

4 Fine del programma meccanicista: il CAMPO

4.1 La luce è un'onda trasversale

Abbiamo visto che il modello preferito dai meccanicisti per la luce si mostra incoerente con gli esperimenti. E' certo un fallimento, ma del resto anche un'onda è un fenomeno di tipo meccanico. Avevamo concluso la scorsa lezione asserendo che il mezzo di propagazione dell'onda luminosa doveva essere l'**etere**, perché la luce si trasmette anche in assenza di aria e, in assenza di aria l'unico mezzo che permane è l'etere, e perché un'**onda meccanica** si propaga c'è bisogno di un mezzo che oscilli e lungo il quale l'oscillazione possa trasmettersi. Riprendiamo da qui seguendo ancora Einstein, *ibidem*, pag. 117.

*Tutti i fenomeni ottici fin qui considerati parlano in favore della teoria ondulatoria [...] guidati dal punto di vista meccanicistico ci rendiamo conto che c'è una grossa questione da chiarire, e cioè quella delle **proprietà meccaniche dell'etere**.*

*Per risolvere questo problema è essenziale sapere se le onde luminose dell'etere sono **longitudinali** o **trasversali** [cfr pag. 30]. In altre parole: la luce si propaga forse come il suono [onda longitudinale]? L'onda luminosa è forse dovuta a variazioni di densità del mezzo, per cui l'oscillazione delle particelle eteree si effettua nella stessa direzione della propagazione dell'onda? O, al contrario, somiglia forse l'etere ad una "gelatina elastica", vale a dire ad un mezzo in cui non possono prodursi altro che onde trasversali, cosicché le particelle oscillano in direzione perpendicolare a quella della propagazione dell'onda?*

*Prima di ricorrere all'esperimento domandiamoci quale sarebbe la **risposta preferibile**. E' ovvio che ci potremmo reputare fortunati se le onde luminose fossero longitudinali: in tal caso le difficoltà inerenti alla rappresentazione di un etere meccanico sarebbero assai minori. Potremmo infatti figurarci l'etere per **analogia** con la rappresentazione meccanica del **gas**, la quale ci permette di spiegare tranquillamente la propagazione delle onde sonore.*

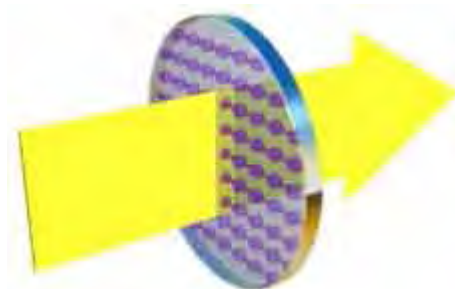
Riuscirebbe assai più difficile raffigurarci un etere suscettibile di trasmettere onde trasversali. Immaginare un mezzo, tipo gelatina, composto di particelle atte a propagare onde luminose trasversali, è un compito tutt'altro che facile.

Ma madre natura poco si cura delle nostre difficoltà. Fu in questo caso clemente con i fisici che tentavano d'interpretare tutti i fatti dal punto di vista meccanicistico? Per rispondere a questa domanda dobbiamo discutere alcuni nuovi esperimenti.

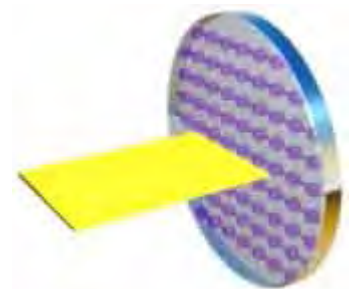
Per realizzarli servono e bastano: una lavagna luminosa e dei foglietti di materiale sintetico scuri... Il principio con il quale vengono costruiti è lo stesso utilizzato da alcuni occhiali da sole, non di moda, ma il cui nome deriva appunto dai filtri che utilizzano: i **Polaroid**.

Se sovrappongo, facendoli coincidere, due filtri Polaroid sul piano della lavagna luminosa e ruoto lentamente quello posto sopra, avviene un fenomeno sorprendente: a seconda della posizione che il filtro assume rispetto all'altro, l'immagine proiettata sullo schermo cambia! Va da un rettangolino grigio (perciò in quella posizione la luce della lampada passa in gran parte attraverso i filtri) ad un rettangolino nero (in quella posizione, la luce della lampada viene quali integralmente bloccata dai filtri!).

*Senza addentrarci nei dettagli di quest'esperimento e di altri simili [che riprenderemo più calma in un'altra lezione] ci porremo la seguente domanda: può un fenomeno come questo spiegarsi ammettendo che le onde luminose siano longitudinali? Nel caso di onde longitudinali le particelle di etere si muoverebbero in maniera **simmetrica** attorno all'asse lungo il quale ho ruotato il Polaroid.*



Per poter ragionare con la tua testa di do qualche informazione in più: un filtro Polaroid puoi immaginarlo come composto di una serie di fessure infinitesimali



una accanto all'altra, parallele. Lo "vedi" che se direzione di oscillazione e direzione di propagazione fossero parallele la luce passerebbe tranquillamente?

Fenomeni come quello che hai visto, cioè fenomeni di **polarizzazione**, si possono spiegare solo ammettendo che la **luce** si propaghi mediante **onde trasversali**.

