estratto da : **L'EQUILIBRIO UNIVERSALE**
dalla meccanica celeste alla fisica nucleare

– Equazione teorica delle onde gravitazionali, interazione delle onde elettromagnetiche con la materia

In base a quanto abbiamo visto finora, possiamo affermare che :

Le onde gravitazionali sono onde che, " al pari di quelle elettromagnetiche ", vengono generate perturbando un sistema legato in equilibrio, con un mezzo esterno oppure per la naturale evoluzione del sistema stesso.

Tra i due tipi di onde non esiste una vera separazione, in quanto le differenze tra quelle che si producono in natura sono solo nella frequenza e nell'intensità.

Anche se il passaggio da un tipo all'altro in natura non è graduale, è possibile teoricamente immaginare **un generatore di tensione di qualsiasi potenza avente una frequenza arbitrariamente bassa**.

Per chiarire questo punto, riprendiamo l'espressione del campo magnetico generato da una massa rotorivoluente in equilibrio :

$$B(t) = \frac{10^{\frac{7}{2}}}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot C_l^3} \cdot \frac{\sqrt{F(t)}}{T}$$

Nella relazione T rappresenta il periodo di rivoluzione della massa orbitante e quindi può assumere valori estremamente bassi se si tratta **degli elettroni atomici oppure dei protoni nucleari**, **dell'ordine di** $\left(10^{-15} \div 10^{-22}\right)$ sec , mentre invece assume valori molto elevati, **dell'ordine di** $\left(10^{5} \div 10^{17}\right)$ sec , **se si tratta di materia ordinaria**, **fino ai sistemi astronomici**.

Se, per esempio, consideriamo un conduttore di uso comune come il rame, che presenta l'ultimo elettrone sul quarto livello, le caratteristiche risultano :

$$K_{ZN}^2(29) = K_p^2 \cdot Z = 253.2638995 \frac{m^3}{sec^2} \cdot 29 = \mathbf{7344.656} \frac{m^3}{sec^2}$$

2176

$$R_{Ze4} = R_{11e} \cdot Z^{\frac{1}{3}} \cdot p^2 = 2.60128 \cdot 10^{-9}\,m$$

$$V_{Ze4} = \left(\frac{K_{ZN}^2}{R_{Ze4}} \right)^{\frac{1}{2}} = V_{11e} \cdot Z^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{1}{p} = 1680320.7\,\frac{m}{sec}$$

$$F_{Ne4} = \frac{K_{ZN}^2 . m_e}{R_{Ze4}^2} = \frac{K_p^2 . m_e . Z^{\frac{1}{3}}}{R_{11e}^2 \cdot p^4} = \frac{F_{11e} . Z^{\frac{1}{3}}}{p^4} = 9.887501 \cdot 10^{-10}\,N_w$$

$$E_{1P_s e} = \frac{1}{2} \cdot F_{Ne4} \cdot R_{Ze4} = E_{11e} \cdot Z^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{p^2} = 8.027\,eV$$

$$T_{4e} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{Ze4}}{V_{Ze4}} = \frac{2 . \pi . R_{11e}^{\frac{3}{2}}}{\left(K_p^2\right)^{\frac{1}{2}}} . p^3 = T_{11e} \cdot p^3 = 9.7269 \cdot 10^{-15}\,sec$$

$$\nu_{4e} = T_{4e}^{-1} = 1.02808 \cdot 10^{14}\,H_z$$

Sostituendo nell'espressione di $B(t)$, si ottiene il contributo, alla formazione del campo magnetico nucleare, di un elettrone in orbita sul livello p dell'atomo avente numero atomico Z. Con alcune semplici semplificazioni, si ottiene :

$$B(t) = \frac{10^{\frac{7}{2}} \cdot \sqrt{F_{11e}} \cdot \nu_{11e}}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot C_l^3} \cdot \frac{Z^{\frac{1}{6}}}{p^5} = 12.51682894\,T \cdot \frac{Z^{\frac{1}{6}}}{p^5}$$

$$= 0.021425322\,T$$

Sommando tutti i contributi da $p = 1$ a $p = p_s$ si ottiene il campo magnetico nucleare totale, di valore **costante**, se l'atomo è in perfetto equilibrio con tutti gli elettroni su orbite circolari.

Se l'orbita della Terra fosse perfettamente circolare, **il contributo al campo magnetico solare** sarebbe :

2177

$$B(t) = \frac{10^{\frac{7}{2}}}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot C_l^3} \cdot \frac{\sqrt{F_{ST}}}{T_T} = \frac{10^{\frac{7}{2}} \cdot \nu_T}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot C_l^3} \cdot \sqrt{\frac{K_s^2 \cdot m_T}{R^2}} =$$

$$= 39.645 \cdot 10^{-9}\ T$$

casualmente ? perfettamente coincidente con il campo magnetico generato sulla Terra dal moto della Luna.

Dal confronto tra i valori ottenuti sul nucleo atomico e sui sistemi astronomici si vede che, nonostante in questi ultimi si abbiano valori molto elevati di K_s^2, i campi magnetici generati in condizioni di equilibrio risultano molto bassi, in quanto i periodi orbitali sono molto elevati.

Se ora si collega un generatore di tensione alternata al sistema in equilibrio e il valore dell'energia fornita dal generatore è sufficiente per allontanare la massa orbitante dal nucleo centrale, si ha sul polo del generatore un numero di particelle che segue nel tempo la stessa legge del generatore.
E' chiaro che la separazione non può aver luogo se il periodo del generatore è minore di quello orbitale.

