

CAPITOLO VII

Seconda metà dell'Ottocento

Nella seconda metà dell'Ottocento predominano decisamente le figure di Maxwell e Hertz però in questo periodo operarono altri cultori di ottica che dobbiamo prendere in considerazione. Alcuni, come Hamilton ed Helmholtz , furono sensibili ai problemi sociali dei loro giorni, altri ebbero un atteggiamento più distaccato, da tecnici. In generale si può dire che dopo la Rivoluzione Francese e l'Impero Napoleonico la partecipazione alla vita pubblica, intesa in senso lato, attirò di meno gli uomini di scienza, almeno fino a che la ricerca da individuale divenne di tipo " industriale " , all'incirca tra il 1895 e il 1914.

Kirchhoff (Gustav Robert, Königsberg, 1824 , † Berlino, 1887), si laureò in fisica a Königsberg nel 1847 e l'anno dopo ottenne la libera docenza a Berlino. Oltre che per le sue ricerche giovanili sui circuiti elettrici e per quelli della maturità sul potere emissivo del corpo nero (1860) è da ricordare quale iniziatore dell'analisi spettroscopica elementare. Esegui le sue misure in feconda collaborazione con R.W. von **Bunsen** (1811 - 1899) negli anni 1850 - 54 quando i due scienziati erano colleghi nella università di Breslau e poi tra il 1854 - 1875 quando erano ambedue nella università di Heidelberg. Kirchhoff mise in evidenza come un dato elemento non solo emette, ma assorbe righe spettrali caratteristiche. Tra l'altro, Bunsen e Kirchhoff scoprirono per via spettroscopica cesio e rubidio. Il merito di avere fondato

l'analisi elementare spettroscopica in emissione ed assorbimento va dunque riconosciuto ad essi, Fraunhofer essendo stato solo un precursore di questa disciplina.

Kirchhoff (1822 - '83) dimostrò che il principio di Huygens - Fresnel si può considerare una approssimazione di un teorema integrale detto ora di Helmholtz - Kirchhoff, come già ricordato parlando di Fresnel. Trattò inoltre in modo esauriente la diffrazione di Fresnel (integrale di diffrazione Fresnel - Kirchhoff).

Nel 1875 Kirchhoff raggiunse a Berlino il suo vecchio amico von Helmholtz ; ambedue ricoprivano cattedre di fisica generale, ma furono difensori e propugnatori della fisica teorica. All'epoca già operavano a Berlino giovani fisici come E. Goldstein, W. Wien, E. Pringstein ed alla fine del secolo la scuola berlinese sarà in primo piano (P. Drude, M. Planck). Anche Hertz sarà allievo di Kirchhoff ed Helmholtz a Berlino. Kirchhoff professava un positivismo estremo, come si deduce dalle prefazioni ai suoi trattati. Spencer aveva cercato di tradurre la sociologia di Comte in termini biologici , il Nostro pensava che fosse compito esclusivo della fisica realizzare il precetto di Comte, *savoir pour prèvoir, prèvoir pour prèvenir*, ma limitandolo stranamente alla *descrizione dei movimenti* che si svolgono in natura. Sia lui che Drude ritenevano che la Scienza non possa farci comprendere la realtà, ma possa solo darci una rappresentazione del mondo fenomenico.

In campo spettroscopico non si può dimenticare **Rowland** (H. A. , 1848 – 1901) , per molti anni professore di fisica alla Johns Hopkins University. Rowland portò ad un elevatissimo grado di separazione i reticoli di diffrazione arrivando a costruirne con 1700 righe mm^{-1} . Ideò uno spettroscopio a reticolo concavo a riflessione col quale misurò con elevata precisione le λ delle righe di Fraunhofer (cf. [16], pagg. 361 – 362).

Helmholtz (Hermann Ludwig Ferdinand von, Potsdam, 1821, † Berlino, 1894) fu uomo di interessi culturali e scientifici vastissimi. Si laureò in medicina a Berlino nel 1842 e fu medico militare dal '43 al '48 ; divenne professore di fisiologia ed anatomia a Königsberg (1849), poi passò a Bonn (1855), quindi ad Heidelberg (1858) ed infine

ricoprì una cattedra di fisica a Berlino (1871 - 1891) dove dal '75 ebbe come collega Kirchhoff come già detto; due dei loro allievi più noti furono Hertz e Planck. Con le vittoriose campagne del '64, '66 e '70 la Prussia di Bismarck era riuscita a riunire al Reich germanico Schleswig, Holstein, Alsazia e Lotaringia, ma soprattutto ad escludere gli Asburgo dagli affari interni della Germania. Con la proclamazione dell'Impero (Versailles, 18 Gennaio 1871) la secolare anarchia germanica fu decisamente ridotta e la nuova capitale imperiale, Berlino, divenne presto uno dei centri culturali ed industriali più importanti del mondo. E' quindi comprensibile la preminenza assunta dall'università berlinese sul finire del secolo.

Le ricerche più importanti di Helmholtz in campo ottico riguardano l'ottica fisiologica. Riuscì ad esplorare il fondo dell'occhio mediante un oftalmoscopio di sua invenzione (Augen-Spiegel). Già nel 1850, proprio quando veniva determinata la velocità della luce in mezzi diversi dall'aria, Helmholtz riuscì a misurare la velocità della conduzione nervosa e si rese conto che il tempo di reazione ad uno stimolo è troppo lungo per dipendere esclusivamente dai nervi periferici. La percezione deriva *dall'inferenza inconscia* di segnali sensoriali non legata al pensiero consapevole, per usare le sue espressioni, cf. [12], pagg.248 e seg.