Einstein, ibidem, pag. 119: *Cioè dobbiamo assumere il modello di etere "tipo gelatina" Ciò è assai increscioso! Dobbiamo prevedere d'imbatterci in difficoltà insormontabili nel tentare di costruire un modello meccanico di etere...*

Prima di proseguire il nostro cammino in direzione dell'obiettivo che tali lezioni portano come "titolo", approfondiamo un po' meglio **il ruolo dell'esperimento nella fisica**.

Vi mostrerò dei filmati un po' datati (risalgono al 1960 anche se sono stati rimasterizzati nel 2005), ma di grande qualità: i professori che ci guideranno nella comprensione degli argomenti oggetto dei filmati sono infatti professori di illustri Università americane.

Vedrete innanzitutto un esperimento di conferma della **legge di Coulomb**, eseguito dal Prof. Eric Rogers dell'Università di **Princeton**, e poi un filmato un po' complesso che mostra come fenomeni apparentemente differenti possano essere tutti ascrivibili ad un medesimo modello: quello delle **onde elettromagnetiche**: già molti di voi a tale modello hanno ricondotto anche la luce, no? Questa serie di esperimenti vengono illustrati dal Prof. S. Wolga, del **MIT** (Massachusetts Institute of Technology).

Del secondo filmato traccio qui di seguito le linee guida in modo che le tante informazioni che riceverete non vadano disperse. Confrontatele con i vostri appunti.

Tutte le onde elettromagnetiche hanno in comune i seguenti aspetti caratteristici (caratteristici al punto che attribuiremo lo *status* di onde elettromagnetiche a tutti i fenomeni che tali caratteristiche manifesteranno!):

- hanno origine da **cariche accelerate**
- sono **onde** (quindi come tutte le onde **diffrangono** e **interferiscono**) **trasversali** (cioè soggette a fenomeni di **polarizzazione**)
- hanno la stessa **velocità (la velocità della luce)**

Gli esperimenti che vi verranno illustrati mostrano come le onde radio, le microonde, l'infrarosso, la luce visibile, l'ultravioletto, i raggi X siano tutte onde elettromagnetiche. Cosa le distingue le une dalle altre? Per quale motivo continuiamo a chiamarle con nomi differenti? I tratti distintivi sono la **lunghezza d'onda** e la **frequenza** o, specularmente, il

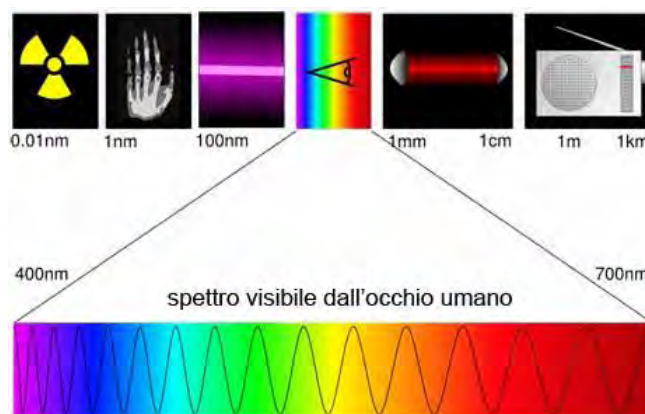
periodo: ricordi? $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$, quindi, fissata la velocità, lunghezza d'onda e periodo sono direttamente proporzionali e frequenza e lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali.

La famiglia delle onde elettromagnetiche viene chiamato **spettro elettromagnetico**.

Lo schema qui a fianco mostra come ciascun *tipo* di onda, in base alla sua lunghezza d'onda, si collochi all'interno dello spettro. La parte relativa alla luce visibile è ingrandita per permetterti di conoscere la lunghezza d'onda corrispondente, almeno, ai colori "limite": il violetto e il rosso.

Un **nm** è un **nanometro** e corrisponde a 10^{-9} metri (cioè un milionesimo di millimetro)

A "sinistra" del violetto ci sono: l'ultravioletto, i raggi X e i raggi gamma, a "destra" del rosso ci sono: l'ultrarosso, le microonde e le onde radio.

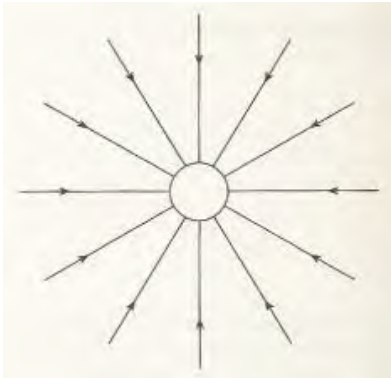


4.2 Il campo come rappresentazione

Einstein *ibidem*, pag. 125. Durante la seconda metà del XIX secolo idee nuove e rivoluzionarie permearono la fisica e aprirono il varco a nuovi criteri filosofici, in contrasto con l'interpretazione meccanicista. I lavori di Faraday, Maxwell e Hertz condussero allo sviluppo della fisica moderna, alla creazione cioè di nuovi modelli della realtà e quindi di nuove immagini della realtà stessa.

I nuovi concetti sorsero dallo studio dei fenomeni elettrici, ma riesce più facile presentarli appoggiandoci alla meccanica: seguiremo perciò un filo logico piuttosto che cronologico.