E' infatti necessario che il verso del campo applicato si mantenga invariato fino alla completa separazione. Questo impone un limite al valore massimo della frequenza del campo elettromagnetico che possiamo generare.
A parte i problemi costruttivi degli apparati, nessun limite esiste invece per le basse frequenze.

Se l'energia ΔE, che viene fornita alla massa in orbita, non è sufficiente per allontanarla dall'orbita, la perturbazione indotta sposta l'equilibrio su un'orbita ellittica.
Questo è quello che si verifica nella quasi totalità dei sistemi astronomici.

Ricordiamo che l'energia si associa sempre ad un punto dello **spazio fisico** e rappresenta, per definizione, la sua capacità di sviluppare un lavoro contro i punti dello spazio circostante.

Il valore dell'energia associata a un punto dello spazio viene assunto dunque coincidente con il lavoro che esso sviluppa quando si sposta

2178

dalla sua posizione, **portandosi in una condizione di equilibrio stabile con lo spazio in cui si muove**.

Se V_{eq} è la velocità associata alla condizione di equilibrio raggiunta e V la velocità iniziale del punto considerato, risulta :

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(V^2 - V_{eq}^2 \right) \quad .$$

Se, per semplicità, consideriamo $V_{eq} = 0$, possiamo dire che in questo caso il trasferimento dell'energia E si realizza per mezzo dello spostamento della massa m e quindi avviene con la velocità V.

Se il punto che si considera non è libero, **non ha una velocità orientata in una direzione definita**, ma si muove su un'orbita ellittica, oscillando attorno ad una posizione di equilibrio, in uno **spazio rotante centrale** K_s^2, la forza di interazione con il nucleo centrale presenterà una componente di equilibrio, di valore costante più una sinusoidale generata dalla eccentricità dell'orbita, che genera sul nucleo un campo magnetico variabile, secondo la relazione :

$$B(t) = \frac{10^{\frac{7}{2}}}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot C_l^3} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{R(t)} \sqrt{K_s^2 \cdot m}$$

Dove T rappresenta il periodo orbitale della massa m ed è uguale a quello del campo elettromagnetico generato.

Ricordando l'equazione dell'orbita ellittica : $R(t) = \dfrac{R_{eq}}{1 + e \cdot \cos(\omega \cdot t)}$

sostituendo, si ha :

$$B(t) = \frac{10^{\frac{7}{2}}}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot C_l^3} \cdot \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\frac{K_s^2 \cdot m}{R_{eq}^2}} \cdot \left[1 + e \cdot \cos(\omega \cdot t) \right]$$

Indicando con B_{eq} la componente associata alla condizione di equilibrio e

2179

ricordando ancora che : $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, si può scrivere :

$$B_{eq} = \frac{10^{\frac{7}{2}}}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot C_l^3} \cdot \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\frac{K_s^2 \cdot m}{R_{eq}^2}} = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}}$$

si ha :

$$B{*}(t) = B_{eq} \cdot \left[1 + e \cdot \cos(\omega \cdot t) \right]$$

La componente variabile nel tempo, che genera il campo elettromagnetico, sarà :

$$B(t) = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Abbiamo visto che questa perturbazione, si propaga nello spazio circostante come **onda variabile sia nel tempo che nello spazio**, secondo la :

$$B(t) = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

derivando rispetto a t e rispetto a r , si ottiene :

$$\left(\frac{dB}{dr} \right)_{t=cost} = \frac{4 \cdot \pi^2}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right)$$

$$\left(\frac{dB}{dt} \right)_{r=cost} = - \frac{4 \cdot \pi^2}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \frac{1}{T} \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right)$$

utilizzando le equazioni di Maxwell :

2180

$$-\frac{d\vec{B}}{dr} = \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{d\vec{K_e}}{dt} \qquad ; \qquad \frac{d\vec{B}}{dr} = -\sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt}$$

si ottiene:

$$\sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} = \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{d\vec{K_e}}{dt} \quad \text{ossia : } d\vec{B} = \sqrt{\varepsilon \cdot \mu} \cdot d\vec{K_e}$$

e quindi si può considerare il campo elettrico :

$$K(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot C_l}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

Si noti che, esprimendo la forza F_{eq} con la legge di Coulomb, si ottengono i campi **elettromagnetici** classici.
Esprimendola con la legge della gravitazione di Newton, si ottengono i campi **gravimagnetici** .
Infine, **esprimendo la forza d'interazione** F_{eq} **con l'espressione della forza unificata** : $F_{eq} = \dfrac{M_s \cdot M}{R^2}$

si ottiene l'espressione dei " campi unificati ".
Essendo la simbologia dei campi elettromagnetici quella più diffusa, per una più facile esposizione, quando è possibile, verrà sempre usata.

Quando si conosce il valore del campo magnetico B_{eq} associato alla massa solare, che possiamo indicare con B_s , come accade per esempio nel caso dei pianeti del sistema Solare, si può utilizzare l'espressione del campo per ricavare il valore della massa che può orbitare in equilibrio.
Con qualche semplice sostituzione, si ottiene :

$$m = \left(10^7 \cdot C_l^2\right) \cdot B_{eq}^2 \cdot \frac{R_{eq}^5}{\left(K_s^2\right)^2}$$

2181

per esempio, per la Terra si ricava :

$$m = \left(10^{7} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{m^2}{sec^2}\right) \cdot \left(39.66 \cdot 10^{-9} T\right)^{2} \cdot \frac{384400000\, m^{5}}{\left(398754 \cdot 10^{9} \frac{m^3}{sec^2}\right)^{2}} = 7.226 \cdot 10^{22}\, K_g$$

coincidente, con buona approssimazione, con la massa della Luna.

