

Radiační biofyzika

Přednáška 4 2023

- Další fundamentální objevy a modely atomu
- Podivuhodnosti kvantového světa v kostce

Martin Falk

falk@ibp.cz

martin.falk@kip.uni-heidelberg.de



ŘEČTÍ FILOSOFOVÉ

Vše je dělitelné do nekonečna



earth



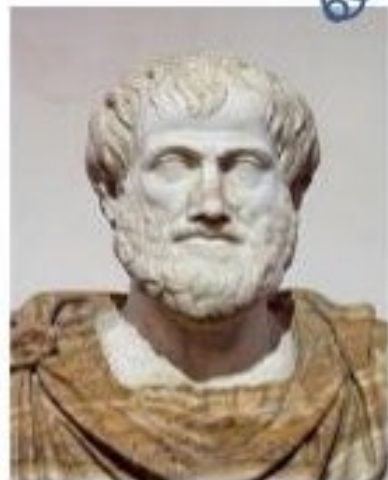
water



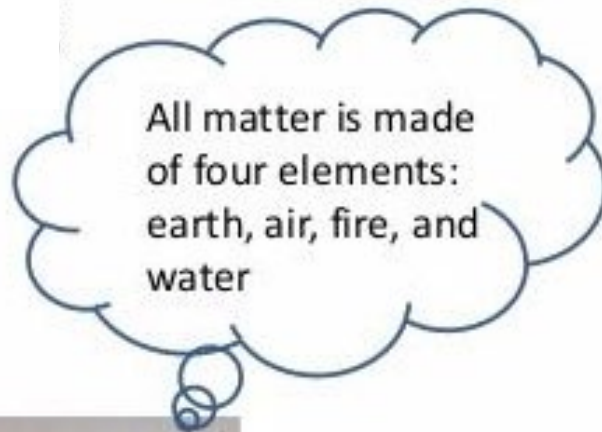
air



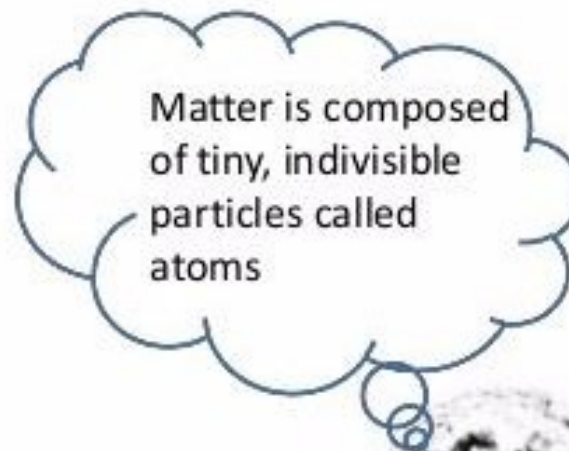
fire



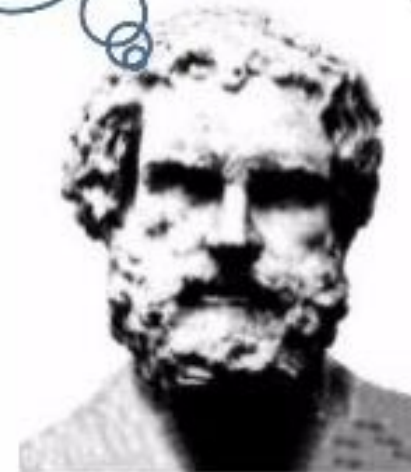
Aristotle



Leukippos + Démokritos



ATOM



Democritus

versus

Antické Řecko - ATOMISMUS



Leukippos

(500 - 440 př. n. l.)

Zakladatel ATOMISMU

Již dále nedělitelné = ATOMOS

Učitel Démokrita

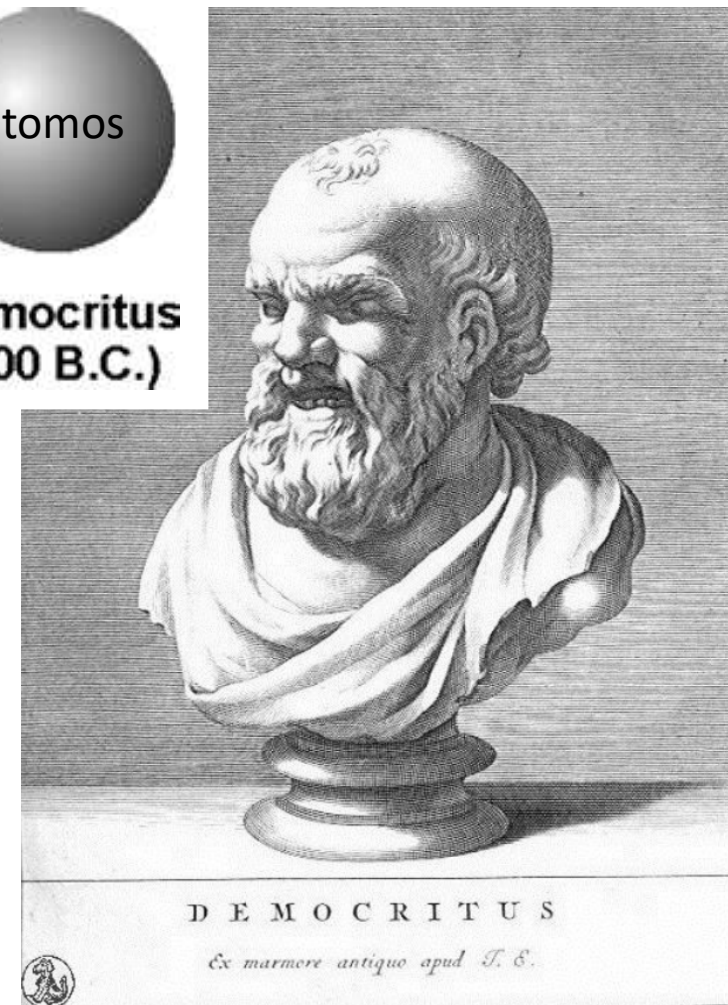


Antické Řecko - ATOMISMUS

- **Démokritos** 460 - 370 př. n. l., žák Leukippose
- Hmotu nelze dělit do nekonečna. Nejmenší částice nazval átomos (ἄτομος) – z řečtiny nedělitelné
- Existuje bytí a nebytí. Svět je tak nekonečné prázdno (nebytí), v němž se pohybuje nekonečné množství neviditelných atomů tvořících hmotu
- Různá hmota (např. kameny vs. zářivé hvězdy, ale třeba i bohové) je tvořena nestejnými atomy, které se liší tvary, polohou i uspořádáním
- Atomy nezanikají a nepodléhají žádným vlivům
- ... jsou nedělitelné, nezničitelné a neměnné,
- ... pohybují se a střetávají



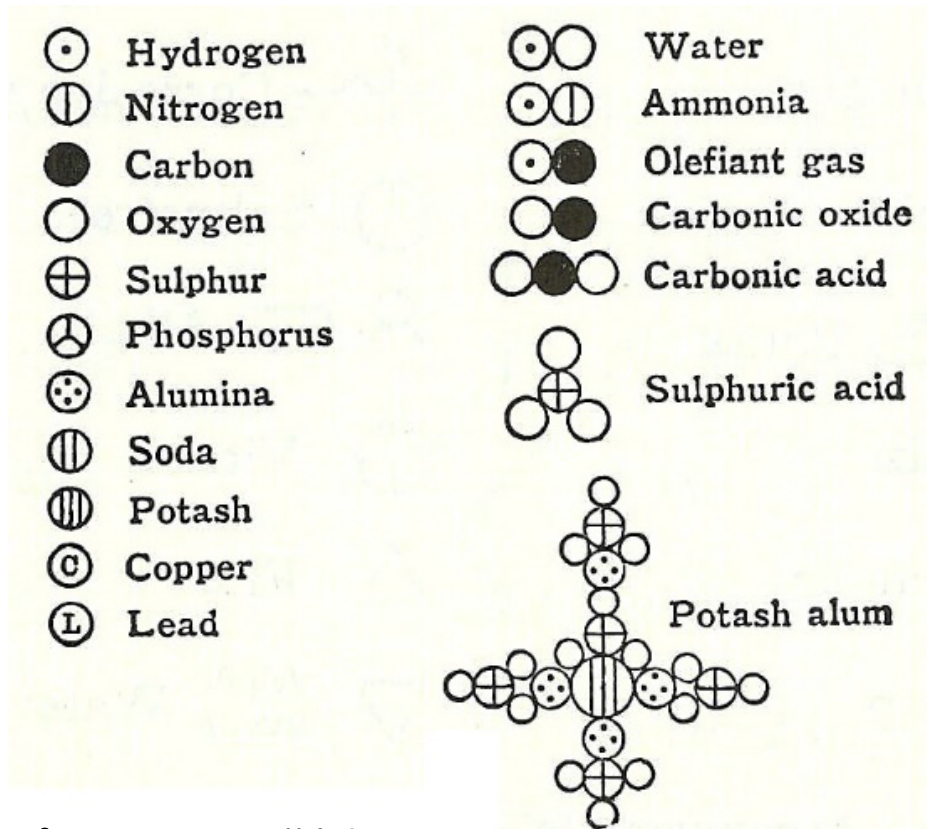
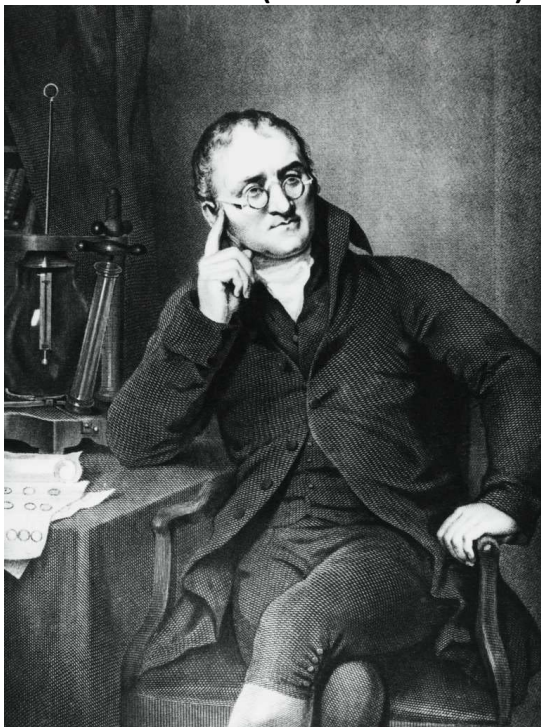
Democritus
(400 B.C.)



„Není nic než atomy a prostor, všechno ostatní jsou jen domněnky“

DALTON, 1801 – ATOMOVÁ TEORIE

John Dalton (1766 – 1844)



- Vzkříšení myšlenky atomistů teprve počátkem 19. st
- **Jon Dalton** 1766 – 1844: všechny prvky se skládají z neviditelných atomů
- Jejich kombinací vznikají chemické sloučeniny



JOHN DALTON

1766-1844

DALTONOVA ATOMOVÁ HYPOTÉZA

postuláty

- prvky se skládají z velmi malých **dále nedělitelných** částic – atomů
- **atomy téhož prvku jsou stejné**, atomy různých prvků se liší svými vlastnostmi (hmotností, velikostí,...)
- v průběhu chemických dějů se atomy spojují, oddělují nebo přeskupují, **nemohou však vznikat a zanikat**
- **sloučením dvou či více prvků vznikají chemické sloučeniny**, slučování probíhá jako spojování celistvých počtů atomů těchto prvků



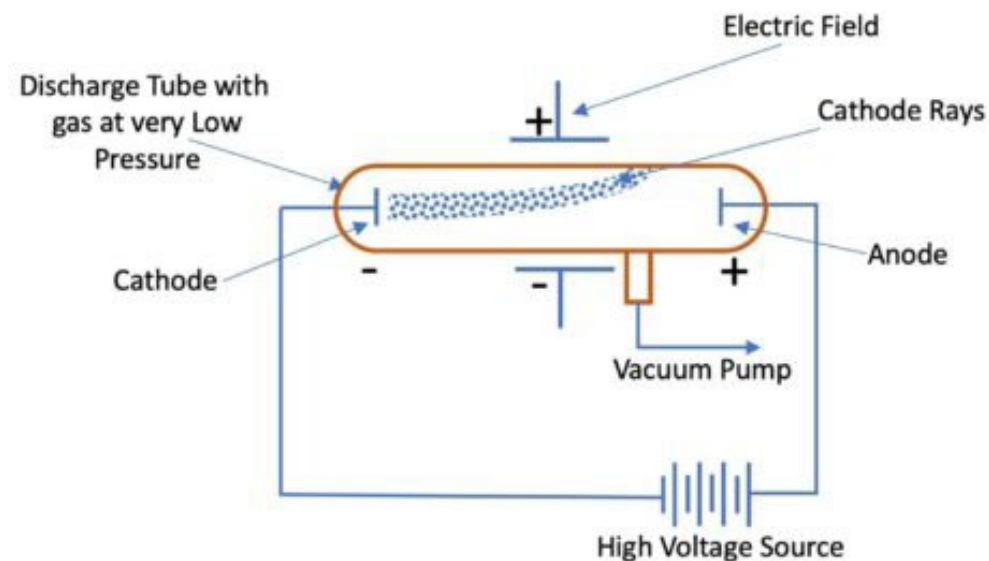
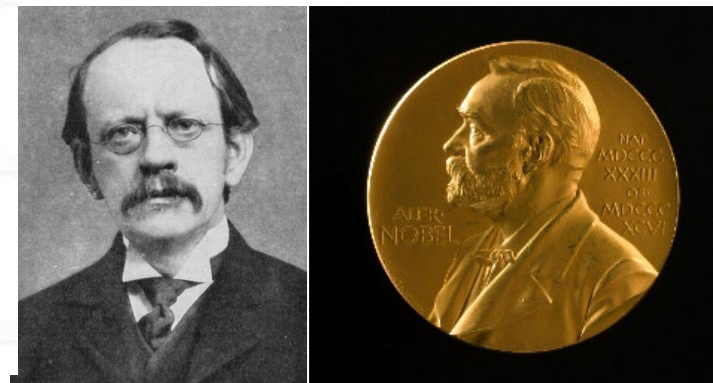
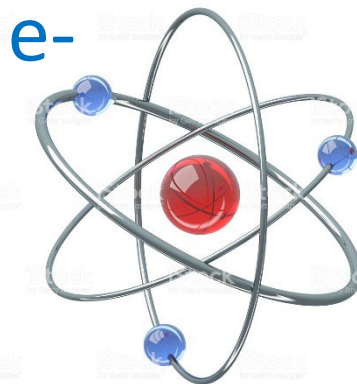
AMEDEO
AVOGADRO

