



asdf

LA "QUESTIONE" DELL'ETERE E L'EFFETTO DOPPLER

9 February 2012

Ci eravamo lasciati...

... [qui](#).

La domanda che ora ci poniamo è la seguente: quando si dice che la velocità della luce nel vuoto è pari a

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

qual è il sistema di riferimento che si sottintende?

L'etere

Proviamo a rispondere.

Non può essere il mezzo attraverso il quale l'onda si muove perché non è richiesto alcun mezzo, diversamente da quanto accade per il suono.

Va detto però che l'idea di un'onda che non richiedesse alcun mezzo era difficilmente accettabile per molti studiosi del diciannovesimo secolo, i quali erano, allora, "fuorviati" da una analogia non veritiera tra onde luminose ed onde sonore o altre perturbazioni meccaniche.

Essi postulavano l'esistenza dell'**etere**, o meglio del cosiddetto "**etere luminifero**", ossia portatore di luce, una sostanza tenue che riempisse tutto lo spazio e servisse da mezzo di trasmissione della luce. Se si voleva spiegare l'impossibilità di metterlo in evidenza con qualsiasi mezzo ordinario in uno spazio in cui era stato fatto il vuoto, si doveva ritenere che l'etere avesse una densità davvero molto piccola.

L'idea dell'etere si dimostrò utile per molto tempo ma poi [non riuscì a rimanere in piedi](#). Nella fattispecie furono compiuti tentativi accurati volti a misurare la velocità della Terra attraverso l'etere e tutti portarono ad un nulla di fatto.

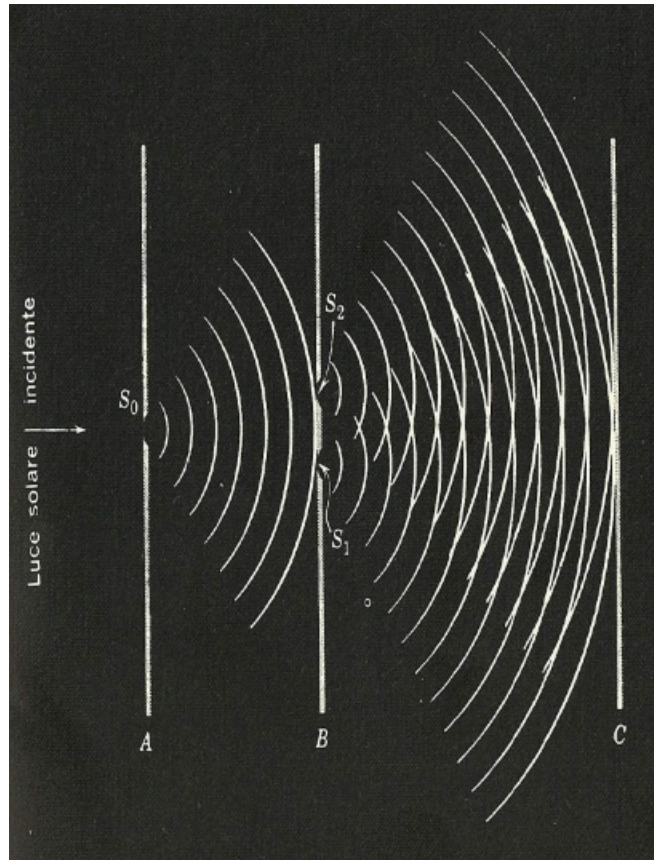
L'esperimento di Michelson-Morley

E' il caso, ad esempio, dell'**esperimento di Michelson e Morley**.

