principio, assumere un valore *qualsunque*, e nessuna delle leggi note della Fisica cesserebbe di valere se essa avesse un valore diverso da quello che ha; semplicemente, nel nostro Universo, c ha questo valore, è un dato. È interessante notare, come nota a margine, che vista l'importanza di c , vista l'universalità del suo valore (parliamo infatti di *costanti universali* riferendoci a grandezze fisiche che ipotizziamo, non senza una certa dose di ragion veduta, che abbiano lo stesso valore in ogni parte dell'Universo), che il suo valore numerico non è un numero semplice. Questo dipende dalle scelte fatte per la determinazione di quanto è lungo un metro e di quanto tempo dura un secondo, determinazioni che hanno ragioni storiche e scientifiche che, a posteriori, si potrebbero rivedere per dare una maggiore razionalità al sistema di unità di misura e un valore numerico più semplice alle costanti universali; in effetti, in Fisica Nucleare e non solo si usa spesso il cosiddetto *sistema naturale* delle unità di misura, in cui si stabilisce che c vale 1 e di conseguenza vengono ridefinite le unità di lunghezza e di tempo... ma stiamo divagando.



Tutto questo ragionamento che abbiamo fatto sul campo elettrico \mathbf{E} avremmo potuto farlo sul campo gravitazionale (che c'entra? Apparentemente poco, ma quando parleremo di Teoria Generale della Relatività c'entrerà eccome!), ma anche sul campo magnetico \mathbf{H} . Non abbiamo definito che cosa sia un campo magnetico, da che cosa sia generato, né come sia esprimibile in formule, e non lo faremo ora, non è necessario. Abbiamo comunque tutti un'esperienza diretta di che cosa sia, ad esempio attraverso le calamite (che più propriamente dovremmo chiamare *magneti permanenti*), l'ago della bussola ecc. Diciamo che:

- il campo magnetico \mathbf{H} è una proprietà dello spazio, esattamente come il campo elettrico \mathbf{E} , e si propaga in esso anche lui a velocità c ;
- il campo magnetico \mathbf{H} è generato, almeno al livello di approfondimento che ci interessa ora, da *cariche elettriche in moto*; l'esempio più ovvio di una carica elettrica in moto è una corrente elettrica (ad esempio in un filo di rame), ma è anche un elettrone in un orbitale atomico (benché non siamo in gra-

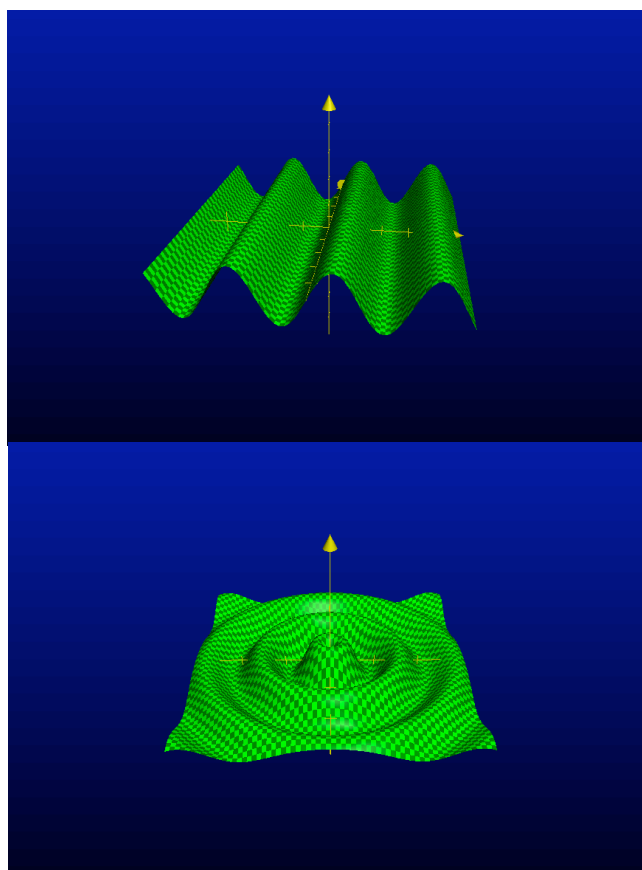
do di descriverne la traiettoria, per le ragioni che abbiamo già discusso, sappiamo che è in movimento, perché se fosse fermo violeremmo il principio di indeterminazione di Heisenberg), ed è anche la nostra particella carica q che abbiamo mosso dal punto x_q al punto x'_q .

Quest'ultimo aspetto è molto interessante: avevamo una carica elettrica in un certo punto dello spazio, essa generava un certo campo elettrico; poi l'abbiamo spostata, e la perturbazione del campo elettrico si è propagata nello spazio con velocità c per riflettere la nuova posizione della particella. Ma per il fatto stesso che essa è una particella carica ed è stata in movimento, essa ha generato anche un campo magnetico (come questo possa avvenire è un argomento che riguarda le Equazioni di Maxwell, di cui parleremo senz'altro in futuro), il quale si propaga nello spazio ancora a velocità c in maniera assolutamente analoga a quanto ha fatto il campo elettrico, pur avendo un'espressione matematica diversa da questo. La particella carica si ferma nella sua nuova posizione, e non essendo più in movimento cessa di generare anche il campo magnetico; tuttavia, *durante il movimento*, ha prodotto un campo \mathbf{H} che si è propagato progressivamente nello spazio.

