

LA MISURA DELLA VELOCITA' DELLA LUCE

UN'ESPERIENZA DI FISICA AD USO DEI DILETTANTI

Marco Brusadin

ROMA - 2009
- PRO MANUSCRIPTO -

AVVERTENZE SUL COPYRIGHT



Questi APPUNTI sulla MISURA DELLA VELOCITA' DELLA LUCE sono rivolti agli Sperimentatori dilettanti.

Sono stati rilasciati - a titolo completamente gratuito - sotto la Licenza: **Creative Commons Attribuzione-Non commerciale-Non opere derivate 2.5 Italia.**

Per leggere una copia della licenza visita il sito web <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/it/>.

L'OPERA È MESSA A DISPOSIZIONE SULLA BASE DEI TERMINI DELLA PRESENTE LICENZA "CREATIVE COMMONS PUBLIC LICENCE" ('CCPL' O 'LICENZA').

L'OPERA È PROTETTA DAL DIRITTO D'AUTORE E/O DALLE ALTRE LEGGI APPLICABILI.

OGNI UTILIZZAZIONE DELL'OPERA CHE NON SIA AUTORIZZATA AI SENSI DELLA PRESENTE LICENZA O DEL DIRITTO D'AUTORE È PROIBITA.

CON IL SEMPLICE ESERCIZIO SULL'OPERA DI UNO QUALUNQUE DEI DIRITTI QUI DI SEGUITO ELENCATI, TU ACCETTI E TI OBBLIGHI A RISPETTARE INTEGRALMENTE I TERMINI DELLA PRESENTE LICENZA AI SENSI DEL PUNTO 8.f.

IL LICENZIANTE CONCEDE A TE I DIRITTI QUI DI SEGUITO ELENCATI A CONDIZIONE CHE TU ACCETTI DI RISPETTARE I TERMINI E LE CONDIZIONI DI CUI ALLA PRESENTE LICENZA.



Creative Commons License Deed

Attribuzione - Non commerciale - Non opere derivate 2.5 Italia

Tu sei libero:

- di riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare quest'opera



Alle seguenti condizioni:

- **Attribuzione.** Devi attribuire la paternità dell'opera nei modi indicati dall'autore o da chi ti ha dato l'opera in licenza e in modo tale da non suggerire che essi avallino te o il modo in cui tu usi l'opera.

Non commerciale. Non puoi usare quest'opera per fini commerciali.

- **Non opere derivate.** Non puoi alterare o trasformare quest'opera, né usarla per crearne un'altra.

- Ogni volta che usi o distribuisi quest'opera, devi farlo secondo i termini di questa licenza, che va comunicata con chiarezza.
- In ogni caso, puoi concordare col titolare dei diritti utilizzi di quest'opera non consentiti da questa licenza.
- Questa licenza lascia impregiudicati i diritti morali.

Le utilizzazioni consentite dalla legge sul diritto d'autore e gli altri diritti non sono in alcun modo limitati da quanto sopra.

Questo è un riassunto in linguaggio accessibile a tutti del [Codice Legale \(la licenza integrale\)](#).

LA MISURA DELLA VELOCITA' DELLA LUCE

Marco Brusadin

Un po' di storia.

Si ritiene che Galileo Galilei sia stato il primo a sospettare che la luce non si propagasse istantaneamente e a cercare di misurarne la velocità, benché alcuni Autori sostengano che l'ipotesi di una velocità "finita" fosse antecedente.

Il metodo di misura usato, infruttuosamente per la verità, da Galileo si basava sull'invio di lampi di luce tramite lanterne tra due colline site in prossimità di Firenze.

La prima misura della velocità della luce, tuttavia, fu effettuata nel 1675 da Ole Rømer sfruttando una anomalia riscontrata nella durata delle eclissi dei "pianeti Medicei" e ottenendo il valore di 210800 km/s.

Misure più precise furono effettuate in seguito e portarono a valutare la velocità di rivoluzione della Terra in circa 1/10.000 della velocità della luce, con l'approssimazione di circa 1%.