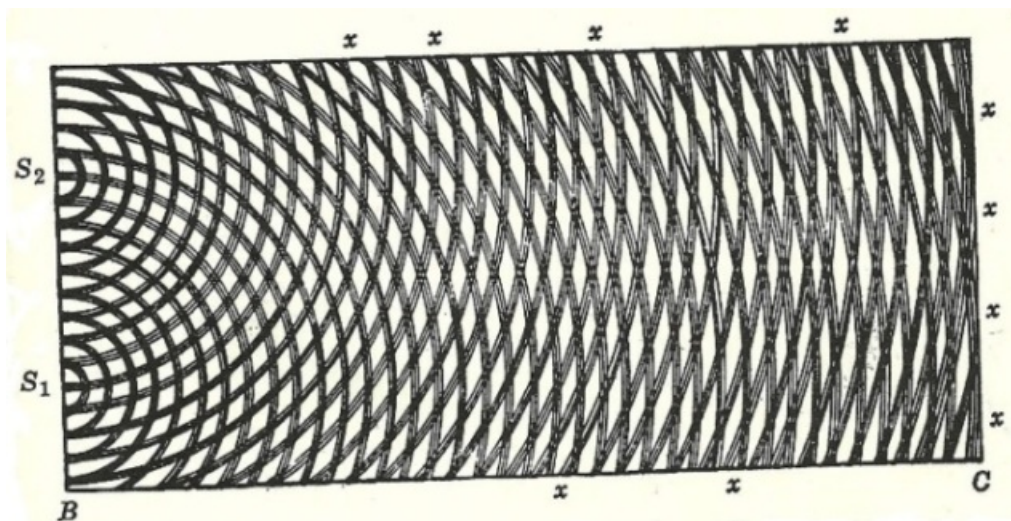
(Consci del fatto che dietro ogni parola che andremo a citare (o a spiegare brevemente) si celano pagine e pagine di letteratura e anni di studi, proviamo ad introdurre alcuni concetti iniziali che ci serviranno per comprendere meglio l'esperimento di Michelson e Morley.)

Quando due onde della stessa frequenza si propagano quasi nella stessa direzione, e presentano differenza di fase costante nel tempo, **si combinano** e così la loro energia non è distribuita in modo uniforme nello spazio, ma è massima in certi punti e minima (ma può essere anche nulla) in altri punti. Il britannico [Thomas Young](#) nel 1801 dimostrò l'esistenza di **effetti di interferenza** per la luce.

Come si vede dalla figura che segue, Young impiegò un fascio di luce solare incidente su un piccolo foro circolare S_0 praticato in uno schermo A . La luce che emerge dal foro si sparpaglia per diffrazione ed investe le fenditure circolari S_1 ed S_2 praticate sullo schermo B . Di nuovo si ha diffrazione ed anche nello spazio a destra di B si propagano due onde sferiche che si sovrappongono.



La seguente figura è invece tratta da un lavoro di Young del 1803.

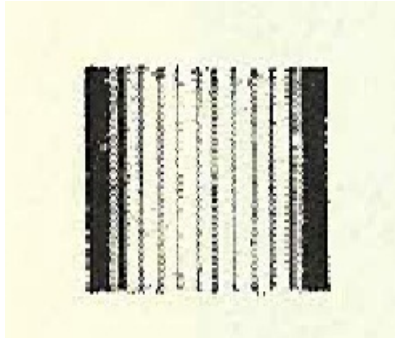


In essa si vede la regione compresa tra gli schermi B e C . Le zone annerite e quelle bianche sono i massimi ed i minimi (rispettivamente) delle onde. Avvicinando l'occhio al bordo sinistro della figura osservandolo in modo radente, si vede che lungo le linee

indicate con X si ha un annullamento delle onde mentre nella zone compresa tra queste linee si ha un rafforzamento.

Se si introduce nella regione in cui le onde si sovrappongono, uno schermo, ci si aspetta di vedere delle zone illuminate alternate a zone di buio.

La fotografia che segue mostra queste **frange di interferenza**; adoperando la tecnica moderna per preparare questa figura sono state adoperate fenditure lunghe e strette, piuttosto che circolari.



