

Alla Scoperta della Ionosfera

Andrea Macchi

DALLA RADIO DI MARCONI ALLE TRASMISSIONI DEL VOYAGER, Convegno, Accademia Nazionale dei Lincei, 17-18/12/2024



La ionosfera come ... problema

11.14 Wave Reflection at the Ionosphere

The ionosphere is a layer of ionized gas, located from about $h \simeq 48\,000$ m altitude to about 965 000 m. As a very rough model we assume the ionized gas as a medium with free electrons without the effects of either dissipation or the Earth's magnetic field, so that it can be described by the dielectric permittivity $\varepsilon_r = \varepsilon_r(\omega) = 1 - \omega_p^2/\omega^2$; we further assume the free electron density n_e (and thus the plasma frequency ω_p) to be uniform (a typical value is $n_e \simeq 10^{12} \text{ m}^{-3}$).

The antenna of a radio broadcaster (S in Fig. 11.9) is located at sea level and can be modeled as an electric dipole oscillating in the direction perpendicular to the Earth surface. The radio is transmitting signals to a receiver (R in Fig. 11.9) located at a distance L, via reflection from the lower boundary of the ionosphere (assumed to be of infinite extension above h).

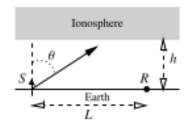


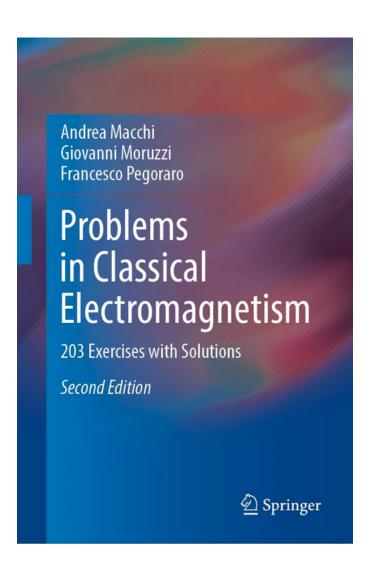
Fig. 11.9 .

(a) Determine the conditions on the broadcaster

frequency ω and the distance L for total reflection from the ionosphere of the signal sent from S to R.

Let θ be the angle between the wave vector of the emitted signal and the dipole, as in Fig. 11.9, determine what values of θ correspond to total reflection of the wave at the ionosphere.

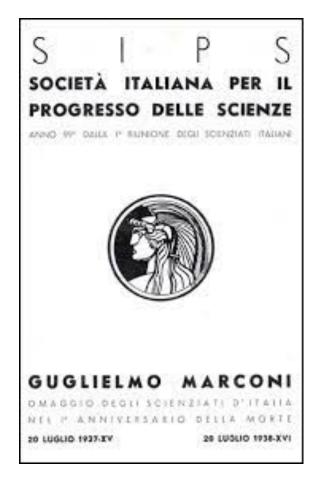
- (b) Evaluate the intensity of the signal reaching R as a function of the total power emitted by the antenna (Pa).
- (c) The Earth's magnetic field has an intensity of approximately 0.5 G. Is this intensity strong enough to affect the propagation of radio waves in the ionosphere? Wavelengths used for radio broadcasting range from approximately 0.1 m to approximately 100 m.





In una precedente celebrazione ...

"Quando nel 1901 Guglielmo Marconi riusciva per la prima volta a trasmettere i tre punti della lettera S attraverso 3500 Km di oceano, dava non soltanto la definitiva dimostrazione delle grandiose possibilità che la sua scoperta offriva per risolvere i problemi delle comunicazioni transoceaniche, ma veniva anche ad aprire un nuovo ed affascinante campo di indagini sulle proprietà elettriche dell'alta atmosfera"



Enrico Fermi, "Guglielmo Marconi e la propagazione delle onde elettromagnetiche nell'alta atmosfera", in:

"Guglielmo Marconi: Omaggio degli Scienziati d'Italia nel 1° Anniversario della Morte", 1938 [riprodotto in: *Il Colle di Galileo*, **6**, n.1 (2017)]



Breve riassunto della fisica di base (1/2)

- In un qualunque materiale a livello sub-microscopico gli elettroni sono le "antenne" riceventi e trasmittenti delle onde elettromagnetiche (EM). Ad esempio un elettrone nel campo di un'onda EM di una certa frequenza riemette (diffonde, irraggia) onde EM alla stessa frequenza.

