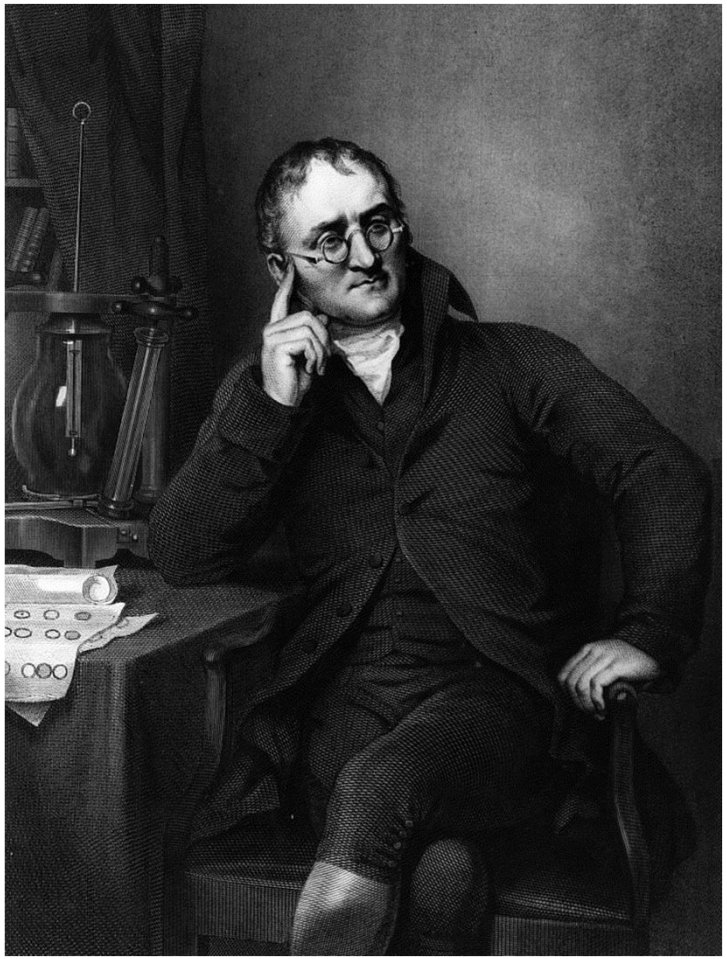
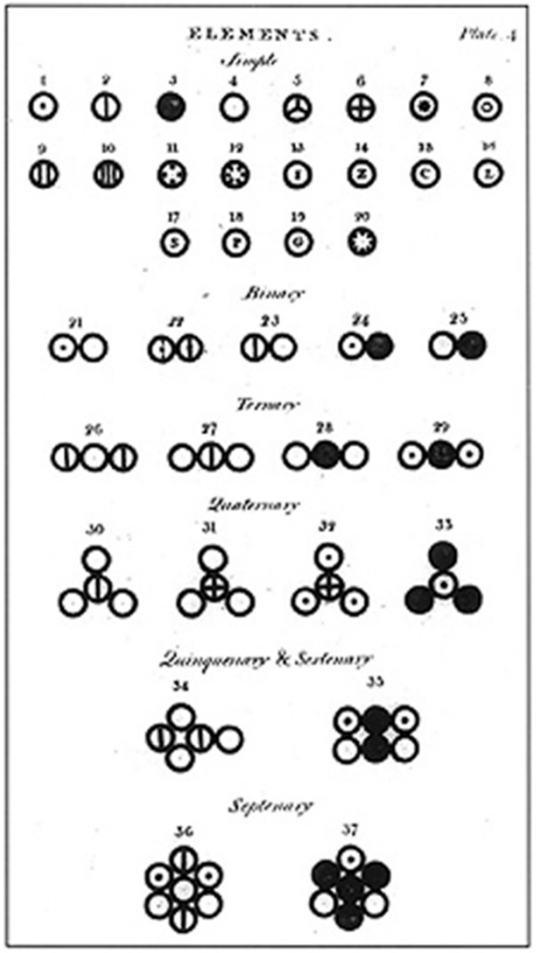
VAROVÁNÍ

Přemýšlení o kvantové mechanice způsobuje nespavost

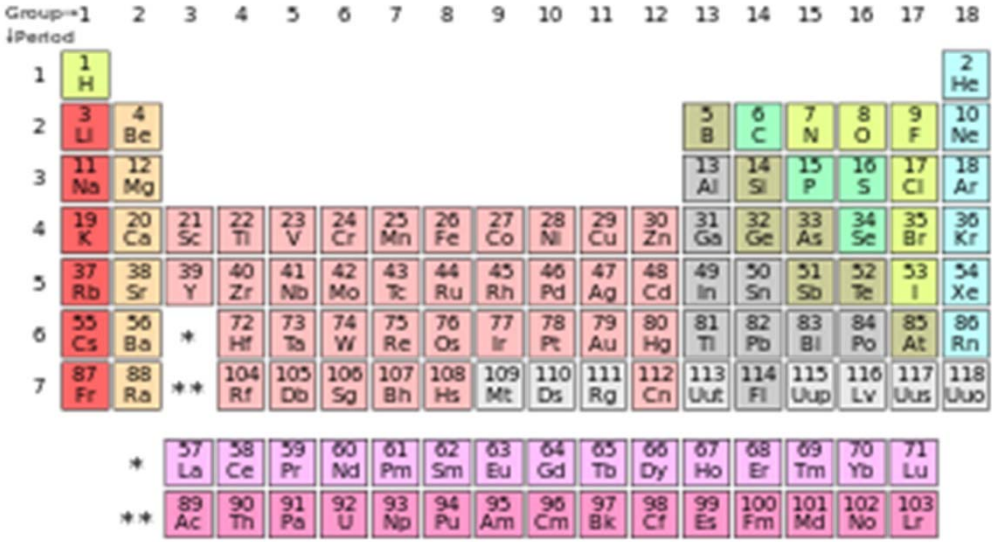
Od atomů (a molekul) ke kvantové mechanice

