

Dalla fisica classica
alla fisica moderna

“Classica” e “moderna” sono due aggettivi che sono variamente usati parlando di arte, filosofia, letteratura...

Per la fisica, la separazione può essere fatta tra la fine dell'800 e l'inizio del '900.

Altri preferiscono far iniziare la fisica moderna con la scoperta dell'elettrone (1890).

Come vedremo è più facile individuare un *periodo di transizione*, che sta appunto a cavallo dei due secoli, e dura almeno vent'anni, forse anche 50.

Panorama sulla fisica dell'800

Conviene cominciare ripercorrendo per capitoli le conquiste della fisica nel corso del 19-mo secolo: che cosa si sapeva attorno al 1800, e che cosa alla fine del secolo.

Meccanica e astronomia

La meccanica newtoniana è già solidamente stabilita, ma progredisce nella capacità di calcoli e previsioni.

La scoperta di Nettuno.

Dalle irregolarità del moto di Urano (scoperto nel 1781) si suppone possa esistere un altro pianeta, non ancora visto, che ne perturba il moto.

I calcoli (Adams, Leverrier) portano a prevedere dove il nuovo pianeta dovrebbe trovarsi: puntano un telescopio in quella regione, il pianeta viene scoperto (Galle a Berlino, 1846).

Questa è una forte conferma della validità della gravitazione newtoniana.

La soluzione del “problema della Luna”.

Fino a metà del secolo non si riusciva ad accordare i calcoli con le osservazioni.

Tanto che era sorto il dubbio che ci fosse qualcosa di sbagliato nella teoria...

Solo verso il 1850 si riuscì a dimostrare che erano solo le approssimazioni usate nei calcoli a essere inadeguate: spingendole più avanti si ottenne finalmente accordo completo con le osservazioni.

Studio dettagliato del moto della Terra.

Intendo non il moto attorno al Sole, ma quello di rotazione su se stessa.

Eulero aveva già previsto il fenomeno del “moto del polo” nel '700: l'asse di rotazione *non rimane fisso rispetto alla Terra*, ma si muove leggermente, con un moto circa periodico.

Però il periodo calcolato da Eulero non tornava con quello osservato.

Alla fine dell'800 la differenza venne spiegata con la non rigidità della Terra.

La meccanica applicata.

Nell'800 si sviluppa la meccanica dei *corpi rigidi*, la teoria dell'*elasticità*, la meccanica dei *mezzi continui* (liquidi, gas).

Lo sviluppo dell'industria meccanica nell'800 richiede lo studio teorico delle più diverse macchine, e dei problemi che nascono nella loro progettazione: turbine, motori e generatori elettrici...

Senza contare la nascita dell'*automobile*.

Astronomia

Nel corso dell'800 ci sono molte scoperte astronomiche.

Oltre la scoperta di Nettuno, va ricordata la scoperta degli *asteroidi* all'inizio del secolo: Piazzi scopre Cerere il 1° gennaio 1801.

Altri asteroidi vengono scoperti negli anni seguenti.

Nel 1809 Gauss pubblica un trattato sulla “Teoria del moto dei corpi celesti che ruotano attorno al Sole”.

Nel 1838 Bessel misura la *prima distanza* di una stella (61 Cygni).

Secchi inizia nel 1863 lo studio *spettroscopico* delle stelle, introducendo la prima classificazione in base al colore e alle righe di assorbimento: è l'inizio dell'*astrofisica*.