Sappiamo che due punti materiali si attirano mutuamente e che la forza di attrazione diminuisce col quadrato della distanza. Possiamo rappresentare questo fatto in modo nuovo, ancorché non si scorga subito il vantaggio che ne può derivare

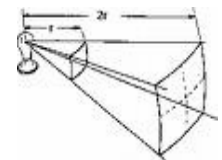


Il piccolo cerchio del disegno rappresenta un corpo dotato di attrazione, poniamo il Sole. In realtà il nostro diagramma dev'essere considerato come un modello nello spazio e non come un disegno nel piano. Pertanto il nostro cerchietto è una proiezione ortogonale di una sfera; abbiamo detto il Sole. Un corpo qualsiasi, il cosiddetto **corpo di prova**, collocato ovunque in vicinanza del Sole, ne subirà l'attrazione lungo la linea congiungente i centri rispettivi.

Cosicché le frecce del nostro disegno indicano direzione e verso della forza attrattiva del Sole, per posizioni diverse del corpo di prova. Diremo che queste sono **linee di forza del campo**

gravitazionale. Per ora tutte le linee di forza o, in una parola, il campo, stanno ad indicare soltanto come si comporterebbe un corpo di prova collocato ovunque in prossimità della sfera-Sole.

Tali linee sono perpendicolari alla superficie della sfera e, poiché divergono dallo stesso centro, sono più dense vicino alla sfera e lo divengono sempre meno con la maggior lontananza. Di più: si dimostra che la diradazione va proprio con l'inverso del quadrato della distanza dal centro: quando la distanza dalla sfera aumenta del doppio o del triplo, la densità delle linee è rispettivamente quattro, nove volte inferiore; ciò beninteso non nel piano da disegno ma nel corrispondente modello spaziale, come mostrato nel disegno a fianco.



Le nostre linee servono pertanto ad un doppio scopo: oltre a mostrare verso e direzione della forza raffigurano anche l'andamento della sua intensità con la distanza.... La legge della gravitazione può pertanto leggersi in tale disegno, con la chiarezza pari a quella della definizione a parole o mediante legge matematica.

Questa rappresentazione del campo è chiara e interessante: sembra fornire un buon modello del fenomeno MA induce a pensare che la propagazione dell'azione attrattiva dal Sole al benedetto corpo di prova sia **istantanea**, cioè che il segnale si propaghi con velocità infinita! Iniziano a suonare campanellini d'allarme? Non abbiamo parlato ancora di **velocità limite**, in fisica, però vi renderete conto che una velocità infinita è inconcepibile... Eppure se ne stava lì in agguato già da molto tempo questa possibilità... Vedrete

Bisogna anche dire però, a onor del vero, che anche partendo dalla legge di Newton potevamo incappare in questa conclusione: il tempo non compare affatto in tale legge...

Insomma è un problema che ora sappiamo esserci e che va risolto. Dopo: andiamo avanti...

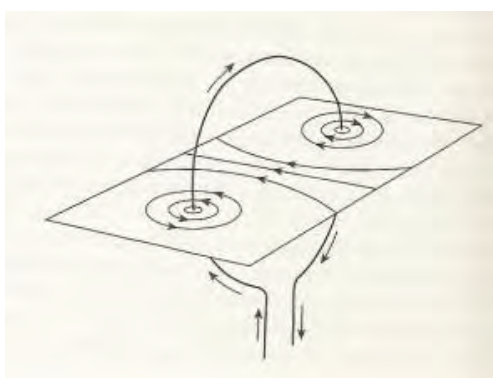
Abbiamo riparlato della Legge di Gravitazione Universale non in sé e per sé: la rivisitazione che fa la Fisica Moderna di tale legge è fuori dalla nostra portata: vi dico solo che è oggetto e soggetto della Relatività Generale, che non è nei nostri programmi. Ora ci serviva per introdurre un modello nuovo, quello del campo, che, risolto il problemino della propagazione del segnale, vedremo prestarsi molto bene agli afflati unificatori di Einstein e

compagni: consente infatti una spiegazione molto elegante e semplificata, rispetto a quelle possibili mediante fluidi imponderabili, di vari fenomeni.

Cominciamo con il rivisitare gli esperimenti che avevano messo in grave imbarazzo l'interpretazione meccanicista. Einstein, *ibidem*, pag. 127

Avevamo una corrente circolante in un filo piegato a cerchio. Avevamo inoltre un ago magnetico al centro del circuito. Appena la corrente cominciava a circolare si manifestava una nuova forza agente sul polo magnetico e diretta perpendicolarmente al piano del circuito, ossia a quella linea congiungente il filo e il polo magnetico. La stessa forza si manifesta anche se alla corrente si sostituisce una carica elettrica in moto circolare nel qual caso, come dimostrò Rowland, l'intensità della forza dipende dalla carica. Questi fatti sperimentali sono incompatibili con il criterio filosofico secondo cui tutte le forze debbono agire lungo la congiungente e non possono dipendere che dalla distanza.

La definizione esatta di come la forza di una corrente agisca su un polo magnetico è assai intricata: molto più complicata della definizione delle forze gravitazionali. Possiamo tuttavia raffigurarci le azioni in gioco come abbiamo fatto per le forze di gravitazione.



