Paola Giacconi   Liceo Luigi Galvani

Le equazioni di Maxwell
e le onde elettromagnetiche

di
Paola Giacconi

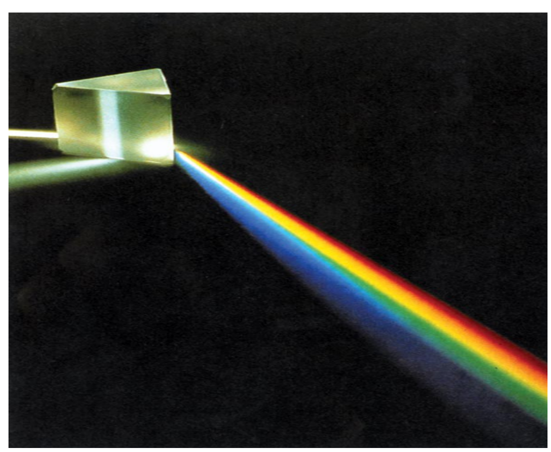
L' elettromagnetismo *classico* è quella branca della fisica che studia i fenomeni di natura elettrica e magnetica prodotti da cariche in quiete e/o in moto e le loro interazioni mediate dai campi elettrici e magnetici. Le quattro equazioni di Maxwell sono la splendida sintesi di tutti i fenomeni elettromagnetici sino ad oggi conosciuti.

Con elettromagnetismo *classico* si intende l' elettromagnetismo *non quantistico* ma, tuttavia, in perfetto accordo con la teoria della relatività ristretta. Infatti, da un punto di vista storico, la *teoria della relatività ristretta* è nata dall'elettromagnetismo classico a dagli esperimenti ad esso ispirati.
La modificazione dell'elettromagnetismo classico secondo i principi della meccanica quantistica, prende invece il nome di *elettrodinamica quantistica.*

La comprensione profonda e completa del comportamento della luce rappresenta la più spettacolare conseguenza della teoria quantistica relativistica del campo elettromagnetico basato sulle equazioni di Maxwell.

In quanto segue analizzeremo come le equazioni di Maxwell siano in grado di spiegare il comportamento della radiazione luminosa da un punto di vista classico.

Lo studio del comportamento della luce, ha occupato e incuriosito i *naturalisti* (*i fisici di una volta!*) sin dai tempi antichi. Il primo a proporre una teoria organica della luce fu Isaac Newton nel XVII secolo. La luce venne da Lui concepita come composta da piccole particelle di materia, *corpuscoli luminiferi,* emessi in tutte le direzioni.
Questa teoria spiegava in maniera sicuramente soddisfacente alcuni comportamenti propri della propagazione luminosa quali la *riflessione* e la *rifrazione* facendo uso del principio dei *tempi minimi di Fermat* secondo il quale la luce, per propagarsi da un punto ad un altro dello spazio, sceglie il percorso che rende minimo il tempo di percorrenza**,** ma in maniera molto meno convincente altri fenomeni tipici del comportamento della luce. Secondo il modello newtoniano, ad esempio, i colori dell'arcobaleno venivano spiegati, in maniera molto barocca, tramite l'introduzione di un gran numero di corpuscoli di luce diversi tra loro, uno per ogni colore ed il bianco era pensato come formato da tante di queste particelle.



Inoltre, la separazione dei colori ad opera, ad esempio, di un prisma, che va sotto il nome di *dispersione* della luce, poneva sicuramente grossi problemi teorici in quanto le particelle di luce avrebbero dovuto avere proprietà identiche nel vuoto ma differenti all'interno della materia. Per non parlare poi dei fenomeni dell'*interferenza* e della *diffrazione* che hanno, nella teoria newotoniana della luce, una spiegazione alla quale, dicono gli storici, credesse poco lo stesso Newton.

Tuttavia, il più grande pregio della teoria corpuscolare di Newton è quello di spiegare, secondo le

conoscenze possedute all'epoca, come la luce delle stelle potesse propagarsi anche nello spazio vuoto interstellare e giungere sino a noi.
Fu anche per quest'ultimo motivo che la teoria ondulatoria della luce formulata da Christiaan Huygens nel 1678 e pubblicata solo nel 1690 nel *Traité de la Lumière* non riuscì ad avere il giusto e meritato riconoscimento dagli scienziati dell'epoca. La luce secondo Huygens è un'onda che si propaga in maniera del tutto simile alle onde del mare e o a quelle acustiche. Facendo uso della teoria ondulatoria fenomeni quali la *riflessione*, la *rifrazione*, la *diffrazione,* l'*interferenza*, la *dispersione* e la *diffusione* della luce trovano una spiegazione soddisfacente ed estremamente elegante.
Rimanevano tuttavia aperte due grandi questioni:

- **che cosa oscilla al passaggio della luce?**
- **in quale mezzo si propaga la luce?**

I Fisici inventarono allora l'esistenza di un peculiare ente: *l'etere* che, pur pervadendo l'intero universo, risultava essere del tutto elusivo.

