



Maxwell, Hertz, Marconi: dalla congettura della propagazione elettromagnetica all'invenzione della radio

1. Un percorso storico

Nella serie di ipotesi, congetture, esperimenti, dibattiti e talora incomprensioni e litigi profondi tra i personaggi che contribuirono all'invenzione della radio sono presenti tutti gli elementi che costituiscono il profilo tipico di una grande ed innovativa invenzione.

Questa storia può essere affrontata sotto svariati punti di vista: quello che è proprio di questo documento è il punto di vista della serie di eventi che portarono il giovane Marconi nel 1897 a brevettare il suo apparato destinato a realizzare comunicazioni a distanza tra due punti. È quindi un percorso tecnologico.

È però importante da sottolineare, che spostando il proprio punto di vista ed analizzando questi eventi storici alla luce del percorso di evoluzione della fisica teorica sarebbe sufficiente sostituire alla figura di Marconi quelle di Lorentz ed Einstein che raccogliendo le esperienze dei due illustri predecessori, sistematizzarono le conoscenze scientifiche ed introdussero la teoria della relatività. Riflettendo su questo paragone, per nulla azzardato, è possibile cogliere l'imponenza della figura dell'inventore bolognese nel panorama delle scienze e delle tecniche di inizio del XX secolo¹.

2. Maxwell

La pubblicazione di Maxwell "On Physical lines of forces" del 1861 pone fine alla ricerca scientifica moderna, basata sul lavoro di Galilei e di Newton ed dà inizio alla ricerca scientifica contemporanea. Non a caso nel 1931, in ricorrenza del centenario della nascita dello scienziato, Einstein definì il lavoro di Maxwell come: "the most profound and the most fruitful that physics has experienced since the time of Newton".

La rottura con gli schemi della ricerca assimilati dalla comunità scientifica del XIX secolo ha come principale chiave di lettura il Positivismo scientifico². Maxwell (che oltre a lavorare sul tema dell'elettromagnetismo mette a disposizione di molti campi della fisica la sua profonda conoscenza matematica e come descrivono i suoi contemporanei, una straordinaria capacità espositiva dei suoi lavori) affronta il tema della relazione tra elettricità e magnetismo evidenziato da Faraday con l'obiettivo di sistematizzare la materia. Questo lavoro lo porta ad affermare una congettura: l'esistenza di cosiddette "displacement currents" ("correnti di spostamento", che in qualche modo simmetrizzano l'insieme delle equazioni da lui proposte, vedi dopo) e quindi di fenomeni di propagazione elettromagnetica. A tutti è chiara la portata della congettura di Maxwell: il mondo scientifico di fronte ad un'affermazione di tale portata, seguendo logiche istintive piuttosto razionali si divide sulla questione proposta³. Per contro a Maxwell ed alla sua scuola è chiaro che solo una verifica empirica può validare la congettura da lui proposta: da questa coscienza nasce un'opera di produzione di deduzioni matematico-scientifiche legate alla natura ondulatoria del fenomeno

¹ Un breve accenno alle vite dei due personaggi stranieri e a quelle di alcuni altri dei personaggi centrali nella concatenazione di eventi che portarono all'invenzione della radio può essere trovata sul sito nel documento: "Onde elettromagnetiche: l'evoluzione della conoscenza"!

² Maxwell era uno dei massimi esponenti della corrente filosofica Creazionista, in ferma e marcata opposizione al filone Evoluzionista, originato dai lavori di Ricerca di Darwin.

³ La divisione del mondo scientifico sul tema proposto da Maxwell è dovuta sia all'alternatività dell'approccio seguito (nessun esperimento scientifico è proposto), sia alla novità della presa di posizione di Maxwell rispetto alla problematica dell'azione-a-distanza/azione-per-contatto esercitata dai corpi elettricamente e magneticamente carichi tra di loro.

Inoltre, che l'equazione di Ampere fosse insufficiente era facilmente dimostrabile, ma che tra le tante possibili scelte per introdurre un'equazione modificata fisicamente consistente si dovesse scegliere l'alternativa proposta da Maxwell, restava ampiamente da dimostrare.



propagativo (non trascurabile frutto di questo lavoro è l'intuizione che la luce sia una particolare onda elettromagnetica) aventi l'obbiettivo di offrire spunti per la realizzazione dello o degli esperimenti risolutivi.

Che l'ambiente scientifico abbia subito un profondo processo di maturazione dal XIX secolo è chiaro dall'approccio espositivo che Maxwell segue per diffondere la teoria elettromagnetica:

- nei suoi lavori propone similitudini meccaniche, per consentire una visualizzazione dei fenomeni descritti⁴;
- le equazioni matematiche descrittive dei fenomeni elettromagnetici sono accompagnate da un'enunciazione:
 1. le linee di flusso del campo elettrico divergono dalle cariche elettriche;
 2. non esistono poli magnetici isolati, ma le forze di Coulomb agiscono tra i poli di un magnete;
 3. i campi elettrici sono generati da campi magnetici variabili nel tempo (changing magnetic fields);
 4. i campi magnetici circolari (circulating) sono prodotti da correnti elettriche⁵ e da campi elettrici variabili nel tempo (changing electric fields, che danno luogo a quelle che sono definite correnti di spostamento per equivalenza con le correnti della legge di Ampere)⁶.

È importante osservare che questa "strategia comunicativa" non è rivolta al lettore casuale del suo lavoro, ma agli stessi suoi colleghi rispetto ai quali Maxwell si sente in obbligo di esplicitare quanto meglio possibile il sistema che prende forma dalla sua congettura⁷.

La scienza ha bisogno di anni per metabolizzare il cambio di prospettiva proposto da Maxwell: oggi la formulazione di una congettura matematica da verificare sperimentalmente è una prassi "empirica" comune. Nel XIX secolo ha costituito una "rivoluzione copernicana". Probabilmente per questo motivo la figura di Hertz e la figura di Marconi si stagliano in modo marcato nel panorama scientifico e tecnologico della fine del XIX secolo, ma per motivi che analizzeremo in seguito profondamente differenti.