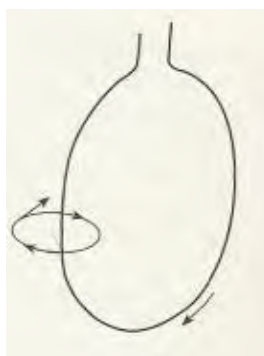
Il nostro quesito è il seguente: con quale forza agisce la corrente su un polo, ovunque situato purché vicino ad essa? La risposta è nel disegno seguente:

*La freccia lungo il circuito rappresenta il verso della corrente, tutte le altre linee sono **linee di forza del campo magnetico generato dalla corrente**. Cioè, come già prima, ci danno punto per punto (anche se abbiamo segnato solo quelle presenti su una sezione piana), direzione e verso di azione su un aghetto magnetico di prova posto nello spazio circostante il filo: in ogni punto la direzione del vettore forza è tangente*

alla linea di forza in quel punto.

Vorreste sapere come si deduce (quindi del vettore forza) corrente? Dovete immaginare di filo percorso da corrente, con il vostro dito vi diranno questo metodo dà un'idea chiara

Desumendo dal disegno il nuovo alla conclusione che questa qualsiasi linea congiungente il filo circolo è sempre perpendicolare al

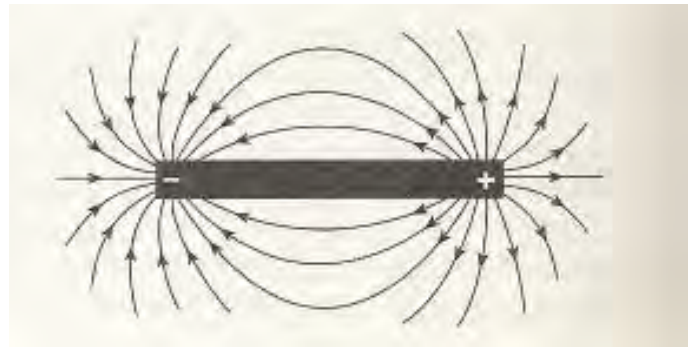
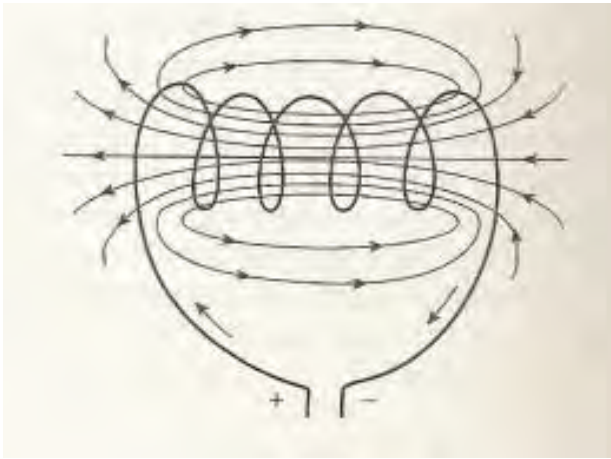


direzione e verso delle linee di forza conoscendo direzione della avvolgere la vostra mano attorno al pollice orientato nel verso della quel che volevate sapere! Certo solo in prossimità del filo stesso...

carattere della forza, giungiamo di agisce in direzione perpendicolare a e il polo, giacché la tangente ad un raggio.

Michael Faraday (1791- 1867), chimico e fisico britannico giunse a queste conclusioni spargendo limatura di ferro su un foglio di carta attraverso il quale passava, ortogonalmente, un filo percorso da corrente e osservando come tale limatura andava disponendosi in circonferenze concentriche attorno al filo! Anche questo rientra nel novero degli esperimenti di facile realizzazione... A partire dal 1832 si sforzò di dimostrare sperimentalmente ciò che lui e **André-Marie Ampère** (1775 - 1836), prima di lui, fisico francese, avevano supposto, cioè che **ogni corrente è associata ad un campo magnetico**, ben oltre quel che abbiamo visto sinora. Ma andiamo con ordine:

Osservate i due disegni seguenti: nel primo sono indicate le linee di forza di un campo magnetico generato da un solenoide (filo avvolto a spirale) percorso da corrente, nel secondo sono segnate le linee di forza di un magnete... Cosa osservate? Sono identiche!

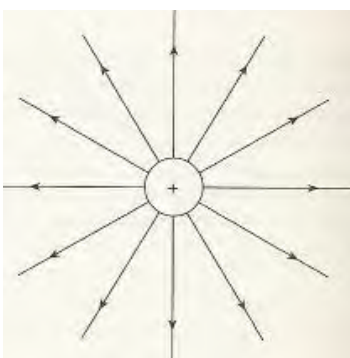


Einstein, *ibidem*, pag. 131: **La rappresentazione del campo porta il suo primo frutto: sarebbe infatti assai difficile riconoscere una così pronunciata similarità fra la corrente circolante in un solenoide ed un magnete lineare, ove non ci venisse rivelata dalla nostra costruzione del campo** [costruzione che, anche in questo caso potrebbe essere effettuata mediante semplici esperimenti con la limatura di ferro...].