Una volta abbandonato il modello "a flusso di particelle" della luce (teoria proposta da Cartesio e sostenuta da Newton), il modello "ondulatorio" (già sostenuto da Huyghens nel '600 e riaffermatosi nel XIX secolo anche ad opera degli esperimenti di Foucault e di Fizeau) postulava - peraltro - l'esistenza di un "mezzo" in grado di sostenere le oscillazioni. Tale mezzo, chiamato "etere", appariva però del tutto peculiare e poco convincente, anche perché avrebbe dovuto letteralmente "trascinare" la luce quasi fosse un "vento" che trasporta le foglie...

Michelson e Morley, servendosi di un "interferometro", tentarono più volte - inutilmente, peraltro - di scoprire l'eventuale presenza di questo "etere", la cui esistenza fu definitivamente esclusa da Einstein il quale dimostrò, inoltre, che la velocità della luce nel vuoto è costante e indipendente dall'osservatore e dalla sorgente.

Hyppolyte Fizeau, tramite un interferometro di sua ideazione e realizzazione che sfruttava la rotazione di una ruota dentata a mo' di otturatore fotografico, determinò per la luce una velocità assai prossima a quella oggi accettata.

Mi riferisco, ovviamente, alla velocità "nel vuoto" (c)!

Infatti, a causa del fenomeno della "rifrazione", la luce subisce una "diffusione" (chiamata *scattering*) che la fa apparire come "rallentata" nella sua propagazione. Nell'aria, la velocità della luce è quasi uguale a c , mentre nell'acqua, ad esempio, è solo $3/4 c$.

Numerosi esperimenti sono stati condotti per "rallentare" la luce tramite un drastico abbassamento della temperatura e utilizzando, dunque, le proprietà del cosiddetto "condensato di Bose-Einstein", cioè di quello stato della materia che si ottiene quando un insieme di bosoni viene portato a temperature assai prossime allo zero assoluto ($-273,15\text{ }^\circ\text{C}$) e che è caratterizzato dal fatto che una frazione - non trascurabile - delle particelle si porta nello stato quantistico di più bassa energia, manifestandosi peraltro gli effetti quantistici su scala macroscopica.

Infine, nel febbraio 2004, su *Physical Review Letters* sono apparsi i risultati di un esperimento, realizzato presso il Ginzton Laboratory dell'Università di Stanford, tendente a "bloccare" letteralmente la luce all'interno di un dispositivo a stato solido a base di semiconduttori (vds.: bibliografia).

La misura sperimentale della velocità della luce

La misura della velocità della luce richiede strumenti piuttosto sofisticati e costosi.

Tuttavia, accontentandosi di una certa approssimazione, tale misura può essere compiuta con strumenti alla portata di ogni laboratorio elettronico amatoriale.

Gli **strumenti** richiesti, infatti, sono:

- *Oscilloscopio* (anche monocanale) con banda passante di almeno 50 MHz, possibilità di espandere la base-tempi di 10x e sensibilità (verticale) di almeno 2 mV/div;
- *Generatore d'impulsi* della durata di 20 ns distanziati di 2 μs;
- 5 m di *cavo coassiale RG58 C/U* (se l'impedenza dell'oscilloscopio è 52 Ω) o *RG59 C/U* (se l'impedenza dell'oscilloscopio è 75 Ω) di buona qualità;
- 1 *connettore BNC* Maschio (per la connessione del cavo RG58);
- 1 *raccordo BNC* a "T" 1 Maschio/2 Femmine (per connettere cavo, generatore e oscilloscopio);
- 1 *raccordo BNC* Maschio/Maschio (per la connessione del BNC a "T" all'oscilloscopio).

L'esperimento si basa sul presupposto che, nel vuoto, la velocità degli impulsi elettromagnetici è pressoché identica alla velocità della luce, cioè circa 300.000 km/s (299.792, 458 km/s, per la precisione).