O4



B5



A0



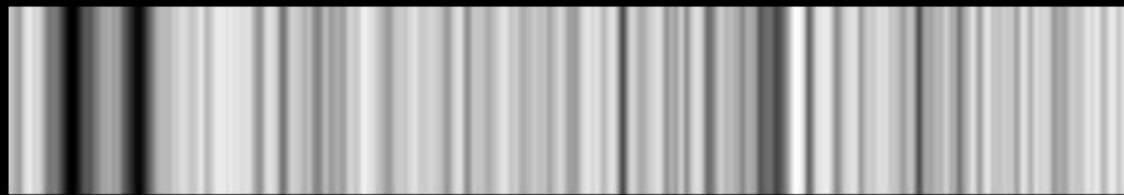
F0



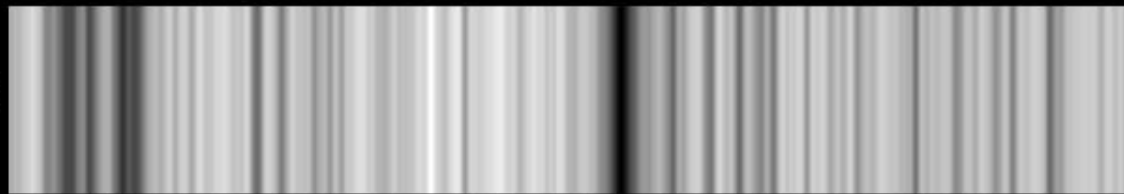
G0



K0



M2



Le nane bianche:

La storia è complicata e durò molti anni.

Herschel (1844) si accorge che Sirio deve essere una stella doppia, anche se la compagna non si vede.

Nel 1862 Clark riesce a vedere Sirio B, 10 magnitudini (cioè 10000 volte) più debole di Sirio A.

Nel 1915 Adams dimostra che lo spettro di Sirio B è simile a quello di Sirio A, e questo è un problema: con una massa poco diversa, e con la stessa temperatura, come fa a essere tanto meno luminosa?

Termodinamica

La termodinamica nasce nell'800, e nel secolo si sviluppa, dal punto di vista pratico e teorico.

Comincia con lo studio delle *macchine termiche* (Carnot, 1824).

Poi con la nascita del concetto generale di energia (*primo principio*: Joule, Helmholtz 1847).

Poi col *secondo principio* (Clausius, Kelvin, 1850–51).

Il problema della “natura del calore”.

L'ipotesi cinetica. I primi inizi risalgono al '700.

Krönig (1856) e Clausius (1857) arrivano alla loro equazione, che ricava la legge dei gas perfetti da un modello cinetico.

Nel 1859 Maxwell enuncia la legge di *distribuzione delle velocità*, poi generalizzata da Boltzmann nel 1871 (la *distribuzione di Boltzmann*).

È l'inizio della *meccanica statistica*: il *teorema di equipartizione* viene enunciato da Maxwell nel 1859, generalizzato da Boltzmann nel 1876).

La prima applicazione è il calcolo dei calori specifici dei gas (ne ripareremo).

Va ricordata anche l'applicazione della termodinamica alla chimica (*chimica fisica*) con Gibbs, Arrhenius, van't Hoff.

Ottica

Agli inizi dell'800 viene stabilita la *natura ondulatoria* della luce (Young).

Nel corso del secolo gli sviluppi teorici portano a una teoria completa della *diffrazione*, e alla possibilità di costruire strumenti ottici sempre più raffinati (*telescopi, microscopi*).

Il microscopio si rivela uno strumento fondamentale della *ricerca biologica e medica* (Koch, Pasteur).

All'inizio del secolo vengono scoperte le radiazioni invisibili: *infrarosso, ultravioletto*.

La *spettroscopia* è un sensibile mezzo di *analisi chimica* (Bunsen, Kirchhoff); inizia la *ricerca astrofisica* (Secchi).

La velocità della luce.

Viene misurata con precisione sempre maggiore: Fizeau 1849, Foucault 1862, Michelson 1879.

Dal 1887 in poi, Michelson e Morley tentano di rivelare *differenze* nella velocità della luce lungo direzioni diverse, dovute al moto della Terra rispetto all'etere: *risultato negativo*.

Elettromagnetismo

Sicuramente il maggiore progresso nella fisica di questo secolo.

All'inizio del secolo c'è l'invenzione della *pila* (Volta, 1799-1800).

Prima c'erano solo le *macchine elettrostatiche*, che producevano alte d.d.p. ma debolissime correnti.

La scoperta di Oersted (1829): la corrente elettrica produce un *campo magnetico*.

Le ricerche di Faraday sull'*induzione e.m.* (1831 e seg.).

Seguono molte *applicazioni pratiche*: motori elettrici, generatori (Paciniotti), trasformatori (Tesla).