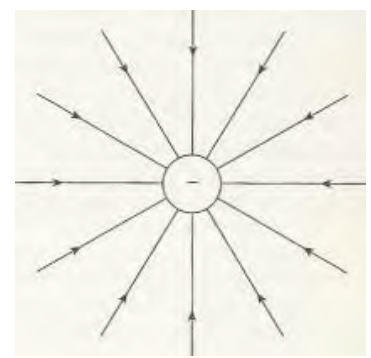
Il concetto di campo può ormai essere sottoposto a più severa prova. Se effettivamente tale modello rende conto esattamente dei fenomeni che rappresenta, allora due solenoidi, o una calamita lineare e un solenoide, dovrebbero attrarsi o respingersi reciprocamente (a seconda dei poli che avviciniamo) nello stesso modo (anche da un punto di vista quantitativo) di due calamite lineari! I risultati sperimentali confermano perfettamente questa congettura!

Il campo è dunque un modello d'indiscutibile utilità: dapprincipio esso apparve *come qualcosa che conveniva inserire fra la sua sorgente e l'ago magnetico per facilitare la descrizione delle forze agenti*. Poi poté considerarsi come un vero e proprio **intermediario** o *agente* della corrente, per mezzo del quale questa esplica la propria azione. Ma ora l'agente funge anche da **interprete**, col tradurre le leggi in un linguaggio semplice, chiaro e suggestivo e da ispiratore di nuovi esperimenti. Un buon modello effettivamente fa tutte queste cose (vedrete cosa succede con il modello di atomo!).

Tali successi suggeriscono che **può essere conveniente considerare tutte le azioni: delle correnti, dei magneti, nonché delle cariche elettriche, per via indiretta: ricorrendo cioè al campo come interprete**. Ad esempio infatti un campo dev'esser sempre associato ad una corrente, anche in assenza di un polo magnetico che ne riveli l'esistenza.



A sinistra le *linee di forza* di un **campo generato da una carica elettrica positiva**. Le linee di forza sono verso l'esterno perché si pensa, per convenzione, di utilizzare sempre una **carica di prova positiva**.



A destra le *linee di forza* di un **campo generato da una carica elettrica negativa**.

4.3 I due pilastri della teoria del campo

Si parla di **campi elettrostatici** perché non variano nel tempo. Ma se, per esempio muoviamo una carica elettrica lungo una circonferenza, cosa vi viene in mente? L'esperimento di Rowland, spero! E sappiamo che tale movimento di carica, cioè tale

campo variabile nel tempo, genera un campo magnetico (prima non dicevamo così) e che maggiore è la velocità di tale movimento maggiore è l'intensità del campo.

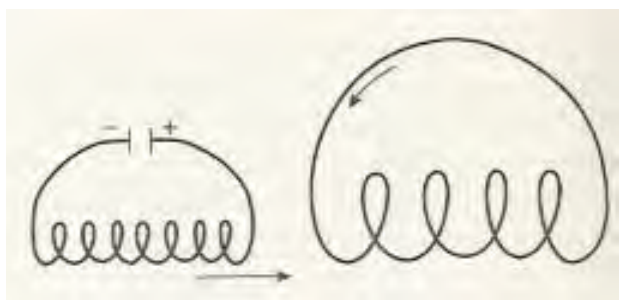
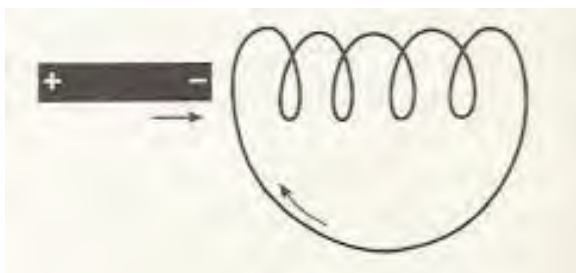
Possiamo pertanto concludere: **la variazione di un campo elettrico è sempre accompagnata da un campo magnetico e quanto più rapidamente varia il campo elettrico, tanto più forte è il campo magnetico associato.**

Abbiamo fin qui tradotto nel nuovo linguaggio del campo fatti già descritti nel linguaggio dei fluidi, modulato sull'interpretazione meccanicista. Vediamo ora come il nuovo linguaggio sia chiaro, istruttivo e ricco di conseguenze

Vi ricordate dove e perché abbiamo incontrato il concetto di **simmetria**? Andiamo a vedere, nella frase precedente in grassetto, cosa succede operando una simmetria fra le parole elettrico e magnetico. Otteniamo:

la variazione di un campo magnetico è sempre accompagnata da un campo elettrico e quanto più rapidamente varia il campo magnetico, tanto più forte è il campo elettrico associato

Suggestivo che tale asserzione possa risultare vera... Soltanto un esperimento può decidere se è così o no. I disegni seguenti illustrano gli esperimenti che confermano questa congettura: la freccia accanto al magnete indica il movimento dello stesso, quindi la variazione del campo magnetico corrispondente, e la freccia vicina al filo uscente dal solenoide indica il verso della **corrente indotta** dalla variazione del campo magnetico.



