

2. ELECTRONUL

2.1 Schiță istorică

O scurtă schiță istorică este deosebit de interesantă pentru a înțelege dezvoltarea ideilor privind electronul ca particulă elementară.

- În antichitate se cunoșteau o serie de fenomene electrice și magnetice; În limba greacă cuvântul *electron* înseamnă *chihlimbar*, material cunoscut prin proprietatea lui de a atrage obiecte ușoare dacă este frecat; se cunoșteau proprietățile unor materiale care atrăgea obiecte de fier, "piatra magnetică" (*magnetita*, denumită *magnis* În Grecia). Fenomene de electrizare prin frecare au fost observate și descrise de către Thales din Milet (aprox. 600 î.Hr.) iar atracția pietrei magnetice a fost descrise de Platon.

- În evul mediu "electricitatea" se considera ca un fluid

- În 1733 C. Dufay, susține ipoteza a două fluide: electricitate *vitroasă* (la frecarea sticlei) și *rășinoasă* (la frecarea unor rășini) ca rezultat al observației privind existența fenomene de atracție dar și de respingere între corpurile electrizate;

- Între 1747 - 1750 B. Franklin, efectuează experimente de electrizare și denumește cele două tipuri de electricitate, *pozitivă* și *negativă*, (deoarece presupunea că sticla câștigă fluid "electric" prin frecare cu mână, deci are ceva *în plus*, iar mâna pierde fluid, deci are fluid *în minus*); se spune (prin convenție) că un corp care este respins de o sticlă electrizată prin frecare este *pozitiv* încărcată și *negativ* încărcată în caz contrar; experimentează paratrăznetul și demonstrează natura electrică a trăznetului și fulgerului;

- 1776 H.Cavendish arată că trebuie făcută o distincție între doi factori de care depind fenomenele electrice: o mărime privind "cantitatea" de electricitate, denumită azi *sarcină electrică*, și o mărime ce privește intensitatea fenomenelor, denumită azi *potențial* sau *tensiune*, iar în 1811, Lord Kelvin, definește cantitativ noțiunea de *potențial electric*;

- 1785 C. Coulomb, a dat legea cantitativă a acțiunii corpurilor încărcate electric, lege analogă cu cea a gravitației;

- 1789 - 1800, experimente cu "electricitatea animală", L.Galvani și apoi A. Volta au inventat pila electrică;

- 1801, H. Davy, descoperă electroliza;

- M. Faraday, studiază electroliza în laboratorul lui Davy și dă legile ei; introduce noțiunea de *ion* (1834, cuvânt de origine greacă, ce înseamnă "pelerin" sau "călător");

- 1839, Faraday, introduce noțiunea de *dielectric*;

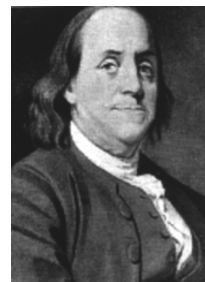
- 1854, Heinrich Geissler, îmbunătățește pompele de vid și efectuează experimente de descărcări electrice în gaze rarefiate;

- 1869, J.W. Hittorf descoperă *razele catodice*;

- 1869, E. Goldstein, cercetări asupra razelor catodice;

- 1873, J. C. Maxwell, scrie "Tratat despre electricitate și magnetism", bazele teoriei electro-magnetismului;

- 1878, H.A. Lorentz, lucrează la teoria "clasică" a electronului;



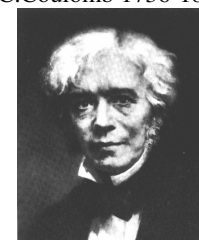
B.Franklin 1706-1790



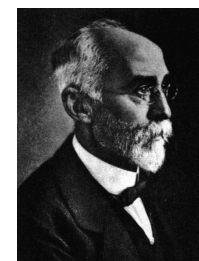
H.Cavendish 1731-1810



C.Coulomb 1736-1806



M.Faraday 1791-1867



H.A.Lorentz 1853-1928

- 1881, H. Helmholtz afirmă că în electroliză se manifestă "atomul de electricitate";

- 1881, Johan Stone, propune denumirea de *electron* pentru ipotetica particulă ce poartă unitatea de sarcină electrică;

- 1881, J.J. Thompson, introduce ideea de masă electromagnetică a electronului;

- 1884, T.A. Edison, - descoperă emisia termoelectronică, efectul Edison;

- 1885, H.A. Lorentz, dezvoltă teoria clasică a electronilor;

- 1886, Goldstein, descoperă *razele canal*;

- 1887, S. Arrhenius, formulează teoria *disociației electrolitice*; disociația în ioni se petrece nu numai la electrozi (în fenomenul de electroliză), ci și în mod normal la orice dizolvare;

- D. Hurmuzescu, construiește electroscopul cu dielectric și ecranare electrostatică;

- J. Perrin, realizează experimente cu electroscopul și descoperă încărcarea electrică negativă, a razelor catodice;

- J.J. Thompson (1897) realizează un experiment crucial pentru detectarea electronilor și stabilirea proprietăților lui; deviația în câmp electric a razelor catodice se face ca și cum aceste raze ar fi constituite din particule încărcate cu sarcină electrică și o masă a cărei valoare este de aproximativ 1/1000 din masa atomului de hidrogen; în același an pune la punct metoda câmpurilor încrucișate;

- se ajunge la concluzia că electronul este un "atom de electricitate"; are o rază de aproximativ $3 \cdot 10^{-13}$ cm (Lorentz, teoria clasică a electronului);

- 1899, Ph. Lenard scoate în aer razele canal utilizând foițe foarte subțiri de metal și studiază proprietățile fasciculului;

- 1899, J.J. Thompson, arată că particulele din razele catodice sunt identice cu cele care apar în efectul fotoelectric, utilizând "semnătura" particulelor: raportul e/m ;

- 1903, E. Rutherford, descoperă că fasciculul de radiații alfa emise de rادیu se descompune în câmp electric (sau magnetic) intens în particule cu sarcina pozitivă, deviate și altele nedeviate (denumite ulterior gama);