Nel suo *Handbuch der physiologischen Optik* (1856 - 1867) spiegò, tra l'altro, il meccanismo dell'accomodazione oculare a distanze diverse : dimostrò che la curvatura del cristallino cambia ed aumenta quando l'oggetto osservato si avvicina all'occhio ed anche per questo studio utilizzò un oftalmometro da lui stesso ideato. Sviluppò inoltre la teoria della percezione cromatica avvalorando l'ipotesi di Young: esisterebbero recettori retinici diversi per i tre colori fondamentali, rosso, verde, violetto e l'effetto percettivo risulterebbe dalla diversa mescolanza dei tre colori. L' *Handbuch* è rimasto un testo fondamentale sino allo sviluppo dell'ottica fisiologica del ventesimo secolo.

Una ulteriore conferma dell'eccezionale molteplicità di interessi di questo scienziato ci viene dai suoi studi sui fenomeni di induzione elettrica e magnetica; dedusse le corrette condizioni al contorno per

spiegare rifrazione e riflessione da parte di *dielettrici* in base alla teoria elettromagnetica e ciò avveniva già nel 1870.

Ricavò infine la condizione di ortoscopia nella formazione delle immagini per rifrazione da parte di un diottro, quando si lavora nell'approssimazione di Gauss :

$$n_1 y_1 \tan(\omega_1) = n_2 y_2 \tan(\omega_2) = \text{cost.} \quad (1)$$

E' questo l'invariante di Helmholtz relativo ad elementi piani di estensione finita con pennelli di raggi di apertura infinitesima (ω).

Diede inoltre importanti contributi ai meccanismi della percezione sonora ed all'acustica in generale e si occupò persino di sistemi voltaici. Si può ritenere l'ultimo degli scienziati universali.

La sua personalità era complessa. Si definiva kantiano e fu molto critico verso Schelling ed Hegel; si adoprò per confutare le errate interpretazioni dell'*a-priori*. Riportò le sue concezioni gnoseologiche anche nell' Handbuch citato oltrechè in articoli specifici. Oltrechè fisico era anzitutto fisiologo e gli era chiaro che in campi diversi dalla fisica non valgono leggi così precise; per lui " la legge di causalità ha *in se* il carattere di legge *puramente logica* , le conseguenze da essa derivate non riguardano in realtà l'esperienza, ma la sua comprensione; essa (legge) pertanto non potrà mai venire sconfessata da qualunque esperienza possibile ". L'ideologia meccanicistica avrebbe dovuto essergli estranea, invece la sua posizione fu in pratica di acquiescenza un po' contraddittoria rispetto alle sue convinzioni; due anime, ahì lui, si agitavano nel suo petto. Si adoperò infatti strenuamente per ricondurre la mente umana nell'ambito delle scienze naturali e riteneva che il fine di queste ultime fosse di ridursi in meccanica. Meccanicismo non vuole però dire determinismo : pur auspicando una metodologia empiristica, per lui era importante l'intuizione per la genesi dei concetti scientifici. Era pur sempre la mente a condizionare l'esperienza e non ad essere da essa condizionata.

Ricoprì diverse cariche accademiche ed ebbe molti riconoscimenti internazionali. L'imperatore Guglielmo I aveva firmato la

nomina ufficiale a professore di fisica a Berlino (23 Febbraio 1871) e Guglielmo II lo elevò allo stato nobiliare e gli conferì la carica di consigliere privato nel 1891.

James **Clerk Maxwell** (Edinburgo, 1831, † Cambridge, 1879) , come Rumford , Rayleigh e Kelvin, è molto più noto sotto il cognome acquisito, ma in effetti era figlio unico dell'avvocato John Clerk del foro di Edinburgo che, poco dopo la nascita di James, ereditò una piccola proprietà nel sud della Scozia , a Middlebie, East Galloway, dove si fece costruire una casa che chiamò Glenlair. La proprietà era appartenuta per generazioni a una famiglia Maxwell; il territorio del clan Maxwell è infatti situato tra Castle Douglas e Dumfries vicino alla quale esiste anche una Maxwelltown. Secondo un vezzo abbastanza diffuso in Scozia, John Clerk ottenne di aggiungere al proprio cognome quello di Maxwell. I Clerk si affezionarono grandemente a Glenlair, dove James rimase sino all'età di dieci anni quando, dopo la morte della madre uccisa dallo stesso male che porterà pure lui alla tomba, si reca ad Edinburgo per gli studi secondari e dove poi, per un triennio (1847 – 50) , seguirà corsi universitari di fisica, matematica, chimica e filosofia, senza però laurearsi. Studia logica e gnoseologia sotto la guida del filosofo W. Hamilton (da non confondere con W. Rowan Hamilton). Nel 1850 passa a Cambridge, prima al Saint Peter (ora Peterhouse) e poi al Trinity College dove si laurea in matematica nel 1854. A Cambridge conosce W. Thomson (Kelvin) che gli rimarrà amico per tutta la vita e studia sotto la guida di W. Whewell uno dei promotori della rinascita scientifica dell'università di Cambridge. Nel '55 diventa fellow del Trinity dove però rimarrà solo per un altro anno. Negli anni di Cambridge si occupa di elettricità e magnetismo e anche di ottica fisiologica. Nel 1856 scrive la memoria *On Faraday's lines of force* in cui tratta in modo matematico i fondamenti dell'elettricità e magnetismo. Nel 1856 accetta il modesto posto di docente di filosofia naturale presso il Marischal College di Aberdeen allo scopo di essere più vicino a Glenlair dove si era ritirato il padre, gravemente ammalato, che morirà nello stesso anno. Rimarrà in Aberdeen sino al 1860 quando perde il posto in seguito ad una ristrutturazione dell'università