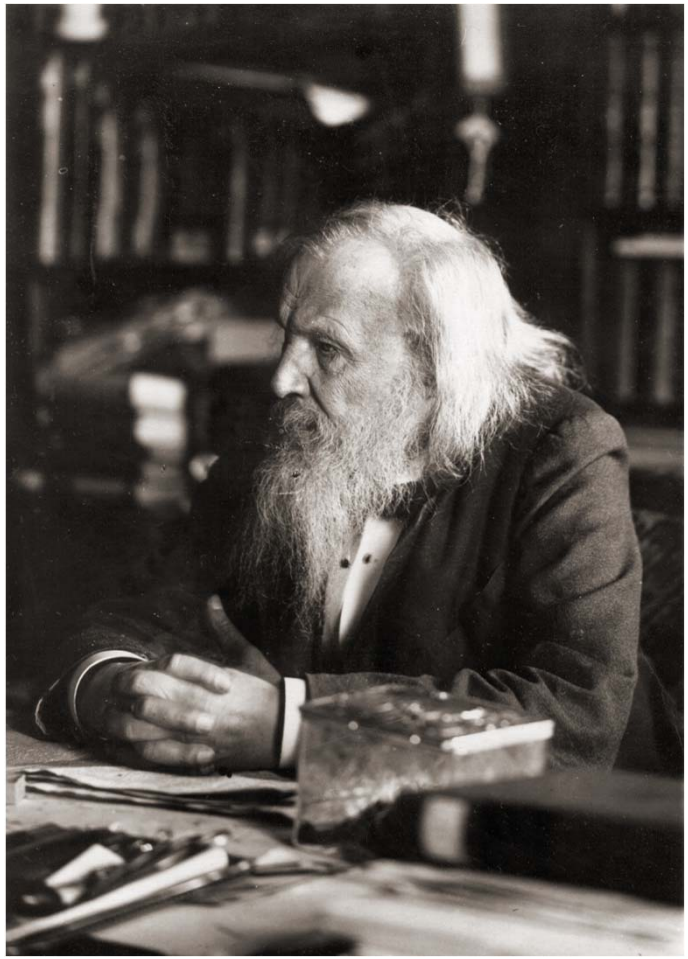
John Dalton
atom vstupuje do chemie



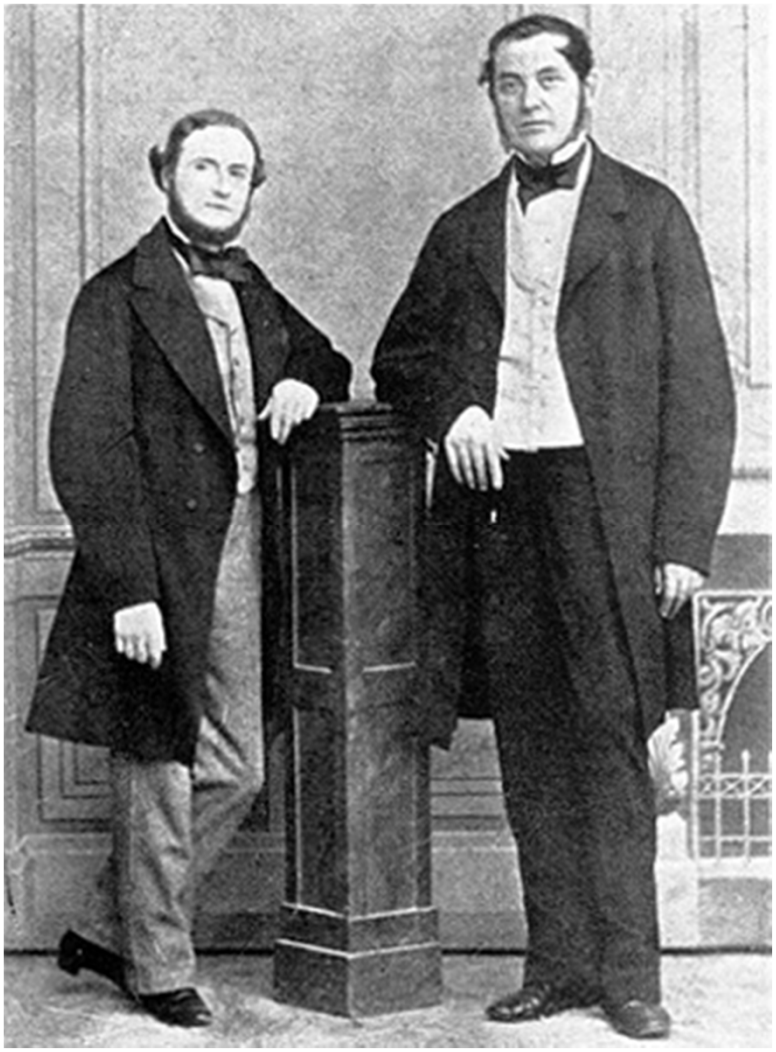


D.I.Mendělejev
periodický systém prvků





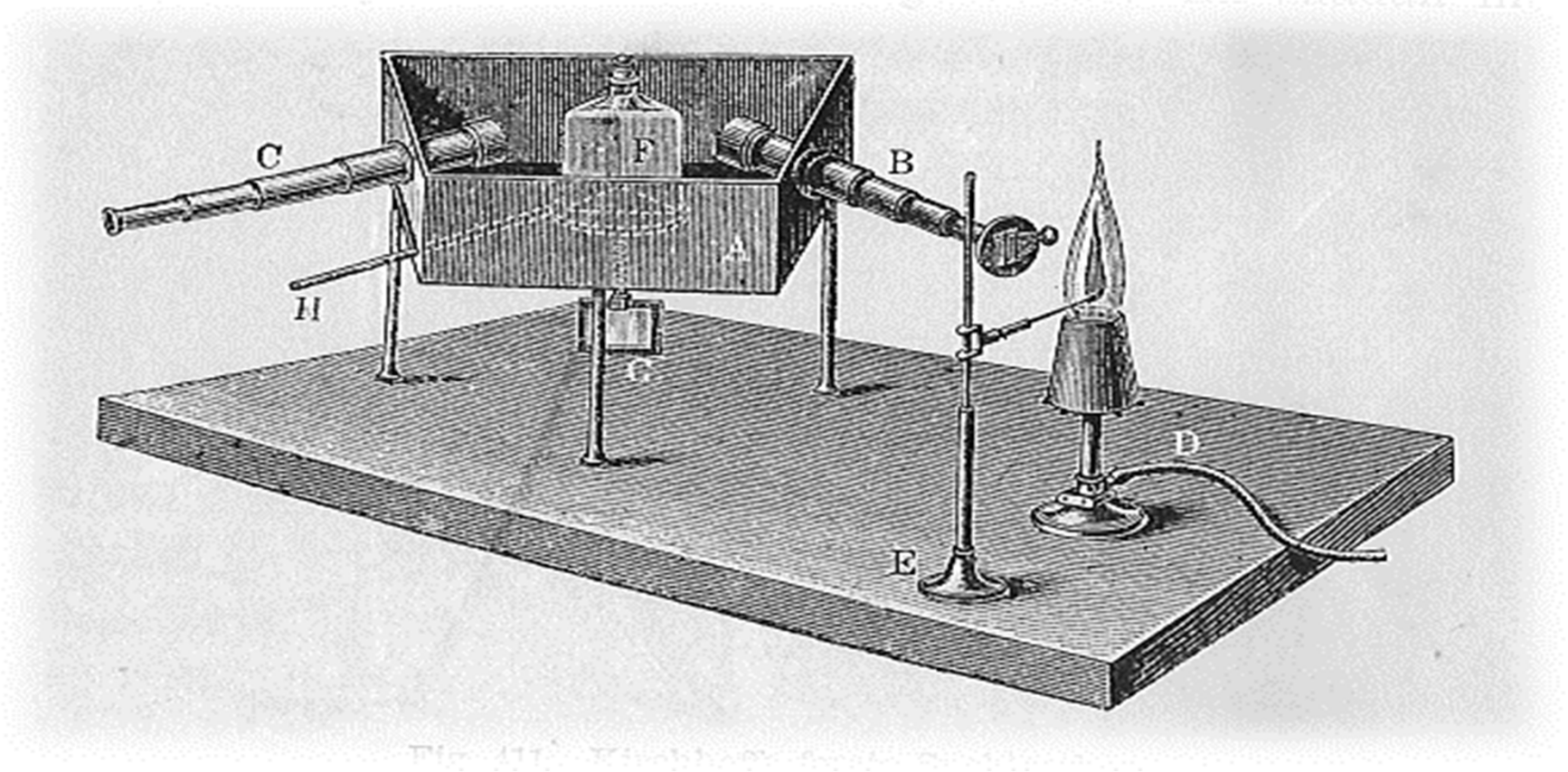
Objevitelé spekter atomů



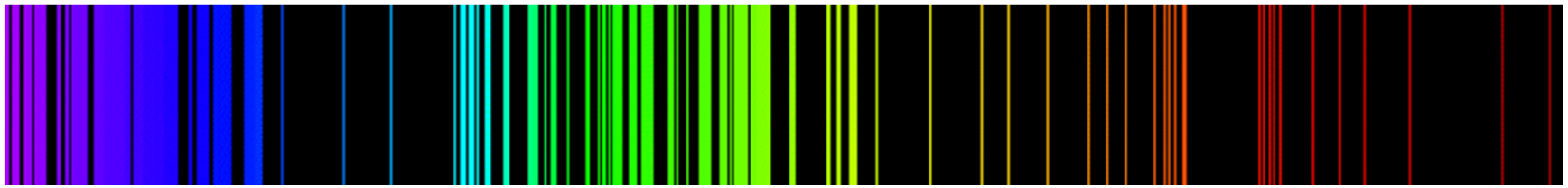
- Robert Bunsen
  (30. 3. 1811 – 16. 8. 1899)
  chemik
- Gustav Kirchhoff
  (12. 3. 1824 – 17. 10. 1887)
  fyzik