Inizia la *distribuzione dell'energia elettrica*, anche per l'illuminazione stradale e privata.

Le *vetture elettriche* (tram) sostituiscono quelle a cavalli nel trasporto cittadino.

Enorme influenza sullo *sviluppo dell'industria*: il motore elettrico sostituisce la macchina a vapore.

Lo sviluppo delle comunicazioni: a metà dell'800 si diffondono *telegrafo* e *telefono*.

La sintesi maxwelliana e la previsione delle onde e.m.

Nel 1873 Maxwell pubblica in forma completa il risultato delle sue ricerche sull'elettromagnetismo: il *Treatise on Electricity and Magnetism*.

Contiene, nella forma delle “equazioni di Maxwell”, tutte le leggi conosciute sui fenomeni elettrici e magnetici.

Maxwell aggiunge però una correzione necessaria: la *corrente di spostamento*. Questa correzione ha una conseguenza profonda: implica l'esistenza delle *onde elettromagnetiche*, fino allora sconosciute.

Maxwell studia le proprietà di queste onde; dimostra che la loro velocità nel vuoto *coincide con quella già nota della luce*.

Ne conclude che la *luce* non sia che *un particolare tipo di onde e.m.*, di lunghezza d'onda molto corta.

Nel 1887 Hertz dimostra per via sperimentale che le onde e.m. esistono realmente.

Prima della fine del secolo le onde e.m. trovano immediata applicazione pratica alle *telecomunicazioni*.

Nasce la “telegrafia senza fili”: Marconi, ma anche Tesla, Lodge, Branly...

Il valore di questa tecnica si dimostra con dei famosi salvataggi in mare: *Republic* nel 1909 (1200 salvati); *Titanic* nel 1912 (700 salvati su 2200).

La struttura della materia

Atomi, molecole, ioni.

Agli inizi del secolo Dalton formula l'*ipotesi atomica* per spiegare le leggi delle combinazioni chimiche.

Nel 1811 Avogadro chiarisce la distinzione fra atomi e molecole, ed enuncia la sua legge sul *numero di molecole* contenute in un dato volume di gas.

Per gran parte del secolo l'atomo resterà un'unità *indivisibile* di materia..

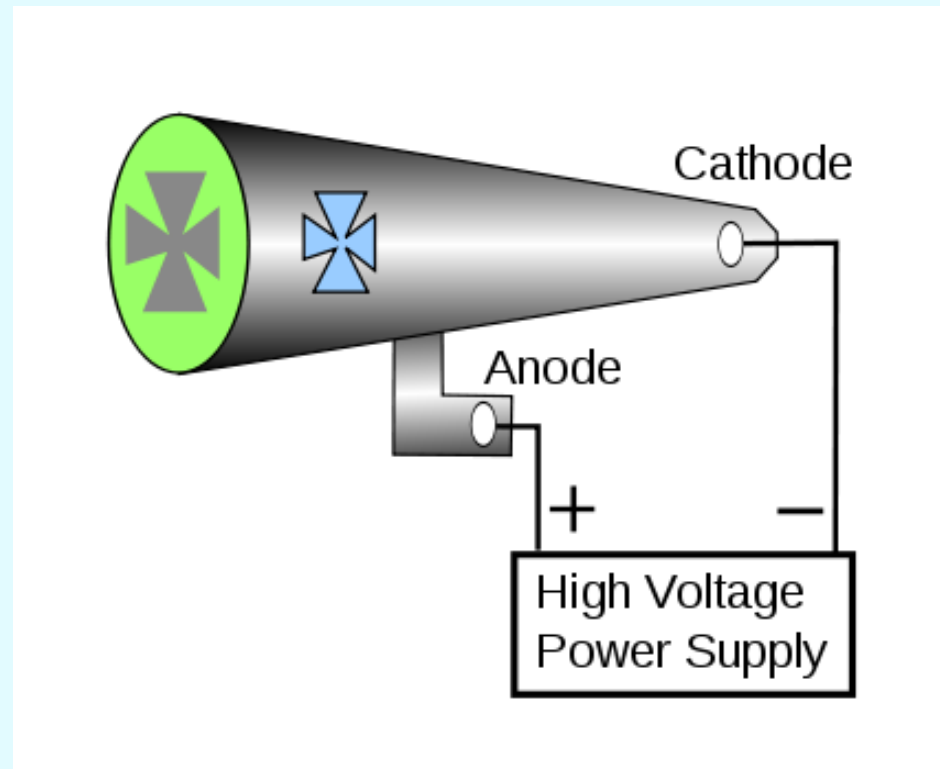
Nel 1834 Faraday formula le leggi dell'*elettrolisi*.