Quando gli impulsi elettromagnetici "viaggiano" lungo un conduttore, subiscono un "rallentamento" che dipende dalla "natura" del conduttore stesso, dalla sua "impedenza", dalla sua "geometria", dalle caratteristiche fisiche e geometriche dell'isolante presente tra il conduttore centrale e la "terra", dalla "capacità", ecc. Nel caso del nostro cavo coassiale, la terra è collegata alla "calza" del cavo e il conduttore centrale ne è isolato da una "camicia" in materiale plastico. La calza, il conduttore centrale e l'isolatore costituiscono un vero e proprio "condensatore" di capacità nota e il cavo è caratterizzato, oltre che dall'impedenza e dalla capacità, anche dal cosiddetto "fattore di velocità", o "coefficiente di velocità di propagazione" o semplicemente "coefficiente di propagazione" indicato con V_c .

$$V_c = \frac{\text{velocità nel cavo}}{\text{velocità nel vuoto}} \quad (1)$$

Le caratteristiche principali del cavo RG58 C/U (rilevabili, ad es., all'URL: <http://www.cavel.it/schpdf2.php?id=RG58C/U>) sono:

$$L = 0,25 \mu H/m$$

$$C = 100 pF/m$$

$$R_0 = 52 \Omega$$

$$V_c = 0,66$$

Per poter effettuare una misura abbastanza attendibile, occorre che il cavo, oltre ad essere di buona qualità, non abbia "strozzature" (dovute ad "acciaccamenti" o indebite torsioni) né interruzioni o altri difetti costruttivi. Il *coefficiente di velocità di trasmissione* "tipico" per i cavi RG58 e RG59 è 0,66, ma possono riscontrarsi lievi differenze a seconda della Casa costruttrice.

Il metodo adottato per misurare la velocità dell'impulso elettromagnetico nel cavo è la TDR, *Time Domain Reflectometry* (riflettometria nel dominio del tempo). Questo metodo, consistente nell'inviare lungo il conduttore un impulso di brevissima durata e di misurarne il tempo di "ritorno", per le sue caratteristiche di propagazione del segnale su un cavo coassiale, fu applicato - negli anni '40 - alle linee telefoniche per testarle, individuandone e localizzandone eventuali difetti.

Nell'esperimento che ci riguarda, l'estremità distale (quella, cioè, non collegata al generatore) del cavo verrà lasciata "aperta" (cioè con il conduttore centrale isolato dalla massa): in tal modo, l'impulso non potrà propagarsi al di fuori del cavo stesso e si genererà un'onda "riflessa" lungo il cavo stesso, della stessa polarità dell'onda "diretta".

Con l'oscilloscopio opportunamente connesso e "settato" si potranno visualizzare sia l'impulso "diretto" sia quello "riflesso" e sarà possibile, dunque, misurare abbastanza accuratamente il tempo Δt intercorso tra i due impulsi.

Il "fattore di velocità" V_c può essere ricavato dalla formula seguente:

$$V_c = \frac{2l}{(300t)} \quad (2)$$

ove:

V_c = "fattore di velocità di propagazione" del cavo

l = lunghezza del cavo (in metri)

t = tempo tra due impulsi (in *microsecondi*, μs).

Orbene, conoscendo esattamente la lunghezza del cavo e il suo "fattore di velocità" (dichiarato dal costruttore), sarà facile dedurre la velocità dell'impulso elettromagnetico e rapportare tale velocità (nel cavo) a quella nel vuoto.

Nell'esperimento realizzato l'intervallo di tempo misurato tra i due impulsi è di **2,6 cm** (cioè di **2,6 divisioni**) e considerando l'errore di misura dello strumento (dichiarato al $\pm 2\%$ dalla Casa costruttrice) si rileva che il Δt (cioè l'intervallo di tempo impiegato dall'impulso originario a tornare indietro lungo il cavo) è di **52 ns** [infatti, la base-tempi dell'oscilloscopio è stata tarata a **20 ns/div** ovvero a **20 ns/cm** e **20 ns*2,6 cm** danno appunto **52ns**].