Bunsenův kahan

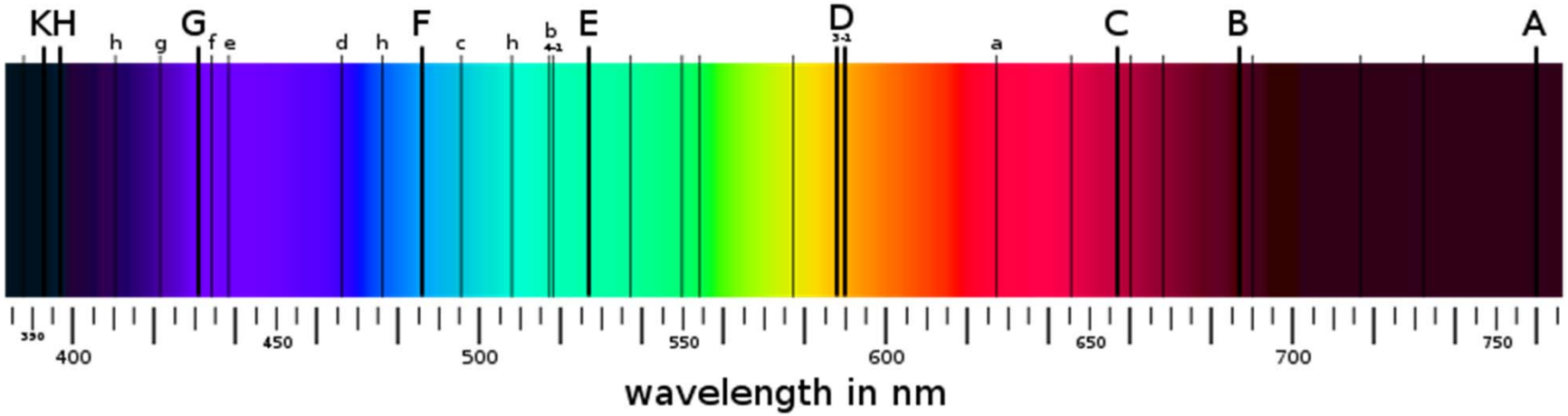
První spektrometr Bunsena a Kirchhoffa



Emisní a absorbční spektra



Emisní spektrum železa

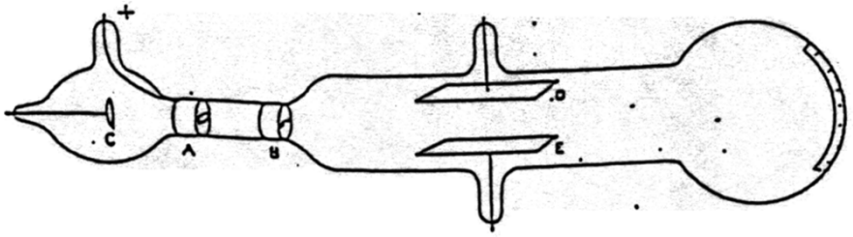


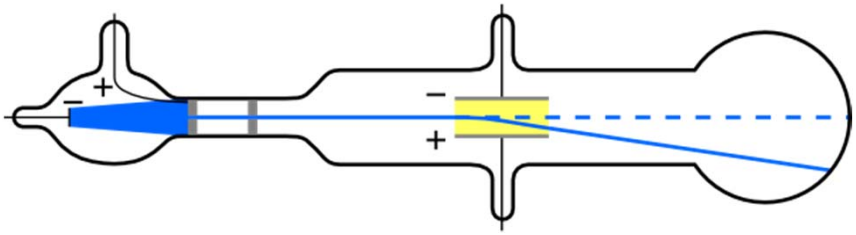
Fraunhoferovy čáry ve slunečním spektru

Joseph John Thomson
18. 12. 1856 – 30. 8. 1940

- Objevitel elektronu
- Spolutvůrce hmotové spektroskopie
- Nobelova cena za fyziku 1906

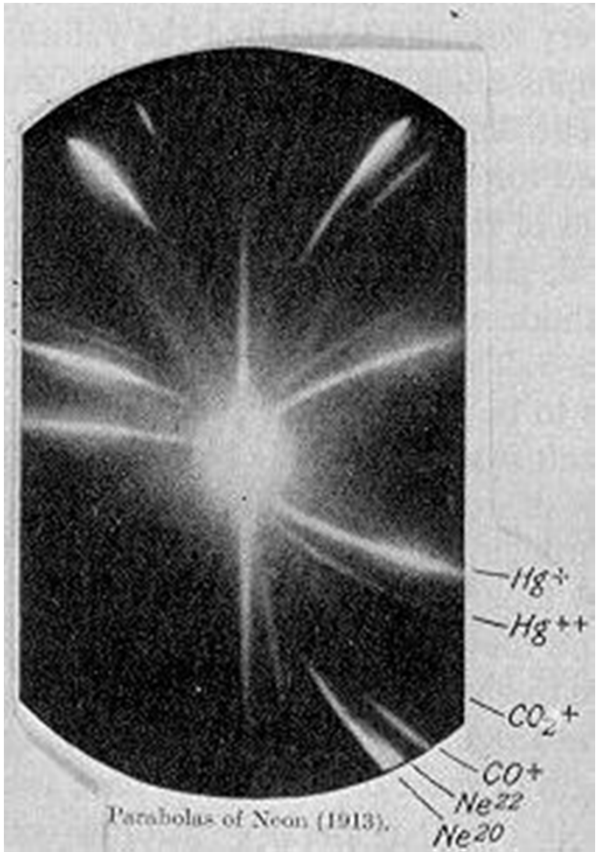
Katodové paprsky a elekron





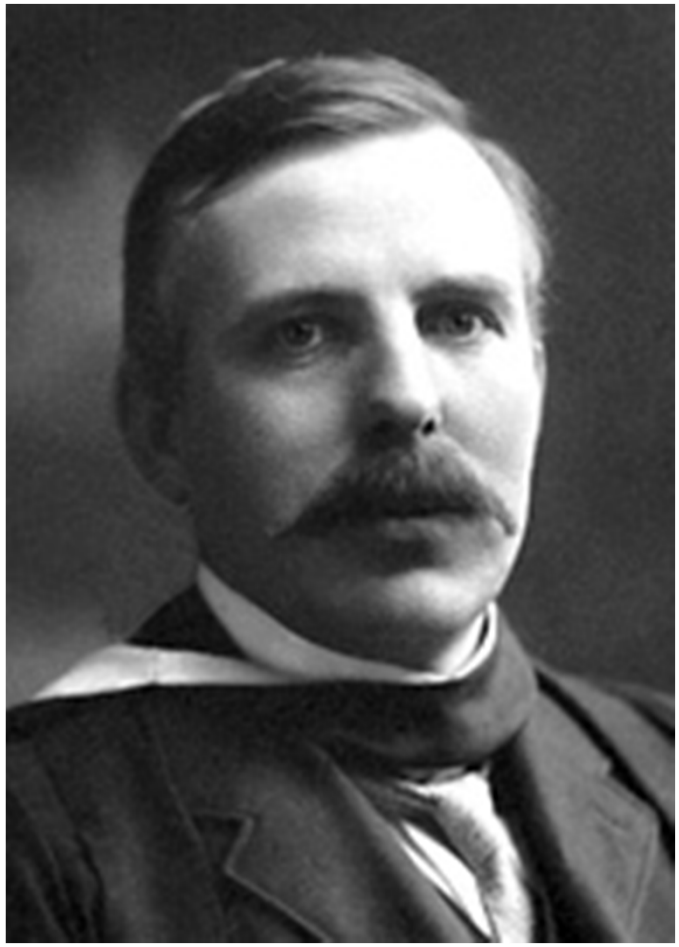
- Katodová trubice (náčrt J. J. Thomsona)
- Chod elektronů v katodové trubici při zapnutí vychylovacího napětí
- historie objevu elektronu

