

VI.1 Dalle onde elettromagnetiche ai raggi X

⌘ **Inquietudini di fine secolo tra fisica, storia, arte e letteratura**

⌘ **Fisica: a proposito di catastrofi, delusioni e disorientamenti**

⌘ **La scoperta dei raggi X**

⌘ **Caratteristiche ed applicazioni dei raggi X**



1.1 Inquietudini di fine secolo tra fisica, storia, arte e letteratura

1.1.1 L'ETÀ DELL'IMPERIALISMO

La fase finale dell'800 è caratterizzata in Europa dal sorgere e poi dal consolidarsi di una nuova fase dello sviluppo del capitalismo ottocentesco: l'imperialismo.

Nel periodo dell'imperialismo si ridefiniscono i rapporti di forza tra i diversi paesi europei: alcuni dei vecchi imperi si ridimensionano o vanno in crisi, si affacciano sulla scena nuove potenze coloniali (tra cui l'Italia), si modificano le caratteristiche e l'organizzazione dei mercati ed i diversi paesi di quello che si incomincerà a chiamare *il mondo sviluppato* si presentano sulla scena mondiale cercando di conquistare nuovi mercati o colonie da cui drenare materie prime.¹

In questo processo l'Inghilterra che era stata il paese dello sviluppo industriale tende a trasformarsi nella capitale della finanza e dei servizi per il capitalismo mondiale (banche, assicurazioni, flotta commerciale) a scapito della produzione industriale; la Germania ha uno sviluppo industriale enorme e tende a porsi in Europa come la potenza più forte sul piano strutturale e della produzione. Oltre Atlantico ed oltre Pacifico si fanno strada due nuovi paesi destinati ad essere protagonisti nello sviluppo del 900: gli Stati Uniti ed il Giappone.

Sul piano strettamente economico la fase finale dell'ottocento è caratterizzata da politiche di tipo deflazionistico. I miglioramenti nei processi produttivi indotti dalla applicazione delle scoperte scientifiche determinano un incremento della produzione dei beni industriali ed una stagnazione o riduzione netta nei prezzi dei prodotti agricoli. Nel giro di 20 anni in Inghilterra si ha una riduzione dei prezzi del 40%.

Ciò determina un netto peggioramento nelle condizioni di vita dei lavoratori agricoli che in tutta Europa, con la eccezione dell'Inghilterra, costituiscono comunque la maggioranza della popolazione. Il prezzo del grano per effetto della globalizzazione dei mercati scende a un terzo nel giro di 20 anni e ciò determina una perdita forte del potere di acquisto dei contadini.

Per queste ragioni, nonostante la induzione di nuovi bisogni ed il modificarsi degli stili di vita, il mercato interno non riesce ad assorbire la produzione. Così molti dei paesi che si danno alla conquista dell'Africa e dell'Asia diventano contemporaneamente esportatori di forza lavoro verso le due Americhe del Nord e del Centro Sud.

Max Weber prevede la I guerra mondiale

Solo una totale cecità politica e un ingenuo ottimismo possono impedirvi di capire che gli inevitabili sforzi di espansione commerciale compiuti da tutti i paesi civili dominati dalla borghesia, dopo un periodo transitorio di concorrenza apparentemente pacifica, si stanno chiaramente avvicinando al punto in cui soltanto la forza deciderà la parte di ciascuna nazione nel controllo economico della terra, e quindi la sfera d'attività del suo popolo, e in particolare il potenziale di guadagno dei suoi lavoratori.

Max Weber, 1894



¹ Molte delle informazioni a carattere storico di questa parte del capitolo sono riprese da Eric J. Hobsbawm "L'età degli imperi 1875 – 1914" Ed. Laterza

Nel 1880 il reddito pro capite del mondo sviluppato era circa doppio di quello del *Terzo Mondo* e nel 1913 era il triplo. Questo divario sarebbe poi continuato al punto di far diventare normali termini contrapposti quali *mondo sviluppato* e *mondo sottosviluppato* che qualche economista poco tenero verso le responsabilità dell'occidente trasformò poi in paesi *sottosviluppati* e paesi *sottosviluppanti*.

Nel 1800 esistevano in Europa solo 17 città con popolazione superiore ai 100'000 abitanti per un totale di 5'000'000 di abitanti; nel 1893 ce n'erano 103 con una popolazione complessiva di 30'000'000 di abitanti. Dietro questi processi di urbanizzazione sta la crescita di peso dell'industria e delle strutture ad essa connesse. A fine 800 la sola Inghilterra presenta un bilancio occupazionale in agricoltura di tipo residuale (1/6) ma in altri 5 paesi la manodopera agricola che si colloca intorno al 35% rimane al di sotto di quella industriale; si tratta di Belgio, Francia, Germania, Olanda e Svizzera.

A fine 800 è in pieno sviluppo la diffusione della elettricità mentre è ormai attuata la rivoluzione nei trasporti via terra grazie alle ferrovie (100'000 locomotive, quasi 3 milioni di vagoni, 2 miliardi di passeggeri l'anno).

Di lì a pochi anni sarebbe stata completata la transiberiana; negli Usa si stampano intorno al 1880 190 milioni di copie al mese di quotidiani e periodici; sono nati e si stanno imponendo i grandi magazzini²

Tra il 1870 e il 1890 la produzione di acciaio in Europa cresce di 20 volte e questo dato che riguarda la materia prima per la produzione di macchine ci dà una informazione importante sulle trasformazioni in atto.

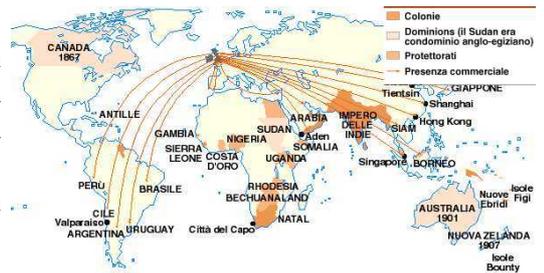
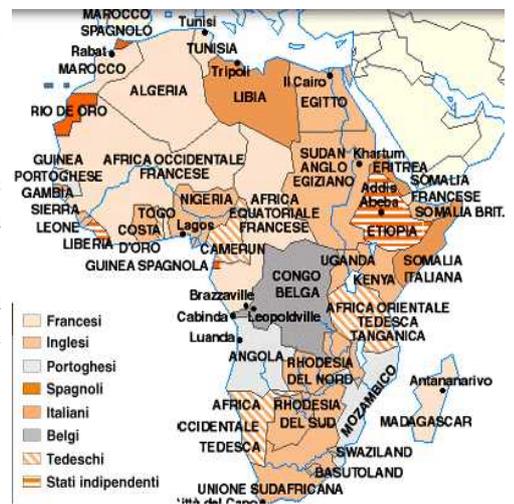
Come si è già osservato l'età dell'imperialismo deve il suo nome alla scelta di gran parte dei paesi sviluppati di dar vita alla costruzione di Imperi. Partecipano alla nuova spartizione sia vecchie potenze coloniali quali l'Inghilterra o la Francia sia paesi nuovi fortemente arretrati sul piano economico quali l'Italia.

Nella scelta di dotarsi di un sistema di colonie strutturato su base imperiale intervengono diversi fattori sia di controllo dei mercati con l'idea di risolvere verso l'esterno le sovrapproduzioni della propria industria, sia la scelta di esportare le proprie eccedenze di manodopera, sia una spinta a carattere ideologico da parte dei nascenti movimenti nazionalistici. L'idea di farsi un Impero risulta pagante sul piano ideologico e consente di attutire la fame o il bisogno degli strati popolari.