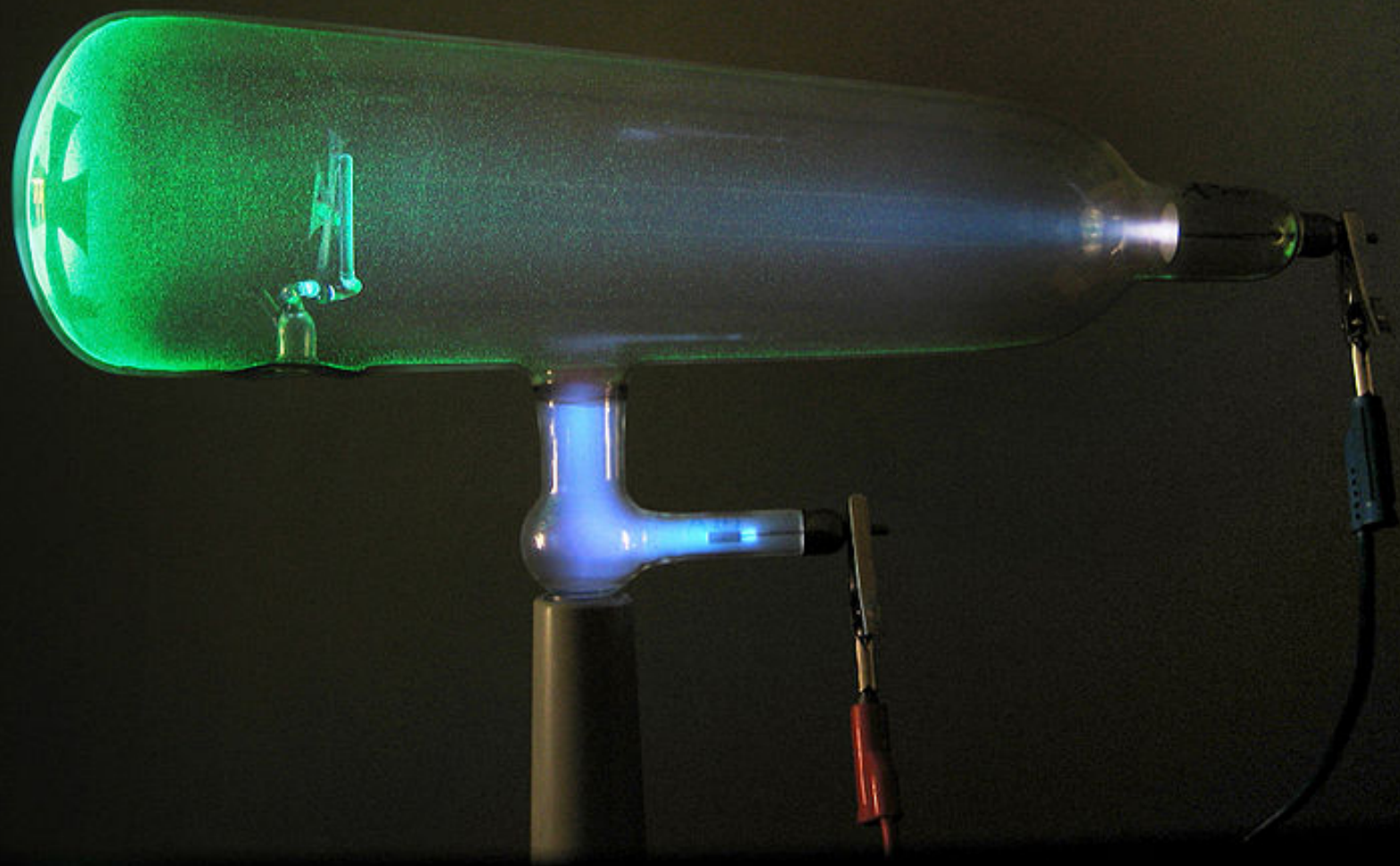
Solo nel 1880 Arrhenius formula l'ipotesi della *dissociazione elettrolitica*: certe molecole in soluzione si dissociano in *ioni* dotati di carica elettrica.