- 1904, P. Drude și J.J. Thompson, arată că valența unui element coincide cu numărul de electroni "labili" pe care îi are atomul (*electroni de valență*);

- 1905, A. Einstein, dă teoria fonică a efectului fotoelectric;

- 1905, P. Langevin, dă teoria electronică a diamagnetismului și a paramagnetismului;

- 1906, Ghercke și Reichenheim, descoperă *razele anodice* (emisia termoionică);

- 1907, P. Weiss, dă o primă teorie a feromagnetismului;

- 1907, J. Starck arată că electronii se găsesc în partea exterioară a atomului;

- 1907, J.J. Thompson, pune la punct metoda parabolilor;

- 1908, R. Millikan, începe seria de determinări a sarcinii electronului;

- 1911, R. Millikan, obține o valoare precisă a sarcinii electronului;



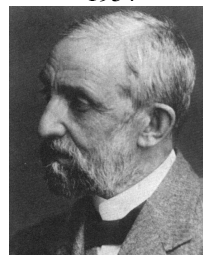
H.Helmholtz 1821-1894



T.A.Edison 1847-1931



D.Hurmuzescu 1865-1954



P.Lenard 1862-1947



P.Langevin 1872-1946



P.Auger 1899 - 1993

- 1922, D. Stern, E. Gerlach, descoperă momentul magnetic al electronului;
- 1922, 1923, A.H. Compton și P. Debye, explică efectului Compton;
- 1925, P. Auger, descoperă așa numiții electroni Auger;
- 1923, 1925, L. de Broglie, emite ipoteza undei asociate;
- 1924, E. Schrodinger, dă ecuația de mișcare a electronului în atom;
- 1925, W. Pauli, exprimă principiul de excluziune;
- 1927, C. Davisson, D.H. Germer, efectuează experimente de difracție a electronilor;
- 1928, P.A.M. Dirac, ajunge la ecuația de mișcare a electronului relativist;



P.A.M. Dirac 1902 - 1984

Conferința Solvay¹ din 1927 a fost intitulată: "Electroni și fotoni" și a fost într-un fel punctul de tranziție care a marcat recunoașterea mecanicii cuantice ca singură teorie coerentă a fenomenelor atomice. Această conferință s-a axat în mod deliberat asupra paradoxurilor ridicate de interpretarea mecanicii cuantice.

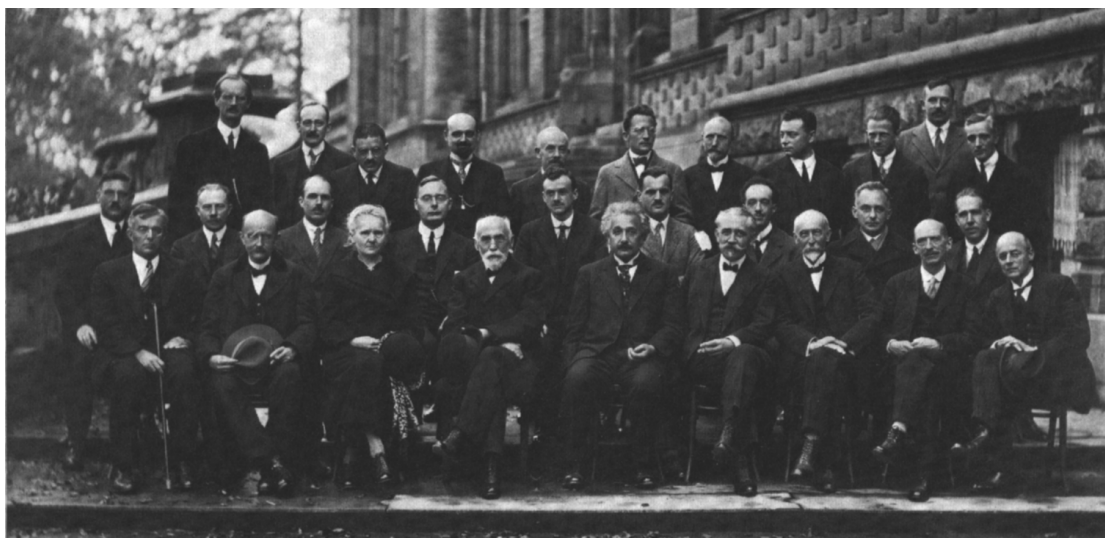


Figura 2.1 Participanții la conferința Solvay din 1927

În picioare: A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, Ed. Herzen, Th. DeDonder, E. Schrodinger, E. Verschaell, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin. *În rândul din mijloc:* P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr. *În rândul de jos:* I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson

¹ Conferințele Solvay au fost pornite la inițiativa lui Ernest Solvay, prima din ele având loc în 1911. Conferințele au avut ca scop o abordare a fizicii moderne sub forma unor întâlniri de lucru care să conducă la rezolvarea unora din aspectele neclare ale fizicii vremii.

2.2 Electroliza și atomul de "electricitate"

Descoperirea electrolizei și stabilirea legilor acestui efect a fost prima evidență, este adevărat, indirectă, a prezenței electronului în materie, respectiv a cuantificării sarcinii electrice. Legea electrolizei este:

$$M = K \cdot I \cdot t = \frac{A}{n \cdot F} \cdot Q \quad (2.1)$$

unde M - masa depusă; K - constantă; I - intensitatea curentului electric; t - durata de depunere; A - masa atomică a elementului depus; n - valența elementului; $F=96500$ C, constanta lui Faraday; $Q=I \cdot t$, - sarcina electrică totală care a depus masa M de substanță.