Maxwell non ha la fortuna di vedere riconosciuta universalmente la correttezza del suo lavoro: obbiettivamente se la sua congettura si fosse rivelata falsa la storia l'avrebbe ricordato ma con minore enfasi di quanto avviene tutt'oggi. È Hertz lo scienziato che impegna la sua vita nello scopo di verificare la congettura Maxwelliana.

3. Hertz

Ad Hertz lo scopo e la difficoltà del compito sono chiari: probabilmente lo scienziato coglie la necessità di avere anche fortuna per realizzare l'esperimento scientifico definitivo. Ad Hertz va innanzitutto riconosciuto di aver chiaramente individuato i tre problemi da risolvere:

1. quale fenomeno legato al moto ondulatorio è necessario considerare per evidenziare in modo efficace la presenza di onde elettromagnetiche?
2. quale strumento bisogna impiegare per rivelarle?
3. (soprattutto) come si generano le "displacement currents"?

⁴ In questo Maxwell si porta dietro un'eredità proveniente dall'approccio di Volta alla similitudine tra fenomeni/entità meccanici ed elettrici.

⁵ Legge di Ampere.

⁶ Si vedano nel sito i documenti:

- L'equazione di Ampere;
- The Love Song of the Electric Field

⁷ A Maxwell è noto che la storia passata dell'elettricità e del magnetismo statici era costellata da enunciazioni non prese in considerazione a causa della difficoltà espositiva matematica con cui erano proposte.



Hertz idea il primo generatore in spazio libero di “displacement currents” ed in buona sostanza il primo trasmettitore elettromagnetico⁸.

Lo scienziato tedesco ha chiaro che la questione al secondo punto, la rilevaabilità delle onde elettromagnetiche, può essere risolta in modo abbastanza semplice. Lo strumento che realizza lo guida nella percezione del fenomeno fisico, gli permette di visualizzarlo, in quanto il campo elettromagnetico genera vere e proprie scintille più o meno intense in ragione della sua intensità. Su questo punto è importante concentrare una certa attenzione: Hertz ha bisogno di rilevare in modo chiaro la presenza del campo elettromagnetico, ha bisogno di “vederlo” agire. Su questo tema la differenza con quanto ideerà Marconi è profondissima e largamente rivelatrice della diversità di approccio al problema della comunicazione.

L'intuizione profonda di Hertz è nella soluzione del primo punto della sequenza di problemi da risolvere. Hertz pensa alle onde stazionarie⁹. In sostanza attrezza il suo laboratorio affinché rilevi la presenza di un'onda elettromagnetica stazionaria, caratterizzata da nodi e ventri la cui posizione è calcolabile in modo accurato fissati i parametri di propagazione del fenomeno ondulatorio.

Hertz calcola (quasi) correttamente tutti i parametri del trasmettitore che ha a disposizione che gli permettono di elaborare le caratteristiche dello specchio riflettente e la sua posizione all'interno del suo laboratorio.

Riflettendo sull'esperimento con la mente di allora, l'evento deve essere apparso straordinario: la visualizzazione di un'ipotesi matematica. La replica dell'esperimento di Hertz, dopo aver stimolato i responsabili di tanti laboratorio per verificarne la correttezza, li stimola per l'assoluta novità del procedimento seguito.

Occorre a questo punto tornare alla questione della natura del campo elettromagnetico ed alla domanda un po' oziosa se la morte non abbia levato allo scienziato tedesco la primigenia dell'invenzione della radio. Sicuramente l'esperimento di Hertz non ha nulla a che fare con l'idea marconiana di collegamento tra punti distanti. È illuminante che nei suoi scritti, ad Hertz il procedimento seguito appare come l'evidente dimostrazione che l'ipotesi di Maxwell sul costituente dello spazio in cui il fenomeno si realizzava: l'*etere*, introdotto dallo scienziato scozzese si polarizzava ossia quasi cambiava forma per permettere la transizione della perturbazione prodotta dalla sorgente¹⁰. Per Hertz il suo esperimento corrobora l'ipotesi di contatto necessaria per l'esistenza dell'interazione elettromagnetica ed al suo tempo fu interpretato in questo modo. La questione a cui si dava risposta e le problematiche che sollevava erano estremamente polarizzanti per tutto il mondo scientifico. Per questo il giovane bolognese, interessato a capire dove potesse arrivare quel fenomeno ondulatorio e non tanto come il fenomeno si realizzasse nello spazio, era guardato con sufficienza dagli esperti del settore.

4. Marconi

La nascita di un'invenzione è un fenomeno complesso. Non è lo scopo di questo breve documento affrontare la genesi di un'invenzione così rivoluzionaria come la radio, ma piuttosto di definire compiutamente la linea di discendenza che caratterizza la nascita della radio a partire dagli illustri precursori elettromagnetisti Maxwell ed Hertz.

⁸ È importante sottolineare che è il primo trasmettitore elettromagnetico e non radio perché nasce dalla risposta ad una precisa domanda: realizzare delle correnti di spostamento rilevabili in laboratorio in seguito ad un esperimento che verificasse la natura elettromagnetica del fenomeno ad esse associato.

Si faccia riferimento al documento sul sito: “L'evoluzione degli apparati di radiotrasmissione”!

⁹ Si faccia riferimento al documento presente sul sito: “Le onde stazionarie”.

¹⁰ Occorreranno gli esperimenti di Michelson e Morley, venti anni dopo, per eliminare questa errata interpretazione della natura del trasporto del fenomeno.



Marconi non è “abbagliato” dalla complessità del fenomeno fisico: le sue domande sono pratiche e significativamente più semplici rispetto alle complesse questioni di modellistica fisica poste dalla relatività del fenomeno dell’azione del campo elettromagnetico sull’ambiente circostante.