Per avere una risposta soddisfacente a queste due fondamentali domande è necessario aspettare circa 200 anni. Saranno infatti Maxwell, alla fine del XIX secolo, con la teoria dell'elettromagnetismo ed Einstein, all'inizio del XX, con la teoria della relatività ristretta, a fornirci una risposta esaustiva a queste domande.

Per completezza è importante ricordare che la luce non finì di stupire. Infatti fenomeni quali l'*effetto fotoelettrico* e l'*effetto Compton* sono completamente incomprensibili facendo riferimento alla teoria ondulatoria della luce. Sarà ancora Einstein, nel 1905, a dare una spiegazione soddisfacente e rivoluzionaria dell'effetto fotoelettrico e ciò costrinse i fisici a tornare ad una *teoria corpuscolare della luce* seppure con un punto di vista ed una prospettiva completamente differenti da quelle di Newton.

Torniamo ora alle equazioni di Maxwell che rappresentano una straordinaria sintesi dei fenomeni elettrici, magnetici ed ottici a tutt'oggi più che mai valida.
Dalle equazioni di Maxwell si ottiene che le onde luminose sono onde elettromagnetiche e non necessitano quindi di alcun mezzo per la trasmissione, la luce visibile è semplicemente una parte dello spettro elettromagnetico.
Cerchiamo allora di capire come le equazioni di Maxwell abbiano in seno il concetto di onda elettromagnetica. Esse nel vuoto assumono la seguente forma:

- $\Phi_{s.c.}(\vec{E}) = \oint\!\!\oint \vec{E} \cdot d\,\vec{a} = \dfrac{\sum Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$

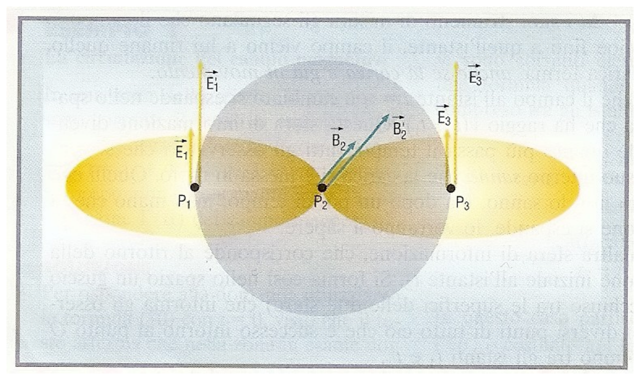
- $\Phi_{s.c.}(\vec{B}) = \oint\!\!\oint \vec{B} \cdot d\,\vec{a} = 0$

- $C(\vec{E}) = f.e.m. = \oint_{\gamma} \vec{E} \cdot d\,\vec{l} = -\dfrac{d\Phi[\vec{B}(t)]}{dt}$

- $C(\vec{B}) = \oint_{\gamma} \vec{B} \cdot d\,\vec{l} = \mu_0 \left(i + \varepsilon_0 \dfrac{d\Phi[\vec{E}(t)]}{dt} \right)$

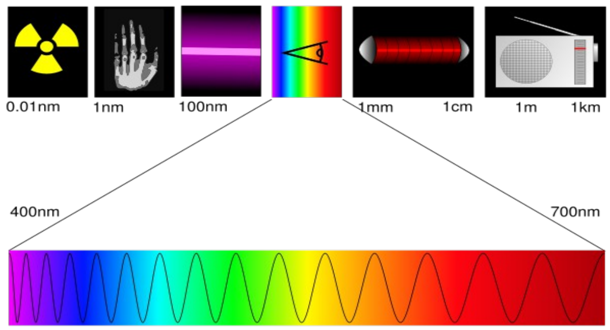
Le prime due rappresentano il teorema di *Gauss* per il campo elettrico e magnetico rispettivamente. La