La scarica elettrica nei gas.

Lo studio della scarica elettrica nei gas rarefatti percorre gran parte del secolo, da Faraday fino alla fine.

Dopo il 1870 Crookes, lavorando a pressione assai bassa, scopre che nel tubo non è più visibile la scarica, ma la parete di vetro diventa luminescente. È la scoperta dei *raggi catodici*.





Intorno al 1890 vengono scoperti i *raggi X*.

Nello stesso tempo si dimostra (Thomson, 1896) che i raggi catodici sono *particelle negative*, circa 2000 volte più leggere dell'atomo di H.

Viene coniato il nome *elettrone*.

Si capisce che gli ioni sono atomi o frammenti di molecole che hanno *perso o acquistato elettroni*.

Che i raggi X sono una *radiazione e.m.*, prodotta quando gli elettroni vengono bruscamente frenati.



Diversi effetti dimostrano che *gli elettroni sono presenti negli atomi*.

a) L'effetto *termoionico*: un metallo *riscaldato* emette elettroni.

Questo effetto sarà utilizzato (lo è ancora) per la produzione di elettroni nei “tubi elettronici”, sui quali venne costruita tutta la *tecnica radio* e poi *l'elettronica*, prima dell'invenzione del *transistor* (~1950).

b) L'effetto *fotoelettrico*: un metallo emette elettroni quando viene *colpito da luce*.

Anche questo effetto ha avuto e ha importanti applicazioni pratiche.

Ma per la nostra storia interessa di più che negli anni attorno al 1900 presentava un *grave problema*: le *leggi sperimentali* dell'effetto fotoelettrico *non erano spiegabili* in base alla fisica allora conosciuta.

Modelli atomici.

Tutte le recenti scoperte alla fine dell'800 portano a una conclusione: l'atomo *non* è un'entità indivisibile.

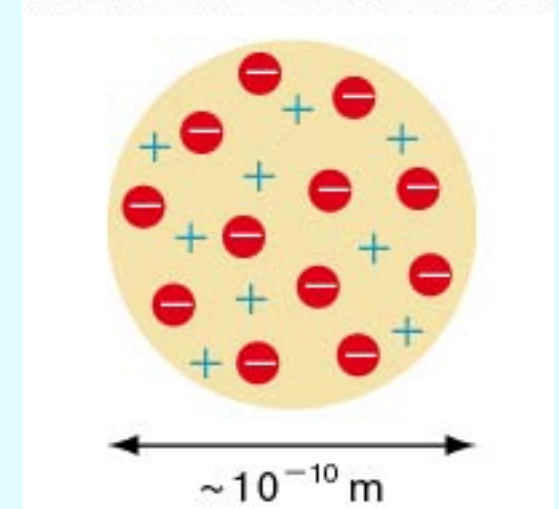
Domanda: come sono fatti gli atomi?

Nascono i primi *modelli atomici*.

Il più famoso è il *modello di Thomson* (1904), detto “plum pudding” (o “panettone”).

L'atomo è una sfera di carica positiva distribuita, all'interno della quale si trovano (si muovono?) gli elettroni.

Thomson's atomic model



La radioattività (Becquerel 1896).

Vengono identificati tre tipi di “raggi”:

- α : i meno penetranti, carica positiva
- β : penetrazione media, carica negativa
- γ : massima penetrazione, nessuna carica.

La radioattività dimostra che non solo gli atomi sono *composti*, ma alcune specie sono addirittura *instabili*.