1.1.2 IL MOVIMENTO SOCIALISTA ORGANIZZATO E IL DISORIENTAMENTO DELLA PICCOLA BORGHESIA

La parte finale dell'ottocento e l'inizio del 900 sono caratterizzati all'interno dei diversi paesi europei dalla costituzione di importanti organizzazioni operaie; nascono e si strutturano sia i sindacati sia i partiti socialisti che, dopo la separazione dall'anarchismo, partecipano con successo

² Si consiglia la lettura dello splendido romanzo di Emil Zola "Al mercato delle signore" in cui si descrive la distruzione della piccola borghesia commerciale parigina in corrispondenza della nascita del primo grande magazzino *Le Bon Marché*



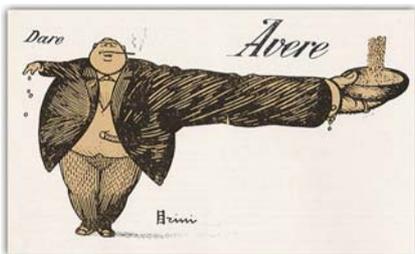
L'imperialismo britannico alla fine dell'800 è fatto di colonie in senso stretto ma anche di forme meno impegnative di protettorato o di presenza commerciale



Il quarto stato di Pelizza da Volpedo illustra bene l'idea del movimento dei lavoratori che irrompe sulla scena del mondo ed è destinato a vincere tutte le resistenze come un fiume in piena



Filippo Turati padre del socialismo riformista italiano e Benito Mussolini (tipico esempio delle svolte degli intellettuali piccolo borghesi) passato nel giro di 4 anni dal socialismo massimalista, all'interventismo, alla fondazione del partito fascista



Due vignette del disegnatore dell'Avanti Scalarini: nella prima viene rappresentata l'alleanza tra operai contadini ed intellettuali tipica del movimento socialista; nella seconda si ironizza sullo spirito del capitalismo. Scalarini aveva una firma particolare come si vede guardando con attenzione le due vignette

crescente alle elezioni, si danno una organizzazione capillare e si battono per il riconoscimento di diritti democratici e per un generale miglioramento delle condizioni di lavoro e del tenore di vita dei ceti popolari.

Ma la politica interna ed estera dei paesi europei nella fase dell'imperialismo fa sì che all'interno del movimento socialista si creino contrasti su due ordini di problemi:

- l'atteggiamento da tenere nei confronti dei governi borghesi e delle riforme sociali e politiche da essi promosse: una parte si fa sostenitrice del riformismo e una parte sostenitrice dei principi rivoluzionari e del programma massimo (contrapposto al programma minimo dei riformisti); i riformisti sostengono la necessità di collaborare con i governi liberali o di non osteggiare le politiche di apertura da essi avanzate in cambio di un allargamento del consenso; i massimalisti sono per la esasperazione delle contraddizioni
- l'atteggiamento nei confronti dei paesi sottosviluppati e delle conquiste coloniali: i riformisti che si rifanno ad una lettura meccanicista della analisi marxiana sulle contraddizioni del capitalismo tendono a cogliere gli aspetti positivi della penetrazione europea nel mondo; essa viene vista come un processo portatore di una civiltà cui seguirà inevitabilmente il socialismo; invece nelle componenti massimaliste e rivoluzionarie (da cui nascerà nel momento di massima crisi dell'imperialismo il movimento comunista) si fa strada una posizione che vede nella concorrenza tra paesi imperialisti e in quella tra zone avanzate ed arretrate del mondo la leva per lo scatenamento della rivoluzione

Lo sviluppo del movimento socialista seguirà il trend degli imperi: ci sarà dapprima un grande rafforzamento e poi la sua crisi nel momento della guerra del 1914 quando i socialisti si divideranno in interventisti (la guerra vista come rivoluzione purificatrice), in pacifisti (*né aderire né sabotare*) e rivoluzionari (*trasformare la guerra imperialista in guerra civile rivoluzionaria*).

La parte finale dell'800 è caratterizzata fortemente anche dalla presenza di una classe sociale intermedia tra la classe dominante (borghesia finanziaria e industriale, proprietari terrieri, aristocrazia in declino) e il proletariato: si tratta di quella che sarà chiamata piccola borghesia: piccolo e medio commercio, professioni, burocrazia statale medio alta, militari, funzionari delle grandi imprese, intellettuali ed artisti.

Si tratta di una classe per sua natura instabile attratta dai due poli entro cui si va configurando lo scontro nei paesi avanzati. L'attrazione è di tipo sociale come effetto delle contraddizioni tipiche dello sviluppo imperialista in cui si possono determinare rapide ascese ma altrettanto rapide cadute. Ma l'attrazione è anche di tipo ideologico perché la piccola borghesia si configura storicamente sia per eroici schieramenti a fianco del movimento operaio (si pensi per esempio al ruolo giocato dai maestri elementari nella storia del primo movimento socialista) sia per il peggiore spirito reazionario e per le peggiori ubriacature ideologiche (come nei primi movimenti nazionalistici o nella storia del movimento fascista).³

³ Consiglio, in occasione del primo passaggio televisivo, la visione di un film di Mario Monicelli del 1963 "I compagni" dedicato ad uno sciopero ad oltranza nella Torino di fine 800 con una bella figura di intellettuale piccolo borghese interpretata da Marcello Mastroianni.

La piccola borghesia è stata certamente la grande interprete dei disorientamenti ideologici di fine 800 che hanno determinato innovazioni nelle arti figurative, nella musica e in letteratura. Tali innovazioni sono state generalmente caratterizzate da una forte vena di pessimismo e di ribellione nei confronti di tutte le spinte di tipo progressivo che avevano caratterizzato l'ottocento; si fanno strada spinte di tipo irrazionale e forme di individualismo esasperato.

Il mito del progresso che è certamente presente nella Europa della fine dell'800 si basa su fondamenta materiali piuttosto solide: i progressi della medicina ed in particolare della igiene pubblica che fanno aumentare a dismisura la speranza di vita della povera gente, la presenza di beni di consumo durevoli che modificano gli stili di vita di tutti i ceti della popolazione, la disponibilità di mezzi di sussistenza diversificati, l'accesso alla istruzione di massa, il diritto di voto, i primi provvedimenti in tema di assistenza e di previdenza, il sistema dei trasporti ferroviari e marittimi, la diffusione dei mezzi di informazione, l'elettricità, il telegrafo, il fonografo, il cinema.

Ma ad un certo punto, dice qualcuno, venne un grande disorientamento e venne meno la fiducia nel progresso o in uno sviluppo lineare della civiltà umana. Vero: ma a fallire non fu l'idea giusta di migliorare attraverso la scienza e la tecnologia la capacità dell'uomo di interagire con la natura. Vennero al pettine nei primi anni del 900 le contraddizioni che l'età dell'imperialismo si portava dietro; e la loro esplosione determinò tragedie, contrasti e fenomeni di squilibrio che ci portiamo ancora dietro all'inizio del terzo millennio. Non ci sono più le colonie e nemmeno il mondo bipolare della fase di scontro URSS ed Occidente ma si sono esasperate le differenze tra mondo sviluppato e resto del mondo.

1.1.3 LE SVOLTE INDOTTE DALLA APPLICAZIONE DELLA TECNOLOGIA ALLA PRODUZIONE ED AI CONSUMI

Nella parte finale dell'800 si può considerare concluso il ciclo delle scoperte della fisica classica e della chimica generale e tali scoperte applicate al mondo della produzione determinano importanti mutamenti negli stili di vita e nei consumi.