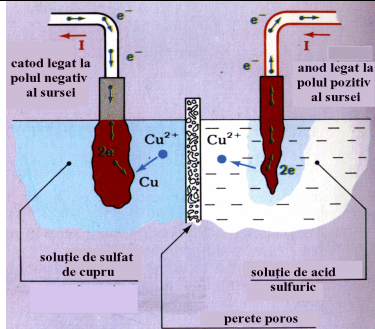
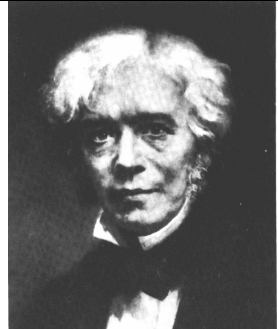
 Sir Humphry Davy (1778-1829) Chimist și fizician englez. A descoperit electroliza și a fost unul dintre fondatorii electrochimiei. A inventat lampa de siguranță a minerilor. A izolat pentru prima dată potasiul, sodiul, calciul, bariul, stronțitul și magneziul. În laboratorul lui a început să lucreze din tinerețe Michael Faraday care a și dat legile fenomenului de electroliză. Membru și președinte al Societății Regale din Londra.	 Mecanismul fenomenului de electroliză Într-o soluție de sulfat de cupru se plasează doi electrozi de cupru legați la bornele unei surse de curent continuu. În procesul de electroliză cuprul dispare de la anod iar la catod se depune cupru. Atomii de cupru de la anod se transformă în ioni de cupru: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ Ionii de cupru din soluție se transformă în atomi neutri la catod: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ Ionul de cupru migrează prin soluție și se depune la catod.	 Michael Faraday (1791-1867) Chimist și fizician englez, este cel care a introdus în fizică conceptele de <i>câmp</i> și de <i>linii de forță</i>. A studiat extensiv fenomenele electrice și magnetice și este inventatorul motorului electric. Cu toate că nu avea studii superioare a deveni membru al Societății Regale din Londra.
---	---	---

Figura 2.2 Electroliza și personajele implicate în descoperirea și studiul fenomenului.

De aici rezultă direct că:

$$\frac{Q}{M} = n \cdot \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

adică că raportul dintre sarcina electrică totală necesară pentru depunere și masa de substanță depusă este întotdeauna constantă pentru un ion de o valență dată, indiferent de elementul respectiv. Această constantă este aceea care permite să se susțină că există atomi de "electricitate". Dacă pentru a depune un atom-gram de substanță (A grame) este necesară întotdeauna aceeași sarcină electrică, dacă această sarcină este repartizată în mod egal între purtătorii de sarcini și dacă un atom-gram de substanță are întotdeauna același număr de atomi sau molecule (Avogadro) atunci sarcina raportată la numărul lui Avogadro va da valoarea unității de sarcină, adică valoarea sarcinii purtate de atomul de "electricitate":

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{96.500}{6,023 \cdot 10^{23}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (2.3)$$

Cunoscând această valoare putem utiliza relația (2.2) pentru a determina masa purtătorului de sarcină electrică din raportul obținut din (2.3):

$$\frac{F}{A} = \frac{e}{m_a}$$

unde m_a este masa atomului. Exemplificând pentru cazul moleculei de hidrogen ($A=2$) rezultă: $m_a = 1,6 \cdot 10^{-24}$ grame.

Să observăm la acest moment utilitatea raportului q/m pentru caracterizarea particulelor.

Din legea lui Faraday rezultă că la trecerea aceleiași cantități de electricitate (Q) prin diferiți electroliți masa de substanță depusă este proporțională cu masa atomică a ionilor respectivi și cu valența acelui ion. Prin urmare un atom gram de ioni monovalenți transportă întotdeauna aceeași cantitate de electricitate independent de natura ionului. Această cantitate de electricitate este denumită numărul lui Faraday și este egal cu $F = 96491 \text{ C}$.

Sarcina "elementară" care se transportă va fi atunci:

$$e = F/N.$$

Ioni de valențe diferite vor transporta atunci o sarcină electrică egală cu $2e$, $3e$, etc.

M. Faraday și ulterior H. Helmholtz au avut intuiția existenței reale a acestui atom de "electricitate", cu toate că până la o dovadă directă relația de mai sus a fost doar o ipoteză de lucru. (Trecerea de la Q/M la q/m implică chiar ipoteza: distribuția egală a sarcii Q peste toți purtătorii, ceea ce se dorea să se demonstreze.) Ca urmare un raționament care pleacă de la valori macroscopice, medii, nu este o dovadă directă a cuantificării sarcinii electrice. Această dovada va fi dată de cercetările și măsurătorile lui J.J. Thomson și R. Millikan.

Experimentele cu ipoteticele particule s-au realizat prin studiile asupra descărcărilor în gaze rarefiate.

2.3 Experimente de descărcări în gaze

Spre deosebire de lichide (soluții de electroliți), gazele în condiții obișnuite au o conductibilitate electrică extrem de scăzută. Experimentele de descărcare electrică în gaze la presiuni scăzute au scos în evidență proprietatea gazelor de a deveni bune conducătoare de electricitate în cazul în care se aplică o tensiune electrică suficient de ridicată între doi electrozi.

H. Geissler (1854) îmbunătățind pompa de vid reușește să coboare presiunea în tuburile de descărcare până la ordinul a 10^{-3} mm Hg ceea ce îi permite să efectueze experimente de descărcări în gaze. Plucker observă că sticla tubului opus catodei devine și ea luminiscentă (1859) atribuind fenomenul curenților electrici care circulă prin tub. El a denumit acești curenți "raze", denumire care s-a păstrat. W. Crookes continuă aceste studii experimentale. Hittorf (1859) arată că acești "curenți" sunt opriți de obstacole materiale interpușe și pune în evidență efectul de "umbră" a acestor raze. Goldstein le denumește "raze catodice".

Sumând concluziile s-a arătat că razele catodice:

- se propagă în linie dreaptă;
- provoacă fluorescența sticlei;
- produc efecte termice (un catod concav poate focaliza razele pe un obiect metalic care se încălzește);
- produc efecte chimice (cu timpul sticla pe care cad razele catodice se înnegește);
- sunt deviate de câmpuri electrice și magnetice.

Schematic un experiment cu raze obținute prin descărcarea în gaze rarefiate este prezentat în fig. 2.3.1.

6 Macroscopic and Quantum Properties of Atoms

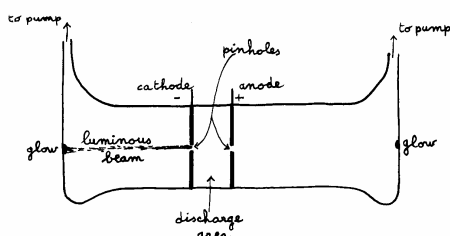


Fig. 1. 1. Sketch of apparatus for canal and cathode rays.