Le domande che lo scienziato bolognese pone ai fisici sono completamente diverse¹¹:

- a che distanza è possibile verificare l’effetto prodotto da una sorgente elettromagnetica
- quali caratteristiche deve avere un sistema atto a catturare l’energia elettromagnetica in modo efficiente
- che soluzioni si possono pensare per allontanare il ricevitore dalla sorgente
- che ruolo ha l’antenna nella propagazione del segnale a distanza

Sono tutte domande di tipo ingegneristico, piuttosto che fisico a cui Marconi ha avuto il coraggio di provare a rispondere in modo autonomo, raccogliendo le indicazioni provenienti dalle sue fonti di ricerca ed universitarie ed interpretandole opportunamente per la finalità che aveva intuito: la comunicazione a distanza.

È indubbio che spostando il ricevitore oltre la collina e richiedendo una verifica della trasmissione per mezzo di un colpo di fucile, Marconi avesse compreso appieno la potenza dello strumento che aveva fatto nascere: del resto che le onde elettromagnetiche si potessero impiegare allo scopo era già stato suggerito da altri autori. Ma rispetto ad altri, Marconi ha avuto l’intuizione che nella sua apparecchiatura, nel processo tecnologico di realizzazione c’era del margine di miglioramento per allontanare trasmettitore e ricevitore ed ottenere un risultato del tutto inatteso dai padri della teoria elettromagnetica.

C.P.

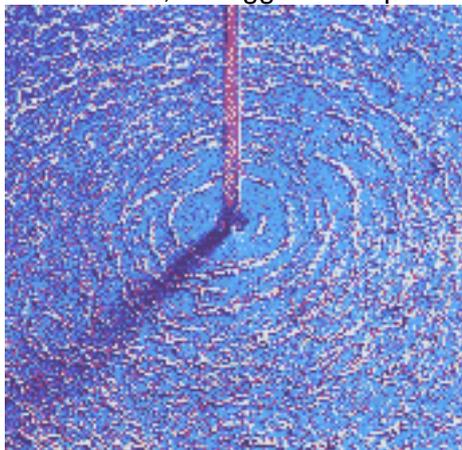
¹¹ Sul significato in termini ingegneristici delle questioni analizzate da Marconi si veda sul sito: “La sensibilità degli apparati”

L'equazione di Ampere

La critica di Maxwell all'equazione di Ampere si basa sull'argomento oggetto di questa scheda.

L'equazione di Ampere stabilisce che la corrente, I , che fluisce in un conduttore filiforme, rettilineo e di lunghezza infinita genera un campo di induzione magnetica che giace sul piano perpendicolare al conduttore.

Visivamente, la legge di Ampere è confermata dalla figura, in cui si vede chiaramente come la segatura di ferro risulta sottoposta ad un campo magnetico quando nel filo scorre una corrente.



La figura permette di compiere anche altre osservazioni.

La prima è relativa alle caratteristiche della corrente: la corrente è costante nel tempo: il campo magnetico risultante non avrà variazioni temporali.

La seconda osservazione riguarda la distribuzione spaziale del campo magnetico: due sono i dati di fatto

1. il campo magnetico si distribuisce lungo delle circonferenze concentriche rispetto al conduttore elettrico;
2. il campo magnetico risultante è indipendente dalla sezione del filo conduttore che si prende in considerazione.

L'ultima considerazione riguarda l'intensità del campo magnetico: è naturale aspettarsi e gli esperimenti lo confermano che maggiore è l'intensità della corrente maggiore risulta proporzionalmente l'intensità del campo elettromagnetico.

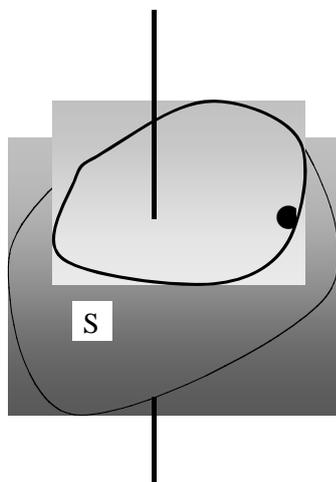
Questa serie di considerazioni sono riassunte nell'equazione di Ampere, che in forma differenziale è formulata nell'espressione (a meno delle costanti dimensionali delle grandezze coinvolte nell'espressione):

$$\nabla \times \mathbf{B} = 4\pi \cdot 10^{-7} \mathbf{I}$$

La formulazione integrale della stessa legge stabilisce che la carica per unità di tempo che attraversa una superficie delimitata da un contorno è proporzionale all'integrale del campo magnetico sul contorno, in formule:

$$\mu \int_S \mathbf{I} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dS = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$$

in cui si evidenzia la natura vettoriale della corrente I (intesa come direzione verso ed intensità di un flusso di cariche elettriche) e del campo magnetico B (che a sua volta ha un andamento che "gira" attorno al conduttore del caso precedente), S è la superficie scelta, \bullet il suo contorno ed infine la costante μ raccoglie il fattore di proporzionalità e il valore dimensionale che permette alle due grandezze di equivalersi. Nella figura si vede il filo che attraversa la superficie (di forma arbitraria) che è chiusa a sua volta da una curva



di forma qualsiasi.

Prima di affrontare nel vivo il tema dell'incompletezza della formulazione della legge di Ampere è importante osservare che nella sua formulazione statica essa ha profonde implicazioni metrologiche. Infatti se si pongono ad una distanza prefissata due fili percorsi dalla stessa corrente, si può verificare che la forza di attrazione tra i due fili è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza ed al quadrato della corrente che vi fluisce: in pratica, fissata l'unità di



forza risulta misurabile la quantità di carica per unità di tempo che scorre sui fili ed in sostanza la carica elettrica a meno di una costante di proporzionalità.