prima rappresenta una generalizzazione della forza di *Coulomb* al caso in cui le sorgenti del campo elettrico non siano cariche puntiformi e ci dice che le linee di campo elettrico sono linee aperte, esiste il monopolo elettrico. La seconda afferma che le linee del campo magnetico sono linee chiuse, cioè non esiste il monopolo magnetico, il campo magnetico è generato da cariche in movimento.
La terza equazione, *legge di induzione di Faraday* e la quarta, con il termine di *corrente di spostamento,* affermano che variazioni di flusso di campo elettrico e/o magnetico generano rispettivamente campi magnetici e/o elettrici. Il segno “ -” della *legge di induzione di Faraday è* dovuto *all'inerzia* dei circuiti elettrici e rappresenta la loro capacità di opporsi ai cambiamenti.
Le ultime due equazioni di Maxwell rappresentano gli ingredienti fondamentali per comprendere la genesi dell'onda elettromagnetica.
Per capire il meccanismo con cui tale onda si propaga nello spazio vuoto, assenza di cariche e correnti, consideriamo le equazioni di Maxwell sopra riportate ponendo $Q=0$ ed $i=0$. Supponiamo allora che in un punto P_1 , all' interno di un guscio immaginario, il campo elettrico aumenti in un breve intervallo di tempo dt , passando da un valore $\vec{E}_1$ ad un valore $\vec{E}_1'$ (vedi figura), questo effetto può ad esempio essere prodotto da una carica oscillante in una qualche zona dello spazio circostante a P_1 . Questa variazione di campo elettrico fa si che, attraverso una piccola superficie, centrata in un punto P_1 , e perpendicolare ai vettori $\vec{E}_1$ ed $\vec{E}_1'$, il flusso del campo elettrico cresca e quindi, secondo l’equazione 4, si genereranno delle linee chiuse di campo magnetico. Se ora consideriamo un punto P_2 qualsiasi appartenente a tali linee chiuse, in quel punto il campo magnetico indotto è perpendicolare alla direzione del campo elettrico $\vec{E}_1$ e varia anch’esso nel tempo passando da un valore $\vec{B}_2$ ad un valore $\vec{B}_2'$. La variazione del flusso magnetico attraverso una piccola superficie ad esso perpendicolare genera, secondo l’equazione 3, delle linee chiuse di campo elettrico, cioè produce un campo elettrico variabile in tutti i punti circostanti ed, in particolare, nel punto P_3 “vicino” al punto P_2 . Anche in questo caso il campo, che è perpendicolare a $\vec{B}_2$, varia da un valore $\vec{E}_3$ ad un valore $\vec{E}_3'$, e quindi, ancora per l’equazione 4, si genera un altro campo magnetico variabile poco distante, il quale a sua volta è causa di un campo elettrico variabile e così via. In questo modo, mediante la generazione reciproca di campi magnetici ed elettrici, perpendicolari tra loro, che variano nel tempo e si eccitano a vicenda da un punto all’altro dello spazio, il campo elettrico e magnetico si propagano nello spazio vuoto circostante, investendo zone sempre più lontane dal punto da cui essi hanno avuto origine.



Così, una volta prodotto dalla carica in movimento, il campo elettromagnetico oscillante ha un’esistenza autonoma, che non dipende dalla sorgente che lo ha generato. Infatti, esso trasportando energia e quantità di moto, continua a propagarsi autogenerandosi anche quando la carica ha smesso di muoversi. Questa proprietà della perturbazione di avere un’esistenza propria è proprio ciò che caratterizza la propagazione di un’onda. Il campo elettromagnetico si propaga come un’onda e possiamo così parlare di onde elettromagnetiche. Secondo quanto abbiamo appena visto, ogni carica elettrica che oscilla rapidamente irraggia, cioè emette onde elettromagnetiche. L’insieme di queste radiazioni rappresenta lo spettro elettromagnetico che va dalle onde lunghe con lunghezza d'onda

$\lambda \approx 10^{8} m$ fino ai raggi gamma con lunghezza d'onda $\lambda \approx 10^{-16} m$. Lo spettro visibile ha lunghezza d'onda che va dai 700nm ai 400nm e frequenze che vanno da $\nu \approx (4-7) \times 10^{14} Hz$ tali frequenze vengono rispettivamente percepite come arancio, giallo, verde, blu e indaco. Le alte frequenze immediatamente al di fuori dello spettro visibile vengono chiamate *ultraviolette* (UV) mentre le basse prendono il nome di *infrarosse* (IR) . Anche se gli esseri umani non possono vedere l'infrarosso, esso viene percepito dai recettori della pelle come calore.