Ricordando che l'energia elettromagnetica associata al volume unitario vale :

$$E_{v,t}\left(K_e ; B\right) = \varepsilon \cdot K_e^2 = \frac{1}{\mu} \cdot B^2$$

sostituendo l'espressione del campo magnetico, si ottiene :

$$E_{v,t}\left(K_e ; B\right) = \frac{10^{7} \cdot \mu_0}{4 \cdot \lambda^2} \cdot F_{eq} \cdot e^2 \cdot \cos^2 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)$$

ricordando ancora che : $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$, si può scrivere :

$$E_{v,t}\left(K_e ; B\right) = \frac{\pi}{\lambda^2} \cdot F_{eq} \cdot e^2 \cdot \cos^2 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)$$

che si propaga con il campo :

$$B(t) = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)$$

Da queste relazioni vediamo che sia il valore del campo magnetico che della energia associata, aumentano con il diminuire della lunghezza d'onda, per cui si ha la tendenza a produrre generatori di tensione aventi frequenze sempre più elevate.

Essi sono però **necessariamente oscillatori materiali** e come tali avranno una frequenza di oscillazione di gran lunga minori di quelle che caratterizzano il moto degli elettroni negli atomi.

2182

Valori limiti dei generatori sono dell'ordine di $500 \cdot 10^9 H_z$, mentre negli atomi l'ordine di grandezza minino è di $2 \cdot 10^{13} H_z$.
Nella produzione di campi elettromagnetici mediante l'impiego di generatori di tensione si ha dunque un vuoto tra $10^{13} H_z$ e $10^{11} H_z$.

Nella realà l'energia irradiata dall'elettrone che si muove su un'orbita ellittica è estremamente ridotta, per cui la reale produzione di campi elettromagnetici si ha solo con generatori fino al limite di frequenza che abbiamo indicato.

Per quanto riguarda la produzione di frequenze basse, dal solo punto di vista teorico non si pongono limiti, tuttavia per problemi costruttivi e perchè la loro scarsa utilità pratica non si scende al di sotto di frazioni di H_z.

Onde elettromagnetiche di frequenza molto bassa sono invece quelle gravitazionali, **generate dalle masse planetarie che si muovono su orbite ellittiche**.

Se consideriamo, per esempio il sistema Solare, **il contributo di frequenza più elevata**, al campo elettromagnetico generato dal Sole, **viene fornito dal pianeta Mercurio**, che presenta le seguenti caratteristiche :

$$m_M = 3.302 \cdot 10^{23} K_g$$

$$R_{eqM} = 57.909176 K_m$$

$$T_{eq} = 87.96935 g$$

$$e = 0.2056307$$

si ricava :

$$\lambda = T_{eq} \cdot C_l = 2.2723642 \cdot 10^{15} m = 15189.6 UA$$

$$F_{SM} = \frac{K_s^2 \cdot m_M}{R_{eqM}^2} = 1.306878 \cdot 10^{22} N_w$$

$$B_{eq} = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e = 20.5545 \cdot 10^{-9} T$$

2183

Il valore massimo dell'energia per unità di volume associata risulta :

$$E_{\nu,t}\left(K_e\ ;\ B\right)_{max} = \frac{\pi}{\lambda^2} \cdot F_{eq} \cdot e^2 = 3.36206 \cdot 10^{-10}\ \frac{J}{m^3}$$

Si tratta di valori irrilevanti, **nonostante le grosse masse in movimento**. Osserviamo inoltre che il periodo di circa **88** g porta a una lunghezza d'onda di gran lunga oltre i confini del sistema Solare e dunque diventa impossibile mettere in evidenza le caratteristiche ondulatorie del campo attraverso rilievi effettuati sulla Terra.

Si noti che non esiste alcuna continuità fra le frequenze massime prodotte dai sistemi astronomici e le minime che si ottengono con i generatori di tensione. L'enorme vuoto è originato all'elevato fattore di espansione della materia nel passare dalla materia ordinaria alla condizione di particella elementare.

Vediamo ora cosa si verifica quando un campo elettromagnetico interagisce con la materia ordinaria.
Innanzitutto osserviamo che, essendo la massa del protone molto più elevata di quella dell'elettrone, con buona approssimazione, possiamo pensare che qualsiasi atomo sia formato da un nucleo di protoni fermi e tutti gli elettroni in orbita sui diversi livelli con le relative frequenze.

Il campo elettromagnetico incidente sull'atomo è formato da due perturbazioni dello spazio, campo elettrico e magnetico, oscillanti con la stessa frequenza, ma sfasati di **90° spaziali**, nel piano ortogonale alla direzione di propagazione. I due campi hanno in ogni istante la stessa fase, mentre i moduli sono legati

dalla relazione : $K_{eq} = C_l \cdot B_{eq}$

La variabilità nel tempo e la propagazione nello spazio danno origine ad una variabilità, dello stesso tipo, nel tempo e nello spazio, secondo le relazioni :

$$\left(\frac{dK}{dt}\right)_{r=cost} = -\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot C_l}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \frac{1}{T} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)$$

$$\left(\frac{dK}{dr}\right)_{t=cost} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot C_l}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \frac{1}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)$$

2184

Con una differenza di percorso Δr si avrà una variazione del campo elettrico data da :

$$\Delta K = \left(\frac{dK}{dr} \right)_{t=cost} \cdot \Delta r = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot C_l}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \Delta r$$

e differenza di fase : $\Delta \vartheta = 2 \cdot \pi \cdot \dfrac{\Delta r}{\lambda}$