- Tra il 1870 e il 1880 vengono messe a punto le macchine elettriche (generatori e motori) che consentono la produzione e l'utilizzo su larga scala della corrente elettrica come sorgente di energia per l'industria.
- Nel 1876 Alexandr Graham Bell brevetta il telefono reso possibile dalla capacità di trasformare suoni in correnti elettriche e viceversa. Nel giro di pochi anni si utilizzano dispositivi di rinforzo dei segnali e nel 1915 viene inaugurata la linea telefonica New York San Francisco.
- Nel 1877 Edison brevetta il fonografo (il suono viene inciso su fogli di stagnola posti su di un cilindro rotante).
- Nel 1879 Edison brevetta la lampadina a filamento (cotone carbonizzato) e già a fine anno una lampada rimane accesa per 40 ore di seguito senza che il filamento bruci. I successivi miglioramenti consistono nell'utilizzo dell'azoto per riempire il bulbo e poi nel 1910 si inizia ad utilizzare il tungsteno.



Il movimento comunista nasce nel corso della I guerra mondiale quando V. I. Lenin organizza gli spezzoni del movimento socialista che si erano attivamente opposti alla guerra



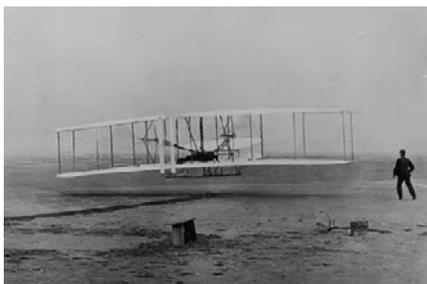
Le Esposizioni Internazionali celebrano il trionfo della tecnologia e la fiducia nel progresso; la tecnologia comincia ad utilizzare la pubblicità



La prima automobile di Benz del 1886 e la pubblicità di una fabbrica francese di auto e cicli



T. Edison e G. Bell due grandi tecnologi americani di fine secolo: inventori e imprenditori



l'aereo dei fratelli Wright: dal sogno di Leonardo alla costruzione delle macchine volanti

- Nel 1876 Otto inventa il motore a 4 tempi. Nel 1886 gli ingegneri tedeschi Daimler e Benz realizzano le prime automobili.
- Henry Ford dal 1892 applica il principio della produzione in serie e la catena di montaggio per la realizzazione di automobili. Nel 1913 dalla sua fabbrica escono 1000 modello T al giorno,
- Nel 1892 l'ingegnere tedesco Rudolph Diesel mette a punto l'omonimo motore che può utilizzare combustibili meno pregiati di quello a benzina e che diventerà il propulsore ideale per le navi ed in genere per i grandi motori.
- Nel 1903 i fratelli Wright riuscirono a volare per 260 metri su un aereo spinto da un motore a scoppio. Nel 1909 viene sorvolata la Manica. Nel 1914 l'aereo diventa una nuova forma di arma.



il ponte di Paderno d'Adda fu realizzato tra il 1887 e il 1889 utilizzando acciaio e ghisa con oltre 100'000 chiodi; su due livelli passano la strada e la ferrovia; la travata è di 255 m e la corda di circa 150; nelle immediate vicinanze si trovano le prime centrali elettriche d'Europa realizzate a fine 800 sfruttando il dislivello dell'Adda tra Paderno e Trezzo per alimentare le industrie di Milano Sesto S. Giovanni e Monza

Il petrolio da illuminazione è ampiamente diffuso nelle abitazioni anche se la elettricità ne soppianderà presto l'utilizzo. Le conoscenze di elettromagnetismo hanno portato alla generazione e distribuzione della energia elettrica per la illuminazione delle città e per il funzionamento dei motori nelle fabbriche. La energia elettrica si trasporta facilmente e consente di distribuire l'energia meccanica su ogni singolo macchinario.

E' ampiamente utilizzato per la trasmissione delle informazioni il telegrafo ed è stato steso e perfezionato il cavo sottomarino che connette l'Europa con gli Stati Uniti d'America. Il collegamento telegrafico tra i diversi continenti ha richiesto perfezionamenti scientifici nella analisi e realizzazione dei cavi (studio dei fenomeni e grandi investimenti economici) ma alla fine le notizie circolano per l'intero mondo. Siamo alle soglie della scoperta della radiotelegrafia.

Chiudiamo questa rassegna ricordando il ponte in ferro di Paderno d'Adda che è unanimemente considerato come un vero e proprio simbolo dell'archeologia industriale in Italia e come una delle più interessanti realizzazioni dell'ingegneria italiana nell'Ottocento (si vedano le immagini e la didascalia qui a lato).

Ma Paderno e Trezzo sono anche la sede in cui si costruiscono, sfruttando le acque dell'Adda, le prime centrali idroelettriche d'Europa nello stesso momento in cui si realizzano negli Usa quelle delle cascate del Niagara.

I mutamenti non riguardano solo la produzione industriale, la tecnologia pesante o il settore dei consumi primari (alimentazione e vestiario). Si diffonde la cultura e i lettori di libri e giornali si contano a centinaia di migliaia o a milioni.

Anche in questo caso la pubblicità fotografa il mutamento mentre nel settore editoriale i romanzi vengono pubblicati a puntate associati ai quotidiani e si crea un settore editoriale di *bassa cultura* in cui, come nella immagine qui a lato, la prima puntata del romanzo viene distribuita gratis come si fa ancora oggi con le enciclopedie in edicola.



Industria culturale in Francia: romanzi a dispense e pubblicità dei grandi quotidiani

1.1.4 LOGICA E FONDAMENTI DELLA MATEMATICA

L'800 in matematica è stato caratterizzato dapprima dalla ricostruzione su basi più solide dell'edificio della analisi matematica. Si tratta di un processo iniziato nei primi decenni dell'800 con la riflessione sul concetto di limite e sostanzialmente concluso nella II metà dell'ottocento con

la costruzione assiomatica dell'insieme dei numeri reali ad opera di Cantor, Frege e Dedekind.

L'approfondimento dello studio sui fondamenti della matematica e gli studi avanzati di Logica Matematica presentano a fine 800 un quadro certamente di sviluppo e anche di crisi. Emergono dallo studio della logica i primi paradossi e ci si rende conto del legame inscindibile tra logica e linguaggio.

La logica che era nata in maniera strettamente legata alla filosofia diventa progressivamente un settore specifico della matematica e dà un forte contributo alla indagine sui fondamenti della matematica stessa.

Il processo intrapreso si basa sulla idea di una riduzione di tutta la matematica alla aritmetica e di questa alla logica proposizionale (che è in corrispondenza biunivoca con la teoria degli insiemi).

Il programma logicista determinerà, grazie alla continua scoperta di contraddizioni e sottigliezze linguistiche, un grande sviluppo tecnico della logica e si concluderà provvisoriamente negli anni 30 del 900 con la dimostrazione ad opera di Kurt Gödel di un teorema con cui si dimostra la *impossibilità di dimostrare sia la contraddittorietà sia la non contraddittorietà della logica elementare senza far ricorso ad un livello linguistico ad essa estraneo*. La logica è in grado di controllare la matematica ma la logica non è in grado di controllare se stessa.



Richard Dedekind (1831–1916) e sotto Kurt Gödel ed Albert Einstein a Princeton nel 1950

1.2 Fisica: a proposito di catastrofi, delusioni e disorientamenti

1.2.1 IL BILANCIO DI FINE 800 È MOLTO POSITIVO: CAMPO ELETTROMAGNETICO, OTTICA, TERMODINAMICA E FISICA MOLECOLARE



A fine 800 la fisica è molto cambiata rispetto al secolo precedente: il paradigma scientifico su cui la fisica era nata (quello newtoniano fondato sulla azione a distanza) e su cui nel corso del 700 era stata costruita la moderna astronomia è stato sostituito da un modello di conoscenza basato sulla azione per contatto e sul concetto di campo.