Le proprietà ottiche di un mezzo materiale (riflessione, rifrazione, diffusione, assorbimento, ...) dipendono dalla sua struttura atomica e mesoscopica, dalla densità e dalla particolare frequenza EM (corrispondente a diversi colori per la luce visibile)





Breve riassunto della fisica di base (2/2)

-Mezzi materiali come gas ionizzati o metalli hanno elettroni "liberi" che cooperano per "cancellare" un'onda EM incidente generando un'onda "opposta" in fase.

- Per una data frequenza, se la densità degli elettroni è abbastanza elevata l'onda incidente è "cancellata" del tutto e il mezzo è riflettente a quella

particolare frequenza.

Questo è il meccanismo che spiega perché i metalli riflettono la luce visibile.

- La ionosfera ha un contenuto di elettroni liberi (generati dalla radiazione solare) sufficiente a riflettere le onde radio.





Alcune tappe essenziali

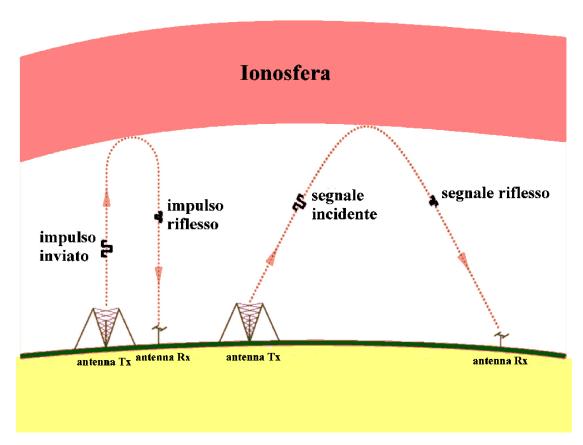
12/12/1901: trasmissione transoceanica di Marconi oltre l'orizzonte

1902: ipotesi indipendenti di O. Heaviside &

onde radio

A. E. Kennelly di uno strato ionizzato dell'alta atmosfera che rifletta le

1924-1927: esperimenti di E. W. Appleton sulla riflessione dalla ionosfera (Nobel 1947)



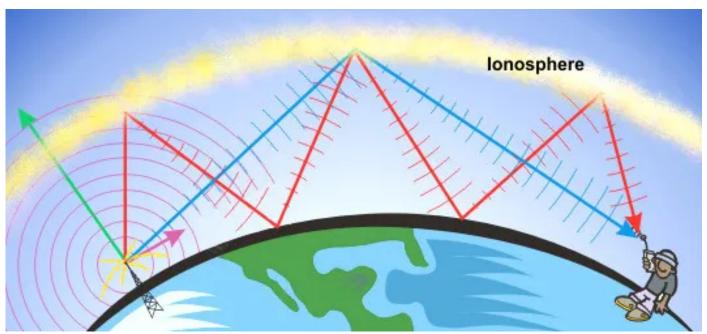
fonte: INGV, sezione Roma 2



Un esempio ante litteram di citizen science

1912: l'USA *Radio Act* impone ai radioamatori la banda di frequenze f > 1.5 MHz ("onde corte" di lunghezza $\lambda < 200$ m) ritenendola inutile.

1930: radioamatori comunicano in tutto il mondo con *skywaves* fino a 6 MHz e oltre, svelando molte caratteristiche della trasmissione

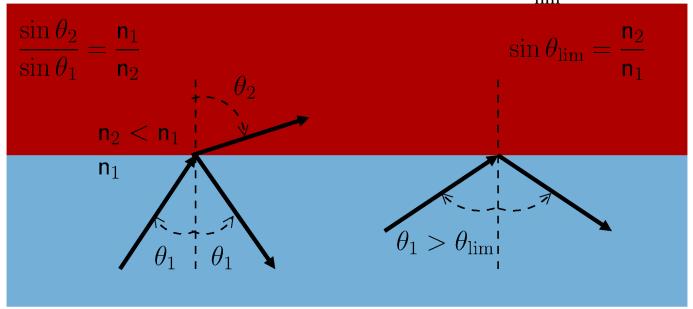


Fonte: INGV ambiente (e altri)