Hmotový spektrograf



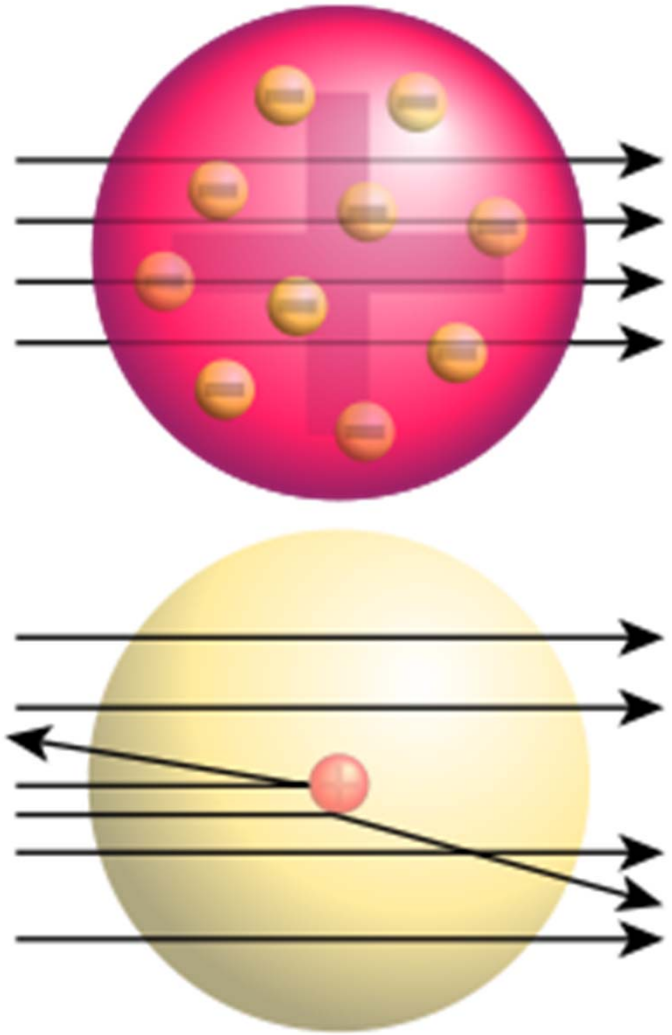
Fotografická deska ukazující isotopy neonu Ne^{20} a Ne^{22}

Ernest Rutherford
(30. 8. 1871 – 19. 10. 1937)



- Zabýval se radioaktivitou
- Objevil atomové jádro
- Vychoval mnoho vynikajících fyziků
- Nobelova cena za chemii 1908

Geigerův – Marsdenův experiment

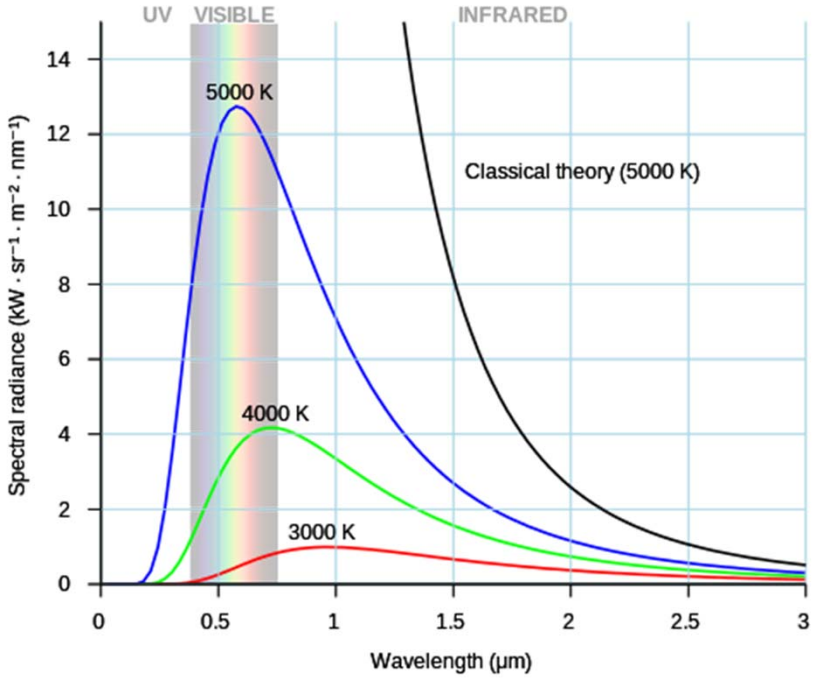


Otázky kolem atomů a molekul

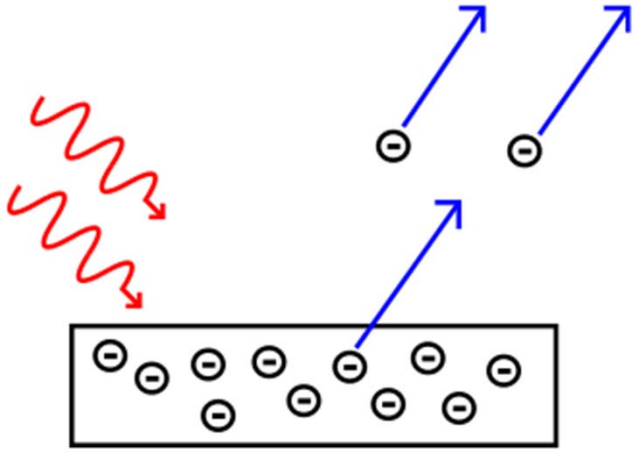
- Chemikové (19. století)
  - Co jsou a jak vypadají atomy?
  - Jak vznikají, proč a jak reagují molekuly?
- Fyzikové (20. století)
  - Existence, struktura a stabilita atomů
  - Struktura spekter atomů a molekul
  - Platnost klasické fyziky v mikrosvětě