Quando il campo elettromagnetico investe l'atomo, il campo elettrico agisce sia sulle masse ferme che su quelle in moto, generando una forza :

$$\overrightarrow{F_K(r\,;\,t)} = q \cdot \overrightarrow{K(r\,;\,t)}$$

mentre il campo magnetico agisce, con la forza di Lorentz, solo sulle masse in movimento e si ha :

$$\overrightarrow{F_B(r\,;\,t)} = q \cdot \vec{V} \Lambda \overrightarrow{B(r\,;\,t)}$$

Sulla carica q agirà quindi la forza :

$$\overrightarrow{F_q(r\,;\,t)} = q \cdot \left(\overrightarrow{K(r\,;\,t)} + \vec{V} \Lambda \overrightarrow{B(r\,;\,t)} \right)$$

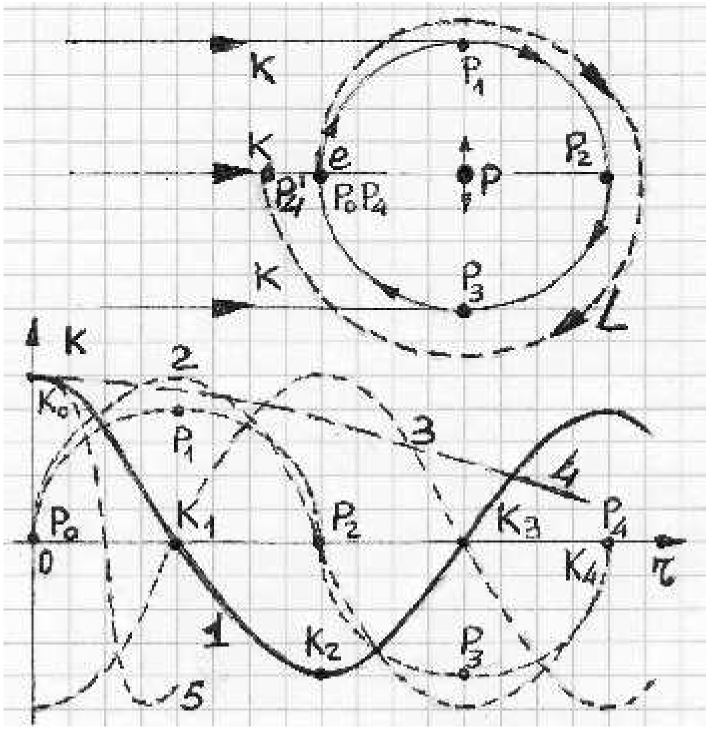
Ricordando la relazione : $K = C_l \cdot B$

la componente magnetica si può scrivere $\dfrac{V}{C_l} \cdot K$ ed essendo $V << C_l$,

risulta trascurabile rispetto all'azione del campo elettrico e dunque non verrà presa in considerazione.

Va ancora precisato che, se il campo elettromagnetico considerato è quello fornito da un generatore di tensione, è rappresentato da un treno continuo di onde aventi una lunghezza d'onda di gran lunga maggiore di quella associata al moto orbitale degli elettroni.
Supponiamo di avere un atomo come è schematizzato in figura, dove è stato indicato un solo elettrone perfettamente in equilibrio su un'orbita circolare.

2185



Per semplificare il discorso, supponiamo che, nell'istante in cui l'onda giunge sull'atomo, l'elettrone si trovi nel punto P_0 in moto sull'orbita nel verso orario e che il vettore K sia diretto verso l'alto con valore massimo positivo.

Se la sua lunghezza d'onda λ_K è uguale a quella associata all'orbita λ_e , la curva che il campo segue nello spazio e nel tempo è la **1**.
Dal diagramma vediamo che nel tratto $\widehat{P_0P_1}$ l'elettrone viene accelerato con accelerazione decrescente fino a zero in corrisponenza di P_1.

Nel punto P_1 il verso del campo s'inverte, ma s'inverte anche la componente verticale (l'unica che varia) della velocità dell'elettrone e quindi esso continua ad essere accelerato con accelerazione che raggiunge il valore massimo nel punto P_2 per poi decrescere fino a zero nel punto P_3 , in corrispondenza del quale il campo passa per lo zero, ed inverte nuovamente il verso insieme alla componente verticale della velocità dell'elettrone.
Con le condizioni che abbiamo ipotizzato, l'elettrone viene quindi accelerato su tutta l'orbita ed acquista energia, ritornando dopo un giro nel punto P'_4 su un'orbita di raggio maggiore.

Nella descrizione del processo d'interazione delle **onde elettromagnetiche con la materia** abbiamo detto che **l'elettrone viene accelerato dal campo elettrico**.

Nella realtà questo non si verifica, in quanto per ogni piccolo spostamento $\overrightarrow{dl}$ all'elettrone il campo elettrico cede l'energia :

$$dE_{\nu,t}(K\,;\,B) = q_e \cdot \overrightarrow{K(r\,;\,t)} \times \overrightarrow{dl}$$

Dopo l'intero giro avrà ceduto l'energia :

$$\Delta E_{\nu,t}(K\,;\,B) = \int_L q_e \cdot \overrightarrow{K(r\,;\,t)} \times \overrightarrow{dl}$$

Questa energia si trasforma sull'elettrone in energia potenziale, data da :

$$\Delta E_e(t) = m_e \cdot K_p^2 \cdot \left(\frac{1}{R_4} - \frac{1}{R_4'} \right)$$

con una velocità finale :

$$V_{e4}' = \left(\frac{K_p^2}{R_4'} \right)^{\frac{1}{2}} < \left(\frac{K_p^2}{R_4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

e periodo orbitale aumentato.
Per quanto riguarda il protone centrale, dopo un ciclo non si registra scambio di energia, in quanto esso subisce una oscillazione completa che lo riporta nella posizione iniziale.