Esistono poi telecamere che prendono il nome di visori notturni, in grado di captare i raggi infrarossi e convertirli in luce visibile. La radiazione ultravioletta viene percepita dagli esseri umani in quanto la sovraesposizione della pelle ai raggi UV causa scottature. Vi sono poi alcuni animali, come ad esempio le api che riescono a vedere i raggi ultravioletti ed altri invece riescono a vedere gli infrarossi, come i serpenti.

Ancora una importante osservazione prima di affrontare la trattazione matematica delle equazioni di Maxwell. La distribuzione di probabilità delle lunghezze d' onda della radiazione elettromagnetica emessa dal sole è la distribuzione di Plank, essa è centrata sulle lunghezze d'onda della radiazione visibile : $\lambda \sim 700-400\, nm$ cioè $\nu \sim 4-7 \times 10^{14} Hz$ che corrispondono ad energie di $E \sim 1\, eV$. Tali energie sono proprio le energie di ionizzazione degli atomi che costituiscono la materia sulla terra , in altre parole l'evoluzione ha fatto si che queste fossero le energie "privilegiate" :**ecco perché Darwin ha ragione!**

Vediamo ora come da un punto di vista matematico le equazioni di Maxwell, in assenza di cariche e sorgenti, soddisfano le equazioni delle onde e di più dimostriamo che la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nel vuoto è costante e vale $c = \left(\mu_0 \varepsilon_0\right)^{-1/2}$.
A tale scopo consideriamo le equazioni di Maxwell in assenza di cariche e sorgenti, abbiamo infatti appena visto che l'onda e.m. si propaga anche in zone dello spazio dove $Q=0,\ i=0$, in questo caso le equazioni di Maxwell assumono la forma:

1. $\Phi_{s.c.}(\vec{E}) = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{a} = 0$

2. $\Phi_{s.c.}(\vec{B}) = \oiint \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0$

3. $C(\vec{E}) = f.e.m. = \oint_{\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\dfrac{d\Phi[\vec{B}(t)]}{dt} = -\dfrac{d}{dt}\left(\int\int_{S_\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{a}\right)$

4. $C(\vec{B}) = \oint_{\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{d\Phi[\vec{E}(t)]}{dt} = \mu_0 \varepsilon_0 \dfrac{d}{dt}\left(\int\int_{S_\gamma} \vec{E} \cdot d\vec{a}\right)$

Come si può notare esse mostrano una mirabile simmetria tra il campo elettrico ed il campo magnetico, sarà Einstein nel suo straordinario lavoro *"Zur electrodynamik bewegter korper"* a mostrare che il campo elettrico ed il campo magnetico in realtà non sono che le due facce di un stessa medaglia ponendo i fondamenti della teoria della Relatività Ristretta.

Paola Giacconi   Liceo Luigi Galvani

In quanto segue vogliamo, più modestamente verificare, che le equazioni di Maxwell 1-4 sono verificate nel caso in cui il campo elettrico ed il campo magnetico si propaghino sotto forma di onde trasversali perpendicolari l'una all' altra. Supponiamo quindi che il campo elettrico ed il campo magnetico abbiano la forma di onde sinusoidali prendiamo ad esempio un campo elettrico tutto diretto nella direzione z ,

$$\vec{E}=(0,\,0,\,E_z);\;\; E_z=E_0\,sen(\omega t-kx)\quad ,$$

ed un campo magnetico diretto lungo y ,

$$\vec{B}=(0,\,B_y\,,o);\;\; B_y=B_0\,sen(\omega t-kx)\quad .$$

Nelle equazioni di cui sopra abbiamo inoltre che il campo elettrico ed il campo magnetico si propagano come onde trasversali nella direzione x con velocità di propagazione $V=\frac{\omega}{k}$.