Secondo questa impostazione le perturbazioni si propagano nello spazio per contiguità e le linee di campo originariamente pensate da Faraday come deformazioni meccaniche del mezzo acquistano sempre di più una realtà fisica indipendente dalla esistenza di un mezzo materiale entro cui esse si collocano.



dalle equazioni di Maxwell alle onde elettromagnetiche prodotte ed indagate da Hertz

Il protagonista di questa trasformazione è stato un gruppo di scienziati inglesi, tedeschi e francesi (con qualche sporadica presenza di italiani e americani) e su di essi domina la figura di James Clerk Maxwell che ha condensato in un'unica teoria un insieme eterogeneo di conoscenze. Questa teoria ha previsto la possibilità di generare onde di campo elettromagnetico in grado di propagarsi nel vuoto e proprio a fine 800 Hertz le ha generate e studiate mentre si discute sulla possibilità di un loro utilizzo per trasmettere informazioni.

Le misure delle costanti del magnetismo e dell'elettrostatica, oltre che le misure accurate della velocità della luce nel vuoto e nei mezzi materiali hanno permesso di avanzare più di un indizio circa la possibilità di ricondurre i fenomeni luminosi alle onde elettromagnetiche visto che la velocità di propagazione delle onde prevista dalla teoria di Maxwell e quella delle onde luminose coincidono.

Naturalmente rimane da esplorare tutto il mondo dei processi di generazione ed assorbimento delle radiazioni da parte della materia ma proprio a fine 800 si stanno raccogliendo preziose informazioni di natura sperimentale (scariche elettriche nei gas a bassa e bassissima pressione) che consentiranno nel giro di pochi decenni di comprendere di cosa si tratti.

Su un altro versante si è sviluppata la termodinamica che ha portato alla enunciazione di due grandi principi (la conservazione della energia e la irreversibilità delle trasformazioni reali) e allo sviluppo di applicazioni che stanno cambiando il mondo (motore termico, frigorifero) e la conoscenza scientifica (liquefazione dei gas).

Rimane aperta la discussione sulla spiegazione del II principio tra una parte degli scienziati che basandosi su un approccio fenomenista alla scienza tende a proporre le leggi della termodinamica come modello di conoscenza ed è ostile ad approcci di tipo riduzionista e chi invece (valendosi dei lavori di Maxwell e di Boltzmann sulla meccanica statistica) sta muovendo i primi passi verso la spiegazione dei fenomeni macroscopici come effetti di leggi più profonde che riguardano il mondo microscopico. Sono particolarmente importanti su questo terreno i lavori di Ludwig Boltzmann perché con lui la statistica entra in grande stile en-



tro lo studio delle leggi fisiche e ciò consentirà di accumulare un prezioso bagaglio di conoscenze per i successivi studi di fisica degli atomi.

In questa fase le leggi statistiche svolgono un ruolo di supplenza nel senso che forniscono previsioni sui comportamenti medi di sistemi così complessi che risulterebbe impossibile seguirne praticamente la evoluzione dei singoli componenti. Ma in una fase successiva (di lì a 30 anni) le leggi fondamentali del mondo microscopico risulteranno avere una struttura intrinsecamente statistica.

1.2.2 SI INDAGA SU NUOVE DIMENSIONI E CON NUOVE ENERGIE: VENGONO SCOPERTI NUOVI FENOMENI; STA NASCENDO UNA NUOVA FISICA

La applicazione della bobina ad induzione ed il perfezionamento delle tecnologie del vuoto stanno consentendo di indagare verso nuove frontiere. Nel giro di pochi anni si passerà in fisica dallo studio del continuo (tipiche degli studi sul campo elettromagnetico) alla indagine del discreto.

Lo studio delle scariche nei gas a pressioni via via più ridotte sta ponendo nelle mani dei fisici un nuovo tipo di coltello che consentirà di spostare di diversi ordini di grandezza il campo di indagine rivolgendo l'attenzione a dimensioni e masse molto inferiori a quelle fin lì indagate. Come mai le scariche nei gas a bassa pressione da cui emergeranno le scoperte dei raggi catodici, dei raggi X, degli spettri di righe della luce avvengono a fine 800?

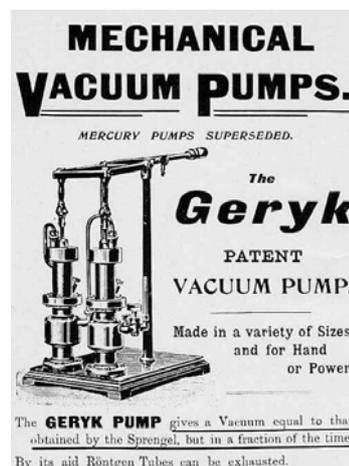
Come mai Becquerel e i coniugi Curie si mettono a studiare la radioattività a fine 800?

La ragione è strettamente legata alla disponibilità di nuovi strumenti sperimentali di indagine. Per studiare in maniera *pulita* le scariche nei gas ed i raggi catodici sono necessarie due condizioni: la disponibilità di pompe in grado di produrre gradi di vuoto sufficientemente elevati, la disponibilità di sorgenti unidirezionali di d.d.p. sufficientemente elevate.

Le pompe meccaniche basate sulla compressione ed aspirazione non riescono a raggiungere le basse pressioni necessarie a consentire che gli ioni e gli elettroni si possano muovere con valori di *libero cammino medio* sufficientemente elevati; allo scopo servono pompe rotative o, meglio ancora, pompe a vapori di mercurio in cui il vuoto si forma per condensazione del gas e queste tecnologie si rendono disponibili solo nella seconda metà dell'800.

Infine nella seconda metà dell'800 vengono perfezionate le bobine ad induzione che consentono di operare con d.d.p. dell'ordine delle decine e centinaia di kV. In queste condizioni, come vedremo in questo stesso capitolo si creano le condizioni per la generazione dei raggi X.

Per quanto riguarda la scoperta della radioattività dobbiamo prendere in considerazione due altri prerequisiti: il primo è di carattere strettamente scientifico e si colloca nell'ambito delle ricerche sui raggi catodici ed in genere sui *raggi* (entità che si vengono a generare nei processi legati alla scarica nei gas): in questo contesto si cercano un po' a caso tutti i fenomeni in cui si producono raggi e si scopre così che i sali di uranio impressionano le lastre fotografiche.



una pubblicità di pompe a vuoto alla fine dell'800 ne propaga l'utilizzo per il vuoto dei tubi a raggi X



La filatelia di tutto il mondo ricorda la scoperta e le applicazioni dei raggi X

Il passo successivo che consiste nel produrre sorgenti radioattive sufficientemente potenti richiede la padronanza di conoscenze di chimica generale ed inorganica che, finalmente, sono disponibili alla fine dell'800 ed è sfruttando esse che i coniugi Curie riusciranno ad isolare elementi più attivi dell'uranio ed arrivare alla scoperta del radio.

1.2.3 UNA VERITÀ GENERALE: LE LEGGI FISICHE SONO DIVERSE SU SCALE DIVERSE.

Ma a fine 800 non si ha solo una raccolta enorme di dati sperimentali si sta facendo strada pian piano una grande rivoluzione sul piano metodologico e che può essere considerata la grande novità della fisica del 900: *le leggi fisiche, tutte le leggi fisiche, hanno un ambito di validità definito; le leggi fisiche sono diverse su scale spazio temporali diverse.*

Questo elemento a fine 800 non è ancora percepito con precisione perché la fisica è reduce da 2 secoli di successi nel corso dei quali il *riduzionismo* cioè il tentativo di unificare la conoscenza attraverso la spiegazione di leggi particolari attraverso leggi più generali è stato lo strumento continuo di crescita della scienza fisica. Ma quando, nei primi decenni del 900, si getteranno le basi teoriche per la comprensione della fisica degli atomi, si farà strada nell'ambito della fisica una maggiore disinvoltura metodologica e la scoperta che il concetto stesso di esperienza cui la teoria deve adattarsi non va idolatrato; l'esperienza si rivela un concetto molto più raffinato della vecchia idea di esperienza sensoriale e la meccanica quantistica rende sfumato il confine tra esperimento e realtà fisica.