La lunghezza del cavo, dal bocchettone BNC di uscita dal generatore d'impulsi al terminale "aperto", è, nel caso in esperimento, di **5,07 m** e la V_c (dichiarata dal fabbricante) è **0,66** [= **66% c**].

Come è facile comprendere, occorre moltiplicare per 2 la lunghezza del cavo perché l'impulso parte da un'estremità, raggiunge l'estremità opposta e torna all'estremità di partenza.

Pertanto, nell'esperimento, l'impulso in esame ha percorso **10,14 m** in **52 ns**.

Impostando la semplice proporzione:

$$10,14(m) : 0,052 (\mu s) = x (\mu s) : 1 (\mu s)$$

risulterà che l'impulso elettromagnetico ha viaggiato alla velocità di **195 m/ μs** , pari a **195.000.000 m/ μs** ovvero a **195.000 km/s**.

Dividendo questa velocità per il "fattore di velocità" del cavo, si ottiene:

$$V_{impulso} = \frac{195.000 km / s}{0,66} = 295.454,546 km/s$$

e, considerando l'errore di misura (tolleranza) dello strumento si avrà:

$$295.454,546 \pm 2\% km/s.$$

In definitiva, la misura mostrerà il risultato:

295.454,546 \pm 5.909,091 km/s ovvero un valore oscillante tra

289.545,455 km/s e **301.363,637 km/s**

del tutto accettabile per il metodo e gli strumenti usati.



foto 1a - L'oscilloscopio usato per l'esperimento.



foto 1b - la regolazione della base-tempi.



foto 1c - la regolazione dell'Asse Y.



foto 2 - Il generatore d'impulsi usato per l'esperimento.



foto 3 - qui sopra: l'impulso uscente dal generatore, prima di essere immesso nel cavo RG58.