Dunque il valore di energia $\Delta E_{\nu,t}(K\,;\,B)$, che l'onda elettromagnetica avrà ceduto coincide solo con quella fornita all'elettrone.
Se però il campo elettrico ha ceduto l'energia $\Delta E_{\nu,t}(K\,;\,B)$, per il principio di conservazione, deve diminuire il suo valore, secondo la relazione :

$$E_{\nu,t}(K\,;\,B) = \varepsilon_0 \cdot K^2$$

Dall'espressione :

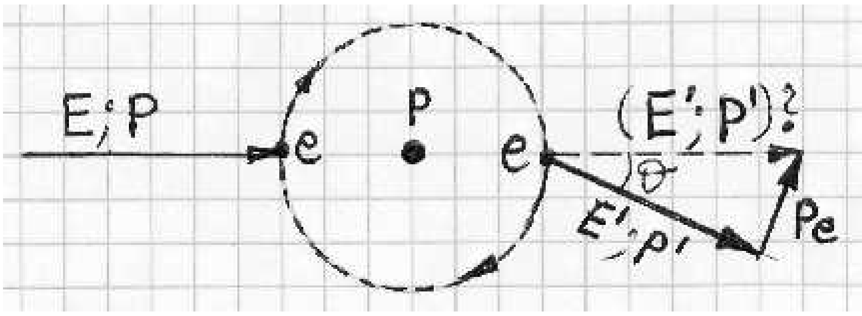
$$K(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot C_l}{10^{\frac{7}{2}} \cdot \lambda_K} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

2187

vediamo che l'unica caratteristica che può variare è la lunghezza d'onda λ_K .
L'onda elettromagnetica uscente dall'atomo, dopo l'interazione, avrà dunque una lunghezza d'onda $\lambda_K' > \lambda_K$.

Un volume di spazio che trasferisce un'energia $E_{\nu,t}(K\,;B)$ con una velocità C_l , trasferisce anche un impulso : $P_{\nu,t}(K\,;B) = \dfrac{E_{\nu,t}(K\,;B)}{C_l}$

durante l'interazione si deve dunque conservare anche l'impulso.



Con riferimento alla figura, se il campo elettromagnetico uscisse dal sistema nella direzione d'ingresso, con l'energia di uscita $E' < E$ sarebbe possibile soddisfare il principio di conservazione dell'energia, in quanto si tratta di una grandezza scalare, ma risulterebbe impossibile soddisfare la conservazione dell'impulso con $P' < P$.

Per poter soddisfare anche questo principio, il campo in uscita dovrà deviare di un angolo ϑ in modo che il nuovo impulso, sommato vettorialmente a quello che è stato trasferito all'elettrone dia come risultato quello iniziale.
Il calcolo non viene ripetuto in quanto è stato trattato diffusamente con l'effetto Compton e la deviazione della luce.

Sempre con l'ipotesi che la lunghezza d'onda λ_K sia uguale a quella orbitale, se il campo giunge nel punto P_0 con fase zero, la curva del campo in funzione dell'avanzamento r è la **2** , la quale mostra che l'elettrone viene accelerato e rallentato a tratti in egual misura e ritorna dopo un giro in P_0 con l'energia e

2188

l'impulso iniziali. La stessa cosa accade se il campo arriva in P_0 con la fase indicata dalla curva **3**.

Se la lunghezza d'onda λ_K è maggiore di quella orbitale, il campo varia nello spazio seguendo la curva **4** , dalla quale si vede che l'elettrone è accelerato nel primo semiperiodo e rallentato, ma in misura minore, durante il secondo semiperiodo.
In definitiva, l'elettrone riceve un impulso di energia e si verifica, in una misura più ridotta quanto abbiamo visto nel primo caso.

Infine, se λ_K è minore della lunghezza dell'orbita, la curva dell'avanzamento è la **5** e sull'elettrone, in aggiunta al moto orbitale, verrà indotta una vibrazione avente frequenza uguale a quella dell'onda incidente.

Il caso che è stato analizzato è estremamente semplificato ed ha solo valore esplicativo.
Nella realtà non abbiamo mai un solo atomo e gli effetti macroscopici, che si generano con l'interazione, sono il risultato medio su un gran numero di atomi.
Bisogna inoltre tener conto del fatto che, se si ha un campo elettromagnetico prodotto da un generatore con funzionamento continuo e non impulsivo, alla prima forma d'onda **seguono tutte le atre**, che interagiscono con l'elettrone con la stessa relazione di fase, esaltando l'effetto che è stato prodotto dalla prima.
Consideriamo quindi il caso reale di interazione tra campo elettromagnetico e ostacolo materiale posto a grande distanza dal generatore, in modo che si possa considerare il fronte d'onda un'onda piana equivalente a una serie di sorgenti perfettamente in fase tra loro.

Se l'ostacolo intercettato dall'onda elettromagnetica ha una certa estensione A sul piano parallelo al fronte d'onda e uno spessore d, lungo la direzione di propagazione, i primi atomi ad interagire saranno quelli superficiali, secondo le modalità che sono state descritte.