aberdoniana. Fortunatamente, riesce ad ottenere la cattedra di fisica ed astronomia al King's College di Londra, dove rimarrà sino al 1865. In questi nove anni si occupa largamente della teoria cinetica dei gas introducendo un punto di vista statistico nella trattazione di problemi dinamici. L'introduzione delle leggi di natura statistica in fisica costituisce un *turning point* di importanza incalcolabile ed a Maxwell siamo debitori di importanti contributi: la distribuzione della velocità tra le molecole gassose e la legge di equipartizione dell'energia (1859).

Nel 1862 pubblica la sua seconda importante memoria sull'elettromagnetismo, *On physical lines of force* . In questa memoria propone un complicato modello meccanico, in base ad analogie con l'idrodinamica, per dare una interpretazione fisica alle linee di forza. Compare però il concetto fondamentale di *corrente di spostamento* . Seguendo Faraday, suppone che un dielettrico sotto l'azione di un campo elettrico si polarizzi, con generazione di " molecole " bipolari che si orientano nella direzione del campo. La causa della corrente di spostamento è costituita dalle *variazioni* di orientazione che comportano movimenti di cariche elettriche. Il concetto non era del tutto nuovo, però Maxwell lo generalizza nel modo più completo: egli suppone infatti che le correnti di spostamento non siano limitate ai dielettrici ponderabili, ma che si manifestino ovunque vi sia una *intensità di campo elettrico variabile* (cfr. arts. 604 e segg. del *Treatise* [14])¹. “ An increase of this displacement is equivalent, *during the time of increase* to a current of positive electricity from within outwards, and any diminution of the displacement is equivalent to a current in the opposite direction , (art. 111) ”. Pertanto bisogna tenere conto di questa corrente la cui intensità è data dalla funzione:

$$\mathbf{j}_E = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} ; \quad (2)$$

¹ Nel 1873 Maxwell pubblicò ad Oxford il *Treatise on electricity and magnetism* , diviso in due volumi i cui capitoli non hanno una numerazione continua. Per evitare ambiguità conviene fare riferimento ai paragrafi, 866 complessivamente, nei quali l'opera è suddivisa ; Maxwell chiama *Articles* i paragrafi. La seconda edizione del 1881 e la terza del 1891 furono curate rispettivamente dai proff. W. D. Niven e J. J. Thomson con qualche aggiunta o su indicazione dello stesso Maxwell, che aveva iniziato la revisione del libro poco prima di morire, o da un suo articolo.

se il dielettrico è suscettibile di polarizzazioni bisogna introdurre il vettore \mathbf{D} :

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P} = \mathbf{E} + 4\pi \eta \mathbf{E} = \mathbf{E} (\epsilon_0 + 4\pi \eta) = \epsilon \mathbf{E} \quad , \quad (3)$$

dove \mathbf{P} è il vettore di polarizzazione risultante dei momenti dipolari indotti dal campo elettrico nell'unità di volume. \mathbf{D} nella forma (3) viene detto spostamento elettrico; se manca il termine \mathbf{P} è detto induzione elettrica; η ed ϵ sono dette suscettività e permeabilità dielettriche rispettivamente. La espressione (3) e l'analogia per campi magnetici valgono solo nei mezzi in cui \mathbf{E} e \mathbf{P} sono paralleli; generalmente non sono rispettate nei cristalli anisotropi. La relazione della circuitazione di Ampère va quindi riscritta:

$$\int_S \mathbf{B} \, ds = \int_S \left(\mathbf{j}_n + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \quad , \quad (4)$$

dove \mathbf{j}_n è la densità della ordinaria corrente di conduzione, *true current*, che assieme a quella di spostamento ci dà la *actual current* di Maxwell e \mathbf{B} è l'induzione magnetica, $\mu_0 \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{M}$, dove il vettore di magnetizzazione \mathbf{M} ha importanza solo nel caso di sostanze ferromagnetiche.

Maxwell pubblica nel **1865** una terza e più importante memoria : *A dynamical theory of the electromagnetic field* . Qui si ritrovano le equazioni differenziali note come *equazioni di Maxwell* che descrivono il campo elettromagnetico e ci dicono come i campi elettrico e magnetico siano collegati tra loro ed in che modo siano funzioni di spazio e tempo. Maxwell afferma cioè la reale esistenza del campo elettromagnetico indipendentemente dal fatto che in un punto dello spazio ci sia un circuito che rilevi la sua esistenza. Come sostanzialmente già per Faraday, i campi sono enti fisici che si possono studiare senza fare riferimento ad oggetti materiali. Oltre ad enunciare la (4), Maxwell diede l'espressione generalizzata del flusso del vettore elettrico attraverso una superficie chiusa S :

$$\int_S \mathbf{D} \, dS = \int_V \rho \, dV + \int_V \rho_P \, dV \quad , \quad (5)$$

dove ρ e ρ_P sono le densità delle cariche libere, eventualmente presenti, e del vettore \mathbf{P} di polarizzazione elettrica:

$$\int_V \rho_P \, dV = - \int_S \mathbf{P} \, dS \quad .$$

Diede alla legge dell'induzione di Faraday forma integrale :

$$\int_S \mathbf{D} \, ds = \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \, dS \quad . \quad (6)$$