1.2.4 LA RIFLESSIONE DI EINSTEIN PRENDE LE MOSSE DALLA NECESSITÀ DI PRODURRE UNA FISICA PIÙ GENERALE.

Nei primissimi anni del 900 si svolge anche la parte centrale della riflessione einsteiniana che determinerà un nuovo modo di vedere il problema dell'elettromagnetismo prima (relatività ristretta) e della gravitazione poi (relatività generale).

L'insegnamento di Einstein è duplice: da un lato egli svolge una critica serrata del senso comune definito come l'insieme delle idee che introiettiamo prima dei sei anni di età e che tendiamo poi a riproporre senza spirito critico, dall'altro egli si fa sostenitore della necessità di costruire teorie fisiche il più possibile concettualmente semplici e generali.

Il primo aspetto rappresenta il legame di Einstein con il positivismo di Mach e produrrà in fisica la cosiddetta rivoluzione dell'operazionismo che porterà i fisici a prestare estrema attenzione alla definizione delle grandezze fisiche che, spogliate da approcci metafisici, dovranno prevedere protocolli di definizione estremamente precisi sul piano operativo. La definizione più famosa è quella secondo cui *il tempo è quella cosa che si misura con gli orologi.*

Il secondo aspetto è quello di costruire teorie fisiche in forma assiomatica utilizzando principi più generali possibili perché solo la estrema generalità è in grado di avvicinarci alla verità. D'altra parte la struttura assiomatica delle teorie, grazie agli sviluppi della logica matematica, ci consente una loro migliore controllabilità in termini di previsioni possibili.



Salvador Dalí rappresenta in questo modo la **disintegrazione dello spazio tempo** attuata da Einstein nella Relatività Generale con i regoli e gli orologi ameba in grado di descrivere un mondo che ha perduto ogni forma di regolarità

1.3 La scoperta dei raggi X

1.3.1 IL CONTESTO DELLA SCOPERTA

Nel dicembre 1895 Röntgen, un professore universitario cinquantenne, non particolarmente famoso, della università di Würzburg II piano di una in una conferenza tenuta davanti alla società medica e fisica della città dà notizia di una scoperta destinata ad avere enormi ripercussioni sulla ricerca scientifica e poi sulla politica sanitaria. Fanno fede di ciò sia la assegnazione a Röntgen, a meno di 6 anni dalla scoperta, del primo premio Nobel per la fisica sia il fatto che i raggi X (insieme alla radioattività) siano la scoperta scientifica più celebrata nei francobolli di tutto il mondo.

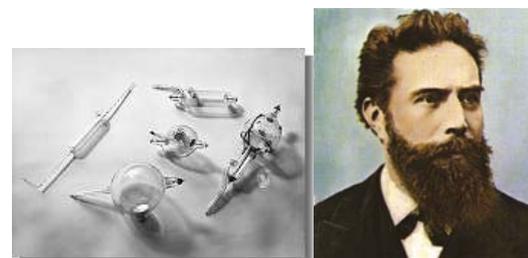
Il contesto in cui la scoperta si origina è quello di ricerche di tipo standard sulla novità scientifica del momento: i raggi catodici su cui stanno lavorando da qualche anno Hittorf, Lenard, Thomson e Crookes. Röntgen nel novembre 1895 osserva inaspettatamente che se un tubo a raggi catodici viene schermato con della carta nera è possibile osservare della fluorescenza in uno schermo al platino cianuro di bario⁴; tale fluorescenza risulta rilevabile sino ad un paio di metri dal tubo. Inizia ad indagare il fenomeno e scopre anche che le pellicole fotografiche poste in prossimità del tubo restano impressionate e che sulla pellicola rimane l'ombra degli oggetti posti sul cammino della radiazione.

Nel momento della scoperta è ancora oggetto di discussione la natura dei raggi catodici ma Röntgen, con appositi esperimenti, evidenzia che il nuovo fenomeno pur associabile ai raggi catodici ha natura diversa per due ordini di problemi: si tratta di una radiazione fortemente penetrante nella materia, a differenza dei raggi catodici che non riescono ad uscire dal tubo, si tratta di una radiazione che, a differenza dei raggi catodici, rimane insensibile ai campi magnetici. La natura di questa radiazione gli appare sconosciuta anche se permane in lui la convinzione che si tratti di radiazione elettromagnetica e per questa ragione tenta senza successo di misurare le caratteristiche. Röntgen scopre tra l'altro che la nuova radiazione non viene apprezzabilmente deviata da lenti e prismi. In attesa di chiarimenti Röntgen conia il termine di radiazione X (sconosciuta).

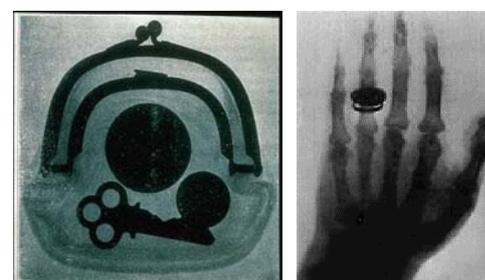
Egli scopre che la densità della materia influenza fortemente e in modo non lineare il potere di penetrazione dei raggi X come si vede nella tabella qui a lato in cui si riportano la densità e lo spessore che determina una eguale attenuazione per materiali diversi. E' inoltre in grado di escludere che si tratti di una forma di radiazione ultravioletta nota visto che quest'ultima viene arrestata già dalla carta che circonda il tubo.

Il tubo utilizzato inizialmente da Röntgen è un normale tubo per raggi catodici con catodo di alluminio e un anodo posto al di sotto della traiettoria dei raggi catodici; la produzione dei raggi X avviene nella interazione con il vetro e la intensità degli stessi è molto bassa al punto che per eseguire la radiografia della mano è necessaria una esposizione di 15' e che lo stesso Röntgen può osservare (senza perdere definitivamente la

⁴ Si tratta di una sostanza che colpita da radiazioni ionizzanti emette luce; gli schermi fluorescenti sono stati lo strumento basilare per osservare le interazioni tra radiazioni e materia agli albori della fisica moderna.



Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) annunciò la scoperta dei raggi X nel 1895 e ricevette il primo premio Nobel per la fisica nel 1901; I tubi a vuoto utilizzati inizialmente da Röntgen sono normali tubi utilizzati per le ricerche sui raggi catodici



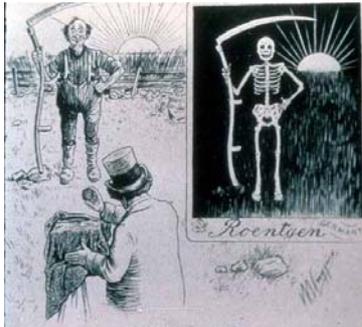
Le prime radiografie presentate da Röntgen: la chiave e la moneta nel borsellino e la mano della moglie

WILHELM RÖNTGEN'S FIRST ATTEMPT AT X-RAYS: SHINING A BRIGHT LIGHT THROUGH MADAME RÖNTGEN



Metallo	s.r.	δ
Platino	1	21.5
Piombo	3	11.3
Zinco	6	7.1
Alluminio	200	2.6

vista) che *la retina è abbastanza insensibile a questi raggi: infatti se si pone l'occhio vicino alla apparecchiatura non si vede nulla di particolare.*



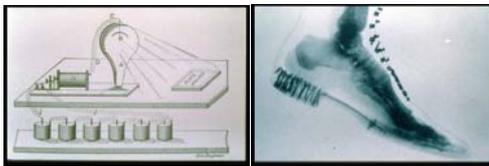
Una vignetta ironizza sulla fotografia con il metodo Röntgen tra meraviglia e timore

1.3.2 NON SE NE SA ANCORA MOLTO MA SI APPLICANO SUBITO

La comprensione del fenomeno non è ancora chiara ma è immediatamente chiaro che i raggi X consentono di arrivare dove la vista non riesce a giungere. La strumentazione necessaria per produrre i raggi X è relativamente semplice e pertanto troviamo traccia delle possibili applicazioni nell'immaginario collettivo. Si vendono tubi a raggi X per diventare più belli e si fa persino della bella ironia sulla fotografia dei raggi di Röntgen come in questa vignetta del 1896.