E se la particella carica non smettesse mai di muoversi? Se essa, in virtù di qualche meccanismo strano potesse continuare a muoversi indefinitamente, ad esempio oscillando di moto armonico attorno ad una posizione di equilibrio, un po' come una massa collegata ad una molla che striscia su un piano senza attrito? (Ti ricorda qualche cosa questo modello, vero?) In questo caso si creerebbe un fenomeno molto interessante: oscillando di moto armonico attorno ad una posizione di equilibrio, la particella carica genererebbe una perturbazione del campo elettrico sinusoidale nel tempo che si propaga nello spazio circostante con velocità c ; associata ad essa, in virtù del fatto che stiamo parlando di una particella elettricamente carica in moto, avremmo anche una perturbazione del campo magnetico, anch'essa sinusoidale nel tempo, anch'essa propagantesi con velocità c nello spazio circostante. Questa perturbazione sinusoidale di \mathbf{E} ed \mathbf{H} prende il nome di *campo elettromagnetico* o *onda elettromagnetica*, ed è il modo con cui si propagano le onde radio e, naturalmente, la luce. Quale sia il meccanismo responsabile dell'oscillazione armonica continua della carica elettrica che genera l'onda elettromagnetica sarà l'argomento di una prossima epistola.

Un'onda elettromagnetica è costituita da un campo elettrico e un campo magnetico variabili sinusoidalmente nel tempo lungo direzioni perpendicolari, ed entrambe sono perpendicolari alla direzione di propagazione; così, nello spazio tridimensionale, un'onda elettromagnetica può propagarsi lungo l'asse z ed avere il campo elettrico oscillante sinusoidalmente lungo la direzione dell'asse x e quello magnetico oscillante sinusoidalmente lungo la direzione dell'asse y . Un'onda siffatta è rappresentata nella figura qui di fianco: l'asse orientato da sinistra a destra è quello di propagazione, mentre l'onda è rappresentata sotto forma del suo campo elettrico \mathbf{E} , che oscilla lungo l'asse diretto dal basso verso l'alto; non è rappresentato, perché renderebbe complicato visualizzare l'immagine, il campo magnetico \mathbf{H} , che devi pensare analogo al campo elettrico ma oscillante lungo l'asse che va da te verso il foglio. Questo tipo di onda elettromagnetica prende il nome di *onda piana*, perché le *creste* o le *valli* del campo elettrico (o del campo magnetico) costituiscono dei piani che si susseguono ad intervalli regolari, secondo la periodicità dell'onda elettromagnetica, ovvero la *frequenza* ν di oscillazione della carica elettrica generatrice dell'onda attorno alla sua posizione di equilibrio.

L'onda piana è in realtà solo un'approssimazione (molto comoda) di un'onda sferica, l'analogo di quello che si produce in uno stagno quando si getta un sasso, e rappresentata nell'altra figura qui di fianco. Un'onda sferica è proprio il tipo di onda elettromagnetica generata da una



carica elettrica in moto armonico attorno ad una posizione di equilibrio. Nuovamente abbiamo scelto di rappresentare l'onda solo attraverso il suo campo elettrico, per semplicità grafica, e la direzione di propagazione è ora quella radiale rispetto all'origine degli assi. Un'onda piana approssima molto bene un'onda sferica a *grande distanza rispetto alla sorgente*, là dove i fronti d'onda sferici hanno una curvatura così piccola da essere approssimabili con fronti d'onda piani. C'è anche un'altra circostanza, questa volta non approssimata, in cui si ha occasione di trattare con onde piane, ma il discorso è così vasto da richiedere l'apertura di un altro capitolo, di cui ci occuperemo la prossima volta.

Concludiamo tornando finalmente alla luce: essa è un'onda elettromagnetica e non differisce dalle onde radio o dai raggi X giusto per fare degli esempi, se non che per qualche motivo i nostri occhi sono in grado di percepirla. Il "qualche motivo" risiede nella sua frequenza ν . La luce visibile ha infatti frequenze che variano tra circa $3.75 \cdot 10^{14}$ Hz e $7.50 \cdot 10^{14}$ Hz, che in virtù della relazione $\lambda \nu = c$ corrispondono a *lunghezze d'onda* λ di circa 800 nm per il colore rosso (ad una delle estremità dello spettro visibile) e di circa 400 nm per il colore blu (all'altra estremità dello spettro visibile), da confrontare ad esempio con le frequenze di $10^5 \div 10^8$ Hz (corrispondenti a lunghezze d'onda da 3 km a 3 m) tipiche delle onde elettromagnetiche per trasmissioni radiofoniche.

A presto,

Marco