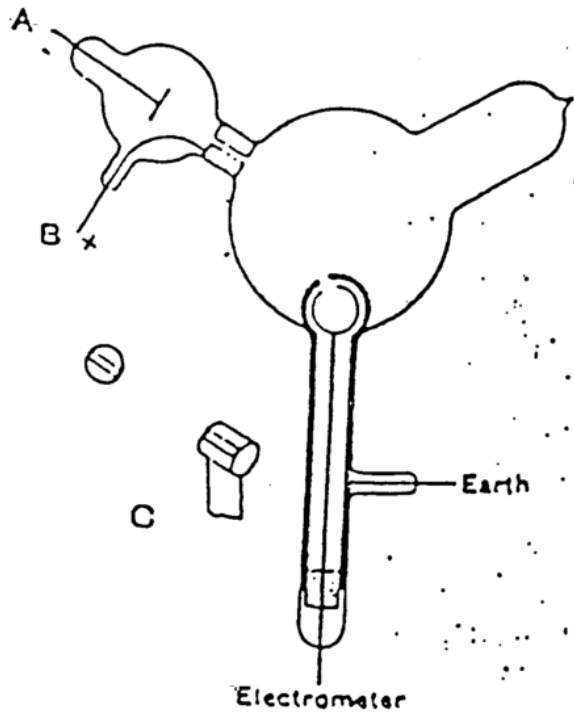
Amedeo Avogadro (1811) později nazval složitější částice skládající se z atomů pojmem **MOLEKULA**

nedělitelnost atomů (dnes platí pouze z chemického hlediska)

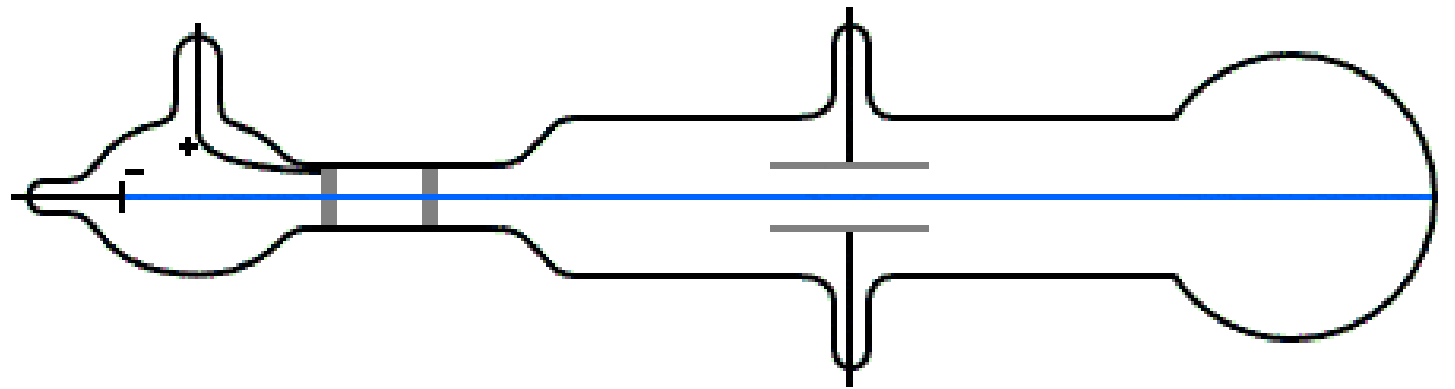
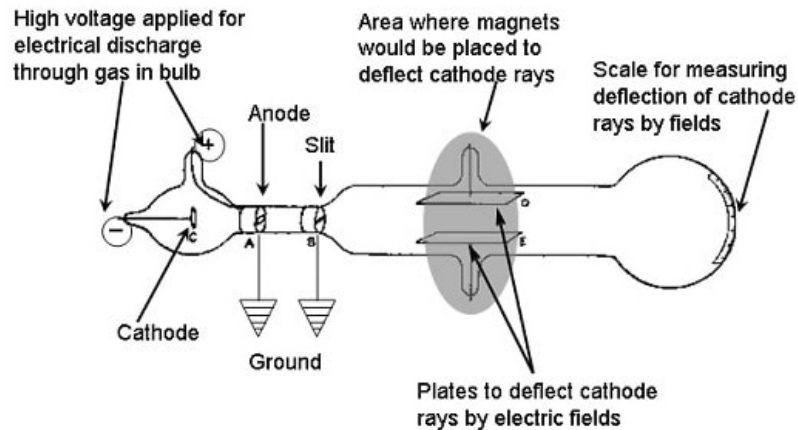
Objev elektronu – první částice menší než atom

- Josef Jon Thomson, anglický fyzik
- 1897 - **Objev elektronu** při experimentech s katodovou trubicí
- **První subatomární částice** → (1897)
vyvrácena teorie o nedělitelnosti atomu (dále už platí jen z chemického pohledu)
- → **spuštění debat o stavbě atomu, počátek částicové fyziky, první model atomu (1903)**
- Nobelova cena za fyziku 1906





Thomson's Apparatus for Research on Cathode Rays

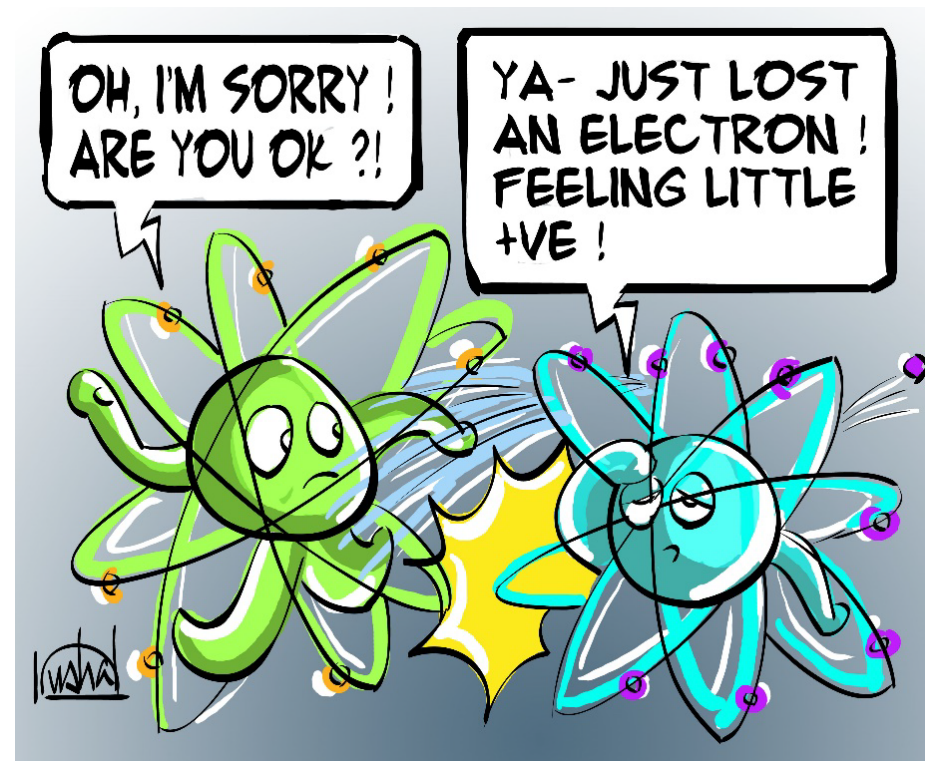


- Náboj nelze oddělit od katodového záření – elektroměr měřil signál pouze tehdy, když jeho směrem Thomson odklonil paprsky pomocí magnetu
- Na základě odklonu záření v el/mag poli: Katodové paprsky jsou partikule cca. 1000-2000 x lehčí než atom vodíku, jsou záporně nabitě a mají vysoký poměr náboje k hmotnosti
- Tyto vlastnosti (elektronu) nezáleží na materiálu katody ani anody, což je rozdíl od anodových paprsků (tvořených různými kationty)
- Thomson tak usoudil, že objevené částice se musí vyskytovat uvnitř atomu a nazval je elektrony -> **objevil tak první subatomární částice**

Elektron a první naivní modely atomu

Skutečnosti, že:

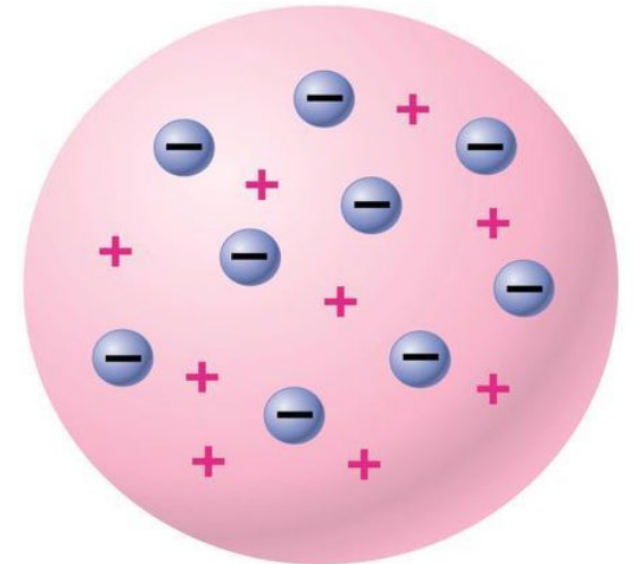
- elektron byl na přelomu 19. a 20. století jediná známá elementární částice,
- **elektrony nesou jen velmi malou část hmotnosti atomu** → např. nejjednodušší atom, (tj. atom vodíku s jedním e^-) je o tři řády těžší než elektron,
- hmota je běžně **elektricky neutrální**,



vedou k myšlence, že musí existovat kladně nabitá složka, jež dodává atomu téměř veškerou jeho hmotu

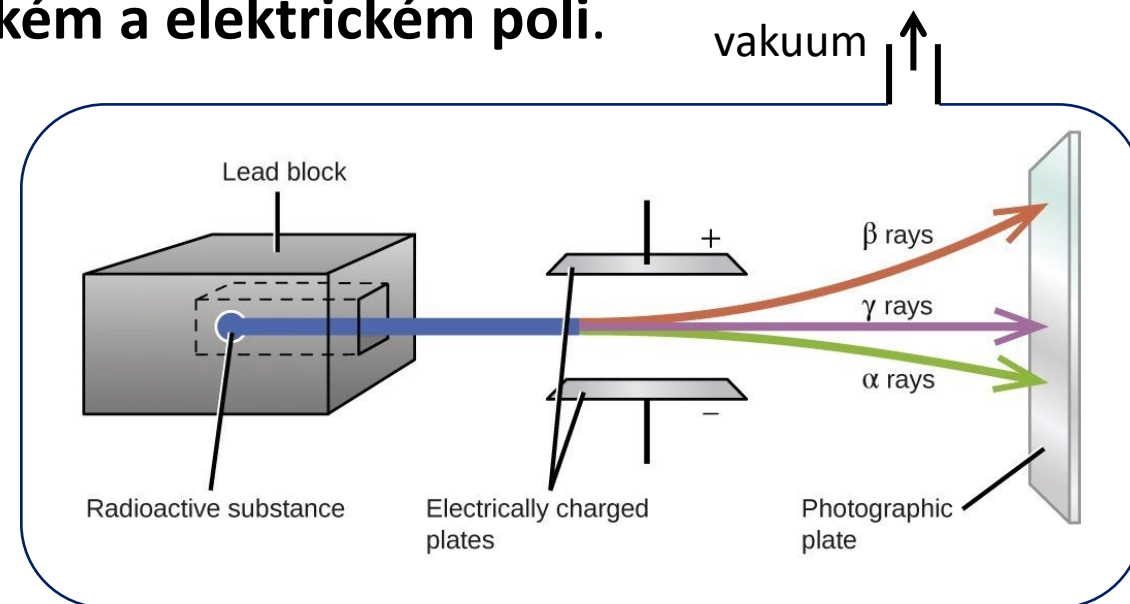
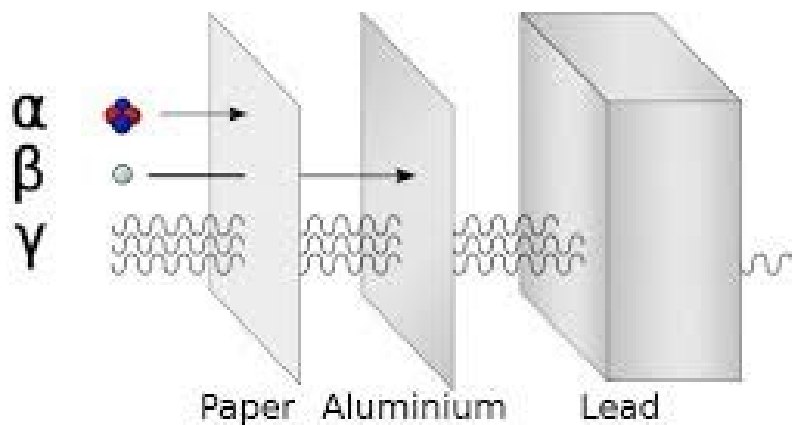
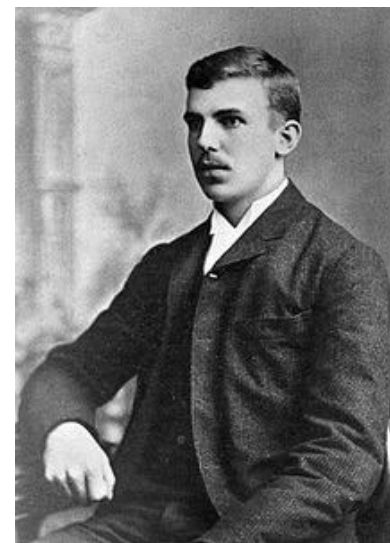
THOMSONŮV PUDINKOVÝ MODEL

- Thomsonovy představy o struktuře (1897)
 - hlavní část hmotnosti atomu představuje látka s kladným elektrickým nábojem; **hmotnost a kladný elektrický náboj jsou spojitě rozloženy v celém objemu atomu**
 - **velmi lehké elektrony jsou rozprostřeny uvnitř kladně nabitě látky v rovnovážných polohách**
 - celkový elektrický náboj je nulový, velikost náboje elektronu byla přitom přirozeně nazvána **elementárním nábojem**.
- nedostatky
 - počet elektronů není přesně určen
 - nevysvětluje původ kladného náboje
 - nevysvětluje soudržnost kladného náboje i přes Coulombovy elektrické síly
 - frekvence elektromagnetického záření vypočtené dle modelu nesouhlasí s experimenty



Další mezníky: objev p^+ a n^0

- **Ernst Rutherford**, novozélandský fyzik, 1871 – 1937
- 1897/98 rozlišil podle pronikavosti dva druhy radioaktivního záření,
- snadněji absorbovatelné záření **alfa**
- a pronikavější záření **beta**.
- Zjistil odklon záření alfa a beta v magnetickém a elektrickém poli.