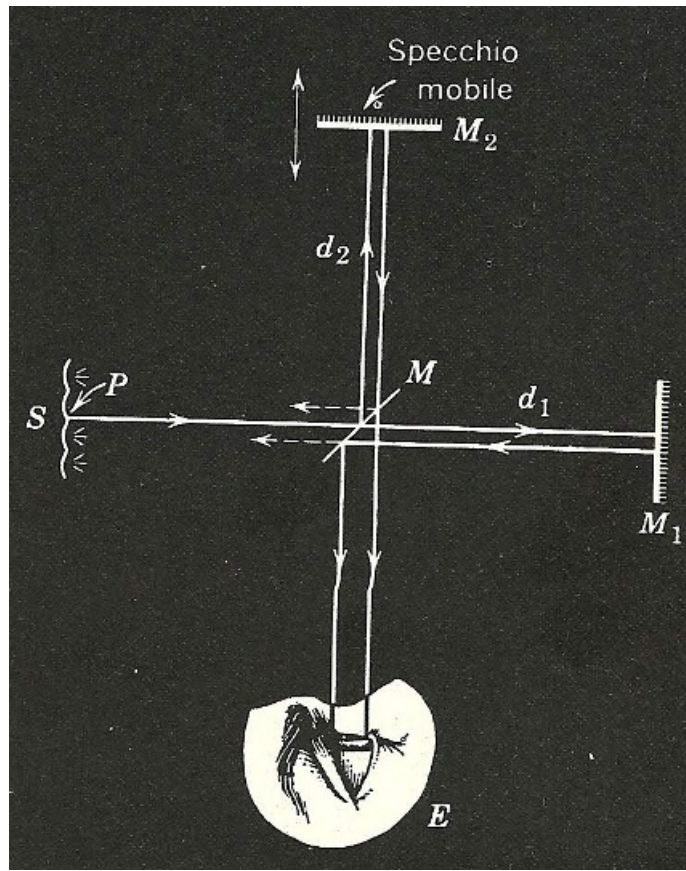
Fatte salve queste piccole premesse iniziali, **torniamo in compagnia di Michelson e Morley**, che avevamo lasciato da soli poco fa.

Nel 1881 [Albert Abraham Michelson](#) volle mettere in evidenza l'etere, ammesso che esistesse, assoggettandolo ad una verifica fisica diretta.

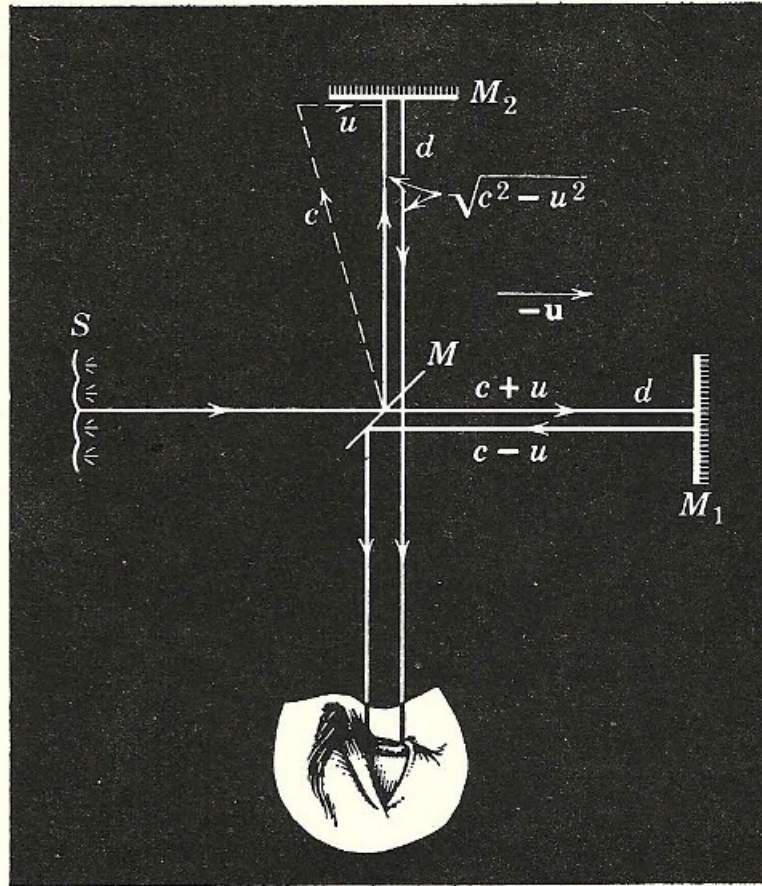
Egli fu affiancato in questo esperimento dal collega [Edward Morley](#). Egli cercò di misurare la velocità u con cui la Terra si muove nell'etere.