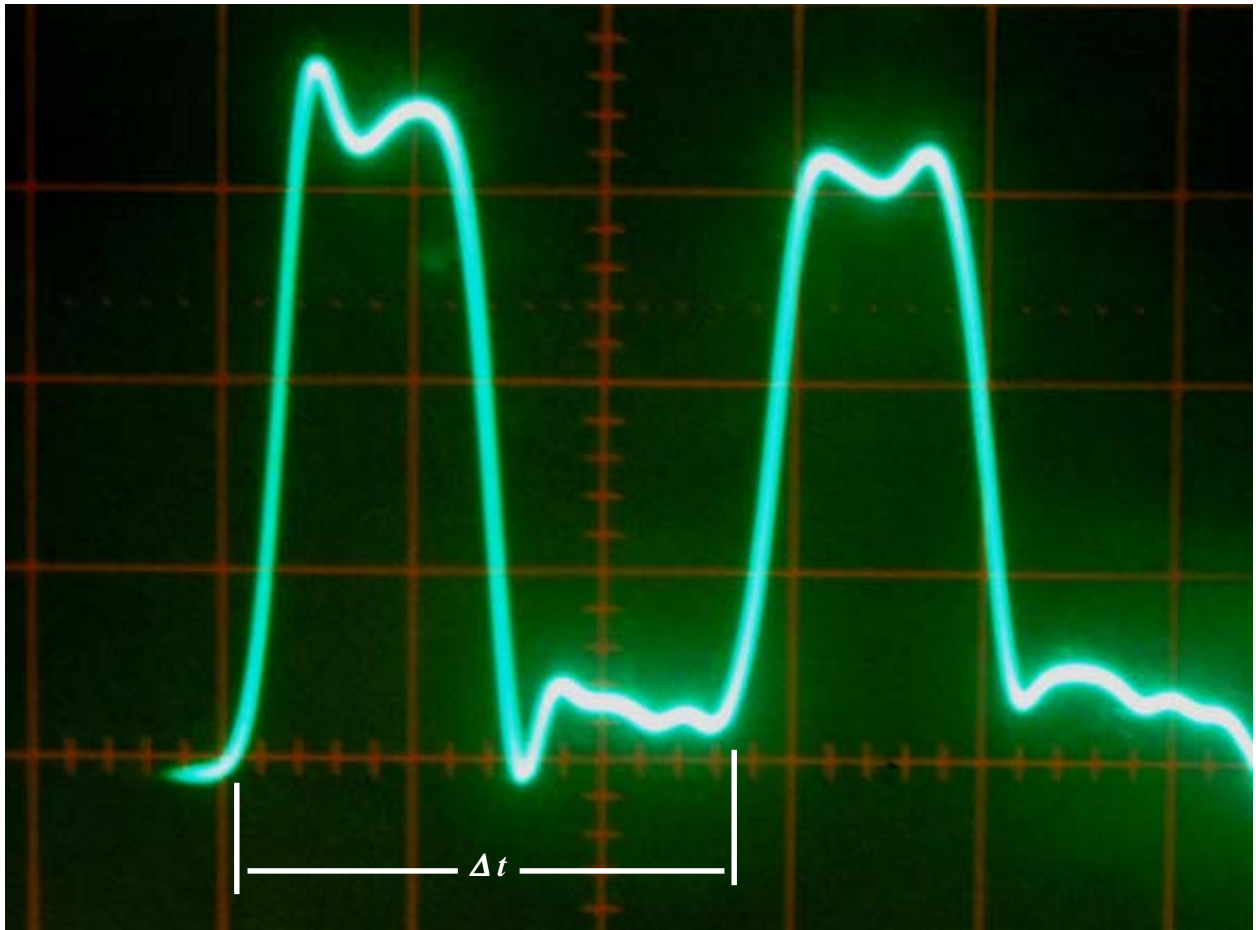


foto 4 - Si evidenzia l'impulso diretto (il primo da Sx) e quello di ritorno, leggermente più "attenuato" (il primo da Dx).

Si può facilmente misurare la distanza Δt tra i due impulsi, come indicato dalle due linee verticali bianche, che corrisponde a 2,6 cm (si ricorda che, nello schermo dell'oscilloscopio, ogni quadretto - chiamato "divisione" - corrisponde a 1 cm).

Sull'asse orizzontale (Asse X) si misurano i tempi (in *secondi/cm*), mentre sull'asse verticale (Asse Y) si misura l'altezza dell'onda (in *Volt/cm*).

Nell'esperimento a cui si fa riferimento l'oscilloscopio era così settato:

Asse X: 20 ns/cm

Asse Y: 0,5 V/cm

Pertanto la distanza Δt tra gli impulsi "diretto" e "riflesso" è di $2,6 * 20 = 52$ ns.

Gli impulsi all'uscita del generatore avevano le seguenti caratteristiche:

morfologia: tipo TTL (vedi foto 3)

durata: 20 ns

intervallo tra gli impulsi: 2 μ s

frequenza del generatore: 500 kHz

altezza degli impulsi: ~ 2 V.

Qualora non fosse disponibile un generatore d'impulsi con le caratteristiche richieste, è possibile utilizzare un semplice generatore basato su tre integrati (NE 555 CN in funzione di oscillatore ad onda quadra; 74HC00 in funzione di "ritardatore" dell'impulso; 74HC04 in funzione di invertitore di polarità dell'impulso e di adattatore d'impedenza). Il circuito è stato pubblicato dalla rivista Nuova Elettronica sul fascicolo n. 234 (gennaio-febbraio 2008) alle pagg. 42-63 e reca la sigla LX.5065. Questo circuito, progettato per misurare le caratteristiche dei cavi coassiali, si presta benissimo per il nostro scopo (vedi foto 5 qui sotto).

Realizzazione pratica dell'esperimento.