Alle (4), (5), (6) v'è aggiunta la seguente (7) :

$$\int_S \mathbf{B} \, dS = 0 \quad . \quad (7)$$

La (7) ricorda che il vettore \mathbf{B} è sempre solenoidale, il suo flusso attraverso qualsiasi superficie chiusa è sempre nullo. La (7) è verificabile in diversi modi; Maxwell la dedusse introducendo un *vector-potential of the magnetic induction* \mathbf{A} , tale che: $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$; di questo potenziale vettore si può fare a meno. Le notazioni di Maxwell , sia nel *Treatise* che nelle note che lo precedettero, sono in genere diverse da quelle poi usualmente usate e rendono i suoi scritti di lettura faticosa poichè bisogna leggersi diversi articles per capire il significato di una data espressione.

Con le equazioni integrali (4) – (7) venne data una trattazione omogenea, applicando i teoremi di Gauss- Green e di Stokes di cui Maxwell era stato allievo a Cambridge, delle relazioni e proprietà di campo elettrico e magnetico già note, a parte l'introduzione, importantissima, della corrente di spostamento. Le (4) – (7) si possono mettere in forma scalare introducendo le componenti di \mathbf{B} e \mathbf{D} lungo la normale all'area elementare dS (B_n , D_n) e tangenzialmente all'elemento ds (B_s , D_s) assumendo i sensi positivi in modo congruente, ad es. secondo la regola dell'uomo di Ampère.

Molto più importante della formalizzazione sono le deduzioni ricavate dalle relazioni (4) – (7) che riscriviamo colle notazioni

universalmente usate ed in forma elementare per il caso di un dielettrico isotropo ed omogeneo ed in assenza di cariche e di correnti ($\rho = 0$, $\mathbf{j} = 0$):

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \quad , \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \quad , \quad (8)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\mu}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad , \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad . \quad (9)$$

\mathbf{E} ed \mathbf{H} si intendono misurati in unità elettrostatiche ed elettromagnetiche rispettivamente; solo con questa scelta ε e μ sono adimensionali ed uguali all'unità nel vuoto (aria). Il fattore c , rapporto tra l'unità di carica elettromagnetica e quella elettrostatica, ha le dimensioni di una velocità e dalle misure di Kohlrausch e Weber si sapeva valere $3,107 \cdot 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$ pressochè coincidente con i valori determinati da Fizeau e Foucault per la velocità della luce nell'aria (ved. App. VI di [19]).

Considerando le (8) ed (9) come equazioni differenziali, Maxwell trovò che una semplice soluzione si può derivare assumendo che \mathbf{E} ed \mathbf{H} dipendano solo dal tempo t e da uno degli assi, ad es. l'asse delle x di una terna ortonormale destra. Le equazioni ammettono come soluzioni delle funzioni per le componenti $E_y(x, t)$ e $H_z(x, t)$ del tipo :

$$H_z(x, t) = \sqrt{\varepsilon/\mu} f_1(t - x/v) = \sqrt{\varepsilon/\mu} E_y(x, t) \quad , \quad (10)$$

purché v soddisfi la relazione:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad . \quad (11)$$

Dato che ε e μ sono numeri puri, v è una velocità. La funzione (10) descrive un'onda piana polarizzata linearmente che si propaga nella direzione positiva dell'asse X con la velocità (11) che nel vuoto ($\varepsilon = \mu = 1$) è quella della luce, con i vettori \mathbf{E} , \mathbf{H} mutuamente perpendicolari ed ortogonali a X ; \mathbf{E} vibra lungo $+Y$ ed \mathbf{H} vibra lungo $+Z$. Le equazioni (8), (9) ammettono però anche la soluzione del tipo :

$$E_z(x, t) = f_2(t - x/v) = -H_y(x, t) = -\sqrt{(\epsilon/\mu)} f_2(t - x/v) \quad . \quad (12)$$

La combinazione delle due soluzioni è anch'essa soluzione e descrive un'onda non polarizzata linearmente, ma ellitticamente, cf. [19] a pag. 329. Per tutti questi argomenti si veda [6], [19] ed anche l'App. VII di [20] che fa vedere velocemente come si possa prendere la funzione coseno come caso particolare delle f_1 ed f_2 .

R. Kohlrausch (1809 - 1858) e W. Weber (1804 - 1891) nel 1856 derivarono il valore di c come rapporto dei valori della capacità di un condensatore misurata in unità elettromagnetiche ed elettrostatiche. Fu però Kirchhoff nel **1857** a sottolineare che il valore della costante c coincide col valore della velocità della luce nell'aria, (App. VI di [19]). Sono stati sicuramente i risultati conseguiti da Faraday e Weber ad ispirare a Maxwell l'ipotesi che le onde luminose facessero parte del campo delle onde elettromagnetiche. " If it should be found that the velocity of propagation of electromagnetic disturbances is the same as the velocity of light, and this not only in air, but in other transparent media, we shall have strong reasons for believing that light is an electromagnetic phenomenon ... ", (*Treatise*, art. 781). Infatti in un'onda piana elettromagnetica sia \mathbf{H} che \mathbf{E} sono perpendicolari alla direzione di propagazione e quindi se la luce è costituita da onde elettromagnetiche essa risulta automaticamente caratterizzata da vibrazioni trasversali, cosa di cui Maxwell era fermamente convinto. Dagli studi condotti nei trent'anni successivi alla pubblicazione della terza nota, risulterà che il responsabile dei fenomeni ottici è il vettore \mathbf{E} . Pertanto il vettore luminoso di Fresnel è il vettore \mathbf{E} che vibra perpendicolarmente a quello che veniva detto piano di polarizzazione, che Neumann supponeva contenere il vettore luminoso (vettore di Neumann). Esso è invece il piano passante per la direzione di propagazione ed il vettore \mathbf{H} ; così si concludeva un'altra annosa querelle.