Alcuni problemi aperti

- Il problema di Mercurio.
- Esiste l'etere?
- I calori specifici.
- La struttura degli spettri atomici.
- Esistono gli atomi?
- Se sì, come sono fatti?
- Che cos'è la radioattività?
- Che cosa sono i diversi “raggi” α , β , γ ?

Il problema dei calori specifici.

Il teorema di equipartizione fa previsioni precise sui *calori specifici di gas e solidi*, che si esprimono meglio se riferite a una mole (*calore molare* = capacità termica di una mole).

Gas monoatomico: $C_p = 5R/2$ (R è la costante di gas perfetti)

Gas biatomico: $C_p = 7R/2$

Solido di elemento: $C_p = 3R$.

Tutti questi valori non dovrebbero dipendere dalla temperatura.

Invece le previsioni sono rispettate solo in certi casi, ma non in altri.

Per es. il cloro (biatomico) ha un calore specifico *più grande*, mentre l'idrogeno *più piccolo*.

Tra i solidi, gli *elementi leggeri* (berilio, boro, carbonio) hanno a temperatura ambiente un calore specifico *molto più piccolo*, e che aumenta con la temperatura.

Le prime risposte

1905: Einstein nega l'etere, nasce la *relatività* (ristretta).

1905: Einstein introduce l'idea dei *quanti* di radiazione (i *fotoni*) e risolve il problema dell'effetto fotoelettrico.

1905: Einstein sviluppa la teoria del *moto browniano*.

1909: Perrin con esperimenti conferma la teoria di Einstein e dà la prova definitiva della realtà degli atomi, misurandone il numero.

1909: Rutherford identifica i raggi α come atomi di elio due volte ionizzato (nuclei).

1909: Rutherford con Geiger e Marsden esegue lo storico esperimento che dimostra la struttura “planetaria” dell'atomo.

1907–1912: Einstein, Debye e altri, partendo dalla *quantizzazione* scoperta da Planck risolvono il problema dei calori specifici dei solidi.

1911–1915: Einstein costruisce la *teoria relativistica della gravitazione*, detta “relatività generale”.

La teoria prevede diversi nuovi fenomeni, che saranno trovati anche a distanza di molto tempo.

In particolare, risolve il *problema di Mercurio*.

Ancora problemi

Il modello atomico di Rutherford fa sorgere nuovi problemi.

