

S. E. Prof. Enrico Fermi

Guglielmo Marconi e la propagazione delle onde elettromagnetiche nell'alta atmosfera

*Guglielmo Marconi and the propagation of
electromagnetic waves in the upper atmosphere*

Accademico d'Italia

Quando nel 1901 Guglielmo Marconi riusciva per la prima volta a trasmettere i tre punti della lettera S, da Poldhu in Cornovaglia a San Giovanni di Terranova, attraverso a 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. Questi studi, che sono tuttora in corso, e che anzi hanno preso nuovo impulso particolarmente negli ultimi anni, hanno permesso di formarsi un quadro generale dei complessi fenomeni di ionizzazione atmosferica, se pure vi è tuttora discussione su punti fondamentali relativi alle cause e alle modalità con le quali il fenomeno si presenta.

When, in 1901, Guglielmo Marconi managed for the first time to transmit the three points of the letter S, from Poldhu in Cornwall to St. John's in Newfoundland, across 3500 km of ocean, he not only gave the definitive demonstration of the spectacular possibilities his discovery offered in solving transoceanic communication problems, but also opened a new and fascinating research field on the electrical properties of the upper atmosphere. These studies, which are still in progress and which indeed gained new impulse particularly in the past few years, have made it possible to construct a general outline of the complex phenomena of atmospheric ionization, although there is still debate about fundamental points relating to the causes and the ways in which the phenomenon occurs.

The transmission of radio waves between two remote stations

Everyone knows that Marconi's discoveries were initially met with skepticism in the scientific community. The skepticism was based on the belief that it was impossible to transmit radio



La trasmissione delle radioonde fra due stazioni lontane

È noto a tutti che le scoperte di Marconi furono in un primo tempo accolte con un certo scetticismo negli ambienti scientifici. Lo scetticismo era basato sulla convinzione che non fosse possibile la trasmissione delle radioonde tra stazioni situate una oltre l'orizzonte dell'altra. Si ragionava, infatti, pressa poco nel modo seguente: le onde elettromagnetiche usate nelle trasmissioni radio sono sostanzialmente analoghe alle onde luminose, dalle quali si differenziano solo per la grande lunghezza d'onda; e la terra, grazie alla sua conducibilità elettrica, si comporta per esse come un corpo opaco. Le radiazioni emesse da una stazione, propagandosi in linea retta, debbono lasciare in ombra tutte le stazioni situate al di sotto dell'orizzonte della stazione trasmittente; e ciò salvo una non grande correzione dovuta a fenomeni di diffrazione. Fu una fortuna per l'umanità che queste argomentazioni, che a priori potevano sembrare ragionevoli e ben fondate, non abbiano distolto Marconi dagli esperimenti sulle trasmissioni a grande distanza. La storia di questi primi successi delle radiotrasmissioni costituisce una riconferma del fatto che nello studio dei fenomeni naturali teoria ed esperimento debbono andare di pari passo. Raramente può l'esperienza, non guidata da un concetto teorico, raggiungere risultati di larga portata; ed è certo uno dei più significativi successi per la teoria che l'esistenza stessa e le proprietà essenziali delle onde elettromagnetiche fossero state previste matematicamente da Maxwell prima della verifica sperimentale della loro esistenza e prima che esse, attraverso alla geniale intuizione di Marconi, trovassero il loro terreno di pratica applicazione;

waves between stations when one was located beyond the horizon of the other. The argument went more or less as follows: the electromagnetic waves used in radio transmissions are basically similar to light waves, from which they differ only in the large wavelength, and the earth, because of its electrical conductivity, acts as an opaque body in relation to them. The radio waves emitted by one station, propagating in a straight line, would leave in shadow all the stations below the horizon of the transmitting station, unless a very large correction due to diffraction phenomena was to be considered. It was lucky for humankind that these arguments, which might a priori seem reasonable and well-founded, did not prevent Marconi from experimenting with long-distance transmissions. The history of these early successes of radio transmissions is a confirmation of the fact that, in the study of natural phenomena, theory and experimentation must proceed hand in hand. Rarely can experience, not driven by a theoretical concept, achieve far-reaching results; and it is certainly one of the most significant successes of theory that the very existence and the essential properties of electromagnetic waves had been predicted mathematically by Maxwell before the experimental verification of their existence and before they found their field of practical application through Marconi's brilliant intuition. On the other hand, overconfidence in theoretical predictions would have advised against persisting with experiments that indeed were destined to revolutionize the technology of communications.