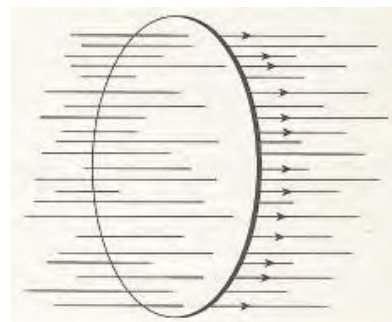
Spetta sempre agli esperimenti di Faraday la scoperta di tali correnti.

Importante rilevare a questo punto come tali risultati siano i primi che incontriamo che non siano spiegabili mediante la teoria dei fluidi e che decretino quindi la necessità di sostituire questa teoria con la nuova teoria dei campi.

Proviamo ad esprimere infatti tali risultati mediante il vecchio linguaggio. Einstein, *ibidem*, pag. 137: *il moto di un dipolo magnetico ha creato una forza che ha costretto il fluido elettrico a circolare nel filo. Dovremmo perciò domandarci: da cosa dipende questa forza? Ma sarebbe estremamente difficile rispondere...*

Le cose vanno altrimenti se usiamo il linguaggio del campo e se continuiamo a fare affidamento sul principio che l'azione è determinata dal campo.

Ricorriamo ad un esempio ancora più semplice. Prendiamo un filo elettrico chiuso ad anello: senza sorgente di corrente. Creiamo in prossimità un campo magnetico, in uno dei modi che conosciamo: o mediante un magnete o mediante un filo percorso da corrente. Il disegno mostra il filo e le linee di forza che attraversano la superficie da esso limitata. Sono queste le sole linee di forza che dobbiamo prendere in considerazione (fidatevi: evidenze sperimentali!).



Non si manifesterà corrente nel circuito, per grande che sia l'intensità del campo magnetico, fin tanto che questo non varia.

Ma una corrente comincerà a circolare nel filo non appena si verificherà una variazione del numero delle linee di forza che attraversano la superficie contornata dal filo stesso. La corrente è suscitata dalla variazione, comunque prodotta, del numero delle linee che

attraversano detta superficie. Tale variazione è l'unico concetto essenziale per la descrizione, sia qualitativa che quantitativa della corrente indotta. "Il numero delle linee varia vuol dire che la densità delle linee varia e, come sappiamo già, ciò significa che la forza del campo varia.

Al solito la velocità di variazione influirà sull'intensità del campo indotto.

Ecco **i due principali pilastri** di sostegno della teoria del **campo elettrico e magnetico**.

Il primo connette campo elettrico variante e campo magnetico (esperimento di Oersted)

Il secondo connette il campo magnetico variante al campo elettrico (esperimento di Faraday)

Ricordate che, sebbene abbiamo costruito il concetto di campo mediante corpi di prova, abbiamo già detto che tale concetto assume una propria **realtà** che prescinde dalla presenza o meno di *rilevatori*.

Dobbiamo ancora menzionare un'ulteriore conseguenza della rappresentazione del campo: consideriamo un circuito, percorso da una corrente, la cui sorgente sia per esempio una pila voltaica. Supponiamo che il collegamento fra il filo del circuito e la sorgente della corrente venga improvvisamente interrotto. Naturalmente la corrente cesserà di circolare. Ma al momento dell'interruzione si verifica un processo piuttosto complicato, sebbene anch'esso prevedibile in base alla teoria di campo: prima dell'interruzione della corrente esisteva un campo magnetico attorniante il filo. Questo campo cesserà di esistere con l'interruzione della corrente. Pertanto il numero di linee di forza di tale campo magnetico che attraversano la superficie delimitata dal circuito subisce una fortissima e rapidissima variazione. Una simile variazione DEVE creare corrente indotta, per il tempo della variazione: un "istante".

E così effettivamente accade: chiunque abbia avuto occasione d'interrompere una corrente avrà notato che si produce una scintilla. Questa scintilla rivela la grande differenza di potenziale causata dalla rapida variazione del campo magnetico.

*Lo stesso processo può venir considerato da un altro punto di vista: quello dell'**energia**. Una scintilla rappresenta energia e pertanto anche il campo magnetico deve rappresentare energia. Per adoperare coerentemente il concetto di campo e il suo linguaggio dobbiamo dunque considerare il campo magnetico come una riserva di energia. Soltanto così saremo in grado di rappresentare i fenomeni elettrici e magnetici in accordo con la legge di conservazione dell'energia.*

Usato da principio come un utile modalità rappresentativa, il campo è andato sempre più assumendo lo status di modello vero e proprio. Ci ha aiutato a capire fatti già noti e ce ne ha additati di nuovi. Attribuire energia al campo significa fare un ulteriore passo avanti lungo la via che ci porta ad attribuirgli sempre maggior consistenza a dispetto del concetto di sostanza, così essenziale per il punto di vista meccanicistico.

Che ne è stato del problema della **propagazione istantanea** delle forze? Il concetto di campo risponde egregiamente a questo problema sostenendo che, ad esempio, nel caso dell'interazione gravitazionale, la presenza di una **massa** in una regione di spazio produca un campo gravitazionale, cioè una sorta di *perturbazione nello spazio circostante*, tale che l'inserimento di una seconda massa risenta istantaneamente non già della presenza della prima massa ma della presenza del campo che questa ha generato nello spazio. Campo che si è propagato con velocità finita ma, una volta propagatosi, nei limiti della legge dell'inverso del quadrato della distanza, interessa ormai ogni punto dello spazio circostante!