Rutherford – tři druhy radioaktivního záření

V roce 1903 si uvědomil, že typ radiace objevený (ale nepojmenovaný) francouzským chemikem **Paulem Villardem** při pokusech s radiem v roce 1900, nemůže být alfa či beta zářením, protože je mnohem pronikavější → pojmenoval tento nový druh záření jako **paprsky gama**.



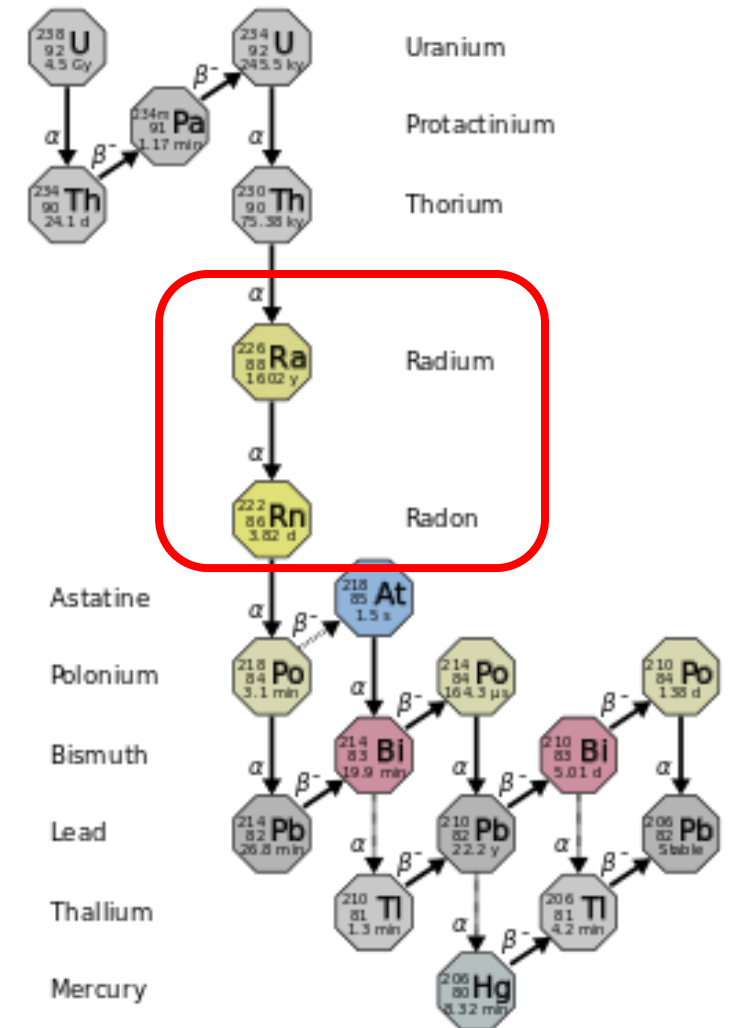
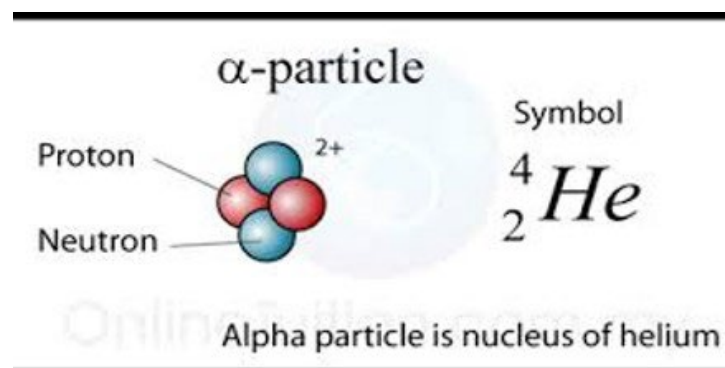
Paulem Villardem,
studoval paprsky X

Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Alpha decay	${}^4_2\alpha$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X' + \frac{4}{2}\alpha$	<p>Parent → Daughter + Alpha Particle</p>
Beta decay	${}^0_{-1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}X' + {}^0_{-1}\beta$	<p>Parent → Daughter + Beta Particle</p>
Gamma emission	${}^0_0\gamma$	${}^A_ZX^{*} \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}^A_ZX' + {}^0_0\gamma$	<p>Parent (excited nuclear state) → Daughter + Gamma ray</p>

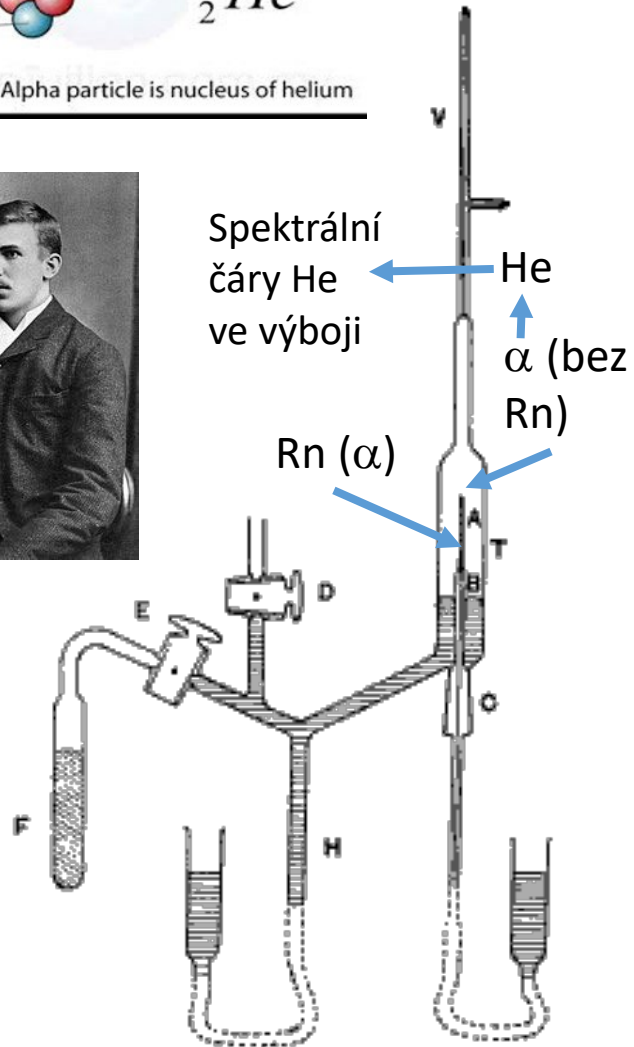
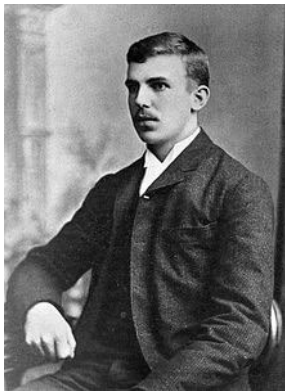
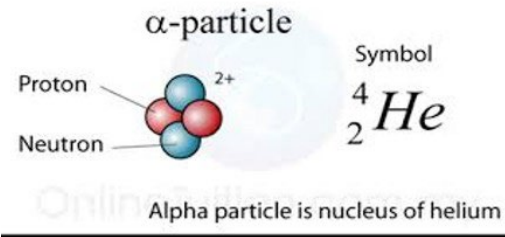
- V roce 1900 Rutherford zjistil, že nejaktivnější prvek není samotné rádium, ale radioaktivní plyn vznikající v důsledku rozpadu rádia. Spolu s Fredericem Soddy přezkoumali vlastnosti tohoto plynu a zjistili, že se podobá vzácným plynům.

- **Tak byla poprvé objevena samovolná přeměna jednoho chemického prvku v jiný, a byl objeven nestálý prvek radon.**
- Když v roce 1904 William Ramsay a Frederic Soddy zpozorovali nápadný výskyt helia kolem radioaktivních sloučeninách rádia, domnívali se, **že helium se tvoří z rádia**.
- Spolu s **Thomasem Roydsem** provedli pokusy (1909), kterými určili, že hélium v okolí α -zářičů vzniká z **alfa částic, jež představují jádra hélia**, tedy ${}^4_2\text{He}^{2+}$

- Dále určil, že elektrický náboj alfa částice je **2+**.



Záření alfa = jádra hélia



- Skleněnou trubičku (A) z tenkých stěn naplnili radonem, jako zdrojem částic alfa. Tloušťka stěn byla asi 0,01 mm, takže **většina částic alfa jimi prošla**.
- **Naopak atomy radonu s menší kinetickou energií stěnami difundovat nemohly**.
- Trubička A byla obklopena ještě širší trubicí (T), ke které přitavili výbojovou trubicí s elektrodami (V).
- **Částice alfa hromadící se v širší trubicí (případně ve rtuti) (T) se neutralizovaly na atomy helia**, které difundovaly do evakuovaného prostoru stlačením se přemístily do kapilární výbojové trubice (V).
- Po šesti dnech při elektrickém výboji **zjistili spektrální čáry helia**. Tím bylo dokázáno, že částice alfa jsou ionty, tj. jádra helia.

D – ventil pro napojení pumpy pro evakuaci trubice V

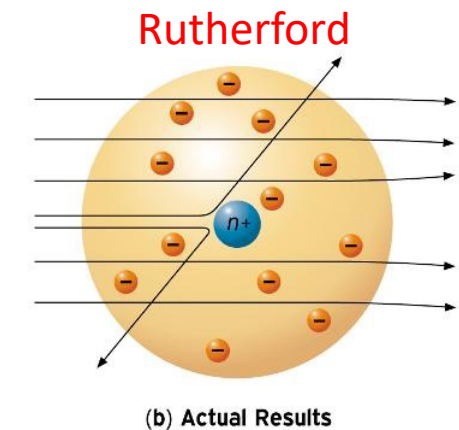
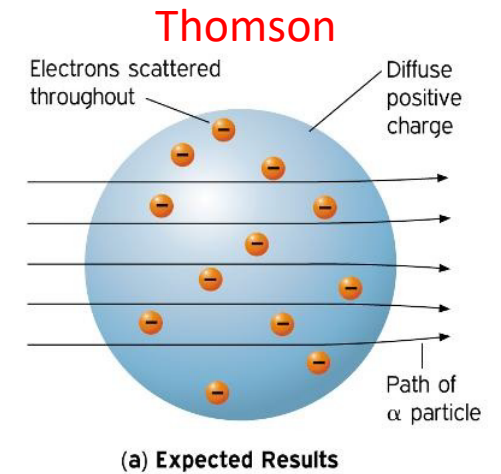
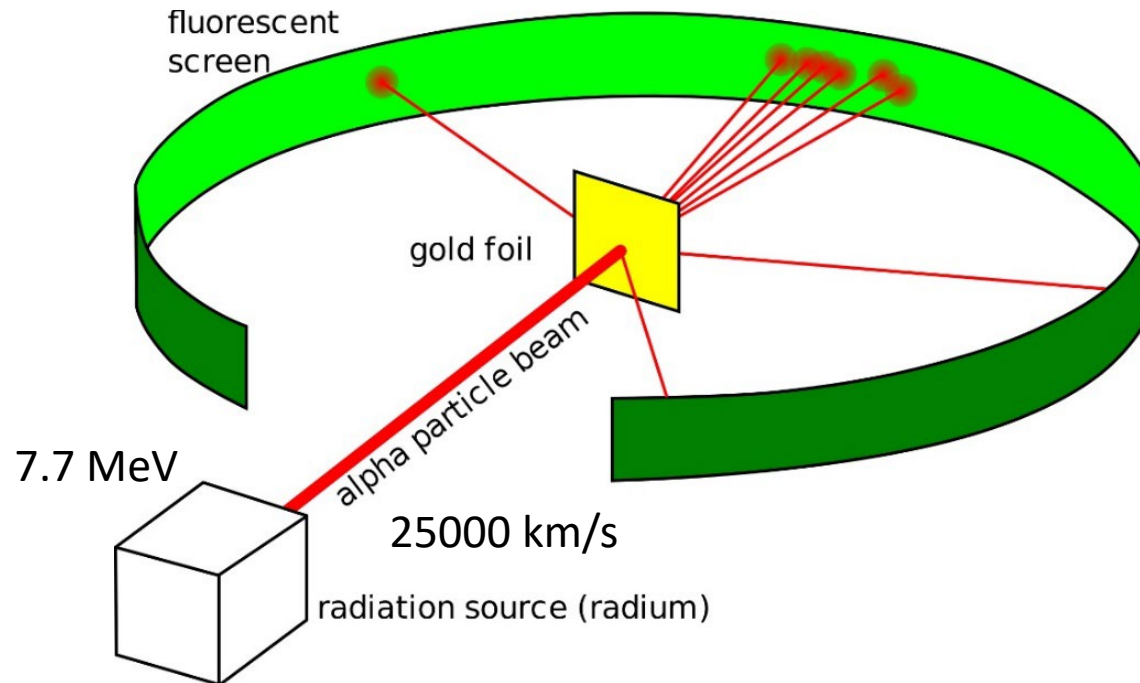
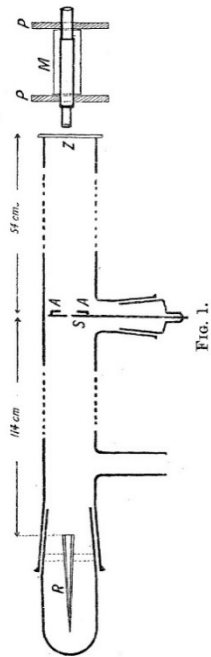
F – dřevěné uhlí pro dokončení evakuace trubice V (chlazené vzduchem)