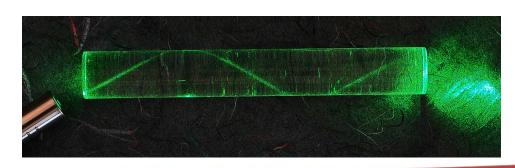
Fisica di base: rifrazione e riflessione totale

Legge di Snell per due mezzi con indici di rifrazione n_1 e n_2 : riflessione totale oltre l'angolo limite di incidenza θ_{lim}



Stesso principio usato nelle fibre ottiche

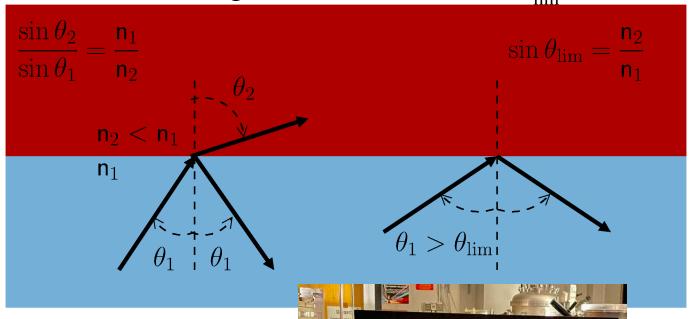
Fonte: <u>Timwether</u> (Wikipedia)





Fisica di base: rifrazione e riflessione totale

Legge di Snell per due mezzi con indici di rifrazione n_1 e n_2 : riflessione totale oltre l'angolo limite di incidenza θ_{lim}



Dimostrazione pratica con strato di olio su acqua

Simona Piccinini, CNR/INO



Modello semplice ...

L'indice di rifrazione dipende dalla frequenza ν delle onde EM (ovvero dal colore per la luce visibile)

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}(\nu)$$

o equivalentemente da $\lambda = c/v$

Per un plasma "semplice" con densità di elettroni liberi n_e (gas ionizzato, mare di Fermi in un conduttore)



Fonte: Kelvinsong (Wikipedia)

$$\mathbf{n} = \sqrt{1 - \frac{\nu_p^2}{\nu^2}} = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_p^2}} \qquad \nu_p = \frac{c}{\lambda_p} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\pi m_e}}$$
 riflessione totale per $n_e > n_c \cos^2 \theta_{\mathrm{inc}} \qquad n_e = \frac{1.1 \times 10^{21} \ \mathrm{m}^{-3}}{[\lambda \ (\mathrm{m})]^2}$



Effetti magnetici

Il campo magnetico terrestre (B) causa:

- anisotropia locale: la propagazione delle onde EM dipende da direzione e polarizzazione (birifrangenza)
- risonanza alla frequenza di "ciclotrone"

$$v_{\rm c} = qB / mc$$

(moto circolare delle cariche attorno a **B**)

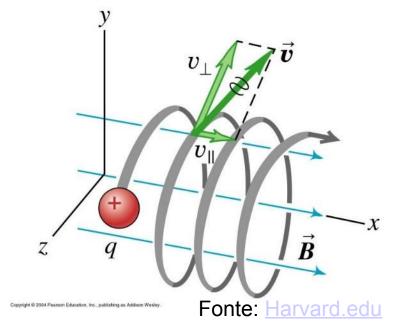
Appleton (1925): teoria "magnetoionica" della propagazione EM in ionosfera

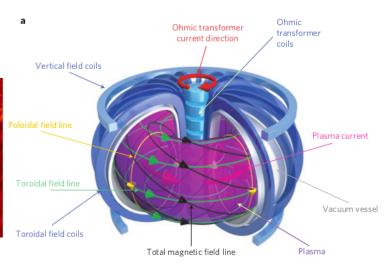
Fisica delle onde EM in plasmi magnetizzati:

- corona e vento solare
- magnetosfere planetarie
- fusione termonucleare
- a confinamento magnetico



Fonte: NASA SDO





Fonte: Ongena et al

Nat. Phys. 12 (2016) 398



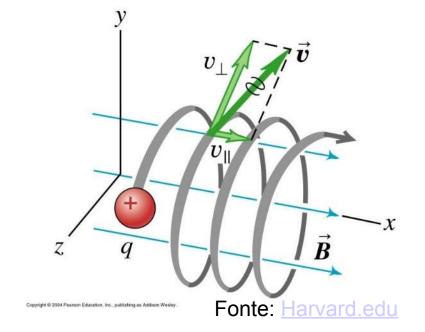
Effetti magnetici

Il campo magnetico terrestre (**B**) causa:

- anisotropia locale: la propagazione delle onde EM dipende da direzione e polarizzazione (birifrangenza)
- risonanza alla frequenza di "ciclotrone"

$$v_{\rm c} = qB / mc$$

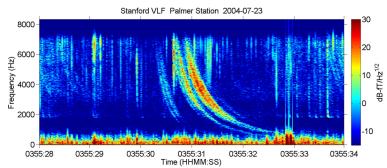
(moto circolare delle cariche attorno a **B**)



Effetti dominanti nella regione più esterna della ionosfera ("plasmasfera")

Onde caratteristiche: "fischietti" (*whistlers*) - segnali con tono ascendente nella banda kHz sovrapposta alle frequenze udibili

Osservati anche nell'atmosfera di Giove da Voyager 1/2



Fonte: drdan14 (Wikipedia) data: VLF Stanford group



Ionosfera artificiale?

Progetto West Ford o "Needles" (MIT Lincoln Labs, 1958-1963): dispersione in orbita di "antennine" di Rame di lunghezza $\lambda/2$ $con \lambda = c/(8 \text{ GHz})$ per consentire comunicazioni "immuni dai disturbi solari e dalle efferate trame sovietiche" (J.Hanson, "The Forgotten Cold War Plan That Put a Ring of Copper Around the Earth", Wired Magazine, Aug 13, 2013)

"Gli USA sporcano lo spazio" (*Pravda*, 1961)

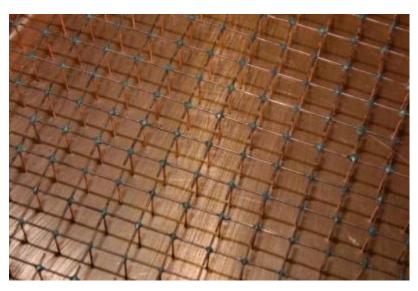


Fonte: NASA



Ionosfera artificiale?

Progetto West Ford o "Needles" (MIT Lincoln Labs, 1958-1963): dispersione in orbita di "antennine" di Rame di lunghezza $\lambda/2$ con $\lambda=c/(8 \text{ GHz})$



Fonte: Penn State (via Phys.org)



Fonte: NASA

Progetto fallito ma ... storicamente primo tentativo di metamateriale artificiale per indici di rifrazione "programmati"

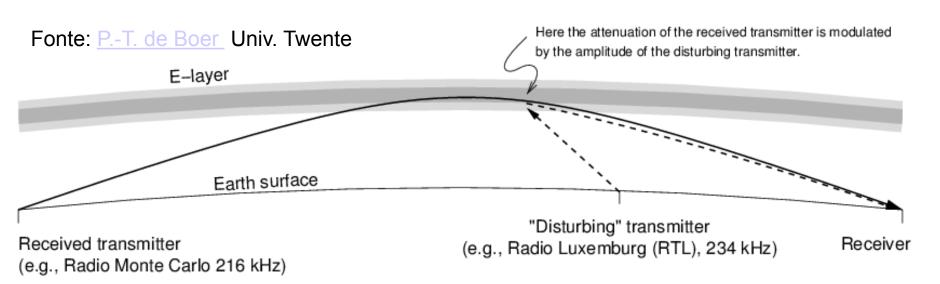
Es: metamateriale a griglia con 0 <n <1 componente antenna a banda larga per trasmissioni satellitari



Effetto Lussemburgo

1933: un ascoltatore sintonizzato su una radio Svizzera ode in sottofondo Radio Lussemburgo (trasmessa a frequenza diversa)

Effetto di "*cross-modulation*": la nonlinearità dell'assorbimento nella ionosfera per onde "forti" mescola le frequenze modulanti di onde sovrapposte (analogia con "effetto runaway" per plasmi in campi EM intensi)



Un primo modello teorico [teoria dei "fenomeni ereditari" di Volterra]

D.Graffi, Rendiconti del Seminario Matematico della Università di Padova 7 (1936) 36

Studio sperimentale recente: P.T. de Boer & M. Vester, Radio Science 53 (2018) 640



Progetto HAARP

"High-frequency Active Auroral Research Program"