Veniamo dunque al ragionamento di Maxwell. Un filo rettilineo percorso da corrente è questa volta tagliato in un certo punto e ad un tratto di esso sono sostituite due piastre elettriche (in sostanza un condensatore, la distanza tra le cui facce non è un parametro essenziale ai fini delle conclusioni). Maxwell si domanda che cosa cambia nella formulazione del campo magnetico a seguito di questo cambiamento, nell'ipotesi che la corrente continui a fluire come nel caso in cui il taglio è assente¹². La prima osservazione che compie è che a distanza sufficientemente grande dalla cesura effettuata la legge di Ampere nella sua formulazione iniziale continua a valere per una superficie che sia ad esempio un cerchio perpendicolare al filo. In pratica, eliminata una regione di spazio circostante la cesura e di dimensioni opportune, spostandosi lungo il filo di lunghezza infinita ad un certo punto gli effetti della cesura scompaiono. La legge di Ampere però non vincola la forma della superficie: quindi il cerchio può essere deformato a realizzare una superficie che non è più piana, ma diventa una sorta di sacco e che raggiunge la zona della cesura del filo.

A questo punto accadono due cose: nella zona del taglio non c'è corrente; però, la curva che delimita la nuova superficie deformata non è cambiata e quindi non è cambiato l'integrale del campo magnetico attorno ad essa.

Quindi l'equazione non è più vera.

Maxwell intuisce che alla corrente vera e propria nella zona del taglio si sostituisce una grandezza fisica che si comporta come una corrente (la corrente di spostamento appunto) e che questa grandezza è proporzionale alla variazione di carica che si accumula sulle facce delle piastre che delimitano la cesura e quindi alla variazione del campo elettrico nella regione.

C.P.

¹² Maxwell era appassionato di queste riflessioni ipotetiche: basta ricordare l'ipotesi che ha tenuto attiva la ricerca scientifica in campo termodinamico per circa un secolo relativa al "diavoleto".

Le onde stazionarie

Qualunque fenomeno fisico dipendente da un parametro di posizione (per comodità di esposizione, solo lungo una retta di ascisse x) ed un parametro temporale, t , il cui andamento nello spazio e nel tempo è riconducibile all'equazione differenziale:

$$c^2 \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0$$

è definito fenomeno ondulatorio. La velocità del fenomeno ondulatorio è la radice quadrata della costante di proporzionalità che appare nell'equazione.

Da un punto di vista puramente qualitativo, un'onda è caratterizzata dallo *scorrimento* nel tempo dell'andamento del fenomeno fisico: matematicamente, una rappresentazione funzionale del concetto di onda è¹³:

$$Y_1(x, t) = f(kx - \omega t)$$

oppure:

$$Y_2(x, t) = f(kx + \omega t)$$

ed è caratterizzato da due "pulsazioni" o frequenze, k frequenza spaziale ed ω frequenza temporale, il cui rapporto, ω/k , è ancora la velocità del fenomeno. Per comodità, è comune riferirsi alla prima espressione dell'onda in termini di onda progressiva ed alla seconda in termini di onda regressiva: il senso è nella seguente osservazione. Se al tempo $t=0$, il fenomeno Y_1 aveva un andamento $f(kx)$ lungo tutta la retta x , lo stesso andamento si ritrova dopo un certo tempo t' spostato di un'opportuna distanza x' positiva: questo è equivalente ad osservare che il fenomeno si sposta in "avanti" lungo l'asse spaziale. La considerazione opposta vale evidentemente per l'onda regressiva. È facile verificare che dividendo la distanza x' per il tempo che è stato necessario al fenomeno ondulatorio per "spostarsi", t' , si ottiene la velocità, c .

È facilmente verificabile con gli opportuni strumenti che la somma di una qualsiasi onda progressiva e di un'onda regressiva è ancora un'onda: proprio alla famiglia di onde derivate dalla sovrapposizione di un'onda regressiva e di un'onda regressiva appartengono le onde stazionarie, onde che, apparentemente, non si spostano.

Consideriamo i due fenomeni ondulatori semplici: $Y_1(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$ e $Y_2(x, t) = A \cos(kx + \omega t)$. L'ampiezza, A , di questi due onde, una progressiva ed una regressiva, è uguale. Sommando queste due onde si ottiene¹⁴:

$$Y(x, t) = \frac{1}{2} A \cos(kx) \cos(\omega t)$$

Questo andamento non si "replica" spazialmente ad istanti temporali diversi: è un fenomeno la cui ampiezza massima si trova solo a certe coordinate spaziali (l'ampiezza è $A' = \frac{A}{2} \cos(kx)$); nel tempo l'ampiezza varia punto per punto, ma solo con legge sinusoidale rispetto al valore che può assumere al massimo nel punto ($A'(x)$): in sostanza, al contrario di quanto accade per le sole onde semplici che lo costituiscono, il fenomeno non ha una forma che si replica in luoghi diversi ad istanti di tempo diversi. È interessantissimo notare che se in un punto c'è un'intensità pari a zero,

¹³ Una verifica può essere richiesta alle classi dei Licei Scientifici.

¹⁴ Si può osservare che la somma di due coseni è pari a...

QuickTime™ and a None decompressor are needed to see this picture.

Andamento temporale di un'onda stazionaria, a colori diversi corrispondono istanti di tempo diversi: il fenomeno è facilmente replicabile con una corda fatta oscillare a mano e legata ad un muro.

nel tempo questa intensità non cambia (ancora, in pieno contrasto con quanto ci si aspetterebbe in ragione dello spostamento del fenomeno, implicito nel concetto di moto ondulatorio¹⁵).

I punti in cui le intensità dell'onda stazionaria sono nulle o massime sono chiamati "nodi" e "ventri".