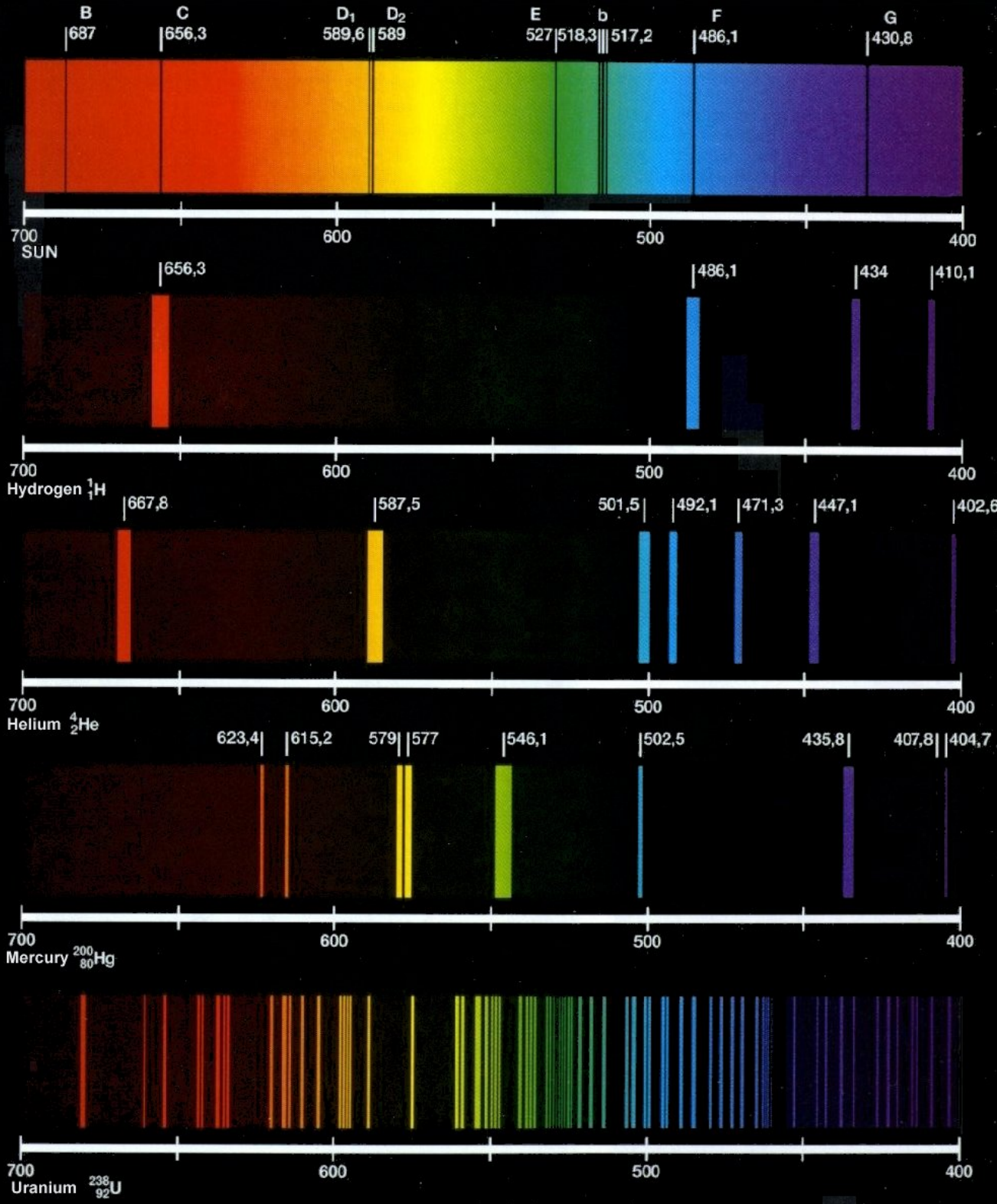
1) Secondo le leggi dell'elettromagnetismo (Maxwell) una carica accelerata deve *emettere onde e.m.*

Questo deve quindi succedere agli *elettroni* in orbita, che dovrebbero perdere energia e *cadere* rapidamente *sul nucleo*.

Invece gli atomi sono *stabili*, e quelli di un dato elemento sono *tutti identici*.

2) Un elettrone in moto periodico attorno al nucleo dovrebbe irraggiare su *una sola frequenza*, o al più sulle *armoniche*.

Invece lo spettro dell'idrogeno è fatto in tutt'altro modo...



Un altro passo

1913: Bohr pubblica un nuovo modello atomico, che con ardite ipotesi risolve i problemi.

Assume che per l'elettrone nell'atomo d'idrogeno siano ammesse *solo certe orbite*: quelle con momento angolare multiplo di $h/2\pi$.

Assume che in quelle orbite l'elettrone *non irraggi*: la radiazione viene emessa o assorbita solo nella *transizione* da un'orbita all'altra.

Il modello di Bohr:

- spiega la stabilità dell'atomo
- spiega perfettamente, anche nei valori numerici delle lunghezze d'onda osservate, lo spettro dell'idrogeno.

Però le ipotesi di Bohr sono *incompatibili* con la meccanica e con l'elettromagnetismo classico.

La soluzione ...

... arriverà 10–12 anni dopo, con la nuova meccanica quantistica.

Richiederà però una *rivoluzione nel modo di pensare* la meccanica (moto, posizione, traiettoria) e l'elettromagnetismo (onde, campi, energia).

Avremo così una *nuova fisica*, che tuttavia *non abroga* la fisica classica: questa *resta valida* entro un certo *campo di applicazione* (grosso modo, la fisica macroscopica).

Ricordiamo che un'altra rivoluzione è stata prodotta dalla *relatività*:

- unificazione di spazio e tempo nello *spazio-tempo*
- *inerzia dell'energia*
- riduzione della gravità a *curvatura* dello spazio tempo,
- universo in *espansione*...

È tutto questo (e molto altro, in realtà) che chiamiamo *fisica moderna*.