H – zásobník rtuti – rtuť se přiváděla do trubice T až po spodek trubice A

Rutherfordův (Geigerův-Marsdenův) experiment, 1909, objev atomového jádra

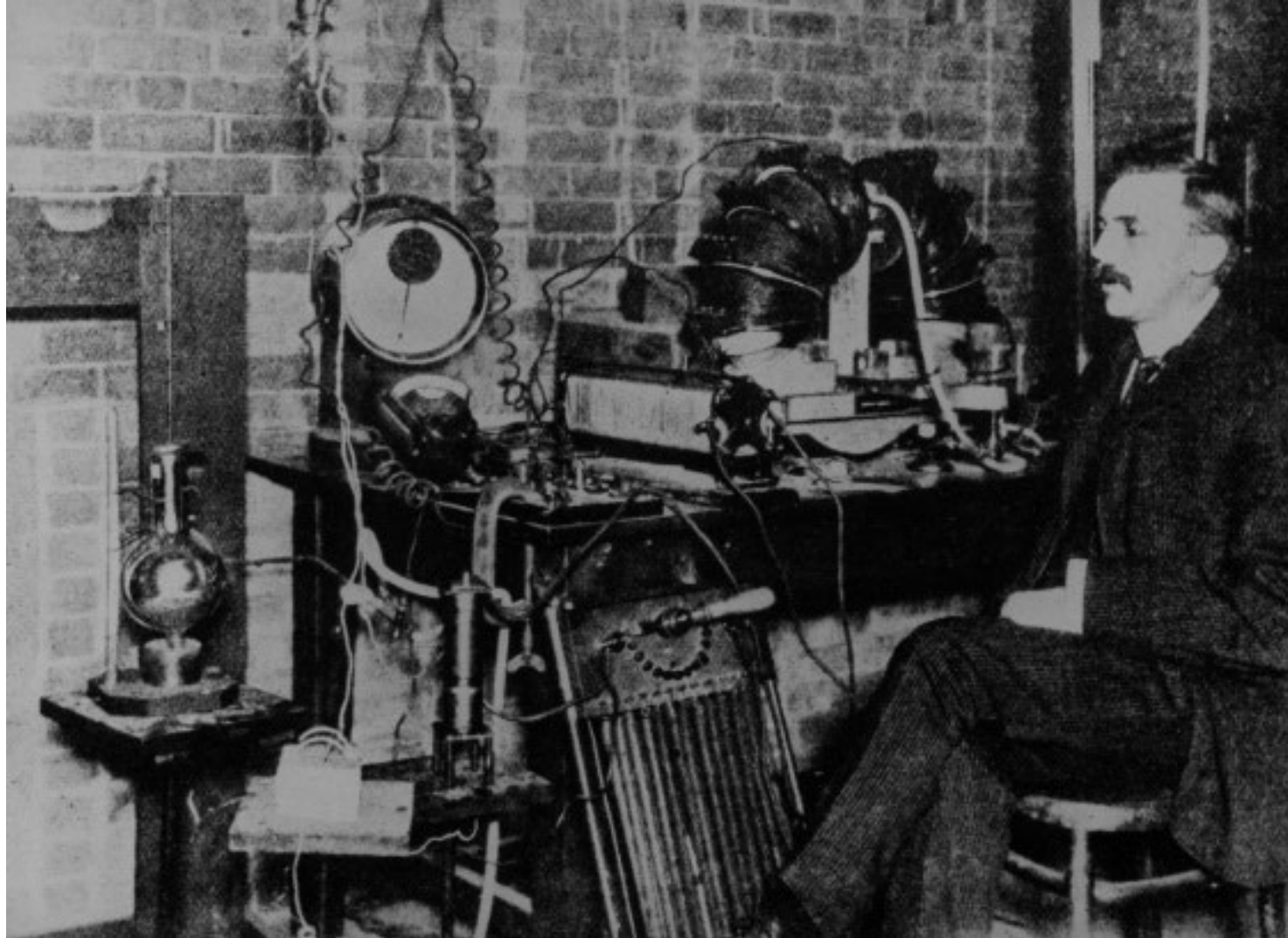
Alfa částice vystřelované proti tenké Au fólii: **8000 částic prošlo : 1 se odrazila**

Odraz možný pouze při interakci s něčím mnohem masivnějším, co zabírá pouze malou část objemu atomu



The schematics for the original two meter long tube that Geiger constructed and used to first detect the scattering of alpha particles by the atomic nucleus. At the point labeled R is the radon particle emission source, and Z the detector screen. (Source: Wikimedia Commons)

Rutherford v jeho laboratoři



Ernest Rutherford – „první“ planetární model atomu

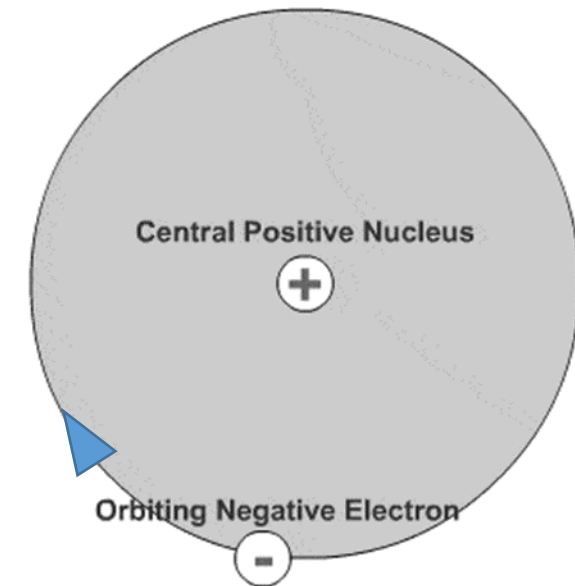
- 1911 Atom se skládá ze dvou částí:
 - a) Velice malé **jádro (100 000x menší než atom)**, kde je uložena kladně nabitá hmota atomu
 - b) **obal**, tvořený elektrony

Ale nový problém:

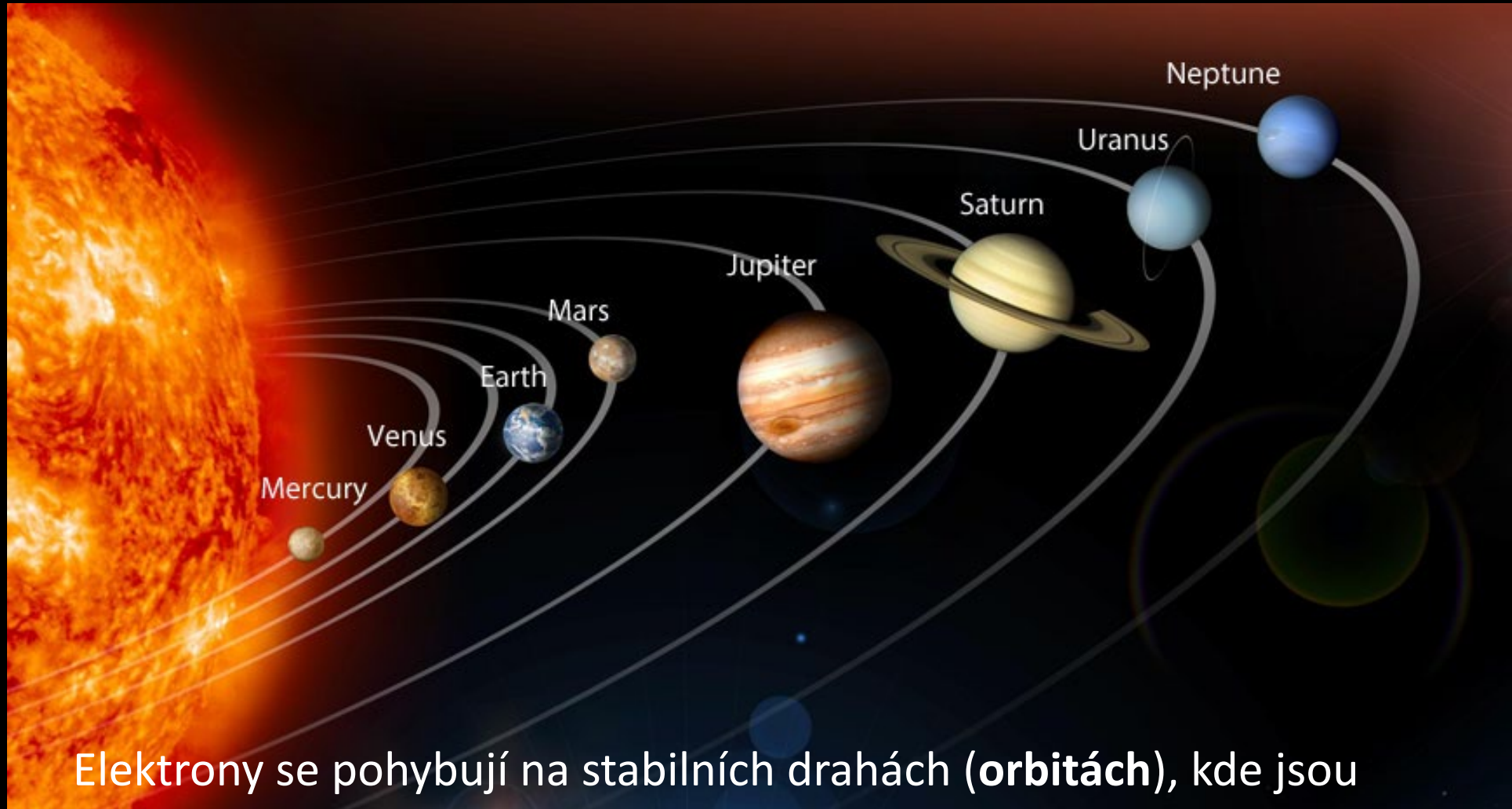
po separaci \oplus a \ominus náboje v rámci atomu musí jádro nutně elektrostaticky přitahovat záporné elektrony

→ e^- již nemohou být statické „hrozinky v pudinku“,

→ **musí se pohybovat**



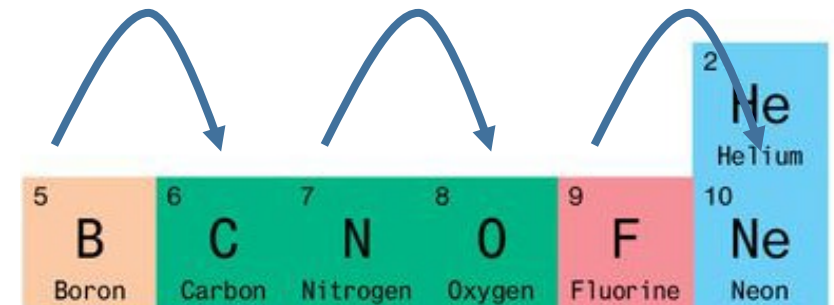
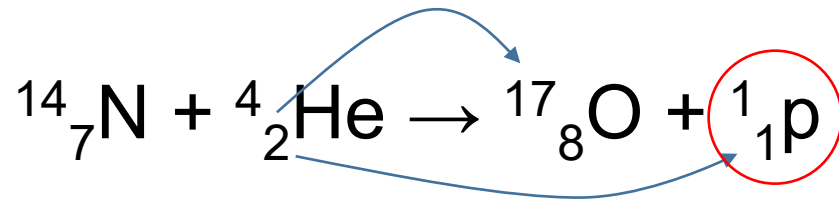
Ernest Rutherford – První planetární model atomu



Elektrony se pohybují na stabilních drahách (**orbitách**), kde jsou v rovnováze elektrostatické a odstředivé síly → pro tuto podobnost bývá často označován jako **planetární model**

A zase ten Rutherford - **PROTON**

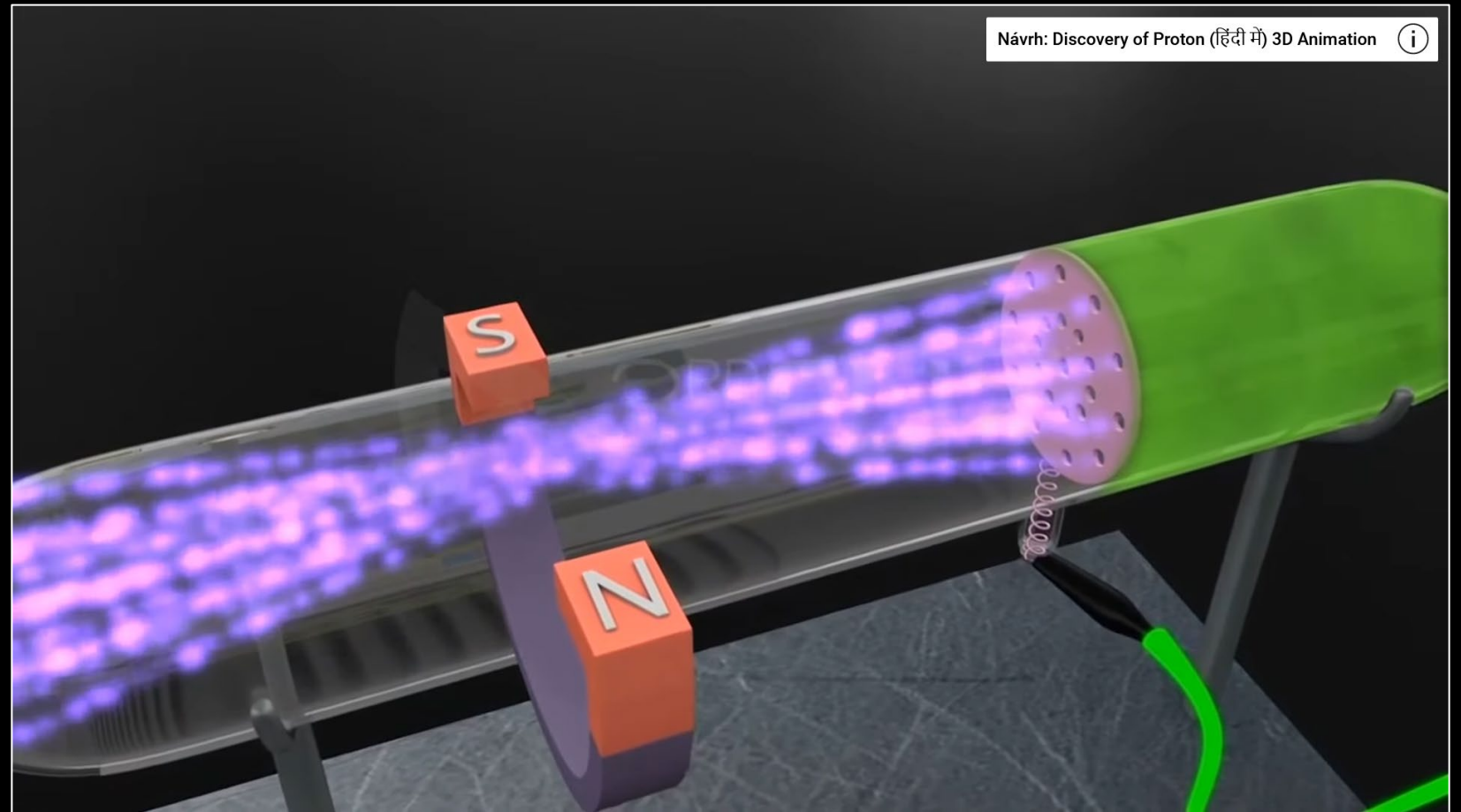
- Až do roku **1918** se hovořilo pouze o elektronu a kladně nabitém jádru.
- Pak ale **E Rutherford objevil p+**,
- Vstřeloval **alfa částice do plynného dusíku** a ty se ve scintilačním detektoru jeví jako jádra vodíku.
- Myslel si, že **jádra vodíku, o nichž věděl, že mají atomové číslo 1**, jsou hledané elementární částice. Pojmenoval je tedy **PROTON**, z řeckého protos, první.



Následné analogické experimenty provedené s bórem, fluórem, neonem, draslíkem a dalšími prvky daly podobné výsledky: v důsledku nárazu α -částice se zasažené jádro ostřelovaného atomu přeměnilo v jádro jeho pravostranného souseda v periodické tabulce za současné emise vodíkového iontu +H (i.e., protonu).