Tenendo conto che le orbite elettroniche dei diversi atomi sono orientate nello spazio in modo assolutamente casuale e che il moto orbitale degli elettroni si realizza senza alcun sincronismo, all'uscita del primo strato di atomi avremo un insieme di **onde secondarie** che si propagano in direzione diversa da un punto all'altro e con frequenza minore in misura dipendente, dalla deviazione ϑ_1 che hanno subito.

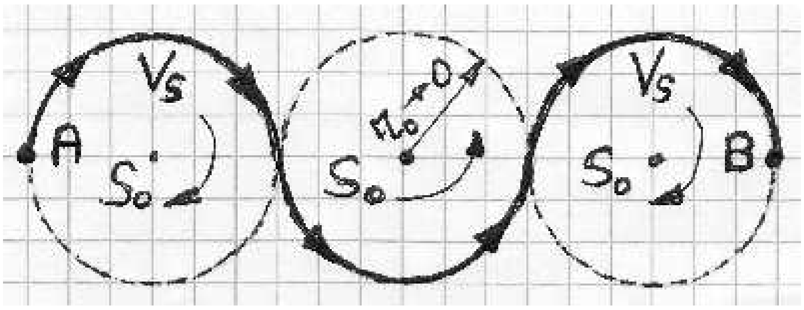
2189

A questo punto ricordiamo che **quella che noi indichiamo come velocità della luce**, **in realtà non è una caratteristica della luce**, **ma dello spazio fisico puro**.

Ricordiamo infatti che nella teoria degli spazi rotanti gli " **elementi spaziali** " sono dotati di rotazione propria su se stessi con velocità periferica V_s .
Se in questo spazio abbiamo un punto di materia organizzata di massa m **,**
e applichiamo una forza F**,** si produrrà uno spostamento nella direzione della forza con un'accelerazione data dalla relazione $F = m \cdot a$.

Se la forza F è alternata, la massa m avrà un moto oscillante attorno al punto di riposo con una velocità tanto più elevata quanto minore è la massa.

Se riduciamo gradualmente la quantità di materia alla quale la la forza viene applicata, la velocità di oscillazione aumenta. Quando la massa si annulla, si ha nel punto considerato solo una perturbazione alternata dell'equilibrio degli elementi spaziali la quale, **per la continuità** (assunta per definizione)**dello spazio fisico**, **si trasmette**, **attraverso la rotazione**, **agli elementi vicini**.



In questo modo l'oscillazione, che è stata prodotta in un punto A in direzione AB, si propaga dal punto A al punto B percorrendo la linea curva alla velocità V_s , caratteristica propria degli elementi spaziali e quindi dello spazio fisico.

Essendo la perturbazione uno spostamento di una massa nulla, la velocità di trasferimento raggiunge il valore massimo . Qualsiasi altra massa diversa da zero si sposterà con una velocità minore di V_s .
Essendo il raggio degli elementi spaziali $r_0 \to 0$, **nessun osservatore avrà**

2190

mai la possibilità di verificare il percorso curvo e dunque ci si riferisce al tratto rettilineo, considerando il valore massimo di velocità : $C_l = \frac{V_s}{\pi}$

C_l **rappresenta così una caratteristica propria dello spazio fisico puro** (**spazio privo di materia organizzata**) **e coincide con la velocità con la quale si propagano le caratteristiche di un punto avente massa** $m \rightarrow 0$.

Essendo il campo elettromagnetico un insieme di caratterictiche di un punto dello spazio fisico avente massa nulla, **diremo che esso nello spazio fisico puro si sposta con la massima velocità raggiungibile**, C_l.

E' chiaro che, **quando si scopre che la luce è una** perturbazione **che viene generata in un punto dello spazio avente massa nulla**, **dobbiamo pensare che " la sua velocità di propagazione dovrà essere uguale al valore massimo caratteristico dello spazio fisico in cui si muove** "**e**, **se lo spazio fisico è puro**, **non dipende dalla frequenza dell'oscillazione**.

Ritornando ora al nostro problema, nel passaggio dal primo al secondo strato di atomi, indipendentemente dalla frequenza, tutte le onde si sposteranno con la velocità C_l .

Quando il secondo strato di atomi viene raggiunto, essendo le caratteristiche uguali a quelle del primo, si ripete una interazione simile a quella che è stata già analizzata, fornendo all'uscita nuove onde secondarie con deviazioni ϑ_2 maggiori e comunque diverse da ϑ_1 .

Con questo meccanismo, l'onda elettromagnetica che attraversa lo spessore d di un mezzo nel quale è presente materia organizzata, durante il passaggio dall'ingresso all'uscita, "**tra una interazione e l'altra si è sempre spostata con la velocità massima** C_l", ma essendo il percorso molto irregolare, per le diverse deviazioni dalla traiettoria iniziale, la distanza realmente percorsa, alla velocità C_l, è maggiore di quella apparente tra il punto di entrata e quello di uscita.
Se L è il percorso reale e L_a quello apparente, la velocità apparente sarà :

2191

$$V_a = \frac{L_a}{L} \cdot C_l < C_l \, . \qquad \text{Avendo posto : } \quad C_l = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

si sceglie ora :

$$V_a = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} = \frac{C_l}{n}$$

il valore $n = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}$ viene definito **indice di rifrazione** .

E’ chiaro che l’indice di rifrazione è una caratteristica del mezzo in cui l’onda si propaga in quanto sarà proporzionale al numero medio di deviazioni che il campo subisce percorrendo un tratto di lunghezza unitaria e questo numero è proporzionale alla densità dei centri di diffusione presenti nel mezzo.