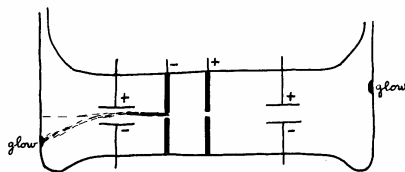


Fig. 1. 2. Deflection of canal and cathode rays.

fig. 2.3.1 Schița experimentelor de descărcare în gaze rarefiate

Catoda și anoda posedă fiecare câte un mic orificiu în centru, iar pereții de sticlă opus electrozilor, în momentul aplicării unei tensiuni ridicate și a prezenței unui gaz rarefiat în tub, se luminează prin fluorescență.

În plus, apare un fascicul luminos din orificiul catodului până la peretele opus de sticlă. Acest fascicul este cel botezat "raze canal". Cu toate că peretele de sticlă opus anodului se luminează, nu se evidențiază un fascicul luminos analog. Deoarece fluorescența este legată de aplicarea tensiunii, s-a considerat și aici existența unor raze care au fost denumite "catodice".

Studiul naturii acestor raze a fost făcut de către mulți cercetători printre care Wiechert. Kaufmann și mai ales J. J. Thomson. Deflexia acestor raze în câmp electric a fost un punct crucial în experimentele efectuate cu aceste raze.

Se observă că razele catodice sunt deviate de către câmpul electric ca și cum ar fi încărcate negativ iar cele canal ca și cum ar fi încărcate pozitiv. Deasemenea prezența într-un caz a fasciculului luminos și lipsa lui în celălalt caz este un alt element care indică diferența dintre cele două tipuri de raze (și deci a purtătorilor de sarcină electrică din cele două cazuri).

Deoarece deflexia este proporțională cu sarcina electrică a purtătorilor dar invers proporțională cu masa (inerția) lor, experimentele de deflexie pot da informații asupra raportului sarcină /masă a purtătorilor. Acest raport, caracteristic pentru un tip dat de purtător, se numește sarcină specifică.

Măsurători concomitente în câmpuri electrice și magnetice a permis lui J. J. Thomson să determine sarcina specifică a purtătorilor din descărcările în gaze, indiferent de viteza pe care aceste particule o aveau. Utilizarea numai a câmpului electric nu permite acest lucru decât dacă particulele au toate aceeași viteză. În consecință se poate astfel determina omogenitatea sau neomogenitatea fasciculului în raport cu sarcina specifică. Această metodă a permis punerea la punct a unei importante tehnici de analiză și anume a *spectrometriei de masă*.

Pe baza acestei metode, J. J. Thomson a evidențiat neomogenitatea razelor canal și dependența sarcinii specifice măsurate, de natura gazului din tub dar și de tensiunea aplicată la descărcare. Cunoaștem acum că acest lucru este legat de prezența ionilor de masă și sarcină diferită prezente în descărcare. Sarcina maximă pe care o poate avea un ion s-a dovedit a fi egală cu numărul atomic Z, numărul de ordine al elementului în tabloul periodic. Pentru un ion dat (masa fixată) se obțin spectre discrete de sarcină specifică legate de starea de ionizare a ionului.

Importanța acestei metode, din punctul nostru de vedere, este acela că permite evidențierea individuală a mișcării în câmp a purtătorilor de sarcină electrică în opoziție cu concluziile trase din experimentele de electroliză care dau valoarea medie a sarcinii specifice a tuturor purtătorilor.

Măsurătorile lui J. J. Thomson relativ la sarcina specifică a razelor catodice a arătat că spre deosebire de razele canal, razele catodice sunt omogene, au riguros aceeași sarcină specifică. Aceeași valoare a sarcinii specifice a razelor catodice se obține și la modificarea gazului din descărcare. Concluzia fundamentală a fost *universalitatea* tipului de purtător din razele catodice. Thompson a obținut pe această cale o sarcină specifică pentru purtătorul de sarcină din razele catodice o valoare de $q/m = 1,7 \cdot 10^8$ C/g. Din sensul de deviație el s-a convins că sarcina purtată este negativă. Valoarea unică pentru q/m indică identitatea tuturor acestor purtători. Se poate obține chiar și masa relativă a acestui purtător dacă calculăm raportul:

$$\frac{F}{e/m} = \frac{96.500}{1,7 \cdot 10^8} = 1/1800 \text{ g/mol}$$

Valoarea indică o masă extrem de mică pentru purtătorul de sarcină din razele catodice.