Due sono gli elementi che rendono di particolare importanza le onde stazionarie: la possibilità di discriminare un fenomeno ondulatorio da uno non ondulatorio osservando se è possibile generare dei fenomeni stazionari; la possibilità di misurare direttamente, ad esempio in termini di distanza tra due nodi, la

lunghezza d'onda del fenomeno sotto studio, come si può facilmente osservare analizzando l'espressione matematica dell'onda stazionaria.

L'esperienza di Hertz si richiama esattamente a queste due proprietà: la preparazione del suo esperimento predisponendo tutti gli elementi per realizzare un fenomeno di onde stazionarie.

Riassumendo il suo schema sperimentale Hertz ha:

1. provveduto a calcolare a priori la lunghezza d'onda che il suo apparato trasmittente generava (derivandola dalla teoria delle equazioni di Maxwell);
2. introdotto a distanza opportuna dal trasmettitore uno schermo perfettamente riflettente (che produce l'onda regressiva con intensità praticamente uguale all'onda progressiva generata)
3. misurato la distanza tra due nodi, con un opportuno strumento ricevente, verificando che i calcoli teorici fossero corretti

La verifica al terzo punto chiude il cerchio logico che collega teoria ed esperienza, offrendo la prova all'ipotesi di Maxwell.

C.P.

¹⁵ Ovviamente, sia l'onda progressiva, sia l'onda regressiva si spostano, nell'accezione data fin qui all'idea di spostamento del fenomeno. La loro composizione "appare" ferma. Che lo spostamento avvenga è chiaro osservando che i massimi, come tutti gli altri punti, oscillano in ampiezza.

La sensibilità degli apparati: la ricerca di Marconi.

La sensibilità è una grandezza ingegneristica che caratterizza le prestazioni di ogni apparato circuitale, sia che si tratti di un ricevitore radio, sia che si tratti di un circuito elettronico.

La sensibilità è¹⁶: *il minimo segnale utile ricevuto in ingresso ad un apparato necessario per ottenere in uscita da questo apparato un segnale che abbia un prefissato rapporto di potenza tra segnale utile e segnale indesiderato* (il rapporto di potenza può anche essere solo uno dei requisiti richiesti per il segnale in uscita, ma sicuramente è quello che si impiega più comunemente).

Per comprendere il concetto di sensibilità si può fare riferimento alla figura che segue: l'apparato, per fissare le idee un coherer marconiano, riceve tramite l'antenna. L'antenna è un trasduttore elettromagnetico: preleva dallo spazio circostante dell'energia, che si propaga in forma di campo elettromagnetico, e la trasforma in energia che si propaga sui morsetti che collegano l'antenna al coherer. È importante fissare le idee sull'energia che l'antenna preleva: questa energia è sia energia prodotta per realizzare la comunicazione di interesse (dalla 'controparte' nella comunicazione in corso, energia che si definisce utile), sia energia che è presente perché altre comunicazioni sono in corso, oppure perché stanno accadendo particolari fenomeni atmosferici (ad esempio un temporale), oppure perché comunque gli apparati sono immersi in un rumore di fondo elettromagnetico. Quest'ultimo insieme di contributi energetici costituisce l'insieme dei segnali indesiderati. Nel caso dell'apparato di Marconi, soprattutto in considerazione del periodo storico in cui l'apparato entrò in funzione, i possibili segnali indesiderati erano solo di due tipi: generati da fenomeni atmosferici oppure fondo elettromagnetico.

Un'interessante considerazione può essere fatta sull'impiego del codice Morse: l'idea è semplicemente quella di filtrare, dopo averla raccolta, l'energia associata alle perturbazioni meteorologiche grazie all'esperienza di chi riceve il codice, che come è noto è composto di punti e di linee. Queste tematiche necessitano di una trattazione a sé stante lontana dalle finalità di questo percorso didattico per cui non sono qui approfondite.

5. Il rumore di fondo

Il fondo elettromagnetico costituiva ai tempi dell'inizio della radio il principale ostacolo alla realizzazione delle comunicazioni. Osservando con mentalità moderna, più tecnologica ed affinata dalla sistematizzazione della materia in studio, uno dei principali contributi dato da Marconi è sicuramente l'intuizione che la sensibilità dell'apparato ricevente fosse il prerequisito essenziale per realizzare una comunicazione a grande distanza. Si delinea nel seguito, dal punto di vista analitico, come l'intuizione di Marconi ha consentito la nascita della radio.

Un qualunque corpo a temperatura superiore allo zero assoluto emette onde elettromagnetiche e quindi irradia potenza. Questa potenza è distribuita sull'intero spettro. Nella formulazione più generale¹⁷, l'andamento della distribuzione della potenza sullo spettro (densità spettrale) è descritto dalla legge di Planck:

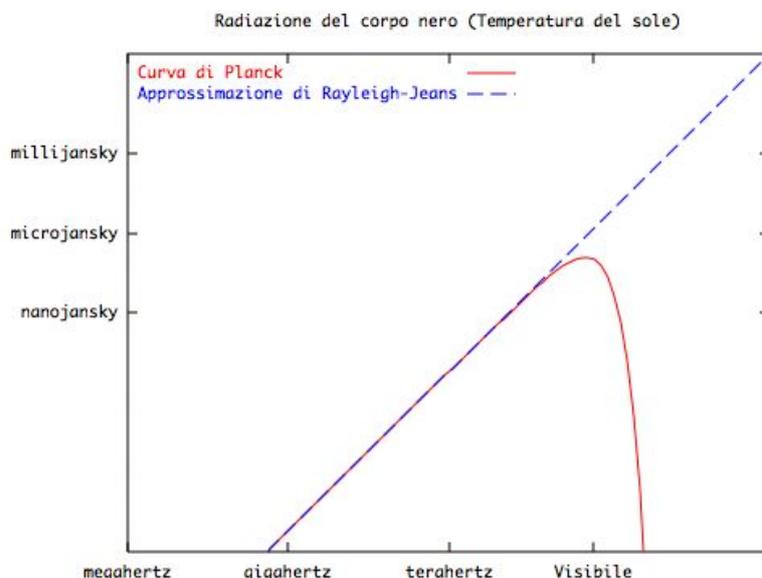
$$n = \frac{2\pi hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

h è la costante di Planck, k la costante di Boltzmann, T la temperatura assoluta, c è la velocità della luce e f è la frequenza. Un possibile grafico dell'andamento di questa distribuzione al variare della frequenza è presentato nella figura¹⁸. Assieme è rappresentata l'approssimazione per basse frequenze di Rayleigh-Jeans:

¹⁶ Glossary of Telecommunications Terms. Federal Standard 1037C.