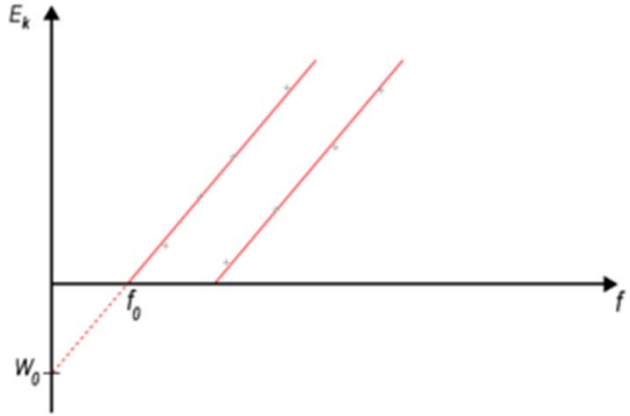
Absolutně černé těleso

Max Planck

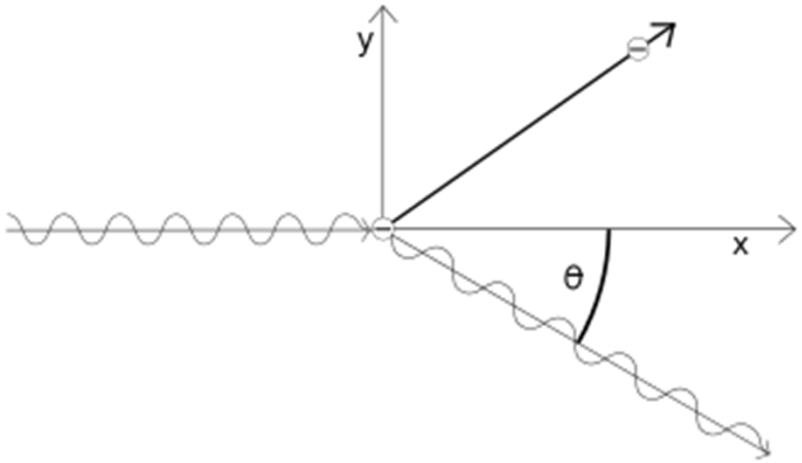


Fotoefekt





Comptonův jev



Délky, energie a počty v mikrosvětě

- Vlnová délka žlutého světla:
  0,000 000 5 m = $5 \cdot 10^{-7}$ m
- Průměr atomu: 0,000 000 000 1 m = $1 \cdot 10^{-10}$ m
- Průměr jádra: 0,000 000 000 000 001 m = $1 \cdot 10^{-15}$ m

  Jádro ~ fotbalový míč, atom ~ Praha
- E. na ohřátí 1 litru vody o 1 stupeň
  ~ 4 000 J = $4 \cdot 10^{3}$ J
- E. ch. vazby ~ 0,000 000 000 000 000 000 72 J
  = $7{,}2 \cdot 10^{-19}$ J = 4,5 eV (H_2)
- „Žlutý“ foton ~ 0,000 000 000 000 000 000 4 J
  = $4 \cdot 10^{-19}$ J = 2,5 eV
- Ve 12 g uhlíku je ~ $6 \cdot 10^{23}$ atomů (Avogadrovo číslo)

Jak měřit v mikrosvětě ?

- Nemáme smysly schopné vnímat mikrosvět
- Problém měřidel:

  Jak vyrobit „pravítko“ na atom ?
- Neostré hranice objektů:

  Kde končí atom?
- Neumíme izolovat systém od okolí
- Měření vždy ovlivní to, co měříme

Experiment v mikrosvětě

- Měření způsobuje obrovské změny
- Jedno měření = jedno číslo
- Opakování stejného měření dává různá čísla

- Statistické zpracování výsledků:
  - četnost výsledků jednotlivých měření
  - střední hodnota = průměr všech výsledků

Matematický formalismus

- Liší se od nekvantové fyziky
- Základem je statistický a pravděpodobnostní popis
- Vlnová funkce, operátory, …
- Několik ekvivalentních formalismů (reprezentací), vhodných pro různé situace

Vlna nebo kulička?

Světlo jako vlna

Fotoefekt

Albert Einstein
(1905)

Světlo jako kulička (foton)

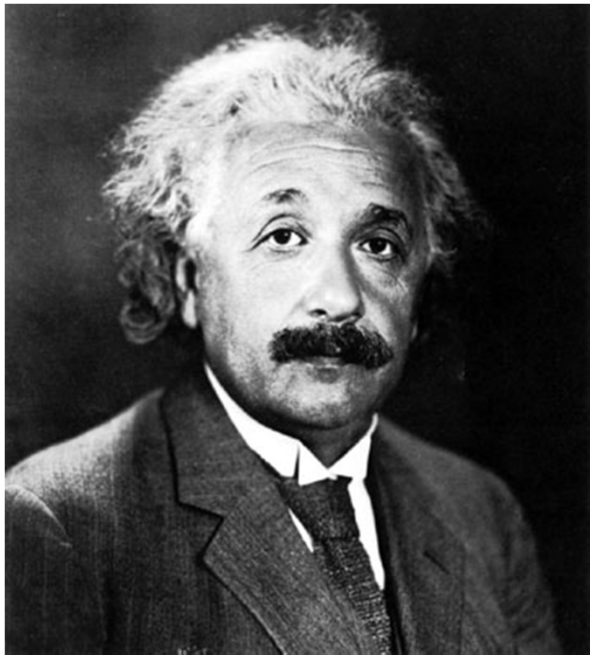
Elektron jako vlna

de Broglie (1924)