Da tutti i lavori sull'interferenza delle onde luminose era chiaro come le onde luminose avessero il carattere di una perturbazione sinusoidale; quindi è logico le funzioni f_1 ed f_2 di cui sopra si specializzino in funzioni sinusoidali. I lavori di Maxwell furono il punto

di partenza per ulteriori indagini sull'applicazione della teoria delle onde elettromagnetiche all'ottica. Le equazioni di Maxwell erano state ricavate per domini spaziali nei quali le proprietà fisiche (ϵ e μ) sono continue; in presenza di discontinuità, riflessione e rifrazione da parte di dielettrici o di conduttori, riflessione totale, sarà necessario determinare le corrette condizioni al contorno. Questi problemi, ed altri, verranno risolti nei tre decenni successivi al 1865. Ad esempio, **Poynting** (John Henry, 1852 - 1914) nel 1884 pubblicò *On the transfer of energy in the electromagnetic field* dove deriva l'espressione del flusso dell'energia, per unità di area, di una perturbazione elettromagnetica. L'espressione è il ben noto vettore di Poynting :

$$\mathbf{S} = c / [4\pi (\mathbf{E} \wedge \mathbf{H})] \quad ; \quad (13)$$

con questa funzione si definisce rigorosamente il raggio luminoso che è dato da ogni linea di flusso del vettore di Poynting. Esso è quindi, in ogni punto, perpendicolare al piano di \mathbf{E} , \mathbf{H} . Era stata chiarita , ad opera di vari autori, la differenza tra velocità di fase, velocità della perturbazione sinusoidale cui si riferiscono gli indici di rifrazione (normali d'onda), e la velocità di gruppo, velocità del vettore di Poynting, che è il responsabile del trasporto dell'energia. A partire dal 1890, ad opera principalmente di Paul Drude (1863 - 1906), vengono misurati indici di rifrazione < 1 , su lamine sottilissime di metalli nei quali quindi la velocità della luce (rad.gialla del sodio, in genere) risulta maggiore di c , ma si tratta di velocità di fase.

A proposito di velocità , dal risultato di Maxwell $v = c / \sqrt{(\mu\epsilon)}$ si deduce che $c / v = n = \sqrt{\epsilon}$ (per le frequenze delle onde luminose $\mu = 1$) e quindi $n^2 = \epsilon$. L'eguaglianza è ben verificata per i gas, prendendo come valore di λ quello della luce gialla del sodio ($D_1 = 5896 \text{ \AA}$, $D_2 = 5890 \text{ \AA}$), ma cade in difetto per i corpi con apprezzabile dispersione od assorbimento, liquidi o solidi. Maxwell non sembra fosse particolarmente interessato a questo effetto anche se gli era ben chiaro (arts. 788,789) ; d'altra parte l'unico dielettrico per cui aveva a disposizione il valore di ϵ , che lui chiama specific capacity, era una

generica paraffina per la quale non si verificava il minimo accordo tra gli indici misurati per diverse λ e $\sqrt{\epsilon}$. Ecco come affronta il problema :
 “ the value of the index of refraction is different for light of different kinds, being greater for light of more rapid vibrations. We must therefore select the index of refraction which corresponds to waves of the longest periods, because these are the only waves whose motion can be compared with the slow processes by which we determine the capacity of the dielectric ” . Infatti si ha buon accordo per le onde la cui frequenza cade nel campo di quelle che verranno dette onde hertziane ; la corretta espressione dell'eguaglianza di cui sopra sarebbe :

$$n_{\infty} = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} (n) = \sqrt{\epsilon} \quad . \quad (14)$$

Maxwell spiegò in modo soddisfacente la riflessione metallica considerando onde appartenenti alla regione infrarossa dello spettro.

Completiamo le note biografiche su Maxwell che avevamo lasciato a Londra al King's College. Nel 1866 pubblica la sua più importante memoria sulla teoria cinetica dei gas : *On the dynamical theory of gases* . Maxwell però non è più a Londra ; per motivi di salute aveva lasciato l'insegnamento e si era ritirato a Glenlair dove si dedica alla sistemazione, in modo organico, delle sue scoperte sull'elettromagnetismo. In questo periodo compie un viaggio in Italia, dopo avere imparato l'italiano per potere conversare con Carlo Matteucci (1811 - 1868) fisico di Pisa che dopo la proclamazione del Regno d'Italia partecipò attivamente alla vita parlamentare, fu anche ministro della Pubblica Istruzione, e quindi non gli rimase molto tempo per la ricerca; la sua parabola ricorda da vicino quella di Quintino Sella, illustre mineralogista prima di diventare il ministro della "economia fino all'osso" e dell'iniqua tassa sul macinato. Matteucci si era occupato intensamente dei fenomeni galvanici. Il periodo di quiete a Glenlair si interrompe nel 1871. Il cancelliere della università di Cambridge, Spencer Campbell Cavendish , 7° duca del Devon, finanzia la creazione del primo laboratorio di fisica sperimentale di quell'università dove viene istituita una cattedra appunto di fisica