In fact, in the theoretical discussions about the modes of transmission of radio waves between two remote stations, a factor had been omitted that subsequently turned out to be of

d'altra parte una fiducia eccessivamente spinta nelle previsioni teoriche avrebbe sconsigliato di insistere in esperimenti che erano destinati a rivoluzionare la tecnica delle comunicazioni.

Nelle discussioni teoriche sulle modalità della trasmissione delle radioonde tra due stazioni lontane era stato, infatti, ommesso un fattore che è risultato in seguito di importanza fondamentale; e cioè l'influenza che gli altissimi strati dell'atmosfera, grazie al loro stato di ionizzazione, esercitano sulla propagazione delle onde elettromagnetiche. Che un possibile stato di ionizzazione dell'alta atmosfera potesse avere una influenza sopra certi fenomeni geomagnetici era stato supposto molti anni prima delle scoperte di Marconi, nel 1878 da B. Stewart. Ma solo dopo che Marconi ebbe provato sperimentalmente che le onde possono propagarsi fino a limiti bene al di là dell'orizzonte, Kennelly ed Heaviside pensarono indipendentemente alla possibilità che le trasmissioni a grande distanza fossero rese possibili da riflessioni determinate dalla ionizzazione atmosferica. Il loro ragionamento è schematicamente il seguente: ammettiamo che, ad una altezza dell'ordine di grandezza di un centinaio di chilometri al di sopra del suolo, l'aria sia intensamente ionizzata ed acquisti così le proprietà di un conduttore elettrico. Questo alto strato ionizzato avrebbe allora la proprietà di riflettere le radioonde le quali, invece di disperdersi nello spazio, verrebbero ad essere come convogliate tra i due strati riflettenti costituiti dalla terra e dall'alta atmosfera. Con successive riflessioni su questi due strati resta allora evidentemente possibile alle radiazioni raggiungere un punto qualsiasi della superficie terrestre.

crucial importance: namely the influence that the upper layers of the atmosphere, due to their ionization, exert on the propagation of electromagnetic waves. Many years before Marconi's discoveries, in 1878, B. Stewart had already assumed that a possible state of ionization of the upper atmosphere could have an influence on certain geomagnetic phenomena. However, it was only after Marconi had experimentally proved that waves can propagate up to limits far beyond the horizon that Kennelly and Heaviside independently posited the possibility that long-distance transmissions were made possible by reflections determined by atmospheric ionization. Their reasoning can be summarized as follows: let's assume that, at a height of the order of a hundred kilometers above the ground, the air is heavily ionized and therefore acquires the properties of an electric conductor. This ionized layer would then have the property of reflecting radio waves which, instead of escaping into space, would be as it were channeled between the two reflecting layers consisting of the earth and the upper atmosphere. With successive reflections on these two layers it is then obviously possible for radiation to reach any point on the earth's surface.

The ionosphere and the propagation of radio waves

This is not the place to recall the innumerable researches and discussions, both theoretical and practical in nature, which have developed as a result of fundamental early experiences in radio transmission. Instead I shall restrict myself to summarizing the general lines of what today can

La ionosfera e la propagazione delle radioonde

Non è questo il luogo per ricordare le innumerevoli ricerche e discussioni, di carattere sia teorico che pratico, che si sono sviluppate in seguito alle prime esperienze fondamentali sulle radiotrasmissioni; mi limiterò, invece, a riassumere nelle linee generali quelli che oggi possono considerarsi risultati acquisiti sulle proprietà di ionizzazione dell'alta atmosfera (la così detta ionosfera) e sulla sua influenza sopra la propagazione delle radioonde. Una considerazione elementare dimostra che vi è una semplice relazione tra l'indice di rifrazione di un gas ionizzato per le onde elettromagnetiche e la densità degli ioni in esso contenuti. La relazione è la seguente:

$$(1) \quad n = \sqrt{1 - \frac{e^2 N}{\pi m \nu^2}}$$

dove n rappresenta l'indice di rifrazione; e ed m rispettivamente la carica elettrica e la massa degli ioni presenti nel gas; ν la frequenza delle onde in esame; N il numero di ioni per unità di volume. Dalla ispezione della formula si riconosce:

- a) che l'indice di rifrazione è minore di 1, ossia che lo stato di ionizzazione determina un abbassamento della rifrangibilità. Come conseguenza la radiazione elettromagnetica che, provenendo dalla bassa atmosfera, entra nella ionosfera può subire una riflessione totale venendo così respinta verso la terra. È appunto questa la proprietà fondamentale che si deve attribuire alla ionosfera per spiegare la sua influenza sulla propagazione delle onde a grandi distanze.

be considered acquired results regarding the ionization properties of the upper atmosphere (the so-called ionosphere) and its influence on the propagation of radio waves.