Germer, Davisson (1927)
G. Thompson

Elektron jako kulička

Teorie



A. Einstein

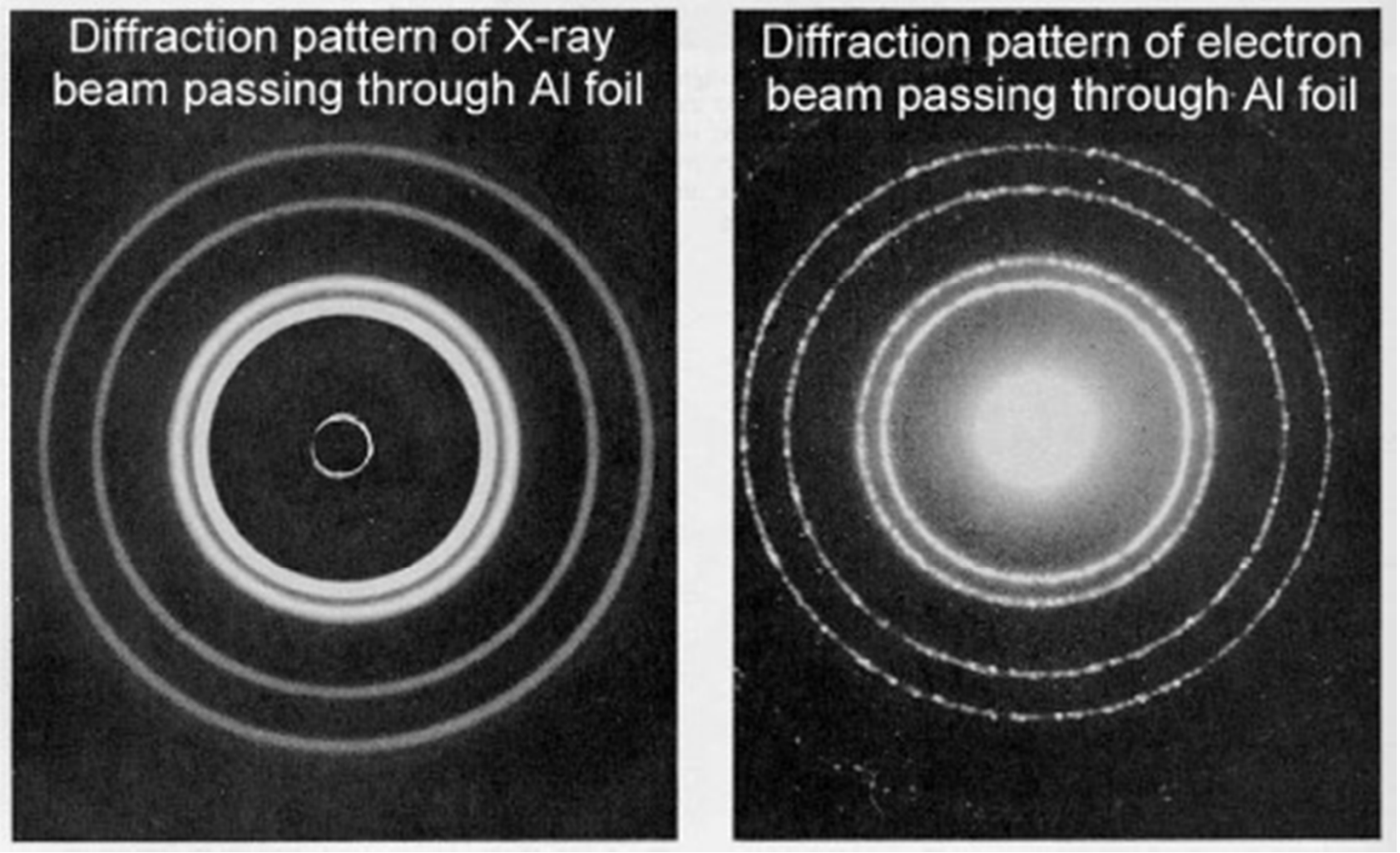
Louis de Broglie

Experiment

George Paget Thomson

Lester Germer a Clinton Joseph Davisson

Vlnové vlastnosti částic



Vlnové vlastnosti mikroobjektů

- Hmotné objekty (elektrony, atomy, molekuly, …) vykazují vlnové vlastnosti

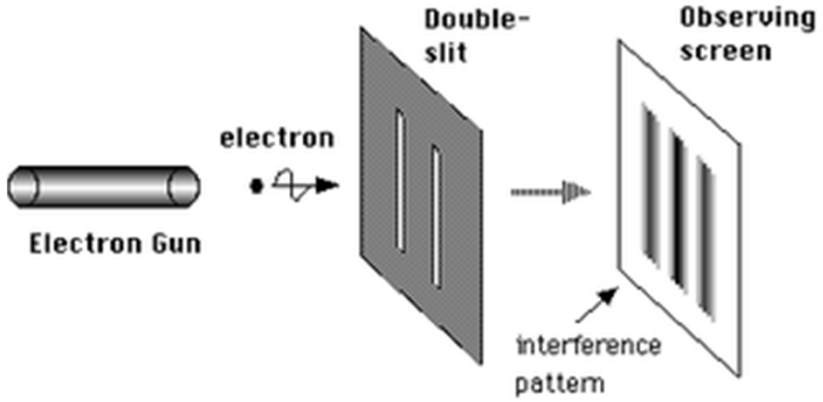
- vlnová délka elektronu (dle de Broglieho)

$$\lambda = h/p = h/(mv)$$

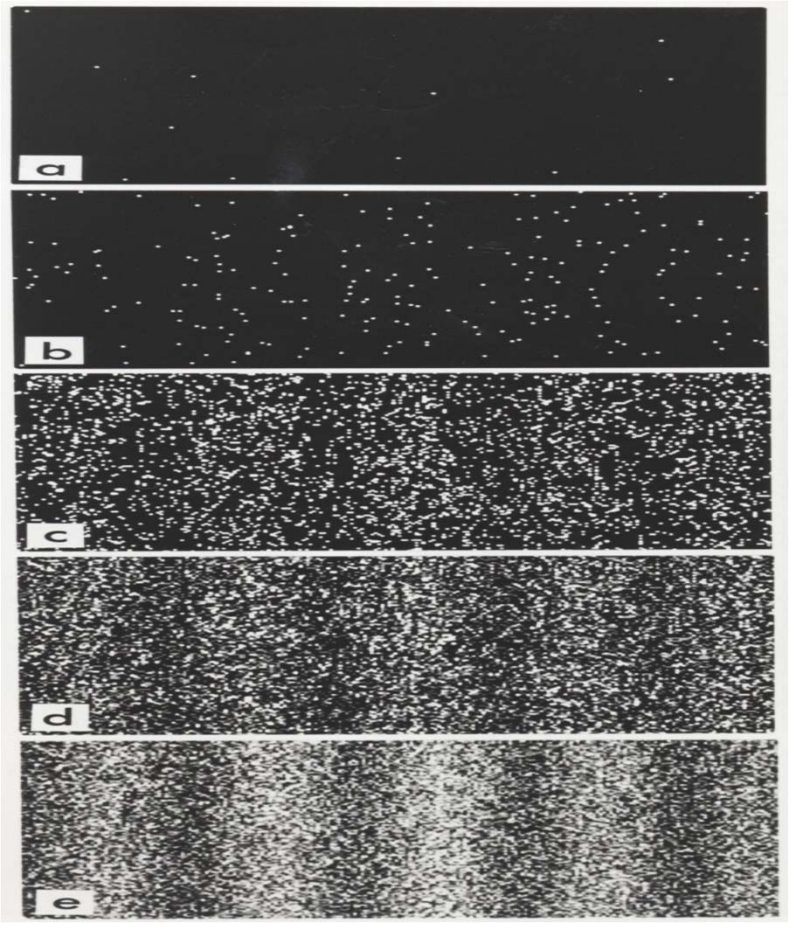
- Elektron urychlený napětím 1V

$$\lambda = 0{,}000\ 000\ 001\ 2\ \text{m}$$
$$= 1{,}2\times10^{-9}\ \text{m}$$
$$\cong \text{10krát chemická vazba}$$

Dvojštěrbinový experiment - simulace



a) 11 elektronů
b) 200
c) 6 000
d) 40 000
e) 140 000



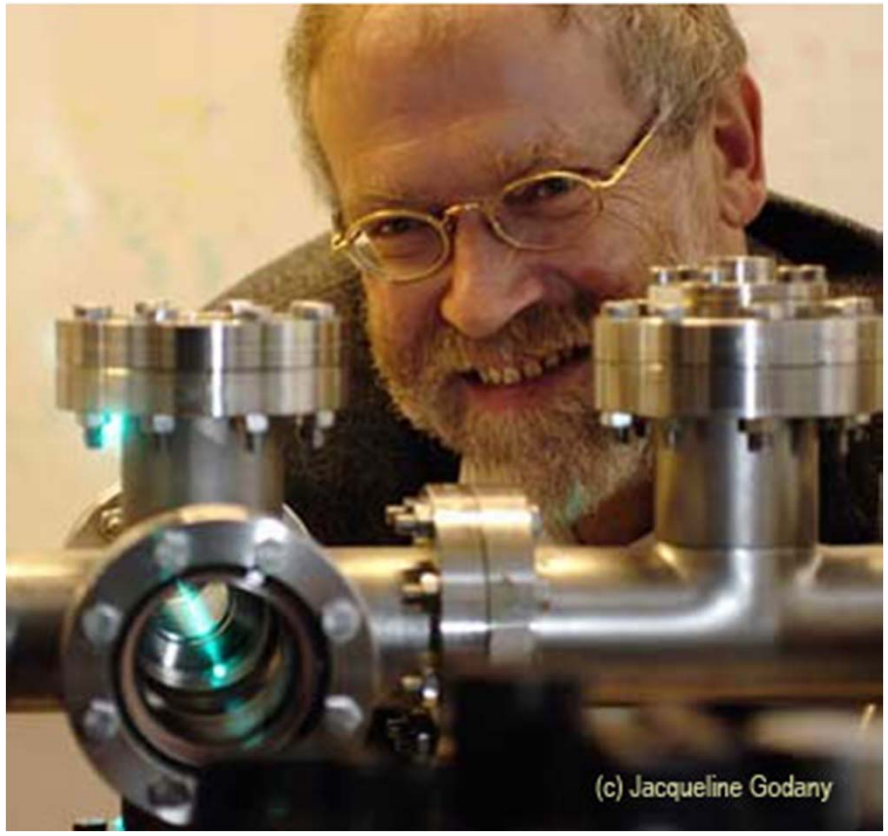
Ohyb (nejen) molekul fullerenu na mřížce