sperimentale. Il laboratorio è il giustamente famoso (vecchio) Cavendish Physical Laboratory intitolato a Henry Cavendish (1731 - 1810) , nipote del 2° duca, fisico-chimico le cui Scientific Papers (sull'elettricità) saranno edite da Maxwell e Larmor. Maxwell viene chiamato a ricoprire la cattedra ed a sovrintendere alla strutturazione del laboratorio. Nel 1879 la salute di Maxwell, e contemporaneamente anche quella della moglie, peggiorano grandemente; il soggiorno estivo a Glenlair non gli reca giovamento e muore il 5 novembre 1879 a Cambridge dove era tornato per curarsi; la causa del decesso fu un cancro allo stomaco come era avvenuto per la madre. Come Faraday, anche il Nostro, e la moglie Catherine Dewar, fu molto religioso. Maxwell, a parte la stima degli scienziati, non ebbe alcun riconoscimento ufficiale al contrario del suo amico di Glasgow, William Thomson (Belfast, 1824 , † Netherhall, Largs, 1907) prima sir (1866) e poi Lord **Kelvin**, baron Largs (1892) , il quale spese quasi tutta la sua vita accademica a Glasgow dove ricoprì per oltre 50 anni la cattedra di filosofia naturale. Ricordiamo che gli furono conferite lauree ad honorem anche dalle università di Pavia, Padova e Bologna, sulla quale era stata modellata l'università di Glasgow nel 1451 con bolla di papa Nicolò V. Gli onori a lui tributati forse non furono dovuti tanto ai suoi studi sulla termodinamica ed elettricità, quanto probabilmente ai suoi contributi sulla progettazione e sulla posa dei primi cavi telegrafici transatlantici (1865 - 70) che lo resero noto al grande pubblico. Nel 1860 si ruppe malamente la gamba sinistra e rimase claudicante per il resto della vita; ciò malgrado condusse una vita attivissima. Fu un appassionato oceanografo; possedeva uno schooner sul quale passava i periodi estivi a partire dal 1871, facendo lunghe crociere ed ospitando notabili e scienziati. Nel 1874 sposò in seconde nozze (era rimasto vedovo nel '70) la figlia di un ricco proprietario terriero, molto impegnata nella vita sociale. I coniugi Thompson si fecero costruire un castello a Largs (Ayrsh.) che ricorda un po' lo stile del castello dei duchi di Argyll (Campbells) ad Inveraray (Loch Fyne). Kelvin era insomma " uomo di mondo " come avrebbe detto Manzoni con garbata ironia. Anche prima di essere elevato alla dignità di pari si era occupato attivamente di politica, passando progressivamente dalla

corrente di Gladstone, liberali, a quella di Lord Salisbury, tory unionisti. Negli ultimi anni della sua vita Kelvin divenne anche imprenditore industriale entrando nella ditta di costruzione di apparecchiature scientifiche di J. White cui devolse i suoi brevetti dei quali il più remunerativo fu quello riguardante una bussola marina. Al contrario Maxwell era di carattere schivo, desideroso di passare il maggior tempo possibile nell'amata Glenlair; sarà sepolto nella piccola parrocchiale di Parton (Kirkudbrightsh.), vicino a Glenlair. Il monumento funebre di Kelvin, viceversa, sarà collocato nella navata nord dell'Abbazia di Westminster, accanto a quello di Newton.

Nel 1873 Maxwell pubblicò, ad Oxford, il suo *Treatise on electricity and magnetism*, più volte citato, in cui si propose di trattare in modo sistematico l'elettromagnetismo sulle nuove basi da lui trovate. Si tratta di una esposizione non sempre chiara e sistematica e la lettura del libro è piuttosto faticosa anche per la simboleggiatura da lui adottata, un po' involuta senza necessità; ad es. non usa la notazione *rot* del quale non gli piaceva nemmeno il nome, " ... I propose with great diffidence to call the vector part of $\nabla(\sigma)$ the *rotation* of σ at the point P " (art. 25), anzi non usa il calcolo vettoriale. Si limita ad introdurre qualche vettore simboleggiato con consonanti gotiche da lui dette German capital letters. La teoria elettromagnetica della luce è poi confinata in una ventina di paragrafi o poco più. Per quest'ultima è molto più gratificante lo studio dei normali trattati o testi universitari i cui autori hanno ovviamente avuto l'inestimabile vantaggio di avere a disposizione i contributi successivi all'opera di Maxwell. Del *Treatise* sono interessanti gli ultimissimi arts. , 846 - 866 , dove Maxwell puntualizza e critica le teorie di diversi autori; viene citato un'altro studioso pisano, Enrico Betti (1823 - 1892) , fisico-matematico che si interessò della teoria del potenziale e della trasmissione del calore; altri italiani sono citati nel trattato.