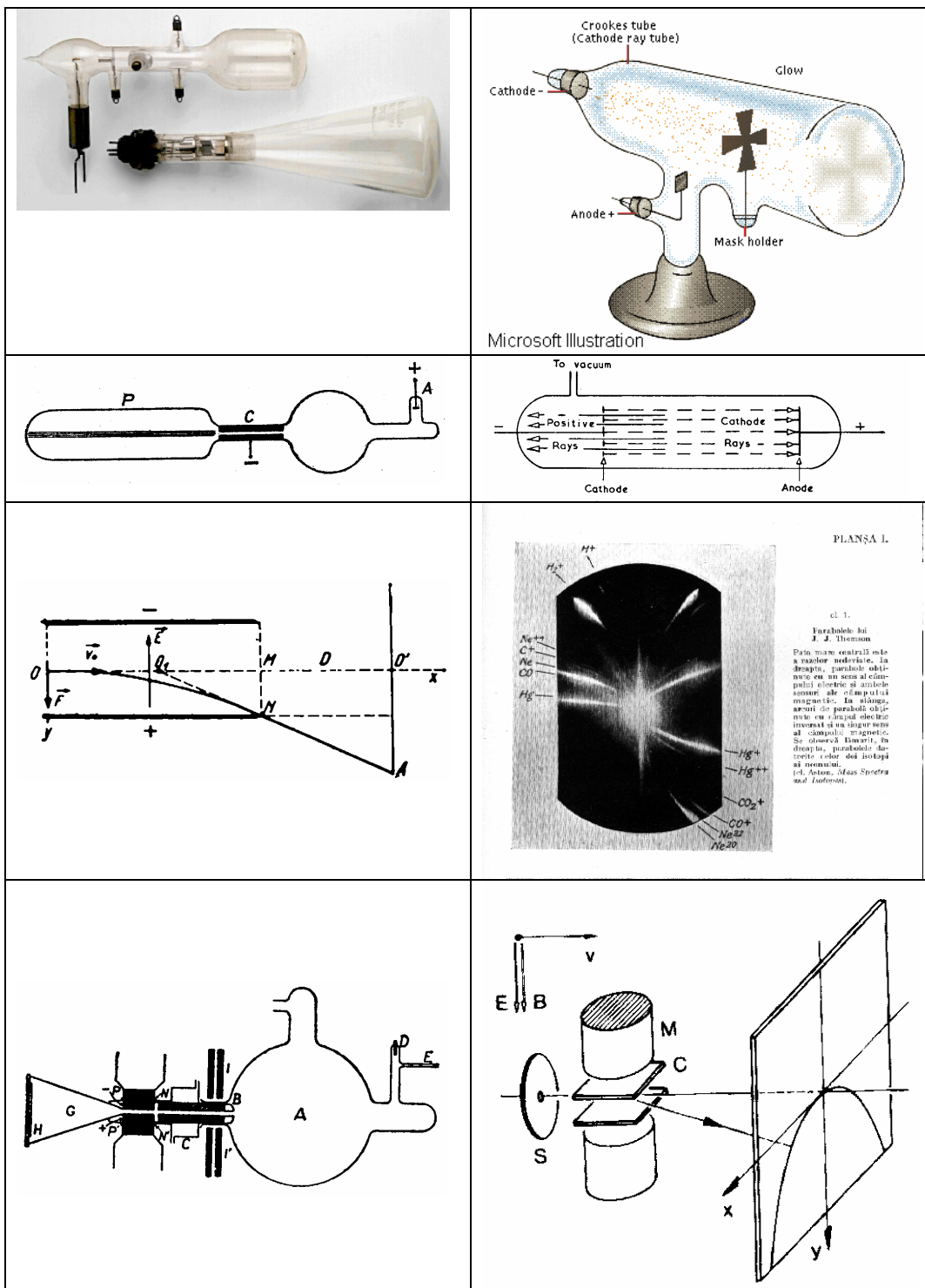
Același tip de experiment (de deviație în câmpuri) a fost efectuat de către Thomson cu diferite substanțe la catod.

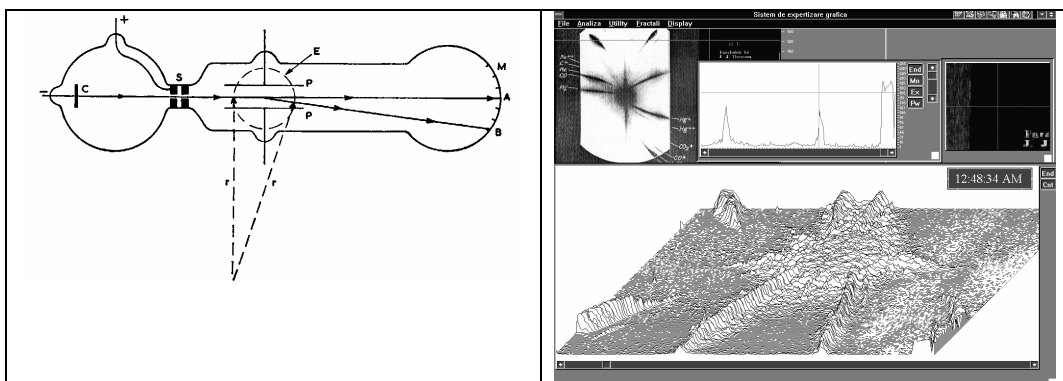
Studiile ulterioare au constatat că oricare din sursele de "raze" enumerate mai jos conduc la aceeași sarcină specifică:

- radiațiile beta emise de sursele radioactive;
- particulele rezultate prin efect fotoelectric;
- particulele produse prin efect Edison (emisii termoelectrice).

Prezența în materiale a unui purtător de sarcină electrică este astfel dovedită, electronul devenind o realitate experimentală și nu doar o ipoteză de lucru.

Cu toate acestea valoarea sarcinii electronului era cunoscută cu destulă imprecizie și mai ales în mod indirect, din măsurători de raport e/m . Acceptarea electronului ca particulă cerea efectuarea unui experiment care să permită măsurarea directă a sarcinii lui, fără a face apel la masa lui. Experimentul a fost făcut de către americanul R. Millikan și a reprezentat ultima dovadă necesară existenței electronului.





2.4 Experimentul lui Millikan

Cu toate că experimentele lui J.J.Thomson au permis determinarea raportului q/m pentru electron și implicit recunoașterea existenței lui, a rămas nerezolvată problema valorii sarcinii electronului, valoare care trebuia aflată pe cale experimentală.

Prima măsurătoare precisă a sarcinii electronului, considerată sarcină elementară de electricitate, a fost făcută în anul 1909 de către R.Millikan. În următorii ani, experimentul a fost refăcut și i s-au adus unele îmbunătățiri.

În scopul determinării sarcinii elementare, Millikan a propus echilibrarea unei picături de lichid (ulei) încărcat electric utilizând câmpul electric și cel gravitațional. Se știe că utilizând câmpuri electrice și magnetice se poate determina doar raportul q/m .