4.4 Realtà del campo

*La definizione quantitativa, ovvero matematica, del campo si riassume nelle **equazioni** che portano il nome **di Maxwell**.*

Sono i fatti menzionati fin qui che condussero all'impostazione di queste equazioni il cui contenuto è assai più ricco di quanto possa sembrare così dal nostro esposto, come dalla loro forma.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$

Questa è bensì molto semplice (semplice ma per niente facile! Te le riporto per completezza ma solo dopo un anno di università specialistica credo riusciresti a comprenderle nella forma in cui sono scritte), ma cela profondità che soltanto uno studio accurato può rivelare.

*La formulazione di queste equazioni costituisce **l'avvenimento più importante verificatosi in fisica dal tempo di Newton** e ciò non soltanto per la dovizia del loro contenuto, ma perché esse hanno fornito un exemplum per un nuovo tipo di legge.*

Le equazioni di Maxwell sono leggi che definiscono la struttura del campo

Perché mai le equazioni di Maxwell differiscono nella forma e nel carattere dalle equazioni della meccanica classica? Che cosa intendiamo dire asserendo che queste equazioni definiscono la struttura del campo? Com'è mai possibile che in base ai risultati degli esperimenti così semplici di Oersted e Faraday si sia giunti a formulare un nuovo tipo di legge, e di così grande importanza per lo sviluppo ulteriore della fisica?

Con l'esperimento di Oersted abbiamo visto che un campo magnetico sia avvolta intorno ad un campo elettrico variante. L'esperimento di Faraday ci ha invece mostrato che un campo elettrico si avvolta intorno ad un campo magnetico variante.

Maxwell espresse innanzitutto questi due aspetti in **forma differenziale**. Ti ricordi le equazioni differenziali? La definizione di derivata che portava ad esse? Si basava sul considerare intervalli sempre più piccoli, in un **procedimento al limite**. Era abbastanza semplice fare un disegno che ti indicasse la strada perché c'era da considerare rapporti fra intervalli. In questo caso invece c'è da trasferire concetti sperimentalmente riferiti a **circuiti macroscopici**, a circuiti sempre più piccoli fino a ridursi ad un punto!

Un'altra astrazione che provo a chiedervi di effettuare per avere un'idea della portata delle Equazioni di Maxwell è svicolarvi da circuiti, magneti e quant'altro e provare a credere che le Equazioni di Maxwell descrivono il **campo elettromagnetico** (campo generato dall'interdipendenza di **campo elettrico e magnetico**) come qualcosa di **reale** e indipendente dai *supporti* che l'hanno generato: come qualcosa di **assoluto**, nel senso etimologico del termine.

*Tali equazioni descrivono in che modo il campo elettromagnetico **sussiste, agisce e varia**. Le equazioni di Maxwell sono leggi **valide nell'intero spazio** e non soltanto nei punti in cui materia e cariche elettriche sono presenti, com'è il caso delle leggi meccaniche.*

*Rammentiamo come stanno le cose in meccanica: conoscendo posizione e velocità di una particella, in un dato istante, e conoscendo inoltre le forze agenti su di essa, è possibile prevedere l'intero futuro percorso della particella stessa. Nella teoria di Maxwell invece **basta conoscere il campo in un dato istante** per poter dedurre, dalle equazioni che portano il suo nome, in qual modo l'intero campo varierà nello spazio e nel tempo.*

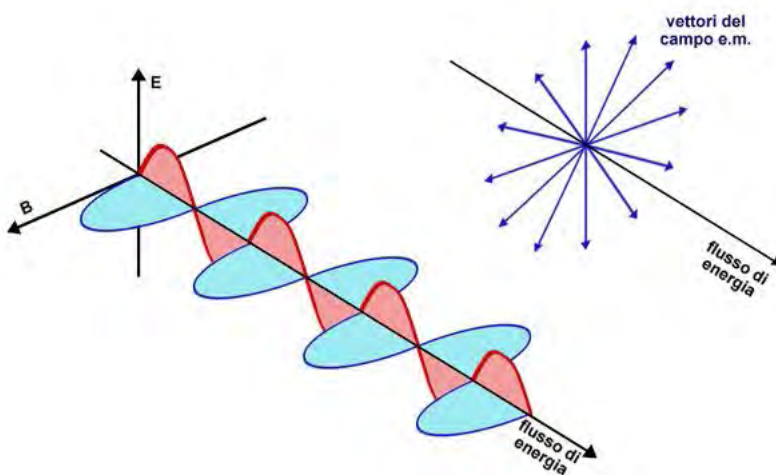
Le equazioni di Maxwell permettono di seguire le vicende del campo, così come le equazioni della meccanica consentono di seguire le vicende di particelle materiali in moto MA nelle equazioni di Maxwell non vi è nessun *attore materiale*: né punti, né masse, né distanze.

Manca ancora qualcosa per chiudere il cerchio... Ancora non è comparsa in alcun modo la parola **onda** che pure sappiamo già connotare la modalità di **propagazione del campo elettromagnetico**. Ricorriamo di nuovo ad un esperimento ideale per farla uscire fuori...