An elementary consideration shows that there is a simple relationship between the refractive index for the electromagnetic waves of an ionized gas and the density of the ions it contains. The relation is the following:

$$(1) \quad n = \sqrt{1 - \frac{e^2 N}{\pi m \nu^2}}$$

where n is the refractive index; e and m are, respectively, the electric charge and the mass of the ions in the gas; ν is the frequency of the waves under consideration; N is the number of ions per unit volume.

Analyzing the formula it can be observed:

- a) that the refractive index is less than 1, namely that the ionization state determines a lowering of the refraction index. As a result the electromagnetic radiation that enters the ionosphere, coming from the lower atmosphere, may suffer a total reflection and be pushed back towards the ground. This is exactly the fundamental property that must be attributed to the ionosphere to explain its influence on wave propagation at great distances.
- b) That, all other physical quantities being equal, the effect of a certain amount of ions is greater the smaller their mass; hence it is much more significant if the ionized gas contains free

- b) Che, a parità di altre condizioni, l'effetto di una determinata quantità di ioni è tanto maggiore quanta più piccola è la loro massa; esso sarà quindi assai più notevole se il gas ionizzato contiene elettroni liberi, che non se essi sono legati sotto forma di ioni atomici o molecolari, di massa molto maggiore. La estrema rarefazione della altissima atmosfera, oltre cento chilometri di altezza, rende d'altra parte probabile che elettroni liberi, una volta formati, vi possano rimanere per un tempo relativamente lungo. Per questo, e più ancora per la verifica diretta fatta in base alla azione che il campo magnetico terrestre esercita sulla rifrazione delle radioonde, deve ritenersi che, almeno nei più alti strati della atmosfera, le onde si rifrangano per effetto prevalente degli elettroni liberi.
- c) La radiazione elettromagnetica, che si propaga verticalmente verso l'alto, subirà una riflessione totale raggiungendo uno strato della atmosfera in cui la densità della ionizzazione sia tanto elevata da rendere eguale a 0 l'indice di rifrazione. Si riconosce, dalla formula (1), che ciò si verificherà quando si abbia:

$$(2) \quad N = \frac{\pi m v^2}{e^2}$$

e cioè per es. una onda di 1000 m. di lunghezza si rifletterà totalmente incontrando uno strato in cui la concentrazione degli elettroni sia di 1100 per centimetro cubo. Per riflettere una onda di 100 m. di lunghezza occorreranno invece 110.000 elettroni per cm^3 , mentre per una onda di 10 m. di lunghezza ne occorrerebbero 11.000.000.

electrons than if they are linked in the form of atomic or molecular ions with much greater mass. On the other hand, the extreme rarefaction of the uppermost atmosphere, over a hundred kilometers in height, makes it likely that free electrons, once formed, may remain there for a relatively long time. For this reason, and even more for the direct verification made on the basis of the action that the terrestrial magnetic field exerts on the refraction of radio waves, it must be considered that, at least in the highest layers of the atmosphere, the waves are refracted due to the prevailing effect of free electrons.

- c) The electromagnetic radiation, that propagates vertically upwards, will undergo a total reflection reaching a layer of the atmosphere where the density of ionization is so high as to make the refractive index equal to 0. It is recognized, from formula (1), that this occurs when you have:

$$(2) \quad N = \frac{\pi m v^2}{e^2}$$

that is, for example, a wave of 1000 m wavelength will be totally reflected encountering a layer in which the concentration of electrons is 1100 per cubic centimeter. To reflect a wave of 100 m wavelength 110,000 electrons per cm^3 will instead be required, while for a wave of 10 m wavelength it would take 11,000,000.