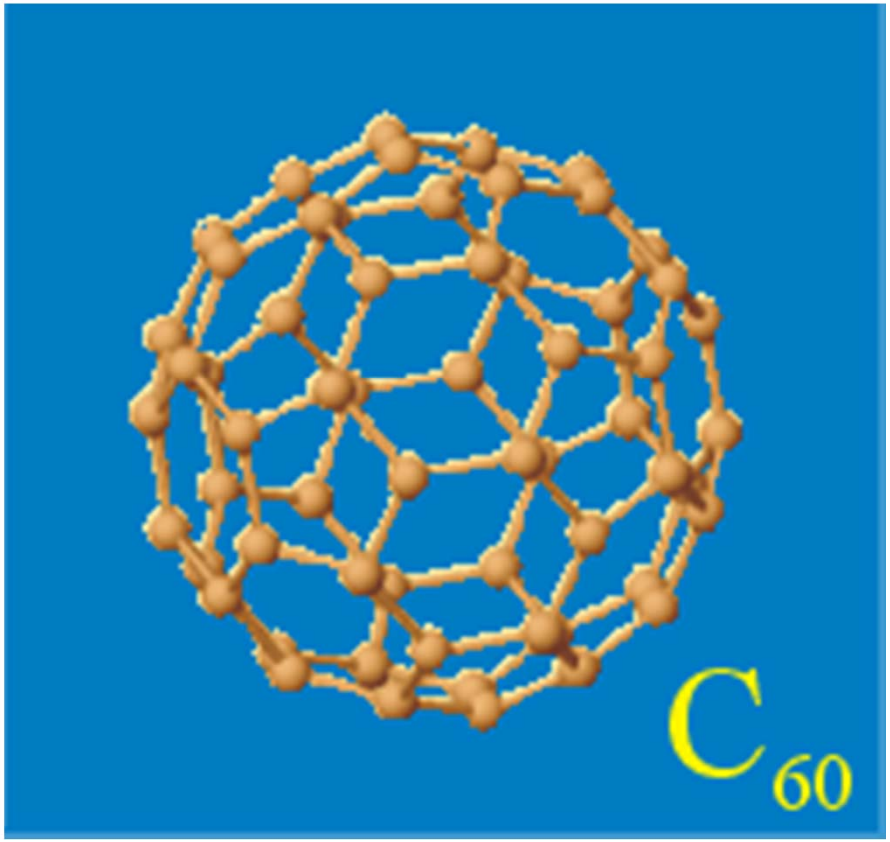
- Ohyby elektronů, neutronů apod. na (krystalové) mřížce podrobně testovány 20. až 80. letech 20. století

- Fulleren – komplikovaný objekt, 1 300 000× těžší než elektron, bude také vykazovat vlnové chování ???

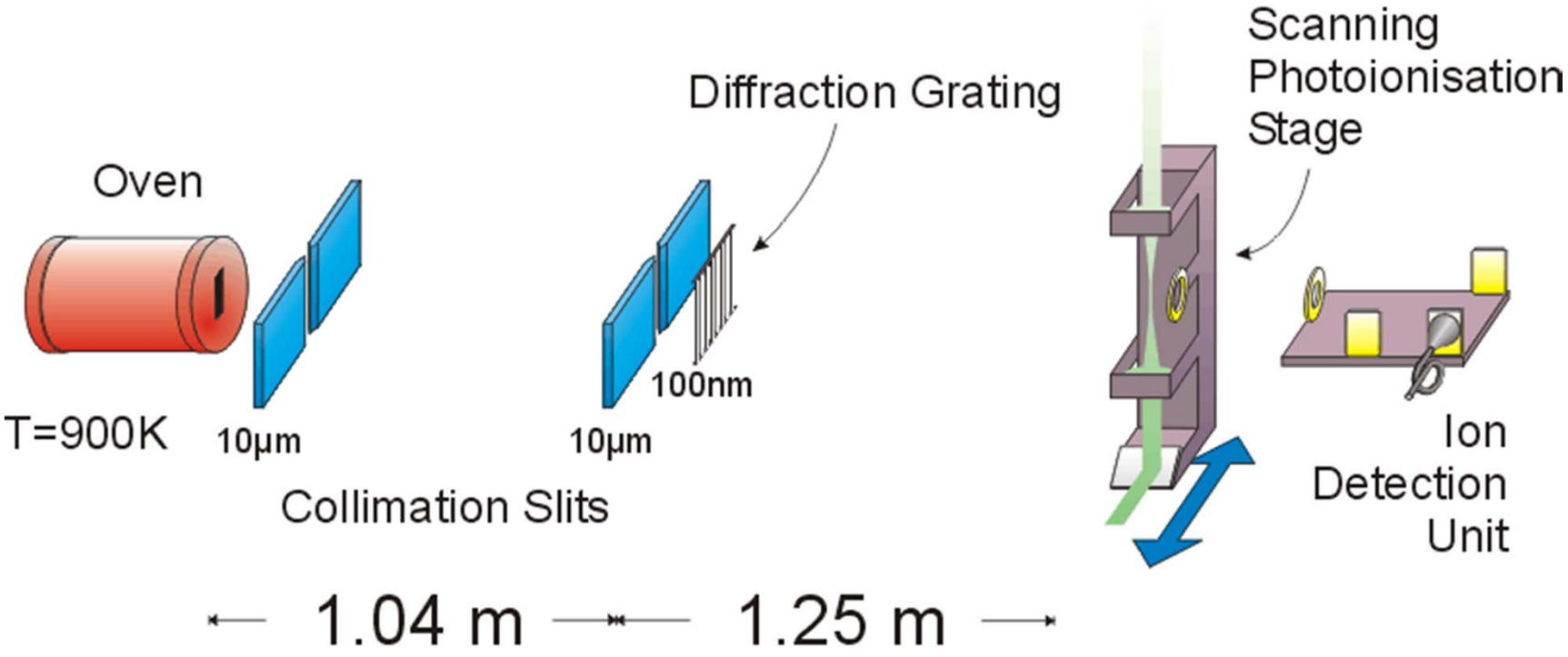
- Prof. Anton Zeilinger (Universität Wien), http://www.quantum.at