Facility operativa dal 1993 con fini militari (--2014) e civili per lo studio "attivo" della ionosfera inclusa la generazione di strati ionosferici artificiali con onde HF ad alta potenza



Fonte: M. Kleiman US Air Force (via Wikipedia)

T. Pedersen et al Geophysical Research Letters 37 (2010) L02106

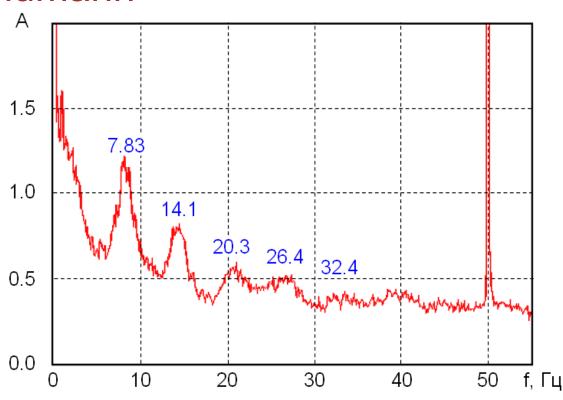
Definita anche la "Moby Dick" del cospirazionismo (accuse: mutazione del clima, generazione di terremoti, inversione dei poli magnetici terrestri, disastri aerei, controllo mentale, inferenza sulle elezioni USA, ...)



Risonanze di Schumann

Tra Terra e Ionosfera si osservano onde EM di frequenze estremamente bass (da 7.83 Hz a 32.4 Hz) correlate con l'attività atmosferica (fulmini) o altri eventi (e.g. esplosioni nucleari)

Predette da W-O. Schumann (1952)



Fonte: AdmiralHood (Wikipedia)



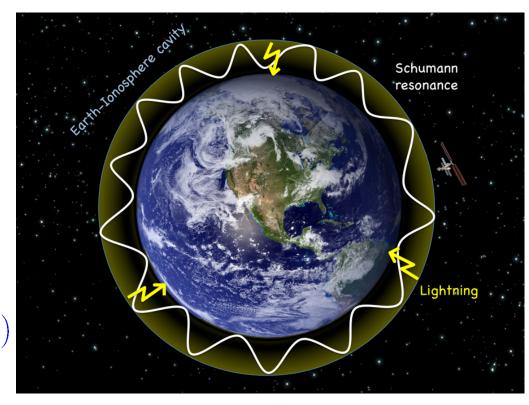
Terra-lonosfera come circuito risonante

Terra e Ionosfera formano una guida d'onda "cortocircuitata": per non auto-cancellarsi per interferenza la lunghezza della cavità deve essere un multiplo intero della lunghezza d'onda

$$2\pi R_T \simeq n\lambda \quad (n = 1, 2, 3...)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \simeq n \times 7.5 \text{ Hz}$$

(Idea della risonanza avanzata da N. Tesla nel 1905, brevetto U.S. 787 412)



Fonte: Victoriya Forsythe (NRL, USA)/ Nataliya Nosikova

No. 787,412.

Patented April 18, 1905.

UNITED STATES PATENT OFFICE.

NIKOLA TESLA, OF NEW YORK, N. Y.

ART OF TRANSMITTING ELECTRICAL ENERGY THROUGH THE NATURAL MEDIUMS.



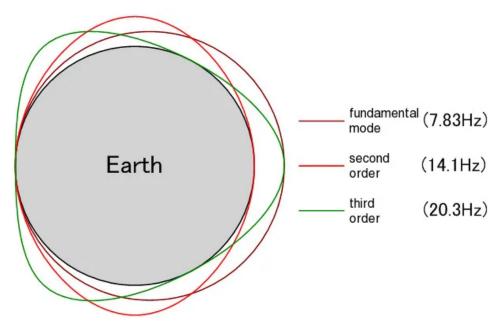
Terra-lonosfera come circuito risonante

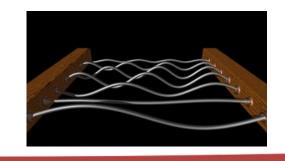
Terra e Ionosfera formano una guida d'onda "cortocircuitata": per non auto-cancellarsi per interferenza la lunghezza del circuito deve essere un multiplo intero della lunghezza d'onda

$$2\pi R_T \simeq n\lambda \quad (n = 1, 2, 3...)$$

 $\nu = \frac{c}{\lambda} \simeq n \times 7.5 \text{ Hz}$

Analogia con corde vibranti, strumenti musicali, cavità risonanti elettromagnetiche ...