Adoperò come strumento l'**interferometro**. Brevemente, l'interferometro è uno strumento che può essere usato per misurare con grande precisione lunghezze o variazioni di lunghezza per mezzo delle frange di interferenza.

La figura che segue mostra l'interferometro adoperato da Michelson:



Nella figura che segue è mostrato l'interferometro che si muove insieme alla Terra con velocità u rispetto all'etere, che è equivalente ad un interferometro fermo rispetto al quale l'etere si muove con velocità pari a $-u$:



1

Consideriamo un'onda luminosa che si muove lungo il percorso MM_1M ed un'altra che si muove lungo il percorso MM_2M . L'analogo classico della prima onda è il vogatore che copre una distanza d , prima nel verso della corrente e poi in verso opposto; l'analogo della seconda onda è il vogatore che percorre avanti e indietro una distanza d muovendosi perpendicolarmente alla corrente.

Qualora esistesse l'etere, la velocità della luce nel tratto MM_1 è $c + u$ e nel tratto di ritorno M_1M è $c - u$.

Per percorrere il percorso completo è necessario il tempo:

$$t_1 = \frac{d}{c+u} + \frac{d}{c-u} = d \frac{2c}{c^2 - u^2} = \frac{2d}{c} \frac{1}{1 - (u/c)^2}.$$

La velocità della luce, **qualora esistesse l'etere**, lungo il tratto MM_2 è

$$\sqrt{c^2 - u^2}$$

come indicato dalla figura 1 in alto.

La stessa velocità è presente anche nel tratto M_2M e quindi il tempo richiesto per percorrere il cammino intero è:

$$t_2 = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}$$

La differenza di tempo impiegato nei due percorsi è:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2d}{c} \left[1 - \left(\frac{u}{c} \right)^2 \right]^{-1} - \left[1 - \left(\frac{u}{c} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

Se $u/c \ll 1$ le quantità all'interno delle parentesi possono essere sviluppate quadrate possono essere sviluppate in serie binomiale, arrestandoci ai primi due termini, ottenendo:

$$\Delta t = \frac{2d}{c} \left[1 + \left(\frac{u}{c} \right)^2 + \dots \right] - \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{c} \right)^2 + \dots \right] = \frac{2d}{c} \frac{1}{2} \left(\frac{u}{c} \right)^2 = \frac{du^2}{c^3} .$$

Se l'intero interferometro venisse fatto ruotare di 90° il cammino MM_1M diventerebbe perpendicolare ad u e MM_2M parallelo.

Anche il ritardo tra le due onde che arrivano all'occhio sarebbe invertito e ciò provocherebbe uno sfasamento tra le onde che si combinano e sposterebbe le posizioni dei massimi di interferenza.

L'esperimento **consiste nell'osservare spostamenti delle frange di interferenza, quando si ruota il dispositivo.**

La **variazione** della differenza di tempo è $2\Delta t$, che corrisponde ad uno spostamento di frange pari a $2\Delta t / T$ dove $T = \lambda / c$ è il periodo di vibrazione della luce.

Il numero massimo di frange che si prevede debba spostarsi per una rotazione di 90° è:

$$\Delta N = \frac{2\Delta t}{T} = \frac{2\Delta}{\lambda} = \frac{2d}{\lambda} \left(\frac{u}{c} \right)^2 \quad (1) .$$

Nell'interferometro di Michelson-Morley si aveva che d era pari a 11 metri e λ era pari a

$$5.9 \times 10^{-7} \text{ m} .$$

Facendo l'ipotesi che u sia dell'ordine della velocità orbitale della Terra, si ha

$$u/c \cong 10^{-4} .$$

Applicando la relazione (1) e sostituendo i valori finora stabiliti e/o ricavati si ha che il numero massimo di frange che si prevede quando l'interferometro si muove di 90° è pari a :

$$0,4$$

Nonostante fosse previsto uno spostamento di 0,4 frange Michelson e Morley si misero nelle condizioni di poter osservare uno spostamento di 0,10, frange.