¹⁷ Formulazione relativa allo spettro di emissione del corpo nero.

¹⁸ Incidentalmente si può osservare che la formulazione dell'emissione del corpo nero comprende anche l'energia elettromagnetica irradiata dalle persone. Alle frequenze degli infrarossi (terahertz) è massima (proprietà sfruttata per "vedere al buio"), ma è presente emissione anche alle frequenze radio.



$$n = \frac{kT}{f^2}$$

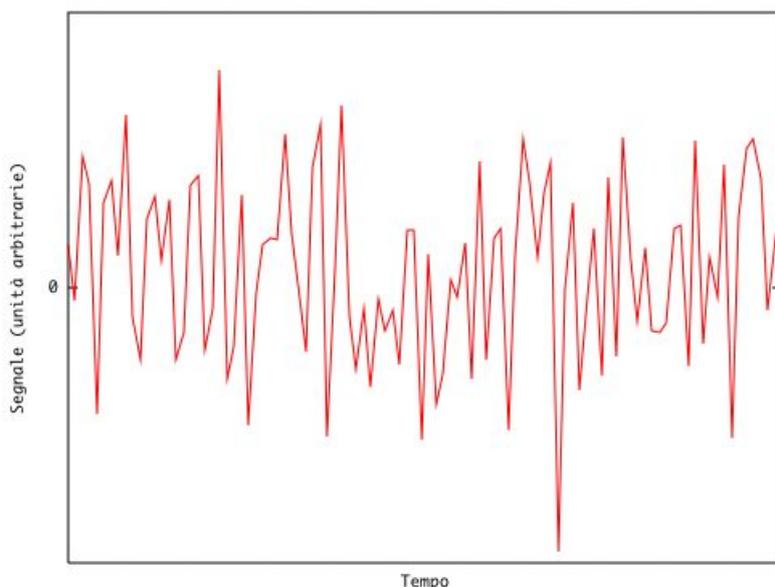
Un'antenna che riceve segnali raccoglie anche la radiazione di corpo nero emessa da tutti gli oggetti presenti nello spazio circostante: si può dimostrare che la potenza raccolta dall'antenna è espressa dalla formula:

$$N = kT_{ant} B$$

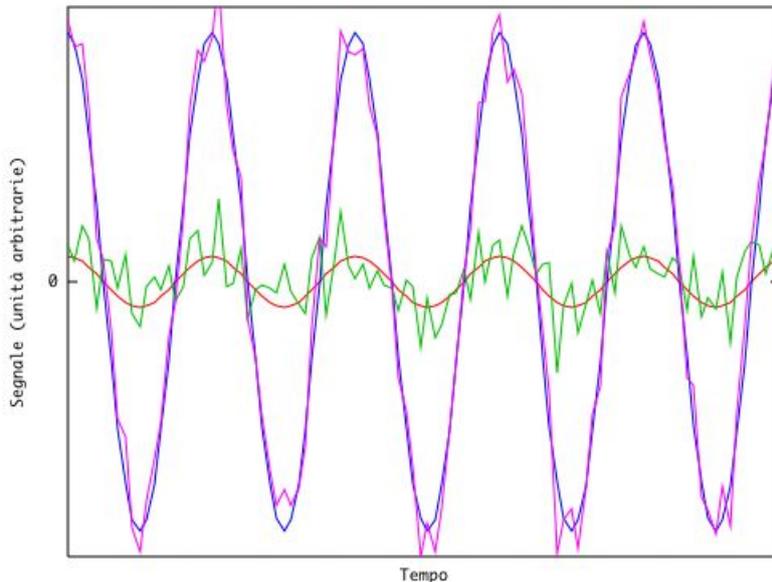
in cui B è la larghezza di banda del ricevitore. Questa potenza raccolta è "rumore", ossia è disturbo per il segnale da riconoscere, segnale indesiderato, appunto. Le caratteristiche del rumore possono essere

enunciate solo in termini statistici, perché chiaramente se avesse caratteristiche deterministiche potrebbe essere filtrato, eliminato per esaltare il segnale desiderato. In particolare il rumore prelevato dall'ambiente esterno nelle condizioni enunciate sinora è detto rumore "bianco", perché non si concentra in una certa frequenza piuttosto che in un'altra, a differenza del rumore colorato. Introduciamo alcuni concetti rilevanti: il rumore con potenza N costituisce un segnale indesiderato che varia nel tempo in modo casuale (altrimenti detto processo aleatorio). Questo processo è un ingresso del sistema, con valor medio nullo e varianza (potenza) pari ad N : si assume che la

statistica del segnale di rumore sia gaussiana e che quindi il valore medio e la sua varianza sono sufficienti a caratterizzare completamente il processo. Per fissare le idee può essere utile introdurre il grafico a fianco nel quale è presentato un possibile andamento di rumore all'ingresso di un ricevitore:



In assenza di segnale trasmesso, il ricevitore "sente" il rumore rappresentato nella figura: un corretto funzionamento dell'apparato ricevente si ottiene se il segnale utile



è sufficientemente intenso perché il ricevitore lo distingua dal rumore. Per chiarire questo concetto, presentiamo due esempi qui di seguito.