Experimentul lui Millikan constă în folosirea unui condensator plan, așezat cu plăcile în poziție orizontală, între armăturile căruia se introduc particule de lichid (prin pulverizare cu care ocazie ele se și electrizează primind o sarcină electrică q). Aceste particule se pot observa cu ajutorul unui fascicul intens de lumină laterală. Picătura apare în câmpul întunecat al microscopului, ca un punct luminos, ca urmare a împrăstierii luminii pe picătură. Mișcarea picăturii (de masă m) se urmărește cantitativ pe traiectoria ei liniară, verticală, de urcare și coborâre, microscopul având repere orizontale (micrometru ocular) care marchează un drum de o anumită lungime (d). Măsurând intervalul de timp de urcare (t_1) sau coborâre (t_2) al picăturii între reperele micrometrului, se poate calcula viteza de mișcare a picăturii. Viteza este constantă deoarece pe lângă cele două forțe, electrică ($q \cdot E$) și gravitațională ($m \cdot g$), există și forța de frecare (Stokes, F_s) care determină o mișcare uniformă (după parcurgerea unei distanțe neglijabile). Ecuațiile de mișcare pentru coborâre (semnul $+$) și pentru urcare (semnul $-$) pot fi scrise sub forma:

$$F_s = \pm m \cdot g \mp q \cdot E$$

$$F_s = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v$$

g , fiind accelerația gravitațională iar η vâscozitatea aerului.

Strategia de măsurare presupune măsurarea vitezei picăturii la urcare, v_1 și la coborâre, v_2 , iar împreună cu datele de câmp electric (intensitatea E), se determină sarcina picăturii (raza ei poate fi eliminată având două relații cu două necunoscute). Sarcinile măsurate pentru un număr mare de particule la mai multe urcări și coborâri formează o bază de date experimentală din a cărei analiză se poate deduce distribuția de sarcini pe care picăturile le pot avea. Evident că în ecuațiile de mișcare se consideră și forța lui Arhimede și se efectuează o serie de corecții privind dependența de temperatură a diferitelor constante de material care apar în relație (tot dispozitivul a fost plasat într-o încălțată termostatăă), de asemenea s-au făcut corecții în expresia forței Stokes legate de forma și dimensiunea picăturii, ca și de eventuala vaporizare a ei în

decursul măsurătorilor. Pentru îmbunătățirea condițiilor de măsurare, picătura se încarcă electric nu numai prin frecare (în procesul de pulverizare), ci și prin iradierea cu radiații X care puteau modifica din timp în timp sarcina picăturii. Ca urmare a tuturor măsurătorilor, a corecțiilor și a utilizării celor mai bune constante cunoscute (experimente refăcute și în 1935, 1964 și 1972), valoarea actuală a sarcinii elementare este:

$$e = 1,602191 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

Partea interesantă a acestor măsurători, este modul în care se poate deduce sarcina elementară din valorile obținute pentru sarcina picăturii (**de gândit !**).

2.5 Mișcarea în câmp electric și magnetic a purtătorilor de sarcină electrică

Experimentele efectuate de către J.J.Thomson (și a altora) în scopul determinării naturii razelor catodice și a celor canal, au pus bazele utilizării tehnicii de deviere a fasciculelor în câmpuri electrice și magnetice. În zilele noastre această tehnică se utilizează frecvent: în tuburile catodice ale osciloscopelor, monitoarelor la calculatoare sau la centrele de dirijare a zborului de pe marile aeroporturi, în recepoarele TV, în tuburile electronice cu vid, clistroane și magnetroane, la accelerarea particulelor elementare și practic peste tot în dispozitivele în care particulele încărcate se mișcă în vid.

Nu vom intra în calcule detaliate, dar câteva aspecte generale trebuiesc menționate. Geometria mișcării este dată în fig. 3

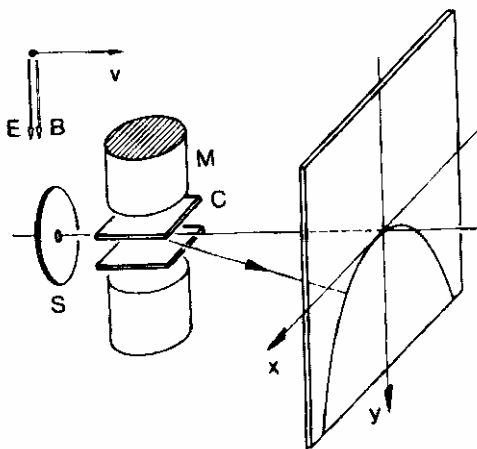


Figura 3

Pentru ambele câmpuri, mișcarea particulelor depinde de unghiul format între viteza particulei la intrare în câmp și direcția câmpului. Astfel, în câmp electric omogen, traiectoria va fi o parabolă care se poate reduce la o dreaptă dacă acest unghi este de 0° sau 180° . În câmp magnetic, traiectoria particulei este un cerc de rază $R = mv / qB$ în afară de cazul în care viteza face unghiul de 0° sau 180° cu direcția câmpului, traiectoria rămânând nemodificată, forța Lorentz fiind nulă.

Aceste aspecte pot fi deduse pentru orice situație, utilizând ecuația de mișcare a particulei de masă m și sarcină q , în câmpuri de intensități E și B :

$$m \cdot \dot{a} = q \cdot E + q \cdot (v \times B) \quad (4)$$

Aspectul energetic în aceste cazuri este important. În câmp electric, orice particulă încărcată își va modifica energia, în sensul că pe parcurs energia ei va crește sau va scădea în mod obligatoriu. Ea va putea fi astfel ori accelerată, ori frânată în câmp, după dorință.

În câmp magnetic constant situația este diferită: particula își va păstra energia nemodificată cu toate că se mișcă accelerat, după cum se poate vedea din (4).

În afară de aceste două cazuri există multe situații particulare foarte interesante. Astfel, dacă o particulă de viteză v intră într-un câmp electric, paralel cu direcția câmpului, dar astfel încât particula să fie frânată, mișcarea ei se va încetini, particula se poate opri și ulterior să se reîntoarcă pe direcția de mișcare inițială. Dacă reușim să frânăm particula astfel încât ea să ajungă la repaus, și dacă cunoaștem diferența de potențial care a determinat această oprire, putem cunoaște viteza particulei și evident, energia ei cinetică înainte de frânare, dacă cunoaștem masa ei. Această situație este utilizată în foarte multe experimente, iar metoda se numește *metoda câmpului de frânare*.