Tuttavia essi non osservarono alcuno spostamento.

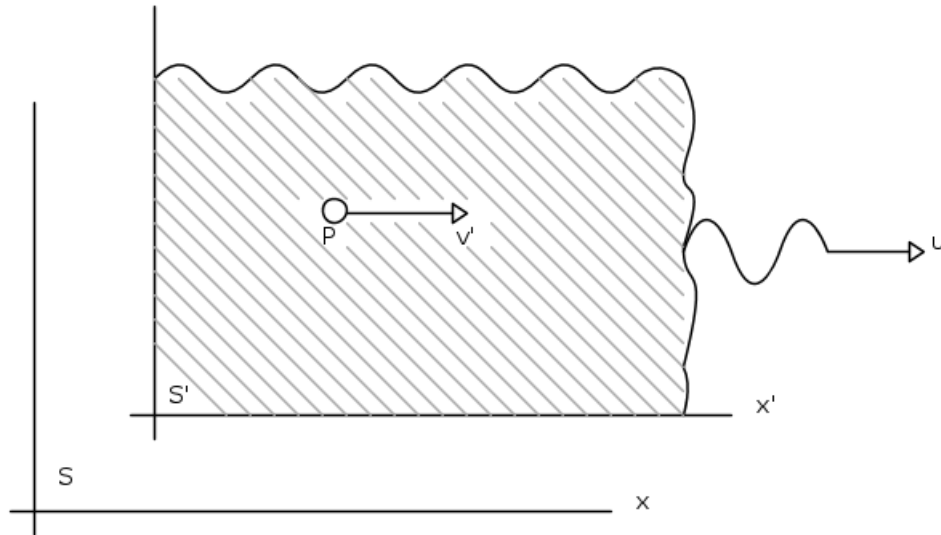
Torniamo a noi...

Dicevamo che i fisici non erano molto convinti a credere che la Terra fosse permanentemente a riposo nell'etere e che tutti gli altri corpi dell'universo in moto. Ad ogni modo nel 1905 [Albert Einstein](#) addusse una soluzione al problema difficile di comprendere la propagazione della luce attraverso un postulato audace.

Cioè: supponendo che un determinato numero di osservatori si muova (a velocità uniforme) l'uno rispetto all'altro e relativamente ad una sorgente di luce, se uno di essi misura la velocità della luce uscente dalla sorgente **troverà lo stesso valore trovato da ciascuno degli altri.**

Questo postulato fondamentale elimina la necessità dell'etere affermando che **la velocità della luce è la stessa in ogni sistema di riferimento.** Nessuno di essi quindi risulta "privilegiato" rispetto agli altri.

La figura che segue mette in evidenza il problema della propagazione della luce.



Una sorgente di luce, a riposo nel sistema di riferimento S' , emette un impulso luminoso P la cui velocità v' viene misurata da un osservatore a riposo nel medesimo sistema. Dal punto di vista di un osservatore che si trovi nel sistema di riferimento S , il sistema di riferimento S' e l'osservatore ad esso relativo si muovono nella direzione positiva dell'asse x a velocità u .

Ora quale velocità v dell'impulso di luce P misurerebbe l'osservatore S ?

L'ipotesi di Einstein afferma che **ciascun** osservatore misurerebbe la medesima velocità c , ovvero che:

$$v = v' = c .$$

Tale ipotesi è in contrasto con la legge classica della composizione delle velocità, che afferma che:

$$v = v' + u \quad (2) .$$

Questa legge è in realtà basata sulla osservazione di oggetti di grandi dimensioni in moto nel mondo che ci circonda.