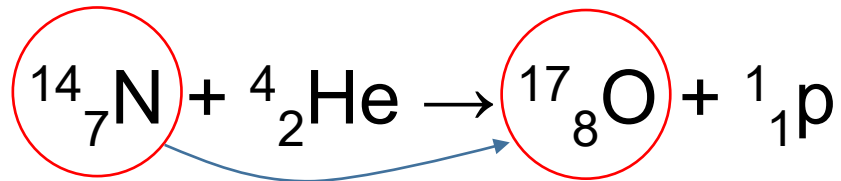
Discovery of the Proton

In 1886 **Eugene Goldstein** (1850–1930) discovered evidence for the existence of this positively charged particle. Using a **cathode ray tube with holes in the cathode**, he noticed that there were rays traveling in the opposite direction from the cathode rays. He called these **canal rays** and showed that they were composed of positively charged particles.

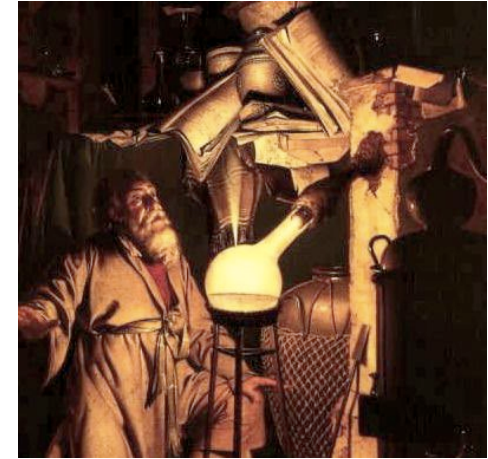
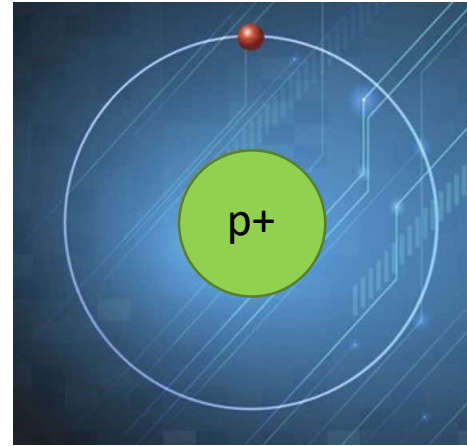


Další mezníky: Rutherford

- **UPŘESNĚNÝ RUTHERFORDŮV MODEL ATOMU:** jádro vodíku obsahuje jedinou kladně nabitou částici – proton – která je přítomna i v jádrech jiných atomů
- 1919 ostřelování dusíku částicemi α → **zároveň první transmutace** (převodl dusík na kyslík)

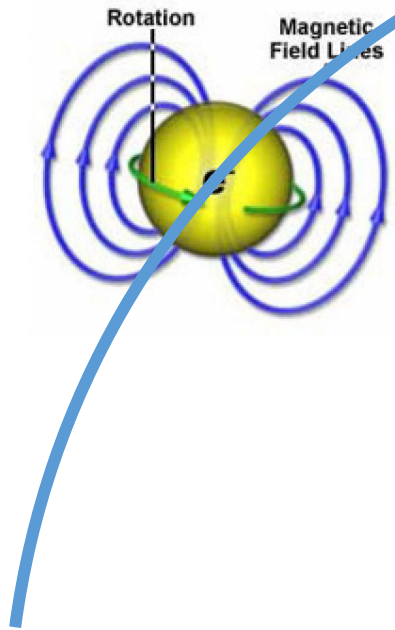


- Pokračoval ve výzkumu záření alfa, spolu s **Hansem Geigerem** objevili metodu detekce alfa záření pomocí záblesků na stínítku ze sulfidu zinečnatého a **ionizační komoru**, která umožňuje počítat alfa částice.
- Zavedl pojem **poločas rozpadu**
- navrhl **metodiku radioaktivního datování**.



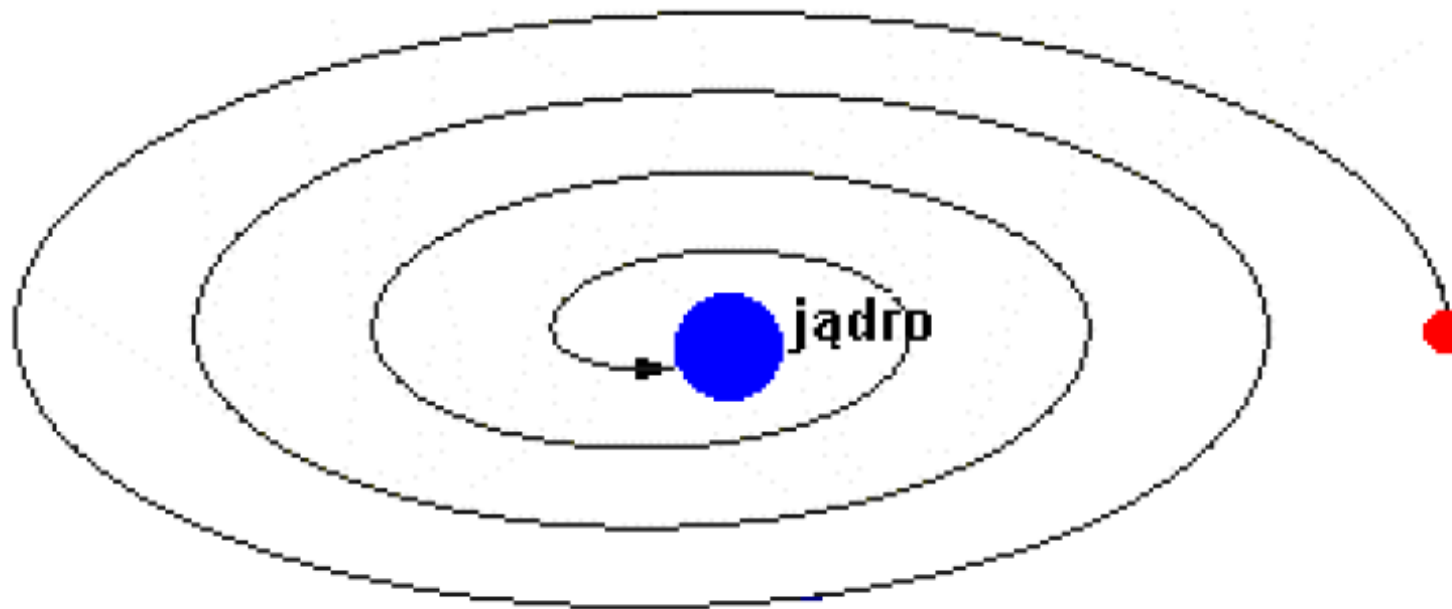
1908 **Nobelova cena za chemii**,
za výzkum rozpadu prvků a
chemii radioaktivních látek

Planetární model atomu – další problémy



- **e- má náboj**
- **Kdyby se nehýbal, přitáhne ho jádro (viz dříve) → obíhá**
- Když se náboj pohybuje (oběh + rotace), generuje magnetické pole
- Magnetické pole se ovšem také pohybuje (mění), takže generuje elektrické pole, to zase magnetické pole atd. → vyzařování el-mag. vln
- **Vyzařováním el-mag. vln ztrácí e- kinetickou** energii a měl by tedy postupně spirálně padat do jádra
- z modelu navíc vyplývá spojité spektrum, zatímco experimentálně získaná **spektra atomů jsou čárová**

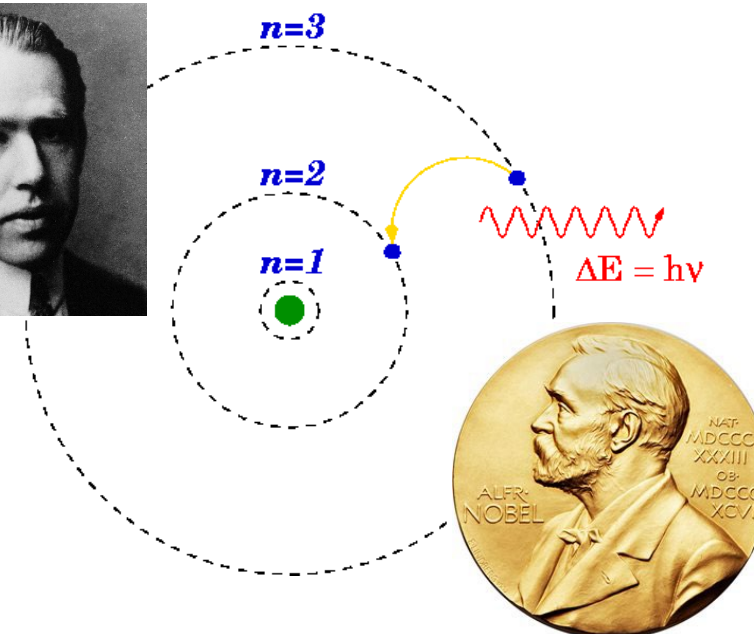
Planetární model atomu – Problémy



- Spočítáno, jak rychle by k tomu elektrickému kolapsu atomu došlo – kdyby to bylo např. 20 mld let, nemusel by to být ještě problém –
- jenže **vyšlo 10^{-10} – 10^{-8} s**, což evidentně odporuje skutečnosti (atomy tu stále jsou)

Bohrův „kvantový“ planetární model atomu

- **Niels Bohr** dánský fyzik, rok 1913. (1922 NC za fyziku)
- PROBLÉM: Rutherfordův planetární model atomu není stabilní podle klasických zákonů fyziky (Maxwellova elektrodynamika).
- CO S TÍM:
- **MAX PLANCK**: Již v roce 1900 objevil, že záření absorbované nebo vydávané atomy nemůže mít libovolnou energii, ale je vždy pohlcováno nebo vydáváno v určitých kvantech, tato **energie je úměrná frekvenci a tzv. Planckově konstantě**
- **N. Bohr vylepšil Rutherfordův model tím, že do něj začlenil Planckovu teorii o kvantování energie.** Prohlásil, že elektromagnetické zákony uvnitř atomů neplatí, tj. že známé fyzikální zákony nejsou aplikovatelné v oblasti mikrosvěta → **první kvantový model atomu**



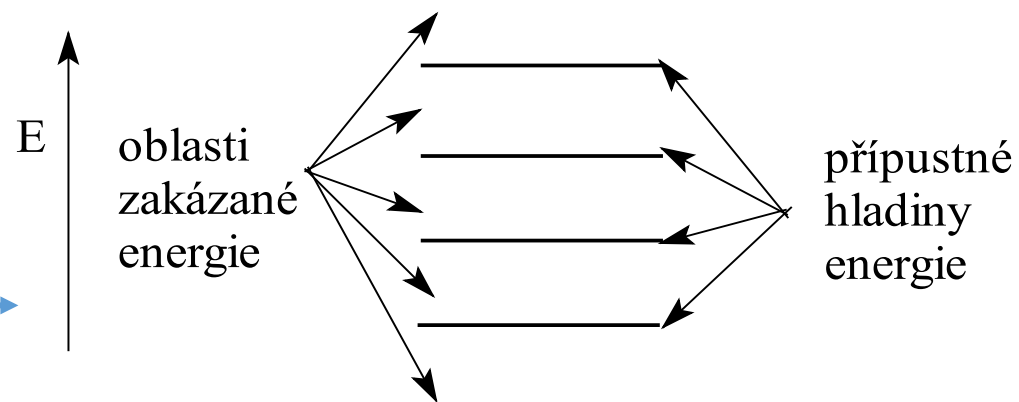
$$E = h * \nu = \frac{hc}{\lambda},$$

ν [ny:] = frekvence záření
 h = Planckova konstanta
= $6.626 \cdot 10^{-34}$ J.s
 c = rychlost světla
 λ = vlnová délka záření



Bohrův „kvantový“ planetární model atomu

- Na základě experimentů a s tehdy vznikající kvantovou mechanikou **doplnil planetární model o 3 zásadní (Bohrovy) postuláty** (které jsou v rozporu s klasickou mechanikou tak i s elektrodynamikou):



- 1) elektrony obíhají atomové jádro **jen na pevně daných dovolených kvantových drahách s přesně určenými diskrétními hodnotami poloměru.**

Možné jsou pouze takové dráhy, kde moment hybnosti obíhajícího elektronu odpovídá **celistvým násobkům $h/2\pi$** (moment hybnosti elektronu je kvantován v násobcích redukované Planckovy konstanty)

$$m_e v r = n \hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

2) Dráhy (elektronové orbitaly), na nichž je splněn první postulát, jsou stacionární. Elektron při pohybu na těchto drahách nevyzařuje elektromagnetické vlny a jeho energie je stálá.