- Connettere tramite un raccordo BNC a "T" (tipo: 1 Maschio e 2 Femmine) e un raccordo BNC Maschio/Maschio il generatore d'impulsi all'oscilloscopio.
- Connettere al raccordo a T il cavo RG58 tramite un BNC maschio.
- Settare il generatore d'impulsi in modo da ottenere in uscita impulsi del tipo TTL di ampiezza di circa 2 V, di durata 20 ns e con un intervallo di 2 μ s. Attenzione: poiché la morfologia degli impulsi non è esattamente del tipo TTL (a causa di distorsioni dovute a svariate cause) l'onda mostrata in foto 3 appare più grande alla base e più stretta alla cuspid: pertanto, la misura della durata dell'impulso viene effettuata come "media".
- Predisporre l'oscilloscopio con la sensibilità verticale a 0,5 V/cm, il trigger inserito in automatico, la base-tempi settata a 20 ns/cm. Qualora la base-tempi non consentisse una scansione così rapida, occorrerebbe usare il "moltiplicatore" 10x per l'asse X.
- Misurare *esattamente* la lunghezza del cavo, dal connettore di uscita del generatore d'impulsi all'estremità distale del cavo coassiale: quest'ultima deve risultare "aperta" (cioè con il conduttore centrale isolato dalla massa, vedi foto 5)).
- Accendere gli strumenti, visualizzare (anche tramite gli spostamenti verticale e orizzontale della traccia) gli impulsi procedendo quindi alla misura della distanza tra l'impulso diretto e quello riflesso, calcolando poi la velocità dell'impulso come descritto nell'esempio.