So, for example, if under certain conditions the concentration of electrons in the vertical over an observation station was 110,000 per cm^3 , the electromagnetic waves with wavelength

Così p. es. se in determinate condizioni la massima concentrazione degli elettroni nella verticale al di sopra di una stazione di osservazione fosse di 110.000 per cm^3 , le onde elettromagnetiche aventi lunghezza d'onda eguale o maggiore di 100 m. verrebbero riflesse totalmente verso il basso; mentre onde di lunghezza d'onda minore non subirebbero riflessione. Si comprende da ciò come l'esame delle riflessioni di onde inviate verso l'alto, in dipendenza dalla loro frequenza, possa permettere di determinare la concentrazione degli elettroni negli strati che determinano la riflessione; si può anche del resto determinare la altezza di questi strati misurando il tempo che intercorre tra la emissione delle onde e l'arrivo delle onde stesse e che è dell'ordine di grandezza di un millesimo di secondo.

Lo studio sperimentale della ionosfera

Da vari anni vengono eseguite sistematicamente osservazioni di questo genere in molti osservatori; esse furono iniziate in America da Breit e Tuve; e tra i primi a dedicarsi a questo genere di ricerche fu in Italia il Ranzi.

L'osservazione sistematica di tali riflessioni ha permesso di concludere che esistono nella atmosfera diversi strati ionizzati che vengono usualmente indicati con le lettere dell'alfabeto. I più notevoli sono lo strato E ad una altezza di circa 100 Km. Al di sopra del suolo è lo strato F, spesso diviso a sua volta in due strati F_1 e F_2 ad altezze tra i 180 e i 300 Km.

equal to or longer than 100 m would be fully reflected downwards, while waves of shorter wavelength would not suffer reflection. From this we can understand how the examination of reflections of waves sent upwards, as a function of frequency, can make it possible to determine the concentration of the electrons in the layers that cause reflection; moreover, we can also determine the height of these layers by measuring the time interval between the wave emission and the arrival of the reflected waves, which is in the order of a millisecond.

Experimental study of the ionosphere

For many years observations of this kind have been systematically performed in many observatories. They were begun in America by Breit and Tuve; Ranzi was among the first in Italy to devote himself to this kind of research.

The systematic observation of such reflections made it possible to conclude that different ionized layers exist in the atmosphere that are normally indicated using letters of the alphabet. The E layer at a height of about 100 km above the ground and the F layer, often divided in turn into two layers F_1 and F_2 at heights between 180 and 300 km, are the most remarkable.

The ionization density in these layers, as an order of magnitude, reaches up to about 1,000,000 electrons per cm^3 ; it varies greatly from day to night and is usually more intense the higher the Sun is above the horizon. This indicates the solar origin of the ionizing agent, which is believed to be primarily the ultraviolet portion of the solar radiation which does not

La densità della ionizzazione in questi strati arriva, come ordine di grandezza, fino a circa 1.000.000 di elettroni per cm^3 ; essa varia moltissimo dal giorno alla notte ed è tanto più intensa di regola quanto più alto è il Sole sull'orizzonte. Ciò indica l'origine solare dell'agente ionizzante, che si ritiene essere in principale misura la porzione ultravioletta della radiazione solare che non raggiunge la superficie della Terra appunto perché assorbita dall'alta atmosfera. Vi sono però varie esperienze che fanno sospettare che i raggi ultravioletti solari non siano gli unici agenti ionizzanti e che possano forse avere importanza anche radiazioni corpuscolari provenienti dal Sole. Deve anche notarsi la dipendenza della ionizzazione atmosferica dai cicli di attività solare: la ionizzazione è di regola massima nei periodi di massima attività solare, pur non essendo stata riconosciuta alcuna diretta dipendenza tra la ionizzazione e il passaggio di determinati gruppi di macchie solari al meridiano solare rivolto verso la Terra.

Sono infine estremamente appariscenti le relazioni tra la ionizzazione atmosferica e quegli stessi fenomeni solari che danno origine alle tempeste magnetiche e alle aurore boreali. In casi particolari le perturbazioni della ionizzazione atmosferica che accompagnano le tempeste magnetiche raggiungono valori così grandi da interrompere praticamente le comunicazioni radiotelegrafiche su regioni assai vaste.

La presenza di elettroni o ioni nella atmosfera non produce soltanto una variazione dell'indice di rifrazione per le onde elettromagnetiche, ma determina anche in genere un assorbimento di esse. Tale assorbimento è prodotto dal fatto che gli elettroni, messi in moto oscillatorio dal campo elettrico dell'onda elettromagne-

reach the Earth's surface precisely because it is absorbed by the upper atmosphere. However, several experiments lead us to believe that ultraviolet solar rays are not the only ionizing agents and that corpuscular radiation coming from the Sun may also be of importance. The dependence of the atmospheric ionization on the cycles of solar activity should also be noted: the ionization is usually highest during periods of maximum solar activity, although no direct connection between the ionization level and the transition of certain groups of sunspots on the solar meridian facing the Earth has been identified.