L'evidenza sperimentale conferma che l'equazione (2) rappresenta una area di esperienza molto ristretta, per le quali, cioè:

$$v' \ll c \quad e \quad u \ll c .$$

Se si fa l'ipotesi che l'equazione (2) valga per tutte le particelle di qualsiasi velocità si farebbe una estrapolazione molto grossolana. La teoria della relatività di Einstein afferma che questa estrapolazione non è in realtà valida e che l'equazione (2) è un caso particolare dell'equazione generale:

$$v = \frac{v' + u}{1 + v'u/c^2} \quad (3)$$

che è valida per impulsi di luce e particelle materiali di qualsiasi velocità.

Se applichiamo l'equazione (3) al caso in cui un oggetto in moto è un impulso luminoso e ponendo $v' = c$, si ha:

$$v = \frac{c + u}{1 + cu/c^2} = c \quad .$$

Ciò mostra che **entrambi** gli osservatori misurano per la luce, la stessa velocità c .

L'effetto Doppler

Si è visto che se si misura la velocità della luce si ottiene sempre lo stesso risultato indipendentemente dalle velocità relative della sorgente luminosa e dell'osservatore. La frequenza e lunghezza d'onda misurate cambieranno ma sempre in maniera tale che il loro prodotto, che è la velocità della luce, rimanga costante.

Tali variazioni di frequenza sono conosciute anche come **effetto Doppler**, dal nome di [Christian Doppler](#), che lo prevede per primo.

Premesso che se una sorgente sonora si allontana da un osservatore a velocità u , la frequenza percepita dall'osservatore è:

$$\nu' = \nu \frac{1}{1 + u/v} \quad (4)$$

in "condizioni" di:

1. onda sonora;
2. osservatore fisso rispetto al mezzo;

3. sorgente che si allontana dall'osservatore.

In questa equazione appena scritta ν è la frequenza percepita quando la sorgente è a riposo e v è la velocità del suono.

Se la sorgente è a riposo nel mezzo attraversato il quale si propaga il suono, ma l'osservatore si allontana dalla sorgente a velocità u , la frequenza percepita è:

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{u}{v}\right) \quad (5)$$

in "condizioni" di:

1. onda sonora;
2. sorgente fissa rispetto al mezzo;
3. osservatore che si allontana dalla sorgente.

Si potrebbero applicare le equazioni (4) e (5) alla luce, sostituendo la velocità della luce c alla velocità del suono v . Tuttavia per la luce, diversamente da quanto accade per il suono, si è dimostrato impossibile identificare un mezzo di trasmissione relativamente al quale si muovono la sorgente e l'osservatore.

Questo significa che "sorgenti allontanatesi dall'osservatore" e viceversa sono situazioni fisicamente identiche e **devono presentare la stessa frequenza Doppler**.

Qualora fossero applicate alla luce o l'equazione (4) o l'equazione (5) o entrambe insieme non possono essere corrette.

Infatti la frequenza Doppler prevista dalla teoria della relatività è:

$$\nu' = \nu \frac{1 - u/c}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \quad (6)$$

in "condizioni" di:

1. onde luminose;
2. sorgente ed osservatore che si allontanano l'uno dall'altra.

Sostituendo nelle equazioni (4), (5), (6) — u ad u si ottengono le relazioni nel caso in cui sorgente ed osservatore **si avvicinano** l'uno all'altra.

Se il rapporto u / c è abbastanza piccolo, le equazioni (4), (5) e (6) non sono poi così tanto diverse.

Sviluppiamo le (4), (5) e (6) col teorema binomiale e sostituiamo C a v ottenendo:

$$\nu' = \nu \left[1 - \frac{u}{c} + \left(\frac{u}{c} \right)^2 + \dots \right] \quad (4a)$$

$$\nu' = \nu \left(1 - \frac{u}{c} \right) \quad (5a)$$

$$\nu' = \nu \left[1 - \frac{u}{c} + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{c} \right)^2 + \dots \right] \quad (6a)$$

Il rapporto u / c è piccolo per tutte le sorgenti monocromatiche ottenibili, anche per quelle di dimensioni atomiche.

Questo vuol dire che i termini successivi di queste equazioni diventeranno a mano a mano sempre più piccoli e sarà sufficiente mantenere solo un numero limitato di termini, dipendentemente dalla precisione richiesta.