Această metodă, spre exemplu, este utilizată în laborator, la determinarea energiei fotoelectronilor. Aceeași metodă se poate folosi și la investigarea spectrului electronilor emiși în diferite situații.

Pe de altă parte, întoarcerea particulelor din drum, este echivalentă fenomenului de reflexie a luminii. Mai mult, dacă o particulă intră într-un câmp sub un anumit unghi față de direcția vectorului intensitate a câmpului atașat acestui câmp, particula își va modifica direcția mișcării într-un mod analog refracției luminii. Analogia poate fi dusă mai departe, astfel creîndu-se un nou domeniu și anume *optica electronică sau ionică*, cu implicații în dezvoltarea acceleratoarelor de particule încărcate electric, în construcția detectoarelor de particule, în construcția microscopelor electronice și a tuburilor videocaptoare, la focalizarea electronilor în cuptoarele cu fascicule de electroni și evident în dispozitivele pentru studiul fuziunii termonucleare.

2.6 Procedee de emisie a electronilor

Descoperirea razelor catodice și manipularea lor, au permis scoaterea lor în spațiul din afara tubului de descărcare, prin "ferestre" subțiri care separau spațiul din tub, de presiune scăzută, de cel exterior, de presiune ridicată. Se putea deci lucra cu astfel de radiații, în condiții relativ comode.

Existau și alte fenomene care ulterior s-au dovedit emițătoare de electroni. Astfel, în 1873, Gutrie a observat că metalele încălzite la roșu se încarcă întotdeauna negativ. În 1883, Edison constată că în tuburile lui vidate și cu filament, apare un curent electric între filament și un alt electrod introdus în balon dacă filamentul se încălzește la roșu. Acest curent nu putea fi explicat asemănător cu cel la razele catodice sau canal, deoarece în vidul înaintat din tub, nu existau atomi sau molecule. În 1899, J.J.Thomson a măsurat raportul q/m pentru "ionii" negativi emiși cu ocazia încălzirii filamentului. El a constatat că acești ioni sunt de fapt identici cu cei din razele catodice, deci au fost identificați cu electronii.

Din 1902, Richardson a început un studiu amănunțit al emisie de electroni de către metale și corpuri încălzite. Cu această ocazie, el a trasat primele caracteristici "moderne" ale diodei cu vid în care a evidențiat prezența zonei neliniare la începutul caracteristicii și a zonei de saturație către sfârșitul acesteia. El a explicat această emisie prin eliberarea electronilor prezenți în metale și care nu pot ieși din cauza prezenței la suprafața metalului a unui potențial de frânare. Acest potențial este rezultatul forței electrostatice imagine care apare când un corp neutru inițial, pierde o sarcină electrică. *)

Richardson a reușit să determine relația care guvernează emisia termoelectronică a unității de arie a unui metal încălzit la temperatura T (absolută). Relația presupune cunoașterea dependenței densității de electroni din metal, de temperatură. Legea dedusă de Richardson era de forma:

$$i = A * T^n \exp(-(e * V_0) / (k * T)) \quad (8)$$

unde n este un exponent care are valoarea $1/2$ în ipoteza independenței de temperatură a densității de electroni din metalul încălzit și 2 dacă această densitate depinde de temperatură după puterea $3/2$ a temperaturii T . A este o constantă de material, k - constanta lui Boltzmann, iar V_0 este potențialul barierei de la suprafața metalului. Electronul pentru a putea ieși din metal, trebuie să efectueze lucrul mecanic eV_0 .

Datele experimentale de atunci nu au putut hotărî valoarea exponentului n , dar după lucrările lui M.von Laue, Dushman și Sommerfeld (bazate pe mecanica cuantică), a rezultat că valoarea $n = 2$ este cea corectă. În același timp s-a determinat și $A = 120 \text{ Amper/cm}^2/\text{grad}$. Măsurătorile experimentale au arătat că valoarea lui A de mai sus, este cea ideală, cazurile reale indicând valori mult mai mici:

Emitor	Wolfram	Wolfram	Catod cu Oxid
temperatură (K)	1900	2370	1100
A (mA)	3	100	30

iar valorile lucrului de extracție al electronului (eV_0) pentru câteva metale, este:

metal	Pt	Rh	Ag	Au	W	oxizi
eV_0 (eV)	6,27	4,57	4,08	4,42	4,52	1,2

2.6.2 Emisia fotoelectronică

Un alt procedeu prin care se pot emite electroni din metale, este emisia fotoelectronică. Prin iluminarea cu radiații electromagnetice din spectrul vizibil, a unui metal, electronii pot primi o energie suficient de mare pentru a depăși bariera de potențial de ieșire din metal.

Acest fenomen a fost observat de către H.Hertz în 1887, în cursul faimoaselor lui experiențe care au confirmat teoria electromagnetică a lui Maxwell. Pentru a dovedi existența undelor electromagnetice, prevăzute de teoria lui Maxwell dar necunoscute la vremea respectivă, Hertz folosea următorul dispozitiv: O bobină de inducție producea scânteii electrice (perturbații electromagnetice, în sensul lui Maxwell) între două bile metalice ce formau un eclator. Alte două bile asemănătoare, introduse într-un circuit acordat cu primul, formau un oscilator un detector de unde: când în primul eclator apare o scânteie, ea apare aproape întotdeauna și în celălalt eclator. Hertz a observat că scânteile ce apăreau erau mai lungi dacă bilele eclatorului erau luminate cu radiație din domeniul vizibil și mai ales ultraviolet. Dacă ar fi studiat fenomenul, Hertz ar fi descoperit efectul fotoelectric. Ulterior de acest efect s-a ocupat Hallwach și uneori fenomenul a fost numit efect Hallwach. Într-un balon de sticlă vidat se află un electrod de Zinc (placă plană, curată și polisată) și altul dintr-un metal oarecare. Iluminând cu radiație luminoasă placa de Zinc, ea se încarcă pozitiv, pierzând electroni, care pot fi colectați la celălalt electrod dacă acesta este pozitiv față de primul (anod - colector). Curentul (fotoelectric) ce trece poate fi măsurat cu un galvanometru sensibil sau cu un electrometru modern (celula fotoelectrică).