Si deve tenere presente che lo spazio vuoto reale deve essere definito come spazio fisico nel quale non è presente materia organizzata a livello elettronico ed oltre, in quanto questo è il grado di vuoto che noi riusciamo a produrre.
In questo spazio è dunque possibile la presenza di " **particelle più piccole** " che producono deviazioni che non riusciamo a rilevare. Per questo spazio si ottiene $n = \mathbf{1}$.

Per un mezzo materiale il livello di organizzazione è quello atomico e quindi il numero di deviazioni subite dal campo dipenderà dalla densità degli elettroni e quindi dal numero atomico Z .
In generale i materiali aventi minore densità risultano più permeabili alle onde elettromagnetiche.
Ritornado al nostro problema, le espressioni dei valori massimi del campo e dell’energia specifica immagazzinata :

$$K_{max} = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}}} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \nu$$

$$E_{\nu\,;\,max}\left(\frac{J}{m^3}\right) = \varepsilon_0 \cdot K^2_{max} = \frac{\pi}{C_l^2} \cdot F_{eq} \cdot e^2 \cdot \nu^2$$

Se consideriamo un singolo evento, l’energia viene trasferita per la durata di

2192

una forma d'onda, ossia per una lunghezza d'onda $\lambda = C_l \cdot T$.
Moltiplicando per l'energia per m^3 , si ottiene il valore massimo dell'energia che incide su una superficie uguale a **1** m^2 :

$$E_{S\,;\,\mathbf{max}}\left(\frac{J}{m^2}\right) = \frac{\pi}{C_l} \cdot F_{eq} \cdot e^2 \cdot \nu$$

Queste relazioni mettono in evidenza che il valore **del campo che accelera gli elettroni e l'energia massima trasferibile** alla sua sfera planetaria sono direttamente proporzionali alla frequenza ν dell'onda elettromagnetica.

Questo vuol dire che le frequenze che riusciamo ad ottenere con i generatori di tensione alternata, in un periodo riescono a trasferire all'elettrone in orbita un'energia piuttosto modesta e incapace di produrre effetti apprezzabili.

Se consideriamo, per esempio un'onda elettromagnetica incidente avente la frequenza di **100** GH_z , la lunghezza d'onda risulta $\lambda_K = \mathbf{2.99792458 \cdot 10^{-3}}\,m$ facendo passare quest'onda attraverso atomi leggeri, per esempio ossigeno che ha un'orbita periferica di lunghezza

$$\lambda_e = \mathbf{2} \cdot \pi \cdot R_{Ze3} = \mathbf{2} \cdot \pi \cdot R_{11e} \cdot Z^{\frac{1}{3}} \cdot p^2 = \mathbf{2.659935} \cdot 10^{-9}\,m$$

risulta un rapporto $\dfrac{\lambda_K}{\lambda_e} = \mathbf{1.137590 \cdot 10^6}$

Con un rapporto così elevato il campo risulta praticamente costante per tutto il periodo orbitale (curva **4**) e quindi l'unico effetto che sull'elettrone il campo elettromagnetico riesce a produrre è una piccola (perchè il valore del campo è basso) deformazione dell'orbita, che diventa ellittica.
Si deve tenere presente che la forza che agisce sul nucleo vale : $Z \cdot q_p \cdot K$ quella che agisce sull'elettrone $q_e \cdot K$ e quindi il rapporto fra le accelerazioni

risulta : $\dfrac{a_e}{a_N} = \dfrac{m_p}{m_e} \cdot \dfrac{\mathbf{1}}{Z}$

Il nucleo rimane praticamente fermo, mentre l'elettrone presenta una piccola oscillazione attorno alla posizione di equilibrio con frequenza ν_e.

2193

In queste condizioni l'elettrone genera un campo elettromagnertico di valore massimo ed energia specifica :

$$K_{emax} = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}}} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \nu_e$$

dove : $$\nu_e = \frac{V_{eq}}{\lambda_e} = \left(\frac{Z \cdot K_p^2}{R_{Ze3}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\lambda_e} = 8.224605 \cdot 10^{14}\ H_z$$

$$F_{eq} = \frac{Z \cdot K_p^2 \cdot m_e}{R_{Ze3}^2} = 10.298412 \cdot 10^{-9}\ N_W$$

sostituendo, si ottiene :

$$K_{emax} = \frac{2 \cdot \pi}{10^{\frac{7}{2}}} \cdot \sqrt{F_{eq}} \cdot e \cdot \nu_e = 165.8365 \cdot 10^{6} \frac{(K_g \cdot m)^{\frac{1}{2}}}{sec^2} \cdot e$$

$$B_{emax} = K_{max} \cdot \frac{1}{C_l} = 0.553171\, T \cdot e$$

$$E_{\nu\,;\,max}\left(\frac{J}{m^3}\right) = \varepsilon_0 \cdot K_{max}^2 = 243506 \frac{J}{m^3} \cdot e^2 = 1.51984 \cdot 10^{24} \frac{eV}{m^3} \cdot e^2$$

Si tratta di un valore molto piccolo che non produce effetti apprezzabili.