Già le rotazioni di **D** e **B** dipendono solo da proprietà locali del campo ed in più con l'introduzione della corrente di spostamento si poteva considerare come eliminata l'azione a distanza ed ignorare l'esistenza di un ipotetico mezzo di trasmissione delle onde. Invece Maxwell,

benchè nella memoria del 1865 avesse asserito che le equazioni del campo hanno una validità indipendente da qualsiasi modello del mezzo di trasmissione, in seguito assume l'esistenza di un *medium* per la propagazione delle onde elettromagnetiche e si compiace che questo sia lo stesso che garantisce la propagazione delle onde luminose senza quindi dovere introdurre un nuovo mezzo e cita un analogo pensiero di Faraday sulla trasmissione delle forze elettriche e magnetiche: “..... if there be an aether, it should have other uses than simply the conveyance of radiations ” (art. 782). Dalla fine del Settecento in poi erano infatti comparsi, e scomparsi, svariati fluidi, eteri, forze vitali ecc. , quasi piccolo drappello di spiriti e spiritelli medioevali. Maxwell è però molto prudente nel definire le proprietà di detto mezzo : “ The luminiferous medium is, during the passage of light through it, a receptacle of energy supposed to be partly potential and partly kinetic. The potential energy is supposed to be due to the distortion of the elementary portions of the medium. We must therefore regard the medium as elastic. The kinetic energy is supposed to be due to the vibratory motion of the medium. We must therefore regard the medium as having a finite density. In the theory of electricity and magnetism adopted in this treatise, two forms of energy are recognised, the electrostatic and the electrokinetic (see Arts. 630 and 636) and these are supposed to have their seat, not merely in the electrified or magnetized bodies, but in every part of the surrounding space, where electric or magnetic force is observed to act. *Hence our theory agrees with the undulatory theory in assuming the existence of a medium which is capable of becoming a receptacle of two forms of energy ”* , (art.782). Questo mezzo universale è però in grado di trasmettere anche onde longitudinali e Maxwell non fu in grado di dedurre le leggi della riflessione e rifrazione per i dielettrici. Va notato come egli si dimostra cauto nell'usare l'ambiguo (pseudo)concetto di materia : nel Treatise usa sempre bodies, media e substances, enti passibili di definizioni chimiche e fisiche.

La teoria elettromagnetica fu recepita, in genere, con grande diffidenza benchè la sua sostanziale correttezza fosse già confermata da diverse

applicazioni. La verifica più stringente si avrà, una ventina di anni dopo la pubblicazione della terza nota di Maxwell, con Hertz che dimostrò sperimentalmente *l'esistenza* delle onde elettromagnetiche.

Maxwell forse non fu eccessivamente interessato alle conseguenze ed applicazioni della teoria elettromagnetica della luce, ad esempio non si interessò alla diffrazione. E' però da tenere presente che per lui i fenomeni luminosi erano semplicemente una parte dell'elettromagnetismo, uno dei due campi di precipuo interesse del Nostro, il secondo essendo la termodinamica dei gas; inoltre negli ultimi quindici anni la sua salute declinò progressivamente e dal '71 in poi fu grandemente preso dall'organizzazione del Cavendish e dall'edizione dei manoscritti di fisica di Lord Cavendish (ma ne valeva la pena ?).

Heinrich Rudolf **Hertz** (Amburgo, 1857, † Bonn, 1° Gennaio 1894) iniziò studi di ingegneria civile al Politecnico di Dresda , ma finì col laurearsi in fisica a Berlino nel 1880 sotto la guida di Helmholtz che lo considerò poi il suo allievo più dotato. Come assistente di Helmholtz si interessò di scariche luminescenti nei gas e di raggi catodici. Libero docente nel 1883, nel 1886 divenne professore ordinario al Politecnico di Karlsruhe dove rimase poco più di due anni poichè nel 1889 passò a Bonn dove morì il 1° Gennaio del '94 , a soli 36 anni, per un cancro alle ossa. Helmholtz , che sopravvisse solo otto mesi a Hertz, scrisse la prefazione all'ultimo lavoro del suo allievo, *Die Prinzipien der Mechanik*, che si inizia così : “ Negli antichi tempi classici si sarebbe detto che egli è stato sacrificato per l'invidia degli dei ” . Hertz fu un uomo molto colto, conosceva bene diverse lingue, tra le quali l'italiano ed il greco classico.

Al campo elettrico indotto da un campo magnetico variabile, Maxwell aggiunse il campo magnetico indotto da un campo elettrico variabile: si rivedano le [9] che sono simmetriche, a parte un segno meno. Hertz vide ovviamente che per avere una apprezzabile intensità di campo magnetico indotto era indispensabile generare oscillazioni elettriche di frequenze molto elevate poichè l'intensità del campo

magnetico indotto è proporzionale alla variazione nell'unità di tempo del campo elettrico. Gli studi che portarono alla scoperta delle onde hertziane furono iniziate dal Nostro a Karlsruhe e vennero completate in pochissimi anni di intensissimo lavoro. Hertz riuscì a produrre oscillazioni elettriche di frequenze mai ottenute prima e nel Novembre del 1886 dimostrò la trasmissione di onde elettromagnetiche da un oscillatore aperto ad un rivelatore a scintilla posti ad una distanza di $\approx 1,5$ m. L'oscillatore aperto a scintilla (poi sostituito da un apparecchio ad antenna) era stato da lui ideato e con esso generò onde smorzate di lunghezza d'onda metrica , ma arrivò progressivamente a produrre lunghezze d'onda fino a soli 50 cm. Ideò inoltre un suo ricevitore costituito da un risonatore e da un rivelatore. Il risonatore era un circuito oscillante posto in risonanza con l'onda in arrivo e sede di oscillazioni elettriche forzate intense, cioè di una corrente alternata. Il rivelatore, a scintilla, segnala l'arrivo dell'oscillazione di (relativamente) alta frequenza cioè dell'onda hertziana. Con questo tipo di apparecchiatura, priva di amplificatori a valvole termoioniche, Hertz riuscì ad ottenere eccellenti risultati: dimostrò che le sue onde venivano riflesse da superfici metalliche e venivano rifratte da prismi di pece e dimostrò anche la trasversalità e la possibilità di polarizzare dette onde. Con onde polarizzate sarà possibile verificare sperimentalmente, variando l'orientazione del ricevitore, che il campo del vettore **E** è sempre accompagnato da quello del vettore **H** nelle onde Hertziane.