3) Energie může být vyzářena nebo přijata pouze při přechodu na jinou kvantovou dráhu. Přejde-li e- na dráhu na níž bude mít nižší energii, je atomem **vyzářena přebývající energie v podobě fotonu.**

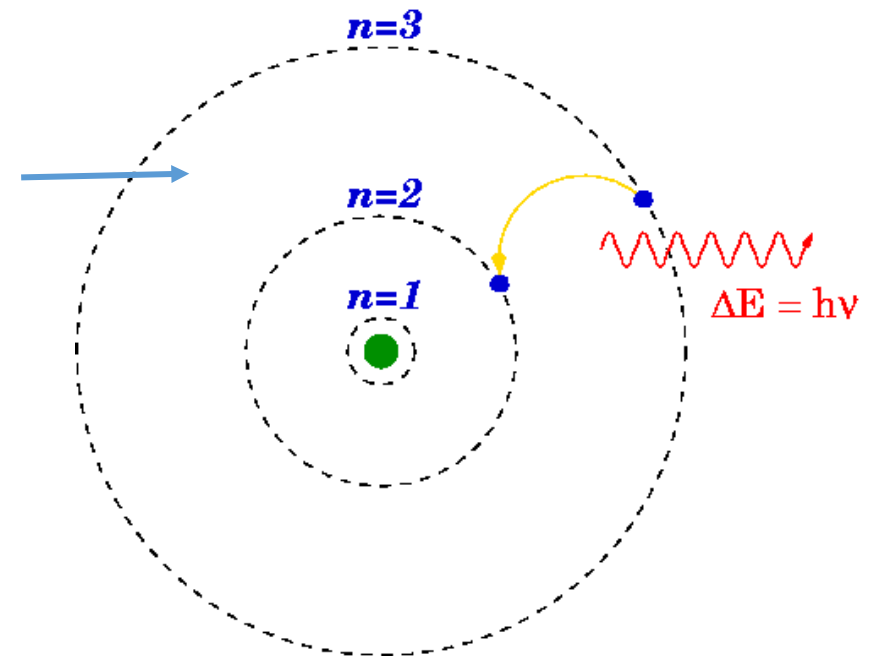
m_e = hmotnost elektronu

R = poloměr kruhové dráhy e-

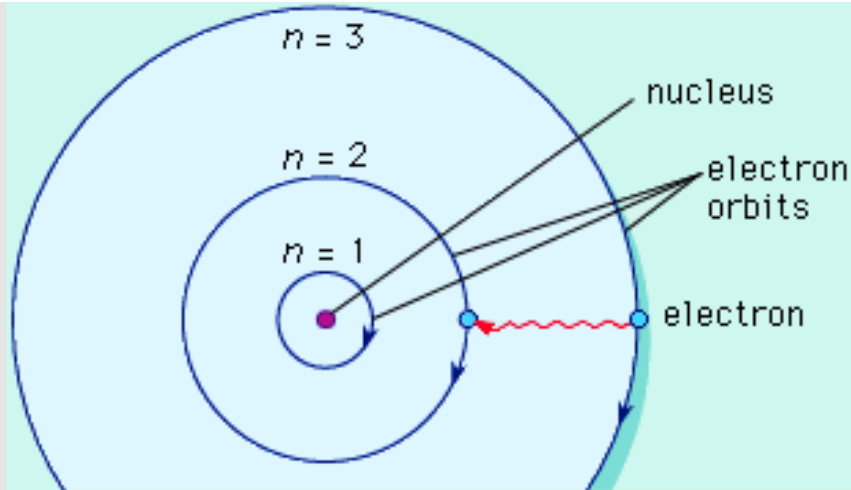
v = rychlost e-

n = kvantové číslo

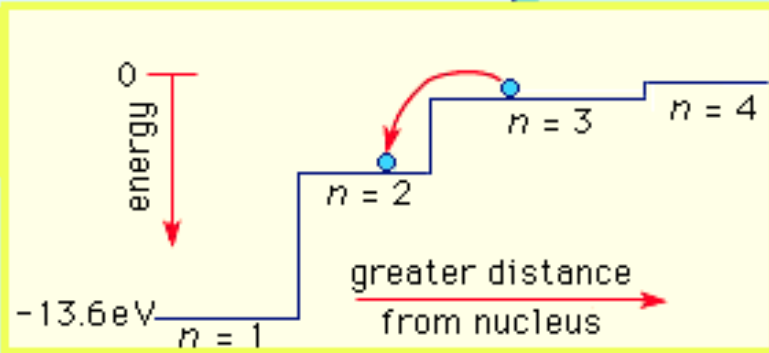
h = Planckova konst.



Hlavní kvantové číslo (n)



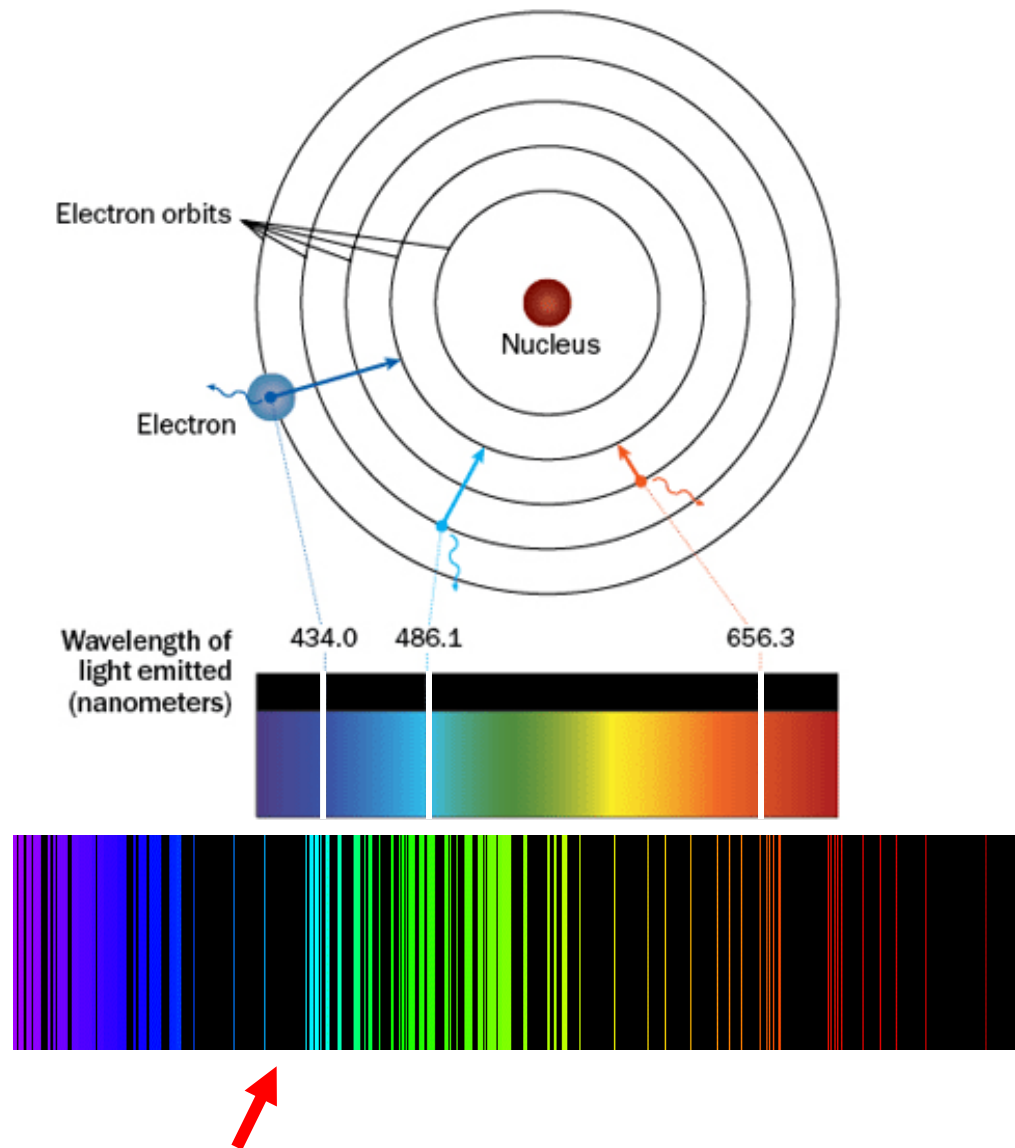
The electron travels in circular orbits around the nucleus. The orbits have quantized sizes and energies. Energy is emitted from the atom when the electron jumps from one orbit to another closer to the nucleus. Shown here is the first Balmer transition, in which an electron jumps from orbit $n = 3$ to orbit $n = 2$, producing a photon of red light with an energy of 1.89 eV and a wavelength of $656 \times 10^{-9} \text{ m}$.



- Bohr označil energetické hladiny (tj. orbity, slupky) písmenem n .
- n – hlavní kvantové číslo – zásadním způsobem určuje energii elektronu v atomu
- Může nabývat hodnot $n = 1, 2, 3, 4,$ etc...

Bohrův model atomu

- Bohrovy postuláty úspěšně popisují nejdůležitější kvantové vlastnosti stavby atomu, **mj. diskrétní (nespojité) čárová spektra** záření vysílaného atomy
- Model je tedy víceméně v souladu s tím, co pozorujeme v přírodě, ale není v pořádku – **chybí vysvětlení** – to až za 25 let.
- Další problémy:
 - je to ale model **plošný**
 - a **nevysvětluje štěpení spektrálních čar**
(viz. přednáška 1 – spektra RTG záření)



Při vyšším rozlišení je ale pozorováno „štěpení“ spektrálních čar → jemná struktura spektra (skupiny blízkých čar, tzv. **multiplety**)

Potvrzení kvantového charakteru e- hladin

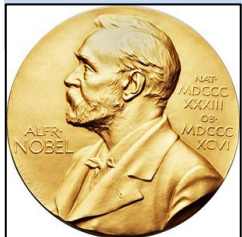
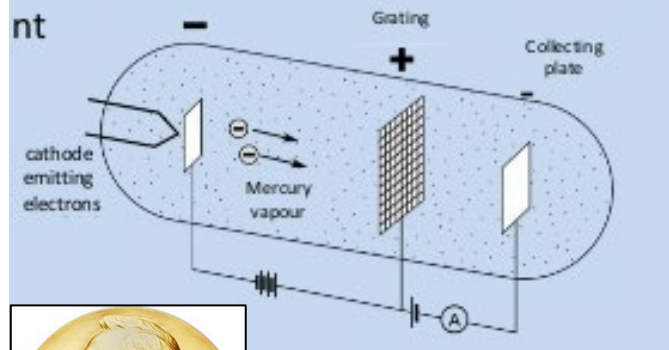
The Franck-Hertz experiment 1914



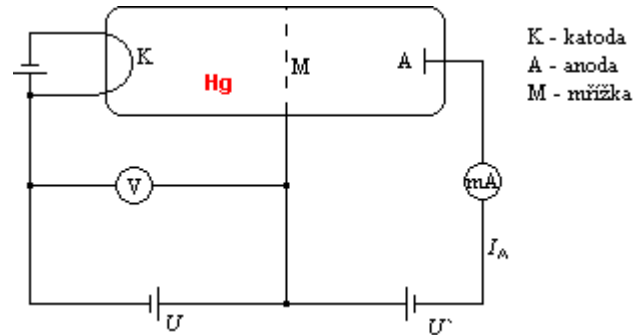
G. Hertz (1887-1975)



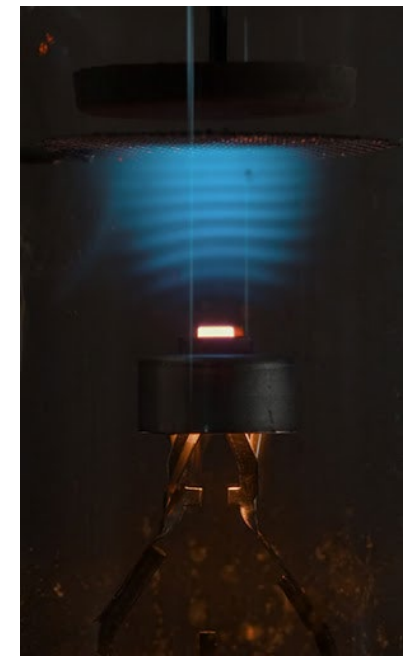
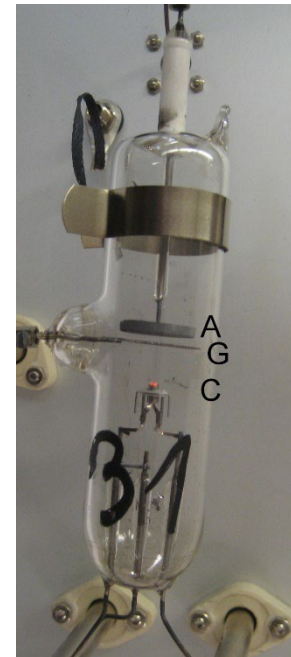
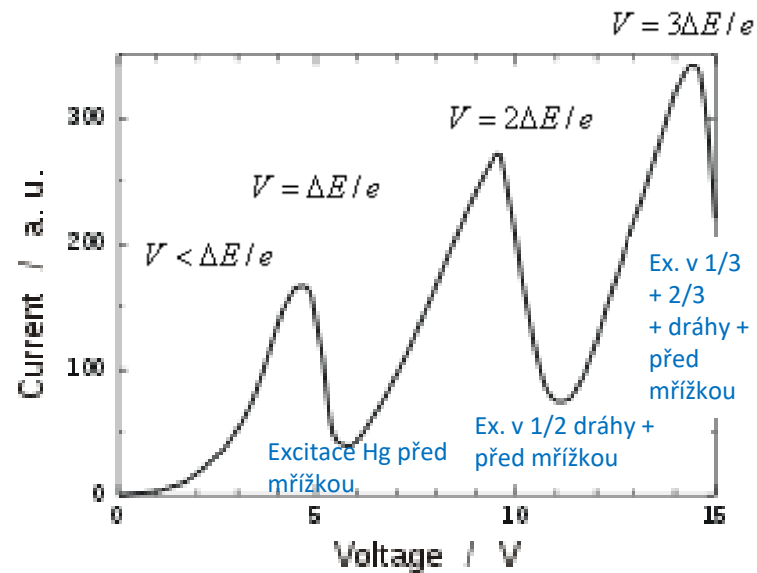
J. Franck (1882-1964)



- Díky ztrátě energie už není schopen překonat brzdné napětí a je zachycen mřížkou; nedoletí tak na anodu → pokles anodového proudu I_A
- Hg atom následně vyzáří přijatou energii ve formě fotonu
- V dokonalém souladu v absorpčním spektru rtuťových par spektroskopicky potvrzena čára o $\lambda=253,6$ nm, (což odpovídá $E_e=4,89$ eV).