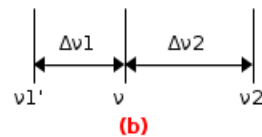
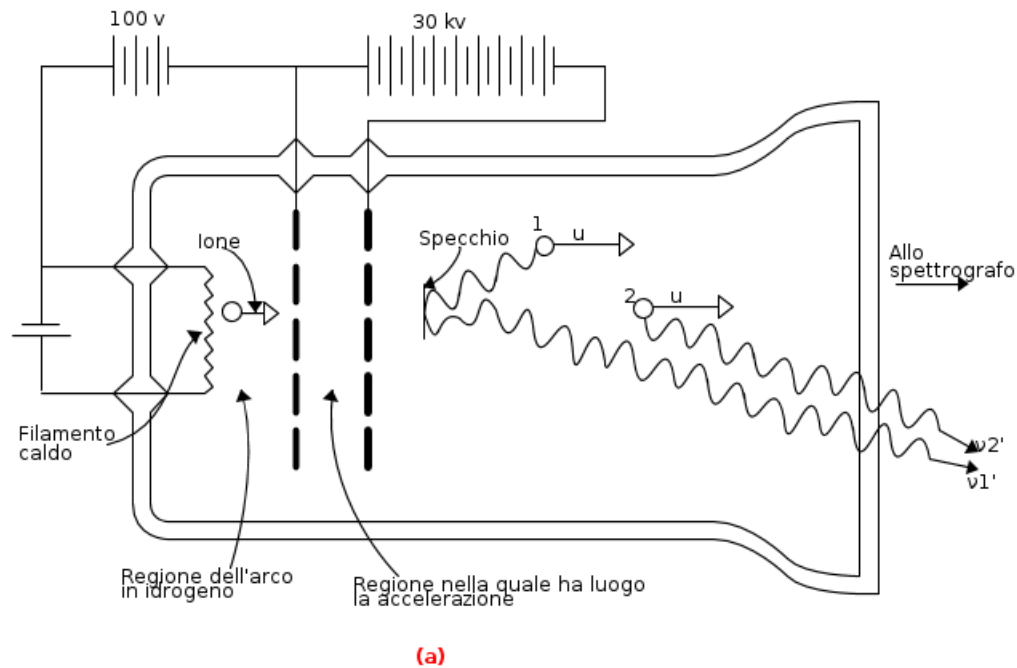
In quasi tutte le circostanze le differenze tra queste equazioni non sono importanti.

Proviamo a seguire ora un esperimento con precisione tale da poter servire da verifica dell'equazione (6a).

L'esperimento di Ives-Stilwell

A tal proposito [Herbert E. Ives](#) e **G. R. Stilwell** eseguirono un esperimento della precisione richiesta nel 1938.

Essi inviarono un fascio di atomi di idrogeno, generati in una scarica nel gas, lungo un tubo a velocità u , come rappresentato schematicamente nella figura (a) che segue.



Essi erano capaci di osservare la luce emessa da questi atomi nel verso opposto a quello di u (atomo 1 ad esempio) usando uno specchio, ed anche quella emessa nel verso di u (atomo 2 per esempio). Usando uno spettrografo di precisione essi poterono fotografare una linea particolare caratteristica dello spettro di questa luce, ottenendo in una scala di frequenza le linee indicate con ν_1' ed ν_2' nella figura (b).

Sulla stessa lastra fotografica è anche possibile fotografare la linea corrispondente alla luce emessa da atomi *a riposo*; questa linea è indicata con ν sempre nella figura (b). Una grandezza fondamentale misurata in questo esperimento è:

$$\Delta\nu / \nu$$

definita con:

$$\Delta\nu/\nu = \frac{\Delta\nu_2 - \Delta\nu_1}{\nu} .$$

Si riesce così a dimostrare di quanto la frequenza emessa da atomi a riposo si allontana dalla media delle frequenze ν_1' ed ν_2' .

Bibliografia

Fisica 2. Elettromagnetismo-ottica - David Halliday, Robert Resnick



Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Asdf:l-effetto-doppler>"