Non si dispone di una raccolta di dati precisi sugli effetti biologici e le prime applicazioni oltre che in ambito radiografico riguardano la terapia di alcuni tipi di tumore ma, come in tutti i fenomeni scientifici nuovi, ci si comporta in modo abbastanza sconsiderato. Siamo entrati nel nuovo secolo e trova credito (o viene alimentata) a livello di massa questa idea sul potere magico della tecnologia.

Nella foto qui a lato vediamo un piede femminile fotografato all'interno dello stivaletto e la immancabile pubblicità della apparecchiatura per farsi i raggi in casa. Il ruolo dei raggi X nell'immaginario collettivo è stato davvero molto grande se su molti settimanali ancora negli anni 80 del 900 comparivano pubblicità ingannevoli con cui si propagandavano *occhiali ai raggi X* con cui si potevano osservare le signore sotto ai vestiti.



Fatti i raggi in casa; il piede in uno stivaletto; gli effetti devastanti delle radiazioni in immagini del primo 900

Nel 1904 si ha la prima morte: quella di Clarence Dally un collaboratore di Edison nella produzione e sperimentazione dei nuovi tubi. Nello stesso periodo Mihran Kassabian annota e fotografa a futura memoria la degenerazione delle sue mani soggette a necrosi e su cui vengono compiute una serie di amputazioni in successione.

Mentre si attenua la ubriacatura sul potere dei raggi X proseguono invece i miglioramenti tecnologici nella produzione dei tubi perché se si vuole puntare ad un utilizzo in ambito medico e diagnostico bisogna ottenere tubi in grado di emettere radiazioni secondo parametri controllabili e le cui caratteristiche non mutino nel tempo.

I progressi riguardano:

- L'utilizzo di anodi metallici che danno la possibilità di ottenere radiazioni di intensità più elevata e in particolare l'utilizzo del tungsteno che è in grado di resistere alle alte temperature generate nell'impatto dei raggi catodici

Sino alla invenzione nel 1911 del tubo Coolidge i tubi contengono del gas a bassa pressione necessario per garantire la emissione di elettroni dal catodo; questi vengono emessi per effetto del bombardamento del catodo da parte degli ioni positivi del gas prodotti nei processi di ionizzazione del gas; la presenza di un gas crea problemi di instabilità nel corso di un uso prolungato del tubo

- La distinzione tra anodo e anticatodo (costruito come bersaglio per gli elettroni di alta energia); l'anodo opportunamente sagomato svolge una funzione di focalizzazione degli elettroni mentre l'anticatodo fa da bersaglio.
- L'utilizzo di un anticatodo rotante che permette di cambiare continuamente il punto in cui vengono fatti convergere i raggi catodici dal



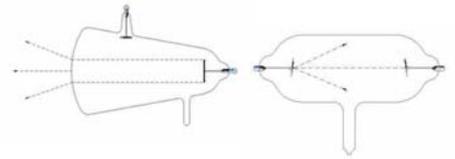
nascono aziende specializzate nella produzione dei tubi e l'esercito inglese utilizza i raggi X in Egitto nel 1896



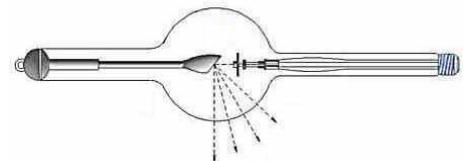
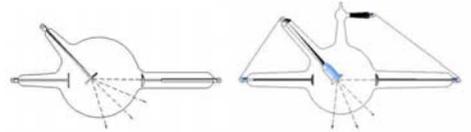
cui frenamento si originano i raggi X; ciò permette un utilizzo continuativo del tubo senza rischio di fondere l'anticatodo.

- L'utilizzo di catodi riscaldati artificialmente (per effetto Joule) il che consente una emissione controllata di elettroni e dunque il controllo della dose di radiazione irradiata.

Inoltre ciò consente di operare nel vuoto invece che in un gas ed elimina tutti i problemi di controllo della pressione all'interno del tubo permettendo di operare con d.d.p. più elevate



1895 il tubo di Röntgen è un classico tubo a raggi catodici; nel 1896 Edison mette un anodo bersaglio di metallo



Nel 1901 compaiono i tubi Mueller con l'anticatodo separato; per una decina d'anni si opera ancora con tubi a gas dotati di regolatore di pressione; nel 1913 Coolidge della General Electric inventa il tubo a vuoto a catodo caldo

1.3.3 COMPrensione della natura e delle caratteristiche dei raggi X

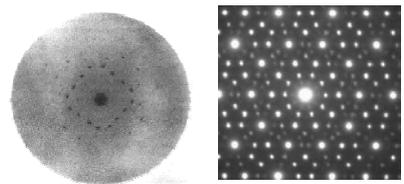
Nel 1912 Max Von Laue e i suoi collaboratori Friedrich e Knipping stabiliscono la natura ondulatoria dei raggi X eseguendo esperimenti di diffrazione che utilizzano i reticoli dei cristalli per produrre l'effetto. La osservazione delle figure di diffrazione per un verso consente di stabilire in via definitiva il carattere ondulatorio della nuova radiazione e per l'altro apre la strada alle indagini cristallografiche. I raggi X forniscono uno strumento per indagare geometria e struttura della materia su scala elementare.

Max Von Laue (1879–1960) riceverà il premio Nobel due anni dopo nel 1914. Nelle immagine qui a lato possiamo osservare una delle prime immagini prodotte dal suo gruppo, una immagine più moderna e il francobollo commemorativo.

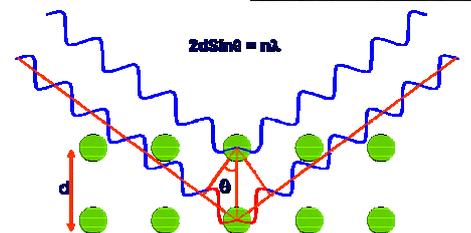
Le ricerche cristallografiche proseguiranno e già nel 1915 i due Bragg (padre e figlio) ricevono il premio Nobel per i miglioramenti apportati alle indagini cristallografiche che li hanno portati a mettere a punto teoria ed apparecchiature per l'esame delle caratteristiche dei reticoli cristallini.

Nel 1917 un terzo premio Nobel viene assegnato per le ricerche sui raggi X a Charles Glover Barkla (1877–1944). Barkla attraverso esperienze di riflessione e polarizzazione era riuscito a stabilire che se le nuove radiazioni avevano natura ondulatoria doveva trattarsi di radiazioni di tipo trasversale (come le onde elettromagnetiche).

Barkla fu anche il primo a riuscire a tracciare i diagrammi con lo spettro dei raggi X ed a scoprire in essi sia la componente continua sia la presenza di uno spettro di righe le cui caratteristiche saranno analizzate in dettaglio nel prossimo paragrafo.