Le due sinusoidi sono i segnali che dovrebbero essere ricevuti in assenza di rumore (segnale rosso e segnale blu): la sinusoida blu ha intensità 10 volte maggiore della sinusoida rossa. Sovrapposti al rumore della figura precedente, i due segnali hanno proprietà "visive" completamente differenti: il segnale viola è simile al segnale blu; il segnale verde non lo è. Quindi la

sinusoida meno intensa viene "visivamente" distrutta dal rumore prelevato dal ricevitore nell'ambiente circostante.

Un ricevitore in grado di riconoscere che la sinusoida rossa è presente nel segnale verde è più sensibile di un ricevitore in grado di riconoscere che una sinusoida è presente in un segnale ricevuto solo nel caso in cui la distorsione dovuta al rumore fosse simile al caso della sinusoida viola.

6. Falsi negativi e falsi allarmi

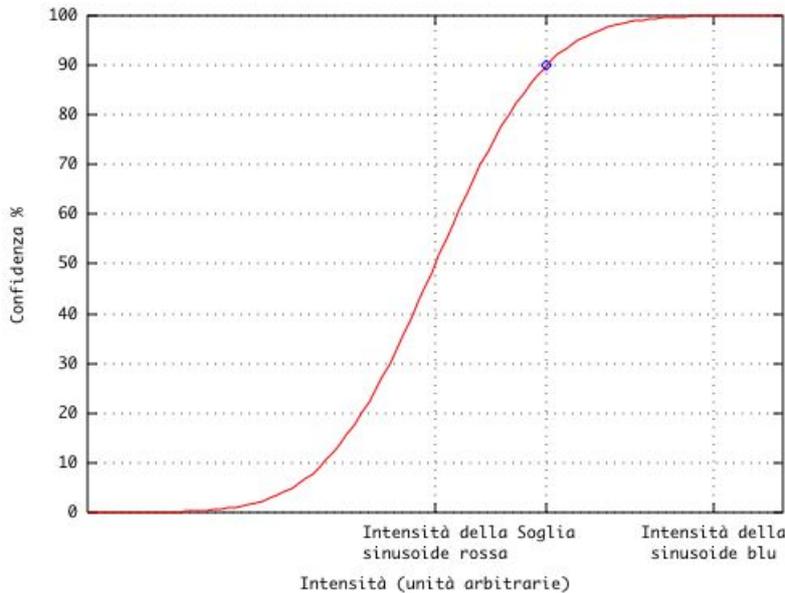
La teoria delle comunicazioni è strettamente collegata con la teoria della probabilità di cui va a costituire una branca specifica detta teoria dell'informazione. Avendo introdotto il concetto di sensibilità rispetto al rumore di fondo risulta agevole aprire uno spiraglio su questa disciplina analizzando il comportamento del ricevitore di un sistema di comunicazioni che debba rivelare la presenza di un segnale.

La figura [delle 4 sinusoidi] serve ancora da riferimento. Poniamoci il seguente problema: il ricevitore deve stabilire se al suo ingresso è presente o meno un segnale sinusoidale. Nel caso "visivo" della figura, è chiaro che non ci siano dubbi sul fatto che ricevendo il segnale viola possiamo dire che all'ingresso del nostro ricevitore è presente un segnale sinusoidale: l'intensità della sinusoida blu è talmente maggiore dell'intensità del rumore da non lasciare dubbi. La nostra confidenza si può esplicitare affermando che con una tale intensità di segnale sinusoidale la probabilità che il ricevitore percepisca la presenza della sinusoida è il 100%, ossia la presenza è certa.

Nel caso del segnale verde le cose sono diverse: "visivamente" due persone diverse potrebbero trarre due conclusioni diverse sulla questione della presenza o meno della sinusoida rossa all'ingresso del ricevitore. Anche in questo caso la confidenza sulla probabilità della presenza della sinusoida si può esprimere in termini di probabilità come il 50%.

È chiaro che poiché tra l'intensità della sinusoida rossa, che lascia dei dubbi in merito alla sua presenza nel segnale verde ricevuto e l'intensità dieci volte maggiore della sinusoida blu, che questi dubbi li elimina, esiste una gamma di variabilità dell'intensità per cui all'aumentare

dell'intensità la probabilità che si associa alla presenza della sinusoide in ingresso al ricevitore cresce. La forma di questa funzione che esprime la confidenza della presenza della sinusoide all'ingresso del ricevitore all'aumentare della sua intensità è ad esempio schematizzata nella seguente figura:



Il funzionamento di un sistema di comunicazione è fissato in funzione della curva rappresentata. In effetti, si definisce per il ricevitore una soglia tollerabile di errore (ad esempio il 90%) che immediatamente determina l'intensità minima con cui può essere ricevuta una sinusoide a cui sia sovrapposto del rumore affinché dal segnale sia identificabile la presenza della sinusoide. In tutti i casi in cui l'intensità della sinusoide sia inferiore al livello fissato, il sistema assume che la sinusoide

non sia presente nel segnale: si parlerà di falsi negativi, ovvero di assenze di rilevazioni in presenza della sinusoide. Per consentire al ricevitore di apprezzare la presenza della sinusoide sarà necessario provvedere aumentandone l'intensità.

La scelta compiuta, di fissare la soglia di errore al 90% tutela il ricevitore dalla situazione opposta, dei cosiddetti falsi positivi o falsi allarmi, che nel sistema in considerazione sono ritenuti più gravi dei falsi positivi per cui il sistema si tutela richiedendo una confidenza elevata¹⁹. Il livello di intensità corrispondente alla soglia è la sensibilità.

7. Impatto della sensibilità nel funzionamento dei collegamenti radio

In precedenza si è detto che se il segnale ricevuto è al di sotto della sensibilità, l'apparato di ricezione non percepisce la presenza della sinusoide nel segnale.

È cruciale chiarire che cosa comporti questo nel caso di un sistema radio: per farlo, fissiamo le idee con una soglia di intensità arbitraria e traiamo le conseguenze logiche.