Verifichiamo ora che questa configurazione scelta per il campo $\vec{E}$ e per il campo $\vec{B}$ soddisfa le equazioni di Maxwell (1-4) in assenza di cariche e sorgenti.
Appare evidente che le prime due equazioni sono automaticamente soddisfatte qualsiasi sia la superficie chiusa considerata in quanto le linee di forza di $\vec{E}$ e di $\vec{B}$ entranti nella superficie sono le stesse che escono dalla superficie chiusa non essendo presenti ne cariche ne correnti. Analizziamo allora le equazioni 3-4 prendendo in considerazione i due particolari percorsi mostrati in *fig1*.
Ricordiamo infatti che le equazioni in questione debbono essere verificate qualsiasi sia il percorso scelto per calcolare la circuitazione dei due campi è quindi lecito ed opportuno, scegliere i percorsi in modo da semplificare il più possibile i calcoli.
Iniziamo dalla terza equazione di Maxwell

$$\oint_{\gamma_1}\vec{E}\cdot d\,\vec{l}=-\frac{d}{dt}\left(\int\int_{S_{\gamma_1}}\vec{B}\cdot d\,\vec{a}\right)$$

e calcoliamola lungo il percorso γ_1 mostrato in figura

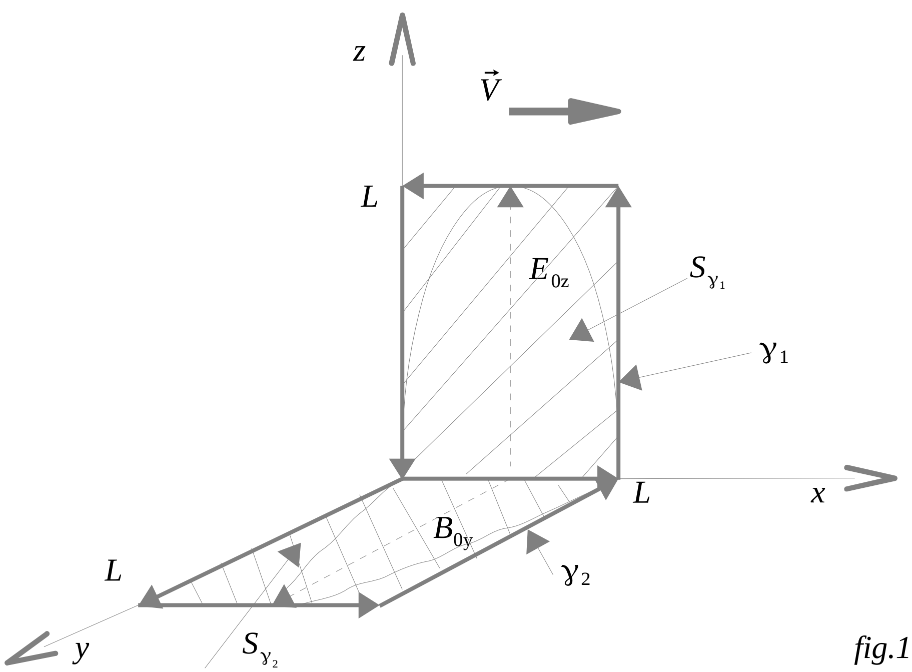


fig.1

Iniziamo con il calcolo di $\oint_{\gamma_1} \vec{E} \cdot d\vec{l}$ il cui risultato è:

$$\oint_{\gamma_1} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_0^L E(L,t)dz - \int_0^L E(0,t)dz = E_0 L\,sen(\omega t - kL) - E_0 L\,sen(\omega t) \qquad (5)$$

in quanto i contributi dovuti ai lati del quadrato di lato L definito da γ_1 e paralleli all'asse x sono nulli essendo il campo elettrico ad essi perpendicolare.

Secondo la terza equazione di Maxwell, questo integrale deve essere uguale a $-\frac{d}{dt}\left(\int\int_{S_{\gamma_1}} \vec{B} \cdot d\vec{a}\right)$

calcoliamo quindi la quantità $\int\int_{S_{\gamma_1}} \vec{B} \cdot d\vec{a}$ per poi farne la derivata temporale.

$$\int\int_{S_{\gamma_1}} \vec{B} \cdot d\vec{a} = \int_0^L [\int_0^L B_0\,sen(\omega t - kx)dx]dz = L\int_0^L B_0\,sen(\omega t - kx)dx = \frac{B_0 L}{k}[\cos(\omega t - kL) - \cos(\omega t)]$$

quindi, facendo la derivata temporale e cambiando di segno otteniamo:

$$-\frac{d}{dt}\left(\int\int_{S_{\gamma_1}} \vec{B} \cdot d\vec{a}\right) = \omega \frac{B_0 L}{k}[sen(\omega t - kL) - sen(\omega t)] \qquad (6)$$

uguagliando l'equazione (5) e l'equazione (6) otteniamo in fine la relazione:

$$\boxed{E_0 = \omega \frac{B_0}{K}} \qquad (7)$$

Prendiamo ora in esame l'equazione (4), essa lungo il percorso γ_1 è banalmente soddisfatta in quanto si ottiene $0=0$ essendo il campo $\vec{B}$ perpendicolare al percorso stesso. Tale equazione darà invece un contributo non banale se consideriamo il percorso γ_2 ribadiamo ancora che le equazioni di Maxwell debbono essere valide qualsiasi sia il percorso scelto.