Raggi X e indagine cristallografica per diffrazione



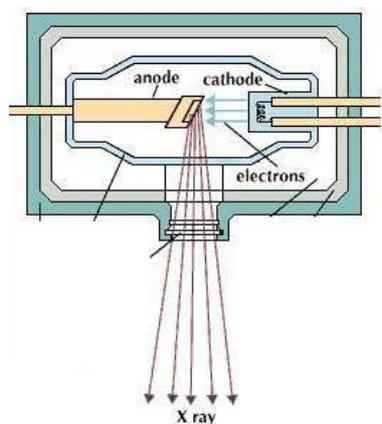
premi Nobel per i raggi X e la cristallografia: 1914 Max Von Laue; 1915 i 2 Bragg padre e figlio



natura	spettro	interazione	utilizzo
radiazione elettromagnetica di alta frequenza	continuo (radiazione di frenamento)	effetto fotoelettrico: il fotone sparisce con emissione un elettrone di alta energia	radiografia e radioscopia su tessuti biologici e non
attenuata dai materiali ad alta densità (trasparente per Al viene bloccata dal vetro al piombo)	di righe (riassettamento elettroni degli strati interni dei metalli)	effetto Compton: il fotone viene diffuso con energia minore insieme all'elettrone	cristallografia e indagini dei livelli atomici profondi
indice di rifrazione dei materiali ≈ 1 ; non può essere focalizzata	non produce spettro di assorbimento ma solo di emissione		irradiazione dei tessuti tumorali

1.4 Caratteristiche ed applicazioni dei raggi X

1.4.1 LA RADIAZIONE DI FRENAMENTO E LO SPETTRO CONTINUO



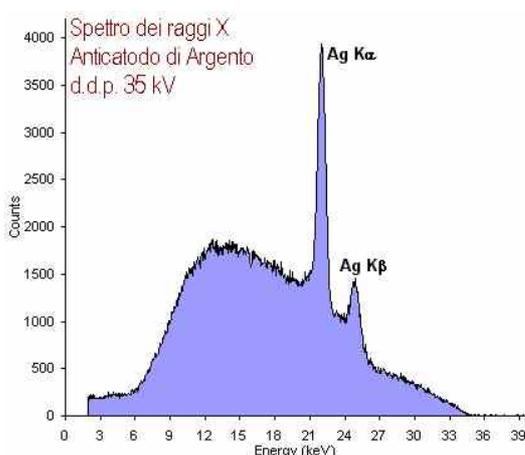
Consideriamo un tubo di tipo Coolidge ed eseguiamo su di esso alcune misure tese ad evidenziare le caratteristiche dello spettro di emissione dei raggi X.

Per eseguire gli esperimenti avremo bisogno di un tubo che ci consenta di variare la emissione elettronica che influenza la corrente anodica, di una sorgente di d.d.p. variabile tra anodo e catodo, di un analizzatore della quantità di radiazione emessa alle diverse frequenze e della possibilità di variare il materiale di cui è costituito l'anticatodo.

Con questa strumentazione disposizione potremo osservare il numero di fotoni emessi (determinati dal numero di colpi indicati dal rivelatore) alle diverse frequenze.

Il diagramma presenta la forma rappresentata qui a lato da cui si leggono le seguenti informazioni

- il numero di fotoni emessi al di sopra delle energie di 2 keV (limite inferiore a cui opera lo strumento) presenta un andamento a campana con un massimo tra 12 e 15 keV
- si riduce a zero nel caso di energie superiori ai 35 keV (essendo di 35 kV la d.d.p. tra anodo e catodo)
- mentre la curva ha un andamento abbastanza regolare essa presenta due picchi molto ben definiti (indicati con k_α e k_β) in corrispondenza di due valori di energia che sono tipici del materiale di cui è costituito il bersaglio



spettro di emissione dei raggi X con la zona continua di bremsstrahlung e i due picchi K_α e K_β

La zona con andamento regolare viene denominata *radiazione continua* o *radiazione di frenamento* (*bremsstrahlung* nell'originale tedesco ampiamente usato tra i fisici). Questo tipo di radiazione è generata per effetto della brusca decelerazione che gli elettroni dei raggi catodici subiscono passando in prossimità dei nuclei atomici dell'anticatodo. Quando l'elettrone passa molto vicino al nucleo la accelerazione subita è così elevata che esso può perdere tutta la sua energia cinetica o una parte rilevante di essa in un solo processo di emissione di un fotone. Il processo ha natura continua perché a seconda della distanza dal nucleo a cui avviene l'emissione del fotone sono coinvolti valori di energia diversi.

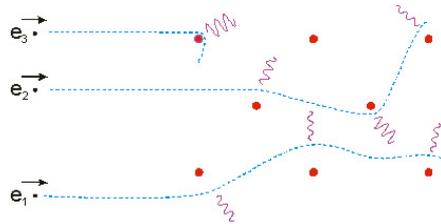
Il legame tra energia, lunghezza d'onda e frequenza del fotone è quello previsto dalla teoria quantistica con la relazione di Planck ed Einstein la cui genesi sarà argomento dei prossimi paragrafi.

$$\mathcal{E} = h \nu \quad (\text{VI.1.1})$$

$$\text{con } h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Ma poiché $\lambda \nu = c$ nelle relazioni della fisica del 900 in cui sono coinvolti i fotoni si usano indifferentemente la energia (espressa in J, in eV o persino in kg), la lunghezza d'onda (espressa in m o in Å) o la frequenza in hz.

Dal punto di vista energetico i raggi X vengono suddivisi in raggi molli ($10^2 \div 10^4$ eV) che hanno come confine sinistro l'ultravioletto e in raggi



i raggi X sono generati dalle brusche accelerazioni che i raggi catodici subiscono nel passare in prossimità dei nuclei del bersaglio

duri ($10^4 \div 10^6$ eV) che si sovrappongono alla zona dei raggi γ generati nei processi di riassetto nucleare



Determinare la costante di proporzionalità tra energia e lunghezza d'onda nell'ipotesi di misurare le energie in eV e le lunghezze d'onda in m.

☹

$$\mathcal{E}_{eV} = \frac{1}{e} \mathcal{E}_J = \frac{1}{e} h \nu = \frac{h c}{e \lambda} = \frac{6.6260755 \cdot 10^{-34} \cdot 2.99792458 \cdot 10^8 \frac{1}{\lambda}}{1.60217733 \cdot 10^{-19}}$$

$$1.2398 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\lambda} = \frac{12'398}{\lambda_A}$$

La relazione trovata ci consente di associare i raggi X alla lunghezza d'onda

$$\lambda_A \approx 10^4 / \mathcal{E}_{eV}$$

e dunque avremo raggi molli lunghezze d'onda da 1 a 100Å e raggi duri dall'Å al centesimo di Å

☺



Determinare la d.d.p. con cui bisogna alimentare un tubo a raggi X se si vuole fare in modo che i raggi X possano dar luogo a fenomeni di diffrazione sulle strutture del reticolo cristallino ipotizzando una interdistanza $d \approx 10^{-9}$ m.