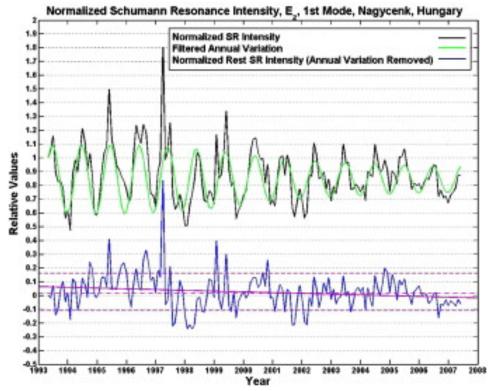


Un termometro globale?

La correlazione con la frequenza dei fulmini (fortemente dipendente dalla temperatura) locale ha suggerito di usare l'intensità delle risonanze di Schumann come indicatore della temperatura media globale

Tuttavia osservazioni tra il 1993 e il 2007 non mostrano variazioni apprezzabili (semmai una certa tendenza alla diminuzione ...)

E.R.Williams, Science **256** (1992) 1184; Atmospheric Research **91** (2009) 140



Dati 1993-2007, Nagycenk (Ungheria) - G. Satori



Effetti biologici ... (o non fisici)?

Il range delle frequenze delle risonanze di Schumann si sovrappone con quello dell'attività cerebrale registrata con l'Elettroencefalogramma. Le risonanze "mediano" il (presunto) effetto sulla salute dell'attività solare/ geomagnetica?

Di certa c'è l'ispirazione per discipline parascientifiche ...

"La formidabile [amazing] frequenza di 7.83Hz nota come frequenza di Schumann [è] la frequenza del nostro bel pianeta Terra ... se le persone sono esposte a questa frequenza naturale hanno benefici come migliore apprendimento o memoria, ringiovanimento, tolleranza allo stress, no jet lag ... se si rimuove la frequenza hanno mal di testa, stress emotivo e altri problemi di salute"







Limiti sulla massa del fotone

A livello quantistico la luce è costituita da fotoni, particelle aventi massa nulla secondo l'attuale modello standard.

Moltiplicando per la costante di Planck h la relazione "di dispersione" tra pulsazione $\omega=2$ πv e vettore d'onda k=2 $\pi/\lambda=2$ $\pi v/c=\omega/c$ della luce classica diventa la relazione tra energia E e quantità di moto p per una particella con massa nulla:

$$\omega = kc \longrightarrow (\hbar\omega) = (\hbar k)c \longrightarrow E = pc$$

In senso inverso, la relazione per una particella di massa *m* fornisce una relazione che prevede l'esistenza di una frequenza minima:

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \longrightarrow \omega = \sqrt{k^2c^2 + \omega_m^2} > \omega_m = \frac{mc^2}{\hbar}$$

L'esistenza di onde EM a 7.83 Hz fornisce per il fotone $m < 6 \times 10^{-50}$ kg



Una riflessione conclusiva

La ionosfera offre un percorso di comunicazione scientifica (storico, divulgativo e didattico) che si estende oltre il contesto dell'elettromagnetismo e delle telecomunicazioni.

Coinvolge aspetti fondamentali e attuali della scienza e della società (il rapporto tra teoria ed esperimento, la *citizen science*, la ricerca militare, le discipline parascientifiche e metafisiche, il complettismo antiscientifico). Forse questa varietà risuona con la "complessità" di Guglielmo Marconi.



Una riflessione conclusiva

La ionosfera offre un percorso di comunicazione scientifica (storico, divulgativo e didattico) che si estende oltre il contesto dell'elettromagnetismo e delle telecomunicazioni.

Coinvolge aspetti fondamentali e attuali della scienza e della società (il rapporto tra teoria ed esperimento, la *citizen science*, la ricerca militare, le discipline parascientifiche e metafisiche, il complottismo antiscientifico). Forse questa varietà risuona con la "complessità" di Guglielmo Marconi.

Ricordiamo infine che la memoria ha bisogno anche di luoghi ...

(la Stazione Marconi a Coltano, Pisa, stato attuale. Fonte: FAI)

andrea.macchi@cnr.it www.ino.cnr.it