În 1889, Elster și Geitel au arătat că un câmp magnetic transversal direcției anod-catod micșorează intensitatea curentului fotoelectric. Din cauza polarității pozitive necesare electrodului pentru a colecta purtătorii, se trage concluzia semnului negativ al purtătorilor de sarcină.

Deasemenea, deoarece balonul este vidat, acești purtători nu pot fi moleculele (ionii) gazului ca în cazul descărcărilor luminescente și nici nu se emit atomi de Zinc din catod.

Din cauza descoperirii lui J.J.Thomson a electronului (1897) s-a presupus că purtătorii sunt electroni. În adevăr, măsurătorile lui Lenard (1900) asupra sarcinii specifice a acestor purtători, a condus la valoarea corespunzătoare pentru electroni, ceea ce a confirmat presupunerea.

Este interesant de observat că studiindu-se emisia fotoelectronilor folosind radiații luminoase polarizate, s-a observat o creștere a intensității curentului dacă planul de polarizare este normal la placa de Zinc.

Reamintindu-ne de modelul sarcinii imagine pentru explicarea lucrului de extracție a electronului din metal, ultima observație aduce un început de lămurire asupra modului în care electronul poate fi scos: câmpul electric intens al luminii prin forța exercitată asupra electronului, îl "smulge" din metal. Evident smulgerea este favorizată de un vector electric (luminos) normal la suprafață.

Studiile au scos deasemenea în evidență dependența curentului fotoelectric de intensitatea luminoasă: un flux luminos mai intens conduce la un curent mai intens și invers. Proportionalitatea este foarte bine verificată pe multe ordine de mărime ale fluxului luminos. La aceasta se adaugă o particularitate a efectului care a creat mari probleme privind explicarea cauzelor lui.

S-a arătat că emisia de electroni nu este posibilă dacă radiația incidentă pe catod are o frecvență mai mică (o lungime de undă mai mare) decât una critică denumită frecvență de prag sau uneori prag roșu al efectului fotoelectric. Oricât de mare ar fi fluxul luminos incident, dacă frecvența radiației este sub cea de prag, efectul nu apare. La acest rezultat ciudat, care vom vedea, nu are explicație corespunzătoare în fizica clasică, se mai adaugă o altă particularitate. Viteza electronilor emiși din placa luminată, este dependentă doar de frecvența radiației și este independentă de fluxul luminos. Ambele proprietăți sunt complet inexplicabile clasic.

Explicația admisă azi pentru efectul fotoelectric se bazează pe conceptul de foton pe care-l vom studia mai târziu. Din punctul de vedere experimental, este interesant de văzut

modul în care s-a măsurat viteza electronilor emiși, metode care și astăzi își păstrează importanța și sunt utilizate în nenumărate dispozitive de spectrometrie de electroni (inclusiv în cele duse de sondele spațiale în cosmos) .

Metoda se bazează pe așa numitul potențial de stopare. Un fascicul monoenergetic de electroni (sau alte particule încărcate) care pătrund în lungul liniilor de câmp electric se vor mișca nedeiat. Energia lor în schimb, se va modifica: ele vor fi accelerate sau frânate după cum forța exercitată asupra particulelor este în sensu vitezei inițiale sau contrar ei. Analogul mecanic al acestui proces este cel al mișcării în câmp gravitațional, pe un plan înclinat în susul lui.

Așa cum la mișcarea în susul planului înclinat, mobilul suferă o frînare, așa și electronul într-un câmp frânant se va mișca frânat; dacă acest câmp este suficient de intens s-ar putea să nu ajungă la capătul drumului (la celălalt electrod). Spunem că energia cinetică a particulei a fost mai mică ca lucrul mecanic necesar parcurgerii spațiului dintre cei doi electrozi.

Variind intensitatea câmpului dintre electrozi, putem modifica lucrul mecanic în câmp și putem face ca electronul să nu mai ajungă la electrodul colector. Curentul electric stabilit de electroni va scădea și în final va deveni nul. Peste o valoare dată pentru tensiunea de pe electrozi (tensiune sau potențial de stopare) nici un electron nu va avea energia necesară învingerii câmpului. Tensiunea pentru care acest curent devine nul (nici mai mică și nici mai mare ca această valoare) este tocmai tensiunea de stopare (V_s) pentru care este valabilă relația:

$$eV_s = mv^2 / 2 ,$$

unde m este masa electronului, iar v viteza lui. Dispozitivul din figura 7 poate fi utilizat pentru acest experiment dacă tensiunea aplicată pe celula fotoelectrică este inversată și poate fi variată controlat. Acest experiment se va efectua la lucrările de laborator.

2.6.3 Emisia radioactivă

În 1896, H.Bequerel descoperă radiația penetrantă pe care unele substanțe naturale o emit. Substanțele cu această proprietate s-au denumit radioactive, iar radiația penetrantă a început să fie intens studiată (Maria și Pierre Curie). Din punct de vedere istoric, descoperirea radiațiilor emise de substanțele radioactive a fost precedată de descoperirea radiațiilor X de către K. Röntgen. Acesta a fost probabil și elementul călăuzitor în cercetările ulterioare asupra radiațiilor emise de substanțele radioactive.

În mare a rezultat că radiația respectivă nu este omogenă. O parte a ei este "moale" (radiații "alfa") și poate fi oprită de foițe subțiri de Aluminiu sau mică și altă parte ("dură") trece prin aceste foițe cu intensitatea practic nemodificată.

Componenta dură s-a dovedit și ea la rândul ei decompozabilă într-o parte încărcată electric (radiații "beta") și alta neutră (radiații "gama"). S-a dovedit că radiația beta este încărcată negativ și sarcina ei specifică este identică cu cea a electronului.

Ca urmare a acestor studii, s-a dovedit și de data aceasta că electronul este un constituent universal al materiei, că poate fi extras printr-o multitudine de procedee și că toți electronii sunt identici între ei. Fizica nucleară va fi partea din fizică care se va ocupa mai departe de proprietățile acestor radiații și modul lor de emisie din nucleu.