K - katoda
A - anoda
M - mřížka

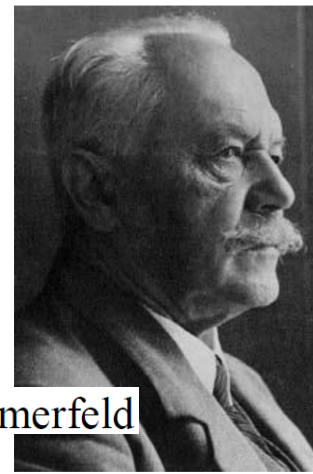


- elektrony jsou urychlovány mezi K a M
- brzdné napětí U' mezi M a A brání elektronům s $E_e < eU'$ doletět na A
- pozorovány velké poklesy anodového proudu I_A pro $U = n \cdot 4.89$ V

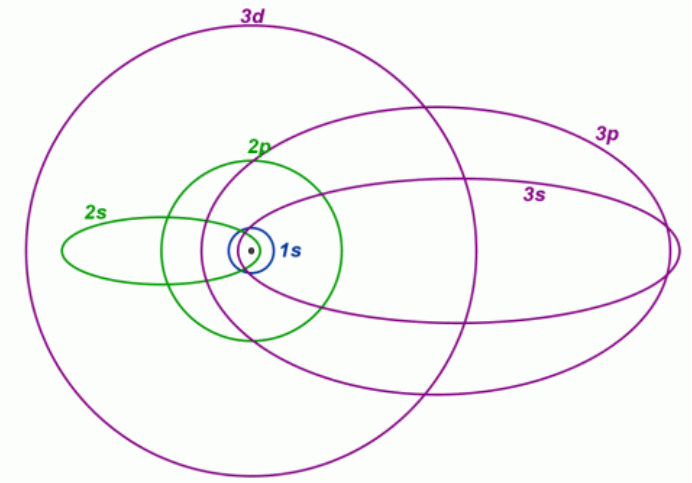
$E_e < 4.89$ eV \Rightarrow srážky elektronů s atomy Hg jsou pružné, elektron doletí k A

$E_e = 4.89$ eV \Rightarrow tato E odpovídá exctiační energii elektronového obalu atomů Hg, e- z katody tudíž předá energii atomu Hg (neelastické srážky) a excituje ho

Sommerfeldův model atomu = zobecnění Bohrova modelu



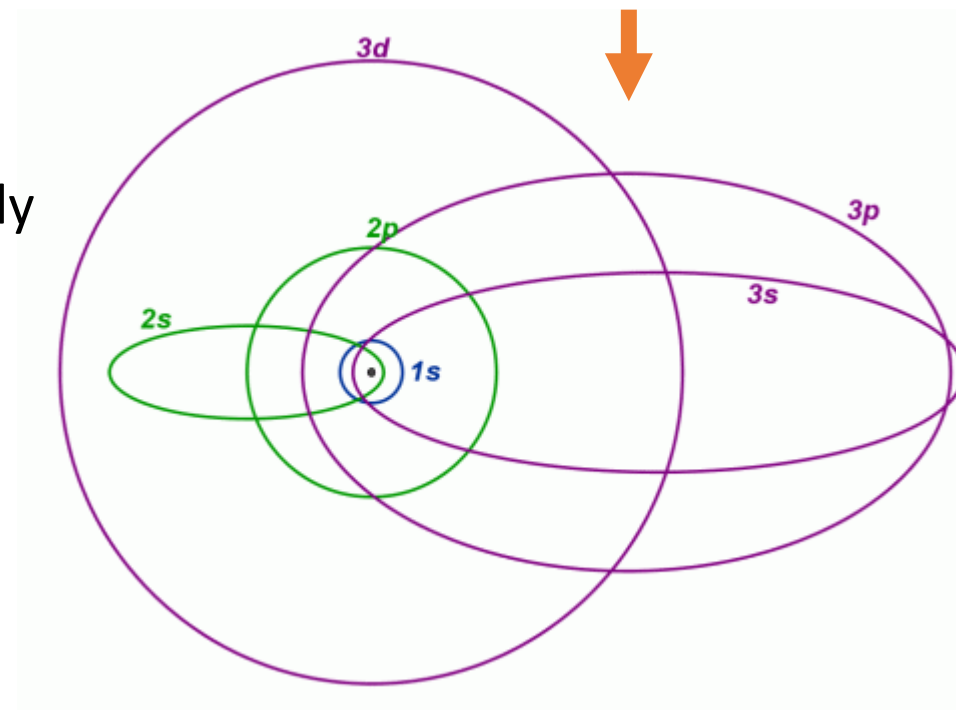
Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld



- Sommerfeld **zobecnil** původní jednoduchou Bohrovu kvantovací podmínku pro moment hybnosti elektronu **pro případ jeho pohybu po libovolné uzavřené dráze**
- Namísto jediné trajektorie e⁻ (kružnice) pro každou energii zavedl Sommerfeld **soustavu elips navzájem se lišících hodnotou vedlejšího kvantového čísla (l)**
- Hlavním kvantovým číslem je určena velká poloosa $a = n^2 r_1$ a vedlejším kvantovým číslem malá poloosa $a' = n(l + 1)r_1$.
- Pokud $n = l + 1$, přechází elipsa v kružnici – vedlejší kvantové číslo proto může nabývat maximální hodnoty $n - 1$. Nejmenší možná hodnota je **0**.
- **Sommerfeld předpokládal, že energie bude záviset na obou kvantových číslech, což by mohlo objasnit pozorované multiplety.**

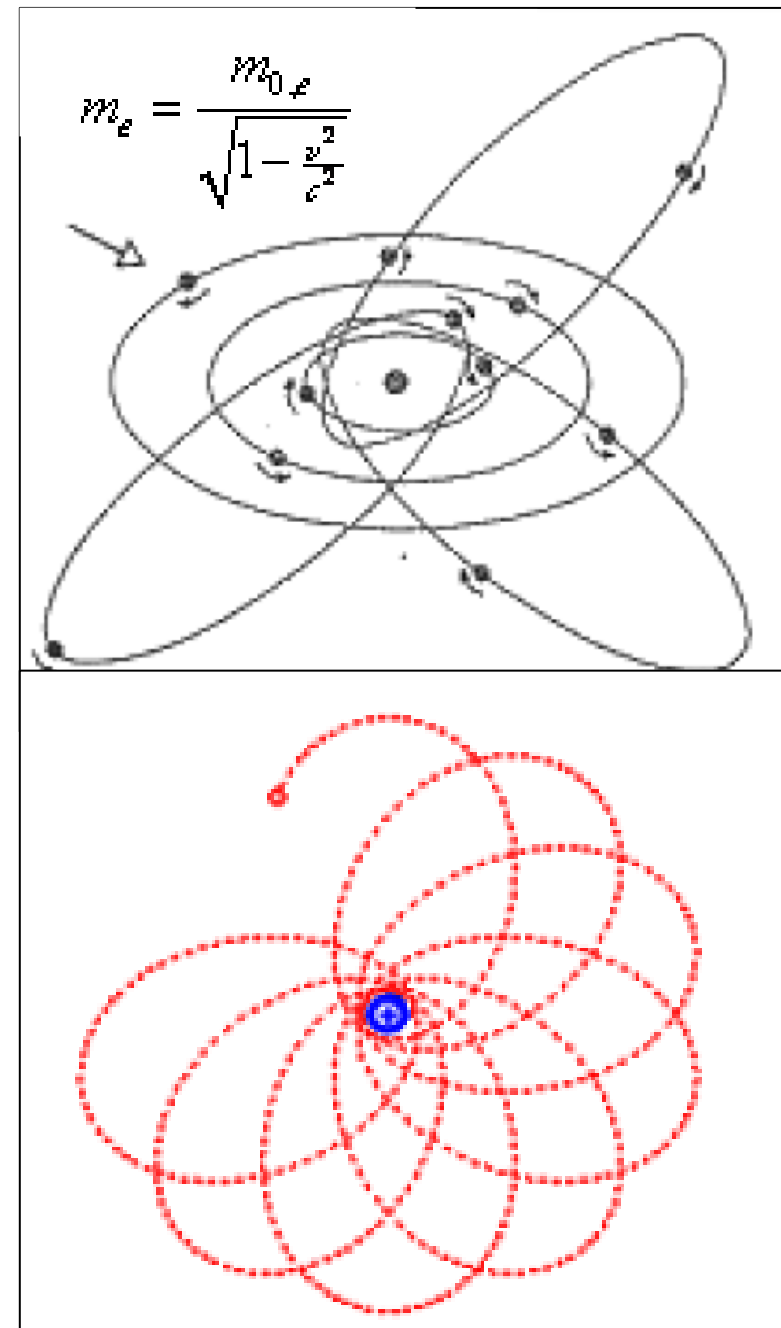
- **Pro n existuje n kvantových drah**, lišících se l , a tedy i tvarem dráhy e-.
- Dráhy se stejným vedlejším kvantovým číslem se pak označují písmeny podle schématu
- l : 0, 1, 2, 3, ...
písmeno: s, p, d, f, \dots
- každý e- je celkem charakterizován 4 kvantovými čísly
- počet e- se řídí Pauliho vylučovacím principem

	s $l=0$	p $l=1$	d $l=2$	f $l=3$	g $l=4$	h $l=5$
$n=1$	1s					
$n=2$	2s	2p				
$n=3$	3s	3p	3d			
$n=4$	4s	4p	4d	4f		
$n=5$	5s	5p	5d	5f	5g	
$n=6$	6s	6p	6d	6f	6g	6h



Kvantové č.	Název	Možné hodnoty	Význam
n	hlavní	1, 2, 3 ...	pořadí elektronové slupky, energetická hladina
l	vedlejší	0, 1, 2, ..., $n-1$	tvar orbitalu (kružnice, elipsa)
m	magnetické	0, $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$	orientace orbitalu v prostoru
s	spin	$\pm 1/2$	"směr rotace" elektronu

- Zavedení vedlejšího kvantového čísla ale nepostačuje k vysvětlení jemné struktury spektrálních čar:
- Sommerfeld nicméně přihlédl k měníci se rychlosti na eliptické dráze – v bodě nejbližším jádru je největší a v bodě nejbližším jádru je nejmenší.
- Protože se elektron po své dráze pohybuje velkou rychlostí blížící se rychlosti světla, tak Sommerfeld ve svém modelu změnil hmotnost elektronu v souladu s teorií relativity. Elektron má tedy největší hmotnost nejbliž u jádra a nejmenší hmotnost nejdál od jádra.
- Vlivem změn hmotnosti elektronu se dráha v nejbližším bodě víc zakřivuje a to vede k **přemístování celé dráhy**, která nabývá tvar růžice.
- **Proto se poněkud liší energie elektronu na drahách se stejným hlavním kvantovým číslem a s odlišným vedlejším kvantovým číslem.** Rozdíl energií elektronu na jednotlivých drahách vede k rozštěpení spektrálních čar.



Sommerfeldův model

- elektrony se pohybují nejen po kruhových, ale také po eliptických drahách
- elektron se pohybuje po elipse, která se otáčí
- elektron se při svém pohybu také otáčí
- neumí vysvětlit všechny vlastnosti atomu, ale poskytuje představu o jeho stavbě

- Uvedený model **dokázal objasnit jemnou strukturu spekter pouze částečně**, nedokázal např. objasnit dublety (dvojice blízkých čar), které souvisí s existencí spinu elektronu.
- Ukázalo se, že **představa pohybu elektronu s určitou hybností po určité dráze je neudržitelná**.
- Energetické spektrum získané na základě Sommerfeldova modelu zahrnuje z relativistických korekcí pouze relativistickou hmotnostní korekci.

Louis Victor Pierre Raymond vévod de Broglie – revoluční hypotéza



- vysvětlil, proč se elektrony pohybují právě na kvantových drahách
- Roku 1923 prohlásil, nejenže se světelné vlny mohou chovat jako částice, ale také obráceně, částice se mohou chovat jako vlny

→ zavedení pojmu **hmotné vlny (vlna místo obíhajícího elektronu)**

Vztah mezi vlnovou délkou hmotné vlny λ , příslušející tělesu o hmotnosti m , pohybujícímu se rychlostí v :

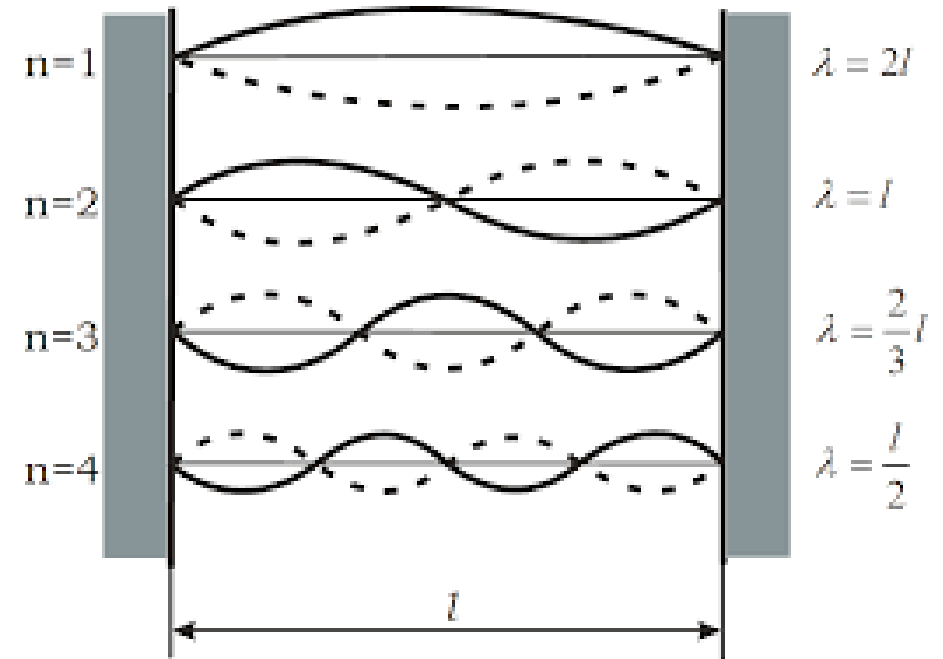
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

p = hybnost částice, h = Planckova konstanta

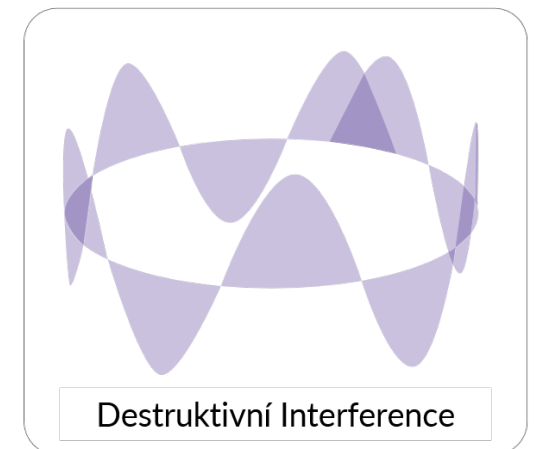
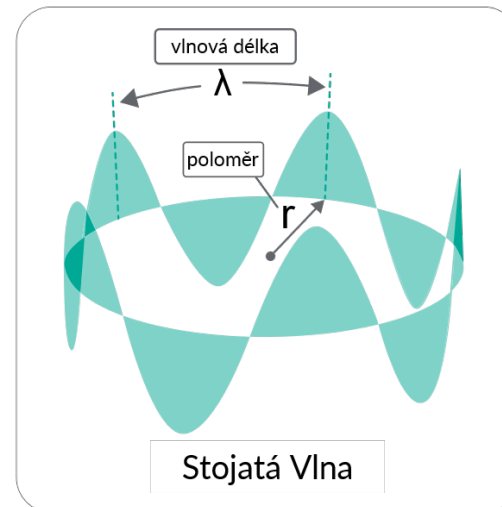
Přítomnost Planckovy konstanty říká, že hmotné vlny jsou kvantové povahy

Stojatá hmotná vlna

- **Vlna má omezený prostor** → je vázána na určité frekvence kmitání
- **nemůže tedy kmitat libovolně**, ale pouze tak, jak je určeno rozměrem a tvarem daného prostoru.
- Vlna příslušného e- v určitém atomu je **poutána elektrickou silou k jádru** a dle de Broglieho je tak omezena na nejbližší okolí kladně nabitého jádra.



n = celé kladné číslo (zde obecně, nejde o kvantové číslo n)