Lungo il percorso γ_2 l'unica equazione non banale è appunto l'equazione (4). Procediamo quindi in modo analogo a quanto già visto per verificare che le configurazioni di campo da noi scelte soddisfano l'equazione:

$$\oint_{\gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\int\int_{S_{\gamma_2}} \vec{E} \cdot d\vec{a}\right)$$

Calcoliamo quindi la circuitazione di $\vec{B}$:

$$\oint_{\gamma_1} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_0^L B(0,t)dy - \int_0^L B(L,t)dy = B_0 L\,sen(\omega t) - B_0 L\,sen(\omega t - kl) \qquad (8)$$

dove, anche in questo caso, i contributi alla circuitazione dovuti ai lati del quadrato definito da γ_2 e paralleli all'asse x , sono nulli in quanto il campo magnetico è ad essi perpendicolare.

Per la quarta equazione di Maxwell la circuitazione del campo magnetico (eq.8) deve essere uguale a

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\int\int_{S_{\gamma_2}} \vec{E}\cdot d\vec{a}\right).$$

Calcoliamo quindi il valore di $\int\int_{S_{\gamma_2}} \vec{E}\cdot d\vec{a}$ per poi farne la derivata temporale ed eguagliare i risultati ottenuti:

$$\int\int_{S_{\gamma_1}} \vec{E}\cdot d\vec{a} = \int_0^L [\int_0^L E_0 sen(\omega t - kx) dy] dx = L\int_0^L E_0 sen(\omega t - kx) dx = \frac{E_0 L}{k}[\cos(\omega t - kL) - \cos(\omega t)]$$

quindi facendo la derivata temporale e moltiplicando per $\mu_0 \varepsilon_0$ otteniamo:

$$\mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\int\int_{S_{\gamma_1}} \vec{E}\cdot d\vec{a}\right) = -\mu_0 \varepsilon_0 \omega \frac{E_0 L}{k}[sen(\omega t - kL) - sen(\omega t)] \quad . \qquad (9)$$

Eguagliando l'eq. (8) con l'eq. (9) si ha:

$$\boxed{B_0 = \mu_0 \varepsilon_0 \omega \frac{E_0}{K}} \quad . \qquad (10)$$

Le equazioni (7) e (10) debbono essere **entrambe** soddisfatte contemporaneamente ciò porta alla conclusione che: $\mu_0 \varepsilon_0 = \left(\frac{k}{\omega}\right)^2$ cioè alla **inaspettata e rivoluzionaria conclusione che la velocità con la quale si propaga l'onda elettromagnetica nel vuoto è costante ed uguale a:**

$$\boxed{V = c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2}} \qquad (11).$$

Abbiamo quindi verificato che **le onde elettromagnetiche sono onde trasversali con** $\vec{E}$ **e** $\vec{B}$ **tra loro perpendicolari inoltre, nel vuoto, queste onde viaggiano con velocità costante uguale a** c .

Se l'onda elettromagnetica si propaga invece in un mezzo materiale l'equazione (11) diviene:

$$V = (\mu\varepsilon)^{-1/2} = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2} (\mu_r \varepsilon_r)^{-1/2} = c(\mu_r \varepsilon_r)^{-1/2} = \frac{c}{n}$$

da cui otteniamo che l'indice di rifrazione dei materiali è $n = (\mu_r \varepsilon_r)^{-1/2}$.