Finally, the relationship between the atmospheric ionization and the same solar phenomena that give rise to magnetic storms and the aurora borealis are distinctly evident. In particular cases, the atmospheric ionization disturbances that accompany magnetic storms reach such high levels as to practically interrupt radiotelegraphic communications over very large areas.

The presence of electrons or ions in the atmosphere not only produces a variation of the refractive index for electromagnetic waves, but also usually causes their absorption. This absorption is due to the fact that the electrons, set in oscillatory motion by the electric field of the electromagnetic wave, occasionally collide with molecules of the air, transferring to them part of their energy, which is converted into heat. From this we can understand how, other conditions being equal, the more intense the absorption, the more frequent the collisions of the electrons, that is, the higher the density of the atmosphere through which the wave propagates. Consequently the absorption takes place to a greater degree the lower the ionized layers are, while it is almost negligible in the uppermost layers of the atmosphere.

tica, subiscono ogni tanto degli urti contro le molecole dell'aria, trasferendo ad esse una parte della loro energia, che viene trasmutata in calore. Si comprende da ciò come, a parità di altre condizioni, l'assorbimento sia tanto più intenso quanto più frequenti sono gli urti che subiscono gli elettroni e cioè quanto più elevata è la densità della atmosfera attraverso alla quale l'onda si propaga. Per conseguenza l'assorbimento ha luogo in misura tanto maggiore, quanto più bassi sono gli strati ionizzati mentre è praticamente trascurabile negli altissimi strati della atmosfera. Accenneremo infine al notevole effetto esercitato dal campo magnetico terrestre sulla rifrazione delle onde elettromagnetiche. Gli elettroni liberi degli alti strati ionizzati, per effetto del campo magnetico terrestre, invece di muoversi in linea retta tra un urto e un altro, tendono a descrivere delle spirali attorno alle linee di forza magnetiche, girando attorno ad esse con una frequenza che risulta proporzionale alla intensità del campo magnetico. A causa di questa frequenza propria degli elettroni, hanno luogo dei fenomeni di risonanza per cui la rifrazione delle onde elettromagnetiche presenta delle anomalie, quando la frequenza dell'onda è vicina alla frequenza propria degli elettroni. Le lunghezze d'onda per le quali hanno luogo queste specie di risonanze si aggirano attorno ai 200 m. e dipendono naturalmente dalla intensità del campo magnetico terrestre nella località. Il fenomeno viene di solito osservato come una specie di birifrangenza e si possono distinguere un raggio ordinario e un raggio straordinario aventi diversa rifrangibilità in modo analogo a quanto avviene per la propagazione della luce in un mezzo birifrangente.

Finally we ought to mention the remarkable effect exerted by the terrestrial magnetic field on the refraction of the electromagnetic waves. Indeed, due to the effect of the terrestrial magnetic field, instead of moving in a straight line between successive collisions, the free electrons of the ionized upper layers tend to proceed in spirals around the magnetic force lines, revolving around them with a frequency proportional to the intensity of the magnetic field. As a result of this eigenfrequency of the electrons, resonant phenomena take place, and the refraction of electromagnetic waves reveals anomalies when the wave frequency is close to the eigenfrequency of the electrons. The wavelengths for which these kinds of resonance take place are around 200 m and obviously depend on the intensity of the terrestrial magnetic field of the area. The phenomenon is usually observed as a sort of birefringence and an ordinary radius and an extraordinary radius having different indices of refraction can be distinguished, similarly to what occurs in the propagation of light in a birefringent medium.

Conclusion

I hope that in this short outline I have demonstrated the breadth and fascination of the field opened to investigation by the study of electromagnetic wave propagation in the upper atmosphere, initiated by Marconi's tests on long distance radio communications. The interest is accentuated by the fact that these properties of the upper atmosphere are linked to many

Conclusione

Io spero di aver mostrato con questi brevi cenni quanto sia vasto ed interessante il campo che lo studio della propagazione delle onde elettromagnetiche nell'alta atmosfera, originato dalle prove di Marconi sulle radiocomunicazioni a grandi distanze, ha aperto alla investigazione. L'interesse è accentuato dal fatto che queste proprietà dell'alta atmosfera si ricollegano a molti altri fenomeni, per ora soltanto parzialmente compresi, di fisica terrestre e di fisica solare; ed è da augurarsi che uno studio metodico di questi fenomeni e delle loro interdipendenze possa portare ad un notevole approfondimento delle nostre conoscenze sullo stato della atmosfera da un lato, e che possa dall'altro essere fecondo di risultati pratici per garantire la stabilità e la efficienza delle radiocomunicazioni in condizioni atmosferiche avverse.