Ohyb molekul fullerenu na mřížce



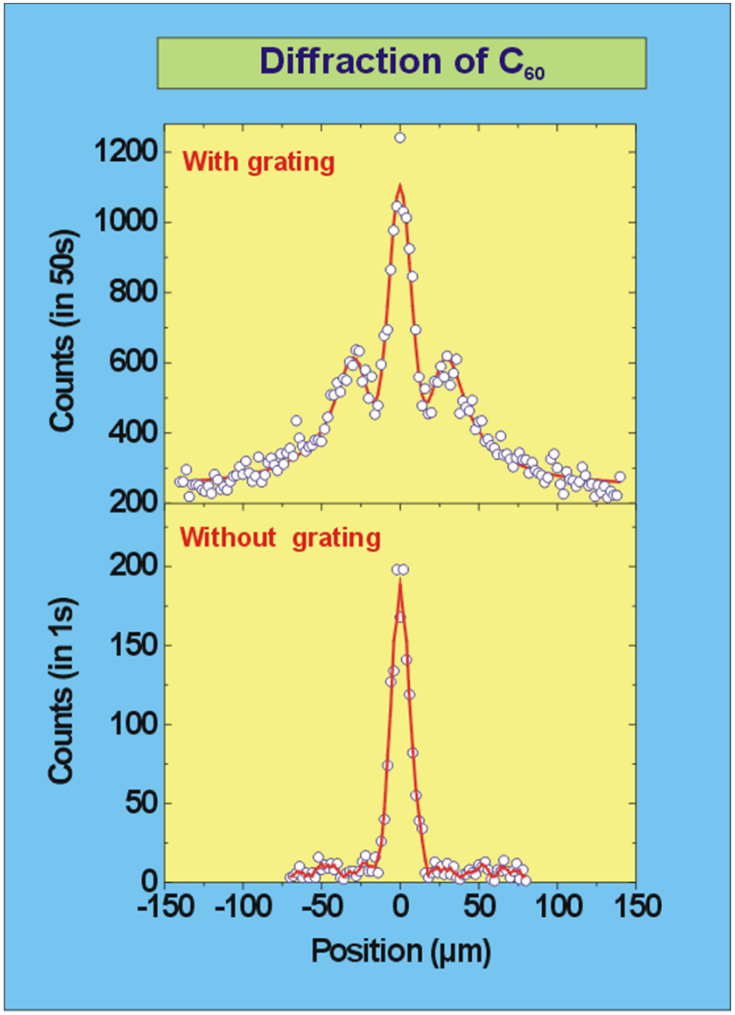


Ohyb molekul fullerenu na mřížce



Pressure ~$5 \cdot 10^{-7}$ mbar

Ohyb molekul fullerenu na mřížce



Tunelový jev

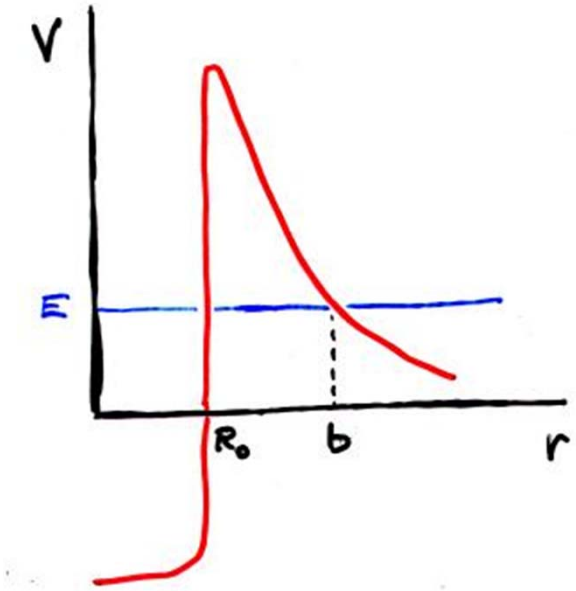
- Částice mohou projít bariérou (i takovou, kterou by „klasické“ částice neprošly)

- Množství prošlých částic závisí na tloušťce bariéry exponenciálně, tj. malé změny tloušťky znamenají velké změny v počtu prošlých částic = velké změny v době života

Alfa rozpad

- Z jader vylétávají alfa částice = jádra helia
- Velké rozdíly v době života
  miliardtiny sekundy až miliardy let

- Nukleony v jádře
  – uvnitř se pohybují volně
  – nemohou ven (bariéra)



Nerozlišitelnost částic

- Pokud si částice stejného druhu (např. elektrony) pro výpočet očísluji, nesmí předpovědělné experimentální výsledky záviset na způsobu očíslování
- Dvě třídy částic: fermiony (elektron, proton,neutron, …) a bosony (foton, $^{2}_{4}$He, …)
- Nerozlišitelnost je odpovědná např. za chemickou vazbu, supravodivost a supratekutost

Relace neurčitosti

- Existují dvojice kanonicky sdružených veličin, např.
  - x-složka souřadnice a x-složka hybnosti (x, p_x)
  - x-složka momentu hybnosti a y-složka momentu hybnosti (l_x, l_y)
- Principiálně nemohu současně přesně změřit obě kanonicky sdružené veličiny
- Mírou nepřesnosti jsou relace neurčitosti

Principy kvantové teorie

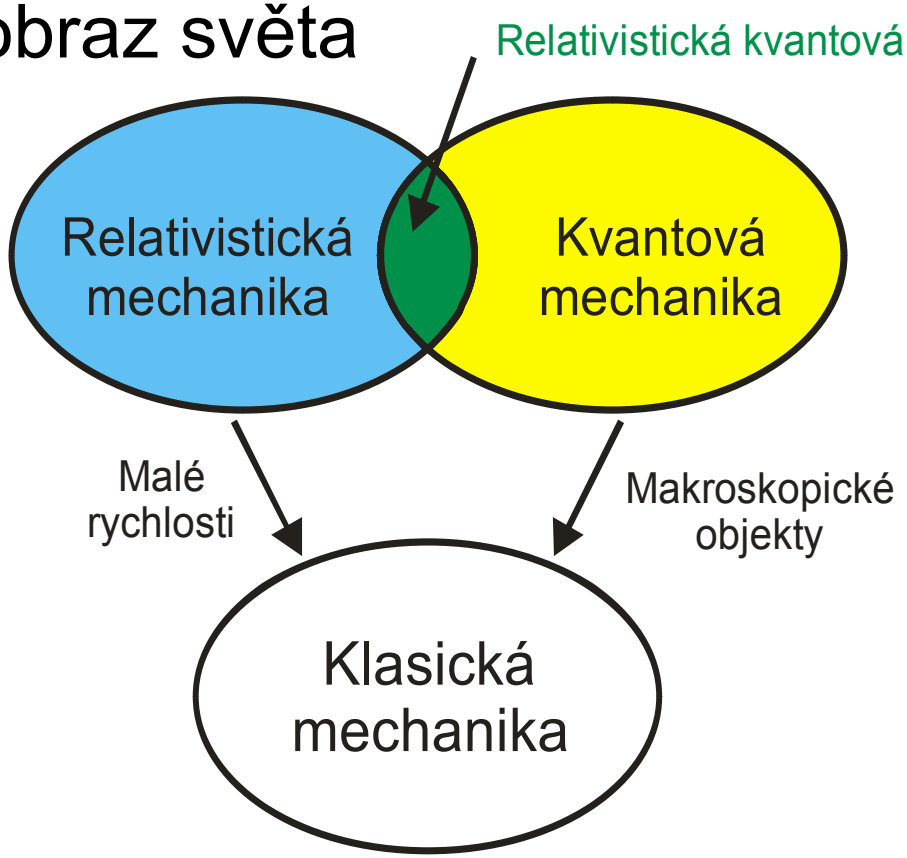
- Chování částic se někdy více blíží chování „kuliček“, jindy zase „vln“. Nelze ale vést striktní hranici mezi těmito typy chování.
- Často jsou povolené jen některé hodnoty energie i jiných veličin (kvantování).
- Některé charakteristiky nelze současně určit s libovolně vysokou přesností (relace neurčitosti).

Principy kvantové teorie

- Obvykle nelze předpovědět jednoznačně výsledek konkrétního měření. Lze určit jen možné výsledky, jejich četnost a střední hodnotu.
- Měření často zničí původní stav.
- Částice stejného druhu jsou nerozlišitelné.

Kvantová mechanika

- Speciální a obecná teorie relativity dovršily klasický obraz světa



Zdroje informací

- stránky profesora Pavla Cejnara: http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/cejnar/prednasky/nefyz.html
- Stránky RNDr. Zdeňky Koupilové http://kdf.mff.cuni.cz/~koupilova/
- stránky profesora Zeilingera: http://www.quantum.at
- Feymanovy přednášky z fyziky
- Halliday, Resnick, Walker: Fyzika
- Polkinghorne: Kvantový svět
- Malíšek: Co víte o dějinách fyziky
- Štoll: Dějiny fyziky