Poiché, in prima istanza, la potenza elettromagnetica si affievolisce con secondo una legge che è legata al quadrato della distanza e quindi l'intensità elettromagnetica si affievolisce in modo inversamente proporzionale alla distanza, si può immediatamente fissare una relazione tra massima intensità (potenza) erogabile dalla sorgente e massima distanza raggiungibile con il radio collegamento.

¹⁹ La scelta del livello di soglia di errore dipende da vincoli di progetto: un esempio estraneo al tema trattato può servire a chiarire bene il punto. Nel caso medico di contagio per un agente mortale che si diffonde abbastanza lentamente si possono prevedere due tipi di test: uno rapido a bassa soglia, che "screma" la popolazione ed uno preciso che conferma la diagnosi. Se l'agente è veloce, la scrematura potrebbe essere fatale, perché richiederebbe una duplicazione e quindi un allungamento dei tempi: quindi un test simile al primo sarebbe privo di utilità pratica.

Ora, a parità della massima potenza erogabile un apparato con sensibilità inferiore potrà essere più distante dal trasmettitore ed in prima battuta ogni dimezzamento della sensibilità porta ad un raddoppio della portata del sistema.

Se la massima potenza erogabile e la sensibilità sono fissate, risulta fissato il raggio di azione del sistema di comunicazione via radio. Questa regola è resa lievemente più complicata dalla reale dipendenza dell'affievolimento dell'intensità elettromagnetica con la distanza: a diverse distanze corrispondono diversi comportamenti dell'atmosfera²⁰, che impongono caratterizzazioni differenti e suggeriscono impieghi che sono compatibili con queste caratteristiche.

La profonda intuizione di Marconi, ragionevolmente ottenuta osservando gli esperimenti di Righi, fu di riuscire ad ampliare il raggio di azione del sistema che aveva immaginato agendo sulla sensibilità del ricevitore piuttosto che sulla potenza del trasmettitore.

8. L'evoluzione della sensibilità degli apparati marconiani

Nel caso degli apparati di Marconi gli esempi sin qui riportati ci servono da guida, ma non sono esaustivi della problematica trattata dall'inventore e dalla sua soluzione. Il problema che Marconi si trovava di fronte era pressappoco simile a quello sin qui enunciato della determinazione della presenza di un segnale noto nel sottofondo naturale di rumore. Sfruttando una tecnica "analogica" è possibile ipotizzare il percorso mentale del giovane Marconi: la ricostruzione analitica è di gran lunga più complessa, per svariate ragioni. In primo luogo la lacunosità delle fonti; poi la complessità del funzionamento del *coherer*; la profonda interazione tra l'apparato d'antenna ed il ricevitore marconiano; infine la mancanza attuale di una sensibilità tecnologica di fine ottocento che è stata soltanto in possesso di Guglielmo Marconi e che ha avuto un impatto devastante nel decennio tra il 1895 ed il 1905 (portando all'invenzione della radio) ma che in seguito è stata rapidamente superata e dimenticata dall'evoluzione degli apparati.

Nel caso reale marconiano le "sinusoidi" hanno due equivalenti: il punto e la linea. Dal punto di vista pratico, fissata la possibilità di ricevere un punto, la ricezione della linea non dovrebbe presentare inconvenienti supplementari, per cui l'equivalenza tra i due problemi è più marcata di quanto possa apparire ad un primo esame.

Marconi evidentemente riflette sul fenomeno fisico che osserva quando il *coherer* riceve il segnale e giunge alla conclusione che la dimensione delle particelle che lo costituiscono deve necessariamente avere un'importanza. Nasce di qui la sua cura maniacale nella produzione delle polveri da introdurre nel *coherer*, guidata dall'intuizione che particelle più piccole hanno minore inerzia a coerizzare. Ovviamente non troppo piccole, perché altrimenti la condizione di falso positivo diviene eccessivamente probabile (ossia piccoli rumori producono segnali).

Da questa riflessione nasce un processo generale di miniaturizzazione dell'apparato che lo rende profondamente dissimile dagli altri apparati che portano lo stesso nome di *coherer* e che gli sono coevi. Anche la miniaturizzazione ha impatto sulla sensibilità: l'"interruttore" virtuale da far scattare alla ricezione dell'onda elettromagnetico è più uniforme in struttura grazie alle minori dimensioni e quindi ha una risposta più omogenea lungo il suo profilo. Anche la stabilità si giova di questa soluzione: il *coherer* ha per sua natura un comportamento erratico, con una sua "personalità". Riducendo le dimensioni, le disuniformità geometriche e fisiche dell'apparato si riducono, portando ad una risposta con caratteristiche meno incostanti.

La miniaturizzazione viene completata con la realizzazione del sottovuoto, per cui la risposta delle polveri non è influenzata dal cambiamento della composizione dell'aria (ed anche questo conduce ad una maggiore stabilità dell'apparato).

L'ultima modifica tecnologica apportata sul *coherer* è la svasatura degli elettrodi metallici che consente all'operatore esperto di regolare sulle condizioni di ricezione le prestazioni del *coherer*.

L'introduzione del detector magnetico chiude un'era. Con il detector l'aumento di sensibilità è pilotato da due fenomeni: l'eliminazione della risposta meccanica delle polveri del *coherer* e dalla

²⁰ Si faccia riferimento al documento sul sito: "L'evoluzione degli apparati per la radiotrasmissione".



possibilità di introdurre l'ascolto del segnale ricevuto: in questo modo il punto non solo ha delle caratteristiche di intensità, ma anche di tono, che rendono facile all'operatore il suo riconoscimento nel brusio di fondo.

La storia successiva degli apparati radio è guidata dall'elettronica: con essa la storia degli apparati marconiani perde il fascino naturale della disciplina pionieristica e di una storia mitologica e si trasforma nella disciplina ingegneristica consolidata che conosciamo ai nostri giorni.

C.P.