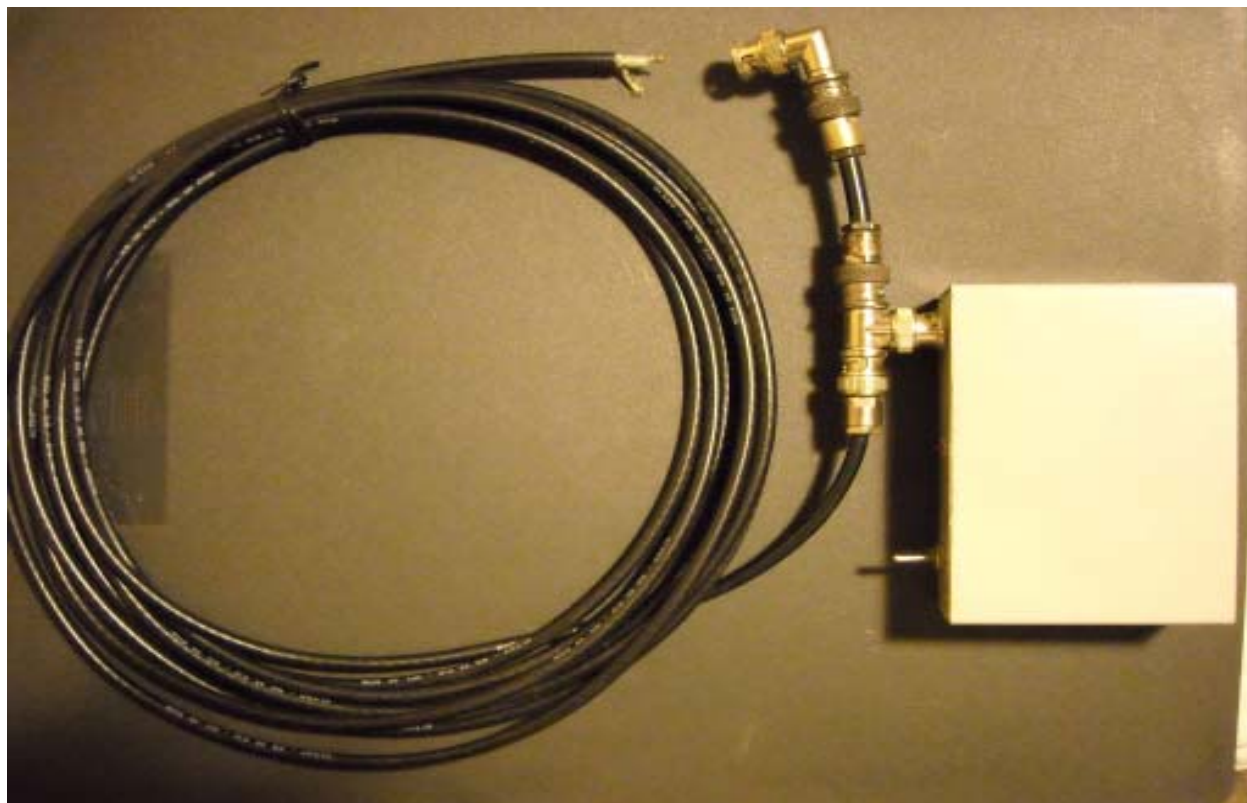


foto 5 - Un piccolo generatore d'impulsi e le connessioni al cavo e all'oscilloscopio.

Il cavo dovrebbe essere mantenuto “disteso” e non arrotolato, per evitare sempre possibili fenomeni di autoinduzione che potrebbero introdurre inesattezze nella misura.

N.B.: qualora non si conoscesse la “tolleranza” dell’oscilloscopio, potrà - in prima approssimazione - assumersi come valore $\pm 2\%$ o anche $\pm 2,5\%$.



foto 6 -Il piccolo generatore d’impulsi connesso con l’oscilloscopio e il cavo RG58. Il collegamento con l’oscilloscopio è stato realizzato con 2 BNC Maschi connessi tra loro con un piccolo tratto di RG58 e un connettore BNC angolare Maschio/Femmina. Ciò si è reso necessario per motivi di... spazio tra gli strumenti.



fot 7 - I connettori BNC necessari per l’esperimento.

Bibliografia - Sitografia

Per l'esperimento sul "fermo" della luce, vds:

Mehmet Fatih Yanik and Shanhui Fan, *Stopping Light All Optically*, Phys. Rev. Lett. 92, 083901 (2004), The American Physical Society.

L'articolo è reperibile (previo abbonamento) c/o PROLA, all'URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.083901>. [PROLA è "l'espressione concreta" di *The American Physical Society's Physical Review Online Archive*].

Per approfondire la propagazione delle onde, vds.:

L. Brillouin, *Wave Propagation and Group Velocity*, (Academic, New York, 1960).

Per approfondire gli aspetti della meccanica quantistica, vds.:

A. Messiah, *Quantum Mechanics* (Interscience, New York, 1963).

Per approfondimenti di optoelettronica, vds.:

S. L. Chuang, *Physics of Optoelectronic Devices* (Interscience, New York, 1995).

Per conoscenze di base sulla TDR, vds:

<http://www.epanorama.net/circuits/tdr.html>

<http://www.ostgate.com/tdr.html>

<http://www.ostgate.com/riserbond.html>

<http://www.iti.northwestern.edu/tdr/>

Per chi volesse approfondire la "teoria" della TDR:

<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5966-4855E.pdf>

Inoltre, sul seguente sito è presente un interessante filmato sull'uso della TDR nel controllo delle linee Ethernet:

<http://www.youtube.com/watch?v=4aXdvwYTzsk>

Per un'interessante simulazione di misura della TDR (in Java):

<http://www.eecircle.com/applets/018/TDR.html>

Per approfondire gli usi della TDR in chimica (es.: Broadband Dielectric Spectroscopy), vds.:

http://www.msi-sensing.com/broadband_dielectrics.htm

Per le applicazioni della TDR in agraria e scienza del suolo, vds.:

C.-C. Chung and C.-P. Lin, *Apparent Dielectric Constant and Effective Frequency of TDR Measurements: Influencing Factors and Comparison*, *Vadose Zone J.* (2009); 8:548-556.

R. C. Schwartz, S. R. Evett, M. G. Pelletier, and J. M. Bell, *Complex Permittivity Model for Time Domain Reflectometry Soil Water Content Sensing: I. Theory*, *Soil Sci. Soc. Am. J.* (2009); 73: 886-897.

R.C. Schwartz, S.R. Evett, and J.M. Bell, *Complex Permittivity Model for Time Domain Reflectometry Soil Water Content Sensing: II. Calibration*, *Soil Sci. Soc. Am. J.* (2009); 73: 898-909.