Le equazioni di Maxwell rispondono così alle nostre domande: **al passaggio della luce ad oscillare è il campo elettromagnetico la luce quindi non necessita di alcun mezzo materiale per propagarsi.**

La propagazione della onda elettromagnetica e quindi della luce avviene anche nel vuoto: **è una propagazione di energia che, nel vuoto, non produce alcun aumento di entropia** in quanto quando l' onda e.m. si propaga nel vuoto non può in alcun modo perdere energia sotto forma di calore, non vi è in altre parole, dispersione di energia per "attrito" sotto forma di calore . Siete sicuramente stati in aereo, allora non vi sarà difficile ricordare quanto sia bassa la temperatura esterna ad alta quota rispetto alla temperatura sulla superficie della Terra, questo a causa del fatto che salendo di quota l'aria diviene sempre più rarefatta e quindi la radiazione e.m. nell' attraversarla perde sempre meno energia sotto forma di calore e produce quindi sempre meno entropia. Quindi se la terra non fosse avvolta dalla atmosfera la luce del sole non ci riscalderebbe, infatti è proprio quando la radiazione e.m. colpisce l'atmosfera che, interagendo con essa, perde energia cinetica in quanto la sua velocità diminuisce divenendo $V=(\mu\varepsilon)^{-1/2}=\frac{c}{n}<c=(\mu_0\varepsilon_0)^{-1/2}$, l' energia "persa" si è trasformata in calore, riscaldando l' atmosfera nelle quale è avvolta la Terra.

Le equazioni di Maxwell sembrano quindi dare una spiegazione soddisfacente del comportamento della luce. I problemi non sono però completamente risolti infatti, dalle equazioni di Maxwell si ottiene che la velocità con la quale si propagano le onde elettromagnetiche nel vuoto **è una costante,** sorge allora un' ulteriore inquietante domanda: **la velocità della luce è costane e uguale a** c **rispetto a quale sistema di riferimento ?**

Fu così che l'*etere*, pur così elusivo, che sembrava per sempre uscito dalla Fisica apparve essere la sola soluzione plausibile. Molti pensavano infatti che *la velocità della luce fosse* c *rispetto all'etere e che quindi le equazioni di Maxwell non valessero in tutti i sistemi di riferimento bensì solo nel sistema di riferimento nel quale l' etere è in quiete!* L'etere rappresentava così un sistema di riferimento privilegiato, cioè quel sistema di riferimento nel quale valgono le equazioni di Maxwell!

Maxwell <u>sembrava</u> aver riportato l'Universo ai tempi dello spazio assoluto newtoniano, per le equazioni di Maxwell non valeva più la Relatività Galileina!

Galileo ci aveva convinti del fatto che in meccanica tutti i sistemi di riferimento inerziali sono equivalenti, mentre con Maxwell ciò sembra non essere più vero, in elettrodinamica esiste un sistema di riferimento inerziale privilegiato: *il sistema dell'etere in quiete rispetto al quale la velocità della luce è massima e vale* c .

Possiamo in sintesi affermare che la situazione alla fine dell' 800 fosse la seguente.

Da una parte la meccanica Newtoniana con i suoi successi, la sua mirabile sintesi e semplicità, due equazioni per descrivere il moto dei pianeti e la caduta dei corpi sulla terra!

E dall'altra l'elettromagnetismo di Maxwell che, con sole 4+1 equazioni sintetizzava tutti i fenomeni elettrici e magnetici fino ad allora noti. In altre parole **tutta** la fisica fino a quel momento conosciuta è sintetizzata dalle seguenti equazioni:

$$\vec{F}=m\vec{a} \qquad \vec{F}=G\frac{M_1M_2}{R^2}\hat{R}$$

$$\Phi_{s.c.}(\vec{E})=\frac{\sum Q_{in.}}{\varepsilon_0} \quad C(\vec{E})=-\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt} \quad \Phi_{s.c.}(\vec{B})=0 \quad C(\vec{B})=\mu_0\left(i+\frac{d\Phi(\vec{E})}{dt}\right) \quad \vec{F}=q\vec{E}+\frac{q}{c}\vec{v}\times\vec{B}$$

ma **purtroppo queste equazioni erano tra loro in "*contraddizione*" !**

Si fecero allora numerosi esperimenti nel tentativo di evidenziare la presenza dell'etere tra questi i più famosi sono quelli dei due fisici *Albert Abraham Michelson* (1852 -*1931)* e *Edward Williams Morley* (1838-1923) che nel 1881 il primo e nel 1887 eseguirono un esperimento di interferenza di onde luminose atto ad evidenziare il moto della terra attraverso l'*etere*. Infatti la Terra, assieme al sistema solare, si muove nella nostra galassia alla notevole velocità di 217 km/s per questo motivo ci dovrebbe essere un *vento d'etere* che viaggiando a 217 km/s , spazza la Terra in direzione opposta al proprio cammino. Ovviamente qualsiasi cosa sarebbe influenzata da tale *vento*, compresa la luce. Come noto l'esperimento non dette i risultati sperati: l'etere sembrava essere sempre più invisibile! Ciò nonostante la comunità scientifica dominante restò orientata sull'esistenza dell'*etere* quale mezzo di propagazione delle onde elettromagnetiche proponendo modelli teorici alquanto barocchi e comunque non in grado di spiegare tutti i dati sperimentali in possesso della comunità scientifica.