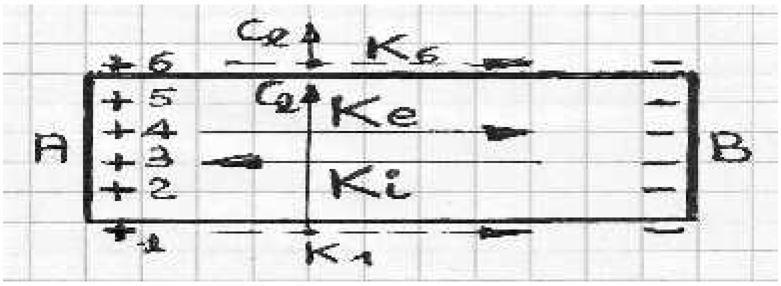
Applicando l'analisi che abbiamo fatto a un gran numero di atomi, variamente orientati nello spazio, possiamo concludere che :
I campi elettromagnetici forniti dai generatori di tensione, **anche quelli aventi la frequenza massima raggiungibile**, **quando interagiscono con** materiali aventi gli elettroni orbitali legati, **cedono agli elettroni un valore di energia molto basso**, **che produce una piccola deviazione dell**'**onda incidente direttamente proporzionale alla frequenza**.

Il risultato macroscopico osservabile dipende dalle caratteristiche del mezzo e dallo spessore attraversato dall'onda. In generale i gas, che hanno elettroni molto legati e gli atomi distanti tra loro, si comportano quasi come lo spazio

2194

vuoto e quindi i campi elettromagnetici riescono a percorrere grandi distanze senza apprezzabile attenuazione.

Decisamente diverso è il comportamento dei campi elettromagnetici quando investono dei metalli.
Sappiamo che i metalli sono caratterizzati dalla capacità dei singoli atomi di disporsi a distanza ravvicinata tra loro, scambiandosi gli elettroni orbitali.
Si formano così strutture cristalline rigide tra le quali si muovono liberamente gli elettroni periferici.
Per esempio, il rame, che presenta un elettrone sul quarto livello, in una mole pari a $\mathbf{63.546}$ g (peso atomico) vi sono $\mathbf{6.02214 \cdot 10^{23}}$ atomi e quindi si ha la carica libera : $Q_l = \mathbf{6.02214 \cdot 10^{23}} \cdot q_e = \mathbf{96485{,}3}$ C.



Con riferimento alla figura, se si applica un campo elettrico K_e tra le superfici A e B, la forza che nasce sugli elettroni liberi (detti anche di conduzione), li sposta da un atomo a quello vicino, creando così un difetto sulla superficie A ed un eccesso sulla B.
(in figura, per maggiore chiarezza, sono indicati i versi in direzioni opposte a quelle convenzionali).

Conseguenza di questa separazione di cariche è la creazione di un campo elettrico interno di verso opposto che cresce con il numero delle cariche che si separano. La condizione di equilibrio verrà raggiunta quando i due campi opposti avranno raggiunto lo stesso valore, fornendo un campo risultante di valore uguale a zero.

Se il conduttore viene investito da un campo elettromagnetico che si propaga con la velocità C_l nella direzione indicata, quando raggiunge il primo strato, sulla superficie **1** si genera un moto alternato di elettroni nella direzione di K ,

2195

che produce un **campo elettromagnetico indotto** che varia nel tempo, **con la stessa legge** di quello incidente.

Questo campo si propaga nello spazio in tutte le direzioni e in particolare nel conduttore, investendo il secondo strato di atomi, poi il terzo e così via fino al sesto in figura.

Trascurando problemi che in questo momento non interessano, diciamo che il conduttore, **opportunamente posizionato**, rispetto al piano di oscillazione del campo, riceve energia dall'onda incidente e **la riemette** nello spazio con la stessa lunghezza d'onda.
La corrente indotta nel conduttore, con appropriate manipolazioni, può trovare molte applicazioni pratiche.

Concludendo questa breve analisi, possiamo dire che **nell'interazione con i conduttori le onde elettromagnetiche vengono assorbite e riemesse come onde indotte aventi le stesse caratteristiche**.

Nell'interazione con i materiali isolanti, **le onde che si propagano sono sempre quelle incidenti**, **dopo che sono state variamente deviate**, **e per questo possono dare origine a diversi fenomeni che vedremo**.

Tutti i processi che sono stati esaminati presentano comunque un limite della frequenza massima, che non può essere superato con i normali generatori di tensione.
Vediamo dunque ora con quali artifici si giunge al superamento parziale del problema.
Abbiamo visto che, se si sottopone un atomo all'azione di un campo elettrico, gli elettroni orbitanti modificano il loro equilibrio, percorrendo orbite ellittiche, che portano alla formazione di **un campo elettromagnetico** che si propaga nello spazio alla velocità C_l con un periodo uguale a quello orbitale.

Si hanno così frequenze dell'ordine di $\mathbf{10^{15}}$ H_z. Il problema sembrerebbe così risolto, se si potesse trascurare il fatto che l'energia associata è decisamente piccola e che tra i campi emessi dai diversi atomi non esiste alcuna relazione di fase e questa casualità rende praticamente nullo il campo elettromagnetico che si propaga nello spazio esterno.
Anche se non risolve il problema, il meccanismo fornisce indizi sui metodi da usare per risolverlo.

Innanzitutto bisogna aumentare il livello di energia associata e questo si può ottenere attraverso due vie.
La prima è quella di aumentare l'energia fornita all'elettrone, aumentando la eccentricità dell'orbita, eventualmente fino al valore massimo $e = \mathbf{1}$.
La seconda via è quella di "**obbligare**" l'elettrone ad emettere tutta l'energia ricevuta in un tempo breve, impedendo la regolare evoluzione dell'orbita.

Si tratta dunque di un processo completamente diverso, che non fa uso di un generatore di tensione alternata e quindi non ricorda nemmeno lontanamente il processo che porta alla formazione delle onde elettromagnetiche.
Del resto, anche la perturbazione che viene generata presenta analogie con i campi elettromagnetici, ma anche notevoli differenze.