☹

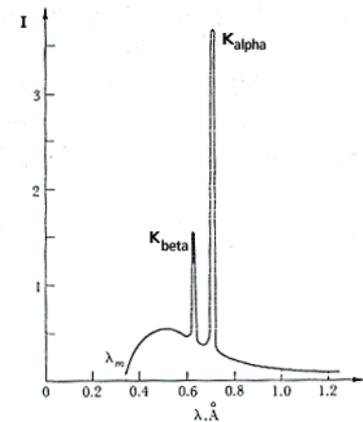
Perché si abbia diffrazione deve essere $d \approx \lambda$ e pertanto i raggi catodici dovranno avere una energia

$$\mathcal{E}_{eV} \geq 1.2398 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\lambda} = \frac{1.2398 \cdot 10^{-6}}{10^{-9}} = 1.24 \cdot 10^3 \text{ eV}$$

La d.d.p. deve pertanto essere superiore a $1.24 \cdot 10^3$ V

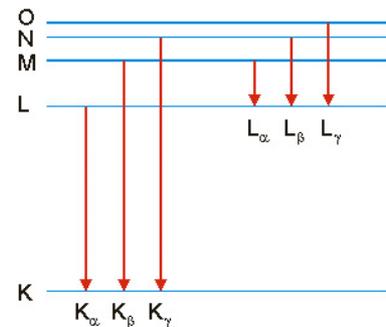
☺

La teoria basata sui fotoni ci spiega come mai lo spettrogramma continua va a zero rapidamente in corrispondenza delle energie (lunghezze d'onda) corrispondenti alla energia massima che un elettrone accelerato è in grado di emettere (la energia cinetica dell'elettrone). In letteratura è diffuso oltre che lo spettrogramma in funzione della energia il suo reciproco in funzione di λ come nella immagine qui a lato in cui si vedono molto bene sia la lunghezza d'onda di soglia legata alla d.d.p. con cui viene alimentato il tubo sia il carattere di picco delle righe k.

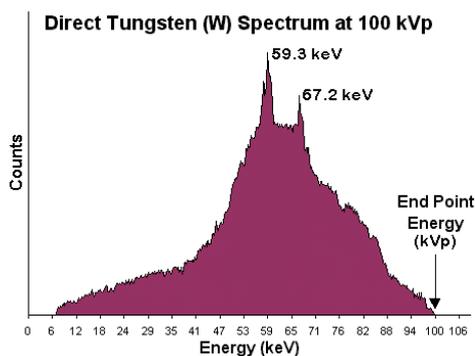


1.4.2 LO SPETTRO DI RIGHE E LA SUA INTERPRETAZIONE

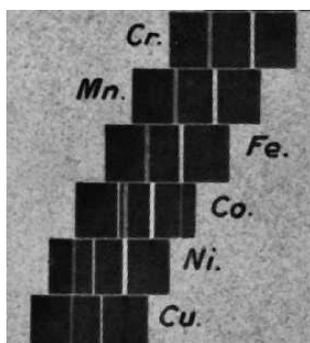
La spiegazione delle righe k_α e k_β può essere spiegata anch'essa con ragionamenti di tipo quantistico basati su una sorta di effetto fotoelettrico inverso⁵. I raggi catodici di alta energia sono in grado di penetrare entro la nube elettronica che circonda il nucleo giungendo sino agli strati più interni. Se per urto un elettrone degli strati interni viene espulso dal suo orbitale si crea un buco e l'atomo si eccita. La successiva diseccitazione corrisponde al passaggio di un elettrone esterno su un'orbita interna con emissione di un fotone con energia pari alla differenza energetica dei due livelli coinvolti.



⁵ Si veda più oltre in questo stesso capitolo.



Lo spettro di emissione del tungsteno il materiale elettivamente usato per i bersagli dei tubi a raggi X



dettaglio della rappresentazione di Moseley della collocazione delle righe $k\alpha$ con il cobalto collocato tra ferro e nichel

La energia di legame sono proporzionali al quadrato della carica nucleare $(Ze)^2$ e hanno il loro valore minimo nello strato più interno K (primo numero quantico = 1). Da questo valore detto fondamentale la energia cresce con legge che va come l'inverso del quadrato dei numeri interi assumendo valori pari a $1/4, 1/9, 1/16$ del valore fondamentale.⁶

Le due righe $k\alpha$ e $k\beta$ corrispondono alle due uniche transizioni significative in cui la energia del salto corrisponde a fotoni nella zona dei raggi X. Questi fotoni, se indichiamo con \mathcal{E} l'energia (cambiata di segno) dello stato fondamentale, possiedono allora energie pari a:

$$(1 - 1/4) = 3/4 \mathcal{E} \text{ e } (1 - 1/9) = 8/9 \mathcal{E} \text{ mentre il successivo fotone } k\gamma \text{ di energia } 15/16 \mathcal{E} \text{ appare scarsamente distinguibile da } k\beta$$

Lo studio delle caratteristiche delle righe spettrali emesse, per un dato valore della d.d.p. di alimentazione del tubo, è stato compiuto da Henry Moseley (1887–1915) del gruppo di Rutherford nel 1913⁷. Egli scoprì una legge empirica riguardante la relazione tra la energia delle righe $k\alpha$ e il numero atomico dei materiali costituenti il bersaglio. Se si riportavano in un diagramma la radice quadrata della frequenza in funzione del numero atomico si otteneva una retta.

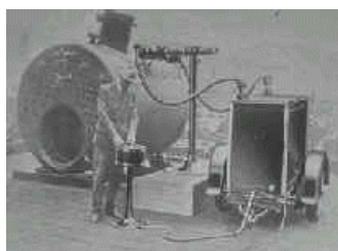
Ciò sembrava indicare una dipendenza proporzionale tra le energie dei fotoni dello spettro di righe e il quadrato della carica nucleare come si andava ipotizzando proprio in quegli anni sulla base degli esperimenti di Rutherford e delle teorie avanzate da Bohr sulla costituzione degli atomi. In altri termini i raggi X davano un forte indizio a favore della interpretazione del numero atomico come indicatore della carica nucleare e non come semplice numero ordinale nella tavola degli elementi.

Lo stesso Moseley dopo aver ordinato i suoi dati sperimentali fu costretto a lasciare dei buchi in corrispondenza di elementi ignoti che sarebbero poi stati scoperti e collocati nel gruppo delle terre rare e risolse il dilemma relativo alla collocazione del Cobalto con $A = 58.933$ e del Nichel con $A = 58.71$. La collocazione delle righe spettrali indicava con certezza che il cobalto va collocato tra il ferro e il nichel nonostante presenti un numero di massa leggermente superiore a quello del nichel.

1.4.3 L'UTILIZZO IN MEDICINA E NELLA SCIENZA DEI MATERIALI

L'utilizzo dei raggi X non è cambiato di molto, se non per quanto riguarda un miglioramento delle tecnologie dagli utilizzi ipotizzati alla fine dell'800 e nei primi anni del 900:

- ispezione dei bagagli ovunque sia necessario un controllo accessi; ciò che si fa oggi negli aeroporti era già fatto in via sperimentale oltre un secolo fa come si vede nella immagine qui a lato
- controllo di strutture non ispezionabili in altro modo: oggi con apparecchiature operanti a 450 kV si possono ispezionare interi container mentre qui vediamo il controllo, eseguito nel primo 900, della caldaia di una nave alla ricerca di crepe nella struttura o calcificazioni da eliminare



⁶ Si veda il calcolo nel capitolo dedicato al modello di Bohr dell'atomo.

⁷ Moseley morì in combattimento nel 1915 nel corso della I guerra mondiale

- terapia dei tumori superficiali e dei tumori profondi (dopo che grazie all'utilizzo degli acceleratori di particelle si sono rese disponibili radiazioni con un spettro stretto e con cui è possibile predeterminare la profondità a cui tali radiazioni debbano giungere nel trattamento di tessuto biologico)
- indagine radiografica e tomografica. Nella tomografia assiale computerizzata (TAC) si opera una ricostruzione tridimensionale di organi interni facendo ruotare il tubo intorno al paziente in modo di formare l'immagine di una sezione del corpo tramite la ricostruzione al computer di immagini provenienti da punti diversi collocati intorno ad un asse di simmetria. Muovendo in senso longitudinale il paziente o il tubo è possibile avere la ricostruzione di più sezioni che forniscono poi l'immagine tridimensionale.