E' chiaro che quanto detto sopra costituisce semplicemente un *pro-memoria* delle ricerche di Hertz; una illustrazione completa e quantitativa, difficoltà a parte, esula del tutto dalla presente narrazione rientrando piuttosto nel campo delle radiotrasmissioni. Quello che importa sono le conclusioni: era definitivamente dimostrato che le onde elettromagnetiche sono della stessa natura delle onde luminose e viceversa; l'unica differenza sta nella lunghezza d'onda. Hertz si compiace che i suoi risultati costituiscano una decisiva conferma della teoria di Maxwell, ma afferma anche che l'ipotesi dell'etere non è affatto necessaria per la propagazione delle onde elettromagnetiche : “ Da tutti gli esperimenti menzionati (quelli schematicamente ricordati

poco sopra) si è avuta per la prima volta la prova della propagazione nel tempo di una presunta forza a distanza. Questo fatto rappresenta l'acquisizione filosofica procurata dagli esperimenti che, in un certo senso, è la più importante ". Viceversa, stranamente, non prevede la possibilità di applicazioni tecniche delle sue scoperte : radiodiffusione, radiogoniometria ecc. Gli oscillatori a valvole termoelettroniche permetteranno dopo poco la produzione di onde non smorzate di frequenze molto elevate, sino a 10^{10} hertz , onde centimetriche, che permetteranno un'ulteriore caratterizzazione delle onde elettromagnetiche: dispersione, birifrangenza, interferenza e rotazione del piano di polarizzazione.

Negli ultimi anni di Bonn Hertz si dedicò in prevalenza ai fondamenti della meccanica ed a problemi teorici dell'elettrodinamica. Nel 1890 affrontò il problema dell' elettrodinamica dei corpi in movimento, *Electrodynamik für bewegte Körper* , ma non riuscì a risolverlo. È infine da ricordare un'altra importantissima scoperta : l'effetto fotoelettrico di superficie (1887) ; Hertz osservò incidentalmente l'effetto di cui due anni dopo W. Hallwachs (1859 - 1922) stabilì la natura nell'emissione di particelle negative dalla superficie illuminata e quindi l'effetto va sotto il nome di Hertz - Hallwachs.

A proposito dell' etere va però notato che Hertz modificò il suo punto di vista negli ultimi anni della sua vita. Alla base del suo programma di trovare una risistemazione della meccanica rimane il problema dell'etere tramite il quale meccanica ed elettromagnetismo avrebbero dovuto portare ad un'unica comprensione dei fenomeni naturali. In una celebre conferenza tenuta ad Heidelberg nel 1889 disse : " Nelle proprietà dell' etere sta la chiave esplicativa degli eventi elettromagnetici e delle caratteristiche essenziali della materia : gravità ed inerzia ". Nella raccolta dei suoi scritti sulle onde elettromagnetiche, apparsa nel 1892, il grande tema dell' etere viene però impostato in questi termini : invece di cercare una deduzione delle equazioni di Maxwell a partire da un qualche modello sulla struttura dell' etere, occorre partire invece dalle equazioni al fine di precisare le *incerte cognizioni* relative al mezzo eterico, precisazione che non fu in grado di

ottenere.

Hendrik Antoon **Lorentz** (Arnhem, 1853, † Haarlem, 1928) si addottorò a Leida nel 1875 con una tesi dal titolo *Reflexion et refraction de la lumière dans la théorie électromagnétique* , che Lorentz aveva appreso studiando i lavori di von Helmholtz. In questo lavoro riflessione e rifrazione da parte dei cristalli sono spiegate introducendo esclusivamente vibrazioni trasversali mentre Fresnel aveva dovuto introdurre anche vibrazioni longitudinali la cui esistenza non riuscì mai a dimostrare.

Nel 1878 Lorentz ricoprì la prima cattedra di fisica pura istituita in Olanda preso l'università di Leida. Nel decennio 1878 - 89 si occupò soprattutto di termodinamica, mentre negli anni novanta elaborò una teoria elettronica della "materia". La materia che si muove liberamente nell'etere è costituita da ioni positivi e atomi di elettricità negativi (elettroni). Nei corpi isolanti gli elettroni sono legati elasticamente nelle posizioni di equilibrio, mentre nei metalli possono muoversi liberamente. I campi elettrico e magnetico si diffondono nell'etere. In base a questi concetti Lorentz riuscì a giustificare diversi fenomeni ed a determinare le costanti della teoria del campo elettromagnetico formulata da Maxwell.

Come si può intuire dagli ultimi cenni biografici, nella seconda metà dell'Ottocento le Università assunsero sempre più il ruolo di principali centri di ricerca. Si assistette ad una industrializzazione delle facoltà scientifiche non solo e non tanto per l'esecuzione di ricerche di diretto interesse industriale (o degli armamenti) quanto per l'enorme aumento di personale ricercatore, per la specializzazione quasi Tayloristica dei compiti, con inevitabile gerarchizzazione, ed infine per il necessario incremento quali-quantitativo della strumentazione e delle attrezzature in genere. E' veramente sorprendente che Francesco Bacon sia stato un vero e proprio precursore di tale sviluppo, quasi 300 anni prima, auspicando inoltre una larga cooperazione internazionale e la pubblicità dei risultati !