Ciò fino a quando nel 1905, un impiegato dell'ufficio Brevetti di Berna, completamente sconosciuto alla comunità scientifica e apparentemente ignaro di molti importanti articoli precedenti sull' argomento, fornì una soluzione al dilemma che attanagliava tutto il mondo scientifico dell'epoca.

Nel suo lavoro *"Sulla elettrodinamica dei corpi in movimento" E*gli scrisse: ***"...nessuna caratteristica dei fatti osservati corrisponde al concetto di etere assoluto..........***

per tutti i sistemi nei quali valgono le equazioni della meccanica valgono anche le equivalenti equazioni dell'elettrodinamica e dell'ottica........

In quanto segue facciamo queste ipotesi : la luce si propaga nello spazio vuoto con velocità c, tale velocità è indipendente dalla natura del moto del corpo che lo emette."

Oggi tali postulati vanno sotto il nome di **postulati della Relatività Ristretta**, quell' impiegato geniale e sconosciuto era ***Albert Einstein*** un uomo che con il suo pensiero ed il suo coraggio ha cambiato la storia dell'umanità. Il termine *etere* è tutt'ora utilizzato nel linguaggio comune per indicare in maniera generalista la trasmissione di dati via cavo o satellite.

Polarizzazione della Luce

Concludiamo queste brevi note con l'analisi della polarizzazione della luce.

Da quanto sopra esposto risulta chiaro che la *luce è una onda elettromagnetica:* questo significa che essa ha tutti i comportamenti tipici delle onde quali *riflessione, rifrazione, interferenza e diffrazione*. Tuttavia, come abbiamo già detto, durante la propagazione dell'onda e.m. non è la materia ad oscillare, in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, bensì sono i campi elettrici e magnetici che sono campi vettoriali. Questo fa sì che la luce mostri anche, a differenza delle onde sonore, il ***fenomeno della polarizzazione.*** Infatti i campi elettrici e magnetici, come qualsiasi vettore dello spazio, possono avere differenti direzioni (orientazioni nello spazio) e quindi, in particolare, differenti direzioni di oscillazione.

Per definire la polarizzazione della luce si prende come riferimento la direzione di oscillazione del campo elettrico.

Consideriamo, per fissare le idee, una onda e.m. monocromatica che si propaga nella direzione z .

Il campo elettrico dovrà oscillare in una direzione perpendicolare alla direzione z , ma le due componenti E_x ed E_y possono oscillare indipendentemente con una stessa frequenza definita. Il campo elettrico risultante sarà quindi la somma vettoriale delle sue componenti e potranno allora verificarsi tre diverse situazioni:

1. le due componente E_x ed E_y vibrano in fase: in questo caso il campo $\vec{E}$ oscillerà lungo una retta, percorrerà in altre parole un segmento di modulo E , la luce si dice ***polarizzata linearmente .***
2. Le due componente E_x ed E_y vibrano sfasate di $\pi/2$: in questo caso il campo $\vec{E}$ percorrerà una circonferenza di raggio pari al modulo E , la luce si dice ***polarizzata***

circolarmente .

3. Le due componente E_x ed E_y vibrano sfasate di un qualsiasi angolo $\propto$: in questo caso il campo $\vec{E}$ percorrerà una ellissi, la luce si dice ***polarizzata ellitticamente .***

Tuttavia se la luce non è assolutamente monocromatica o se le fasi relative delle componenti E_x ed E_y del campo elettrico non mantengono uno sfasamento definito, la polarizzazione dell'onda cambia continuamente più velocemente di quanto i nostri occhi non siano in grado di percepire, in questo caso affermiamo che la luce è ***non polarizzata*** in quanto gli effetti della polarizzazione si mediano.

La **luce bianca**, sovrapposizione continua di infinite frequenze, **non è polarizzata** ma la si può polarizzare facendola passare attraverso un mezzo ad esempio attraverso gli occhiali polaroid che non lasciano passare la componente della radiazione nociva agli occhi. Non solo ma anche la stessa atmosfera ha effetti di polarizzazione sulla luce proveniente dal sole.