other phenomena of terrestrial and solar physics that are to date only partially understood. It is to be hoped that a methodical study of these phenomena and their interdependence may, on the one hand lead to a considerable advance in our knowledge about the state of the atmosphere, and on the other furnish practical results to guarantee the stability and efficiency of radio communications in adverse weather conditions.

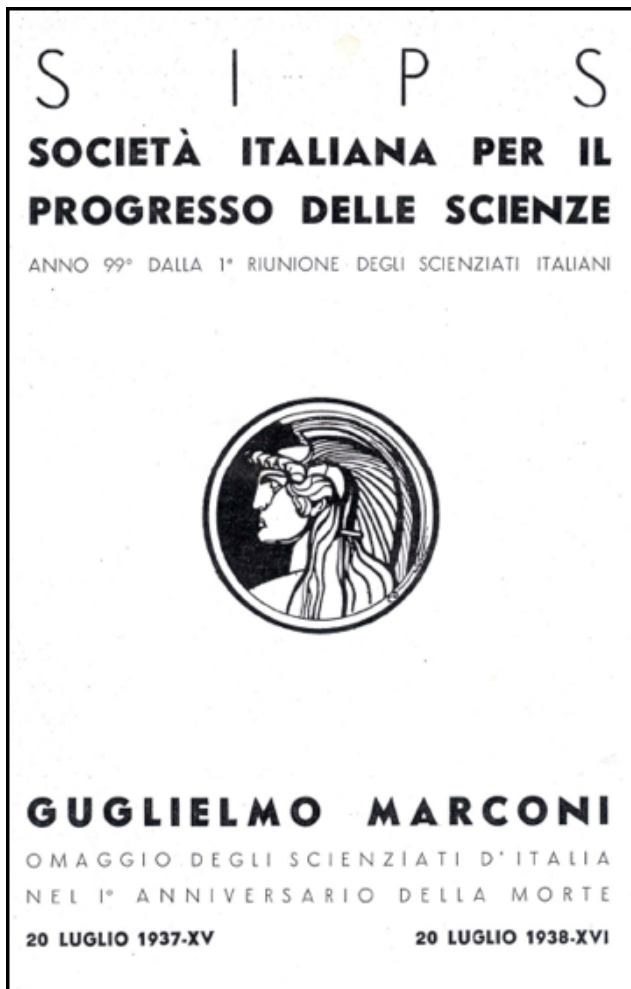


Figura 1. La prima pagina della pubblicazione della Società Italiana per il Progresso delle Scienze datata 20 Luglio 1938 dedicata a Guglielmo Marconi in occasione del primo anniversario della sua morte.

Figure 1. Cover of the publication by the Società Italiana per il Progresso delle Scienze [Italian Society for Scientific Progress] dated July 20, 1938, dedicated to Guglielmo Marconi on the first anniversary of his death.

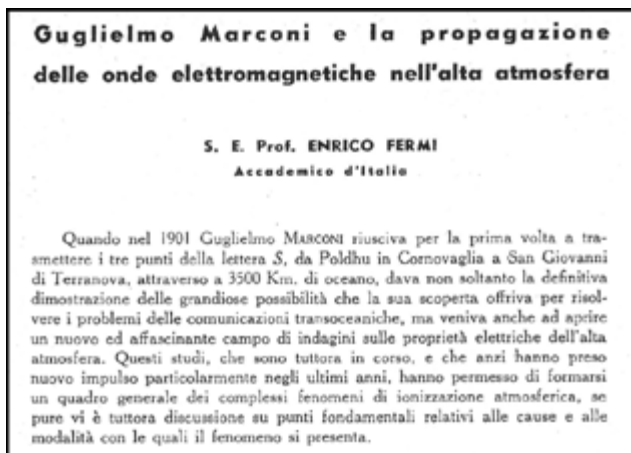


Figura 2. Titolo ed inizio dell'articolo di Fermi contenuto nella pubblicazione indicata in Figura 1.

Figure 2. Title and *incipit* of Fermi's paper contained in the publication illustrated in Figure 1.