Una piccola sfera dotata di carica elettrica oscilla rapidamente e ritmicamente: a mo' di pendolo (quindi non con moto costante ma con l'**accelerazione** tipica del **moto armonico**). L'oscillazione della carica genera un campo elettrico variante, il quale a sua volta genera un campo magnetico variante e così via: ecco come può nascere un'onda elettromagnetica (del resto proprio all'inizio abbiamo parlato di cariche accelerate!): l'**energia** irradiata dalla carica oscillante attraversa lo spazio con velocità determinata. Il trasferimento di energia, **il moto** cioè **di uno stato**, è la caratteristica di tutti i fenomeni ondulatori: ecco qua!

Le linee di forza elettriche e le linee di forza magnetiche giacciono, come risulta dalla teoria, in **piani perpendicolari fra loro e perpendicolari alla direzione di propagazione**. Pertanto l'**onda è trasversale**.

4.5 L'onda elettromagnetica si propaga nello spazio vuoto



E' questa una conseguenza della teoria: se la carica oscillante cessa improvvisamente di muoversi, il suo campo diventa elettrostatico: ma le serie precedenti di onde create nell'oscillazione continuano a propagarsi: le onde conducono un'esistenza indipendente e la storia delle loro variazioni può venir seguita come quella di un qualsiasi oggetto materiale, pur non essendo oggetti materiali in senso classico.

Resta da chiarire un'altra questione importante: quella della **velocità di propagazione**. Ora, nelle equazioni compare una **grandezza costante** che ha le dimensioni di una velocità e che corrisponde esattamente al modulo della velocità della luce! Questo fatto, assieme ai rilievi sperimentali non lascia dubbi: il campo elettromagnetico, nel vuoto, si propaga alla velocità della luce.

Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894), fisico tedesco, attorno al **1885** e mediante un esperimento dimostrò che segnali elettrici potevano essere inviati attraverso l'aria, come già predetto da James Clerk Maxwell nel **1873** e Michael Faraday ponendo così le basi per l'invenzione della **radio**.

Conclusioni: *l'antico criterio meccanicistico tendeva a ridurre tutti gli eventi della natura a forze interagenti fra particelle materiali. Su questo criterio si basa la teoria dei fluidi elettrici.*

Per il fisico dei primi anni del XIX secolo il campo non esisteva. Egli considerava come reali soltanto la sostanza e le sue modificazioni e tentava di descrivere l'azione di due cariche elettriche unicamente mediante concetti afferenti alle cariche stesse.

Al principio il concetto di campo non fu altro che uno strumento volto ad agevolare la comprensione dei fenomeni da un punto di vista meccanico. L'accettazione del nuovo concetto si affermò progressivamente e, infine, il campo lasciò in ombra la sostanza.

Per il fisico moderno il campo elettromagnetico è tanto reale come la sedia su cui siede.

MA sarebbe ingiusto ritenere che il nuovo concetto di campo abbia liberato la scienza da tutti i concetti precedenti, o ancora che la nuova teoria annulli le conquiste della precedente.

La nuova teoria mette in luce tanto i pregi quanto le deficienze della precedente e ci permette di ritrovare i concetti anteriori ad un livello superiore.

Per esempio ritroviamo il concetto di carica elettrica anche nella teoria di Maxwell, ancorché la carica elettrica vi sia intesa soltanto come sorgente di campo elettrico. La legge di Coulomb è sempre valida ed è contenuta nelle equazioni di Maxwell.

Ricorrendo ad un confronto potremmo dire che creare una nuova teoria non è come demolire una vecchia tettoia per sostituirla con un grattacielo. E' piuttosto come inerpicarsi su per una montagna, raggiungendo nuovi e più vasti orizzonti e scoprendo inattesi rapporti fra il nostro punto di partenza e le bellezze dei suoi dintorni. Tuttavia il sito da cui siamo partiti è sempre lì e possiamo ancora scorgerlo, ancorché sembri piccolo e non sia ormai più che un dettaglio, nella vasta veduta.

Occorse molto tempo prima che tutto il contenuto della teoria di Maxwell venisse riconosciuto.

Il campo fu dapprima considerato come qualcosa che, più tardi, avrebbe potuto interpretarsi meccanicamente, con il sussidio dell'etere [del quale il campo stesso non aveva il minimo

bisogno ma i fisici sì!] . Quando si riconobbe che questo programma non poteva realizzarsi, la teoria del campo stesso aveva ormai condotto a conquiste così brillanti ed importanti, da non poter più essere sostituita dal dogma meccanicistico. D'altra parte, il problema di costruire un plausibile modello meccanico dell'etere andava continuamente perdendo di interesse, tanto più che, in ragione del carattere artificioso e forzato delle congetture cui bisognava ricorrere, il risultato appariva sempre meno incoraggiante.

L'unica via d'uscita sembra tener per certo il fatto che lo spazio possiede la proprietà fisica di trasmettere le onde elettromagnetiche, senza troppo preoccuparsi del significato di questa nostra affermazione.

*Ritorniamo comunque a parlare di **etere** introducendo la Relatività!*