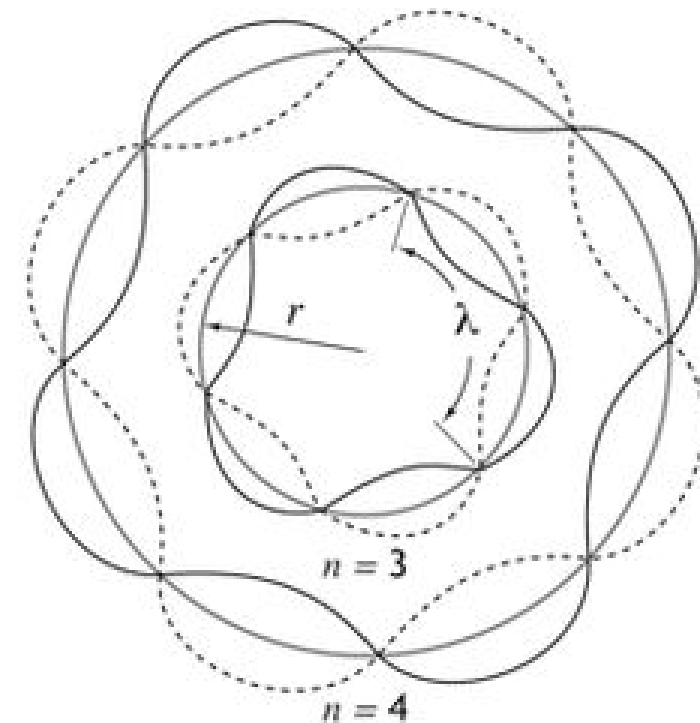


Luis de Broglie

- Aby mohla podle Brogliho hmotná vlna elektronu stabilně „obíhat“ kolem jádra po dráze o poloměru r ,
- musí se na dráhu (obvod) $2\pi r$ vejít **celý počet vlnových délek elektronu**, tj. buď jedna celá vlna λ , nebo 2λ , 3λ atd.
- Pokud by počet vlnových délek nebyl celý, došlo by k interferenci a dráha nebude stabilní.
- Tato **nestabilita se „zformuje“ do kvanta el-mag. záření** → atom vyzáří **foton**, který odnese příslušné množství energie
- ... e- zároveň přejde na nejbližší stabilní dráhu s celočíselným počtem vlnových délek λ elektronu. Podmínka stability dráhy má tvar:

$$2\pi r_n = n\lambda_e, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

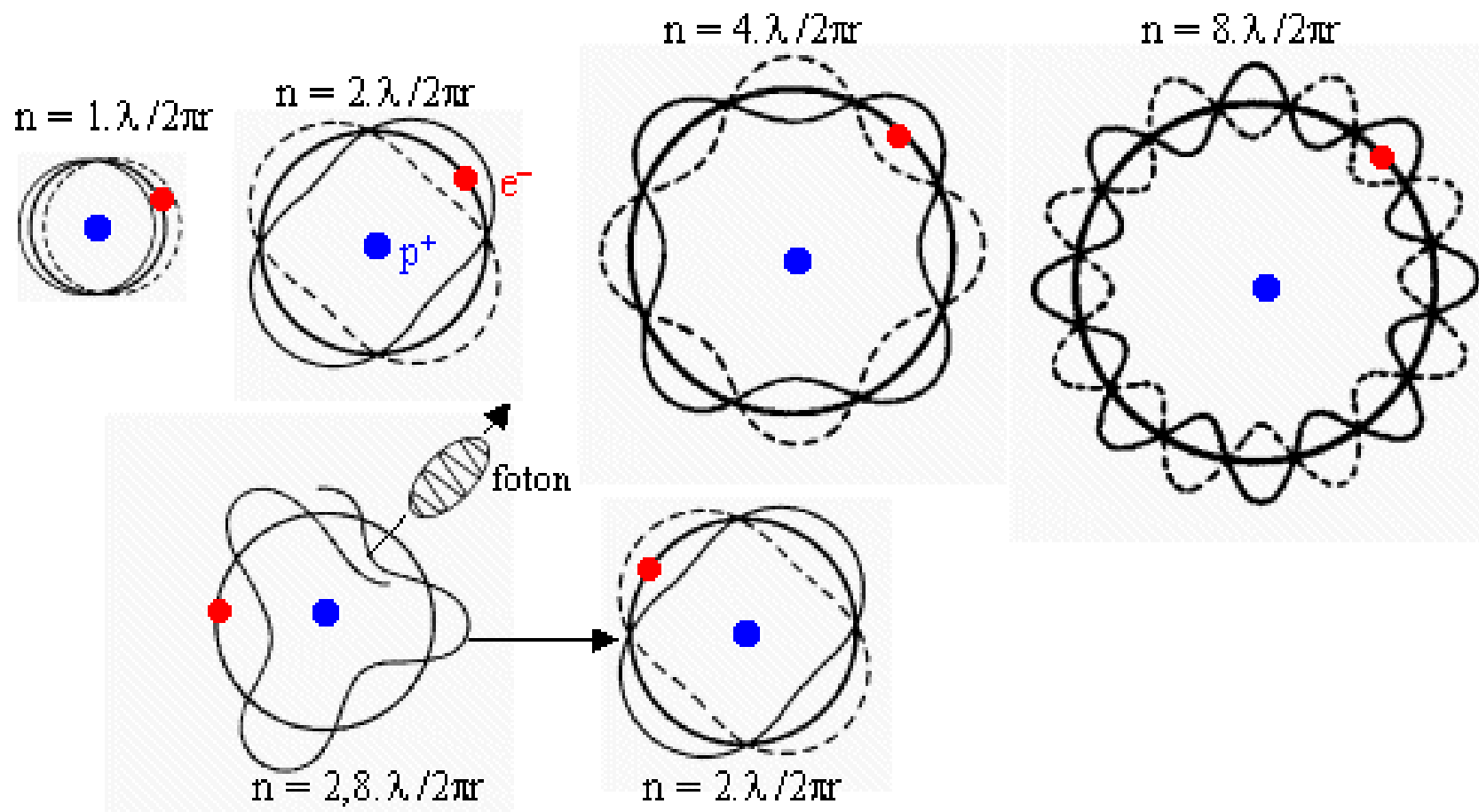
- **n = hlavní kvantové číslo**, určuje nejen pořadí „dovolené“ kvantové dráhy, ale také energii elektronu na této dráze (viz dříve)



$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- λ = wavelength
- h = Planck's constant ($6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
- p = momentum
- m = mass
- v = speed

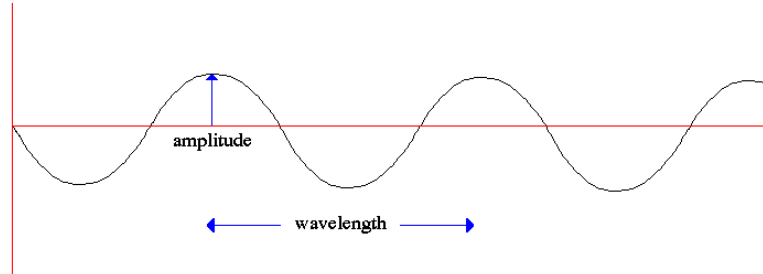
Na dráhu (obvod) $2\pi r$ se musí vejít **celý počet vlnových délek elektronu**,
tj. buď jedna celá vlna λ , nebo 2λ , 3λ atd.



Pokud je vlna kratší nebo delší, dojde k rušivé interferenci a vyzáření „nestability“ ve formě fotonu

Luis de Broglie – hmotná vlna

Normální vlna: nemá začátek a konec



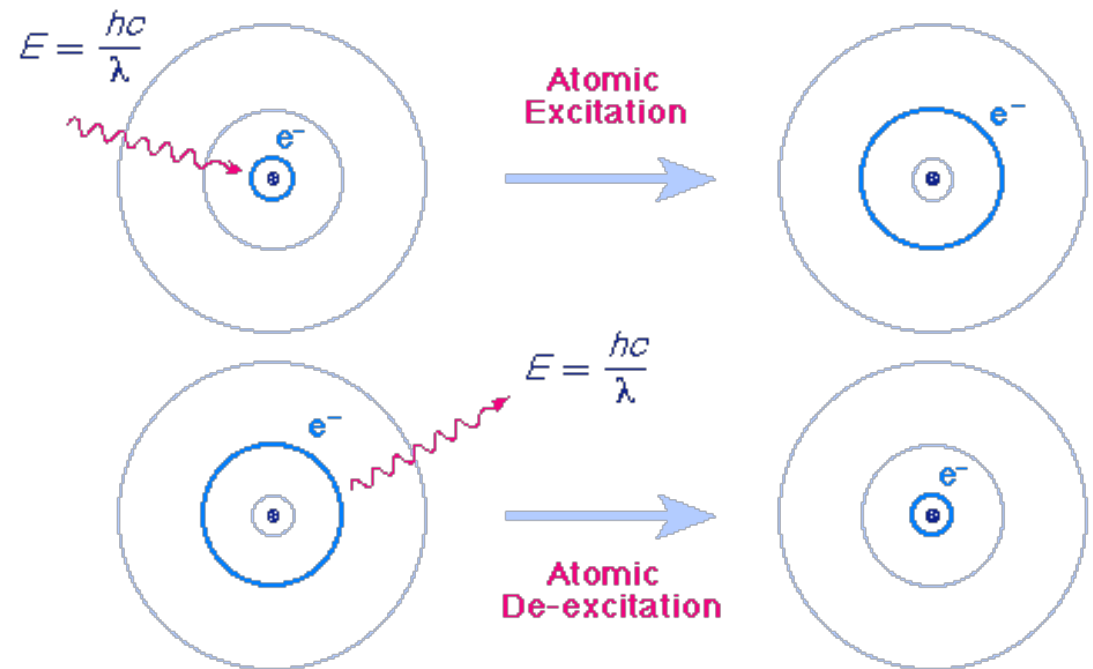
Interakcí různých vln o různé vlnové délce může nicméně vzniknout „wave packet“, viz níže:



So a photon, or a free moving electron, can be thought of as a wave packet, having both wave-like properties and also the single position and size we associate with a particle. There are some slight problems, such as the wave packet doesn't really stop at a finite distance from its peak, it also goes on for every and every. Does this mean an electron exists at all places in its trajectory?

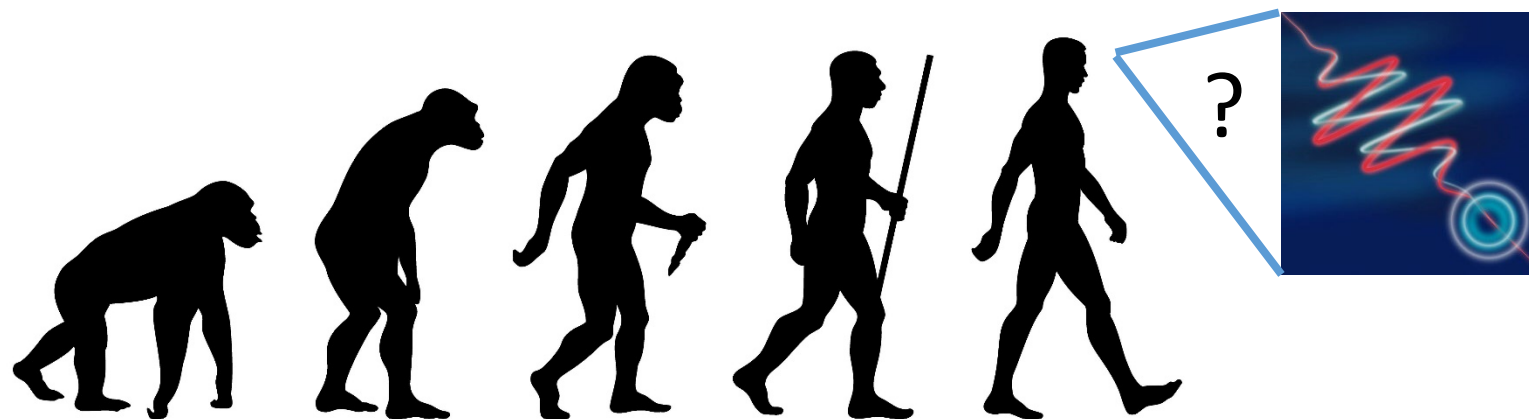
Luis de Broglie – „relativistický planetární“ model atomu

- Obíhá-li e^- na nejnižší kvantové dráze \rightarrow je v **základním stavu** (nevzbuzeném)
- **Přechod na vyšší energetickou dráhu je možný pouze po dodání E:**
 - absorpcí fotonu,
 - působením el-mag sil při průletu nabité částice
 - či při nárazu dalšího atomu
- Je-li dodána vyšší energie než je energie vazbová $|E_n|$, uvolní se elektron z pole jádra \rightarrow **ionizace**



Problémy člověka s mikrosvěttem

- Evoluce člověka – zaměření na makrosvět
- Náš mozek nemá receptory pro mikrosvět
- Nedokážeme mikrosvět vnímat, a tudíž si ho ani představit
→ umíme ho pouze (matematicky) popsat
- Kvantové teorii nerozumí vůbec nikdo (Faymann)



Záhadné vlastnosti mikrosvěta

<https://www.youtube.com/watch?v=p-MNSLsjdo>

- Diskrétní oddělené hladiny - **Energie a ostatní veličiny mohou a nemusí být kvantovány**
- Našimi smysly ani přístroji nejsme schopni rozdíly mezi energetickými hladinami detekovat → zdá se nám to kontinuální - projeví se ale např. ve spektru atomu (díky přeskokům e- mezi hladinami).
- Již bylo zmíněno - Kvantování objevil **M. Planck** při studiu vlastností záření absolutně černého tělesa.

Planck studoval vyzařování černého tělesa na jeho teplotě a **zjistil, že těleso vyzařuje jen elmag. záření určitých vlnových délek.**

Pro energii tohoto záření odvodil vztah:

$$E = h\nu,$$

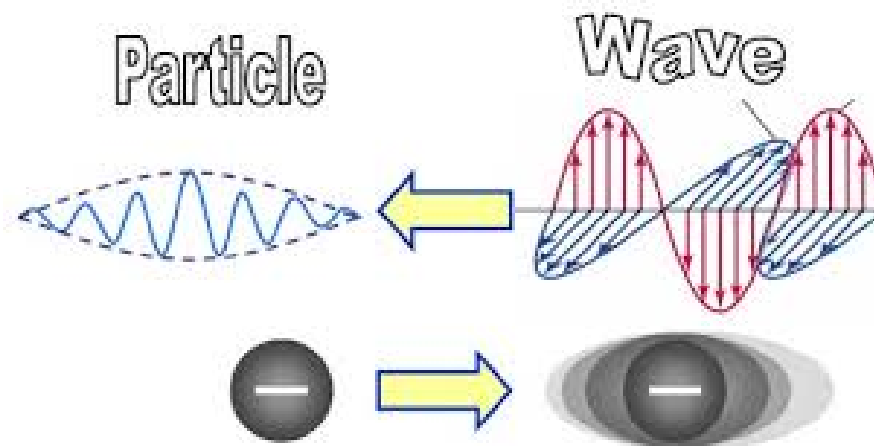
kde ν je frekvence záření a h je Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^*$)

$$* \text{ J}\cdot\text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

I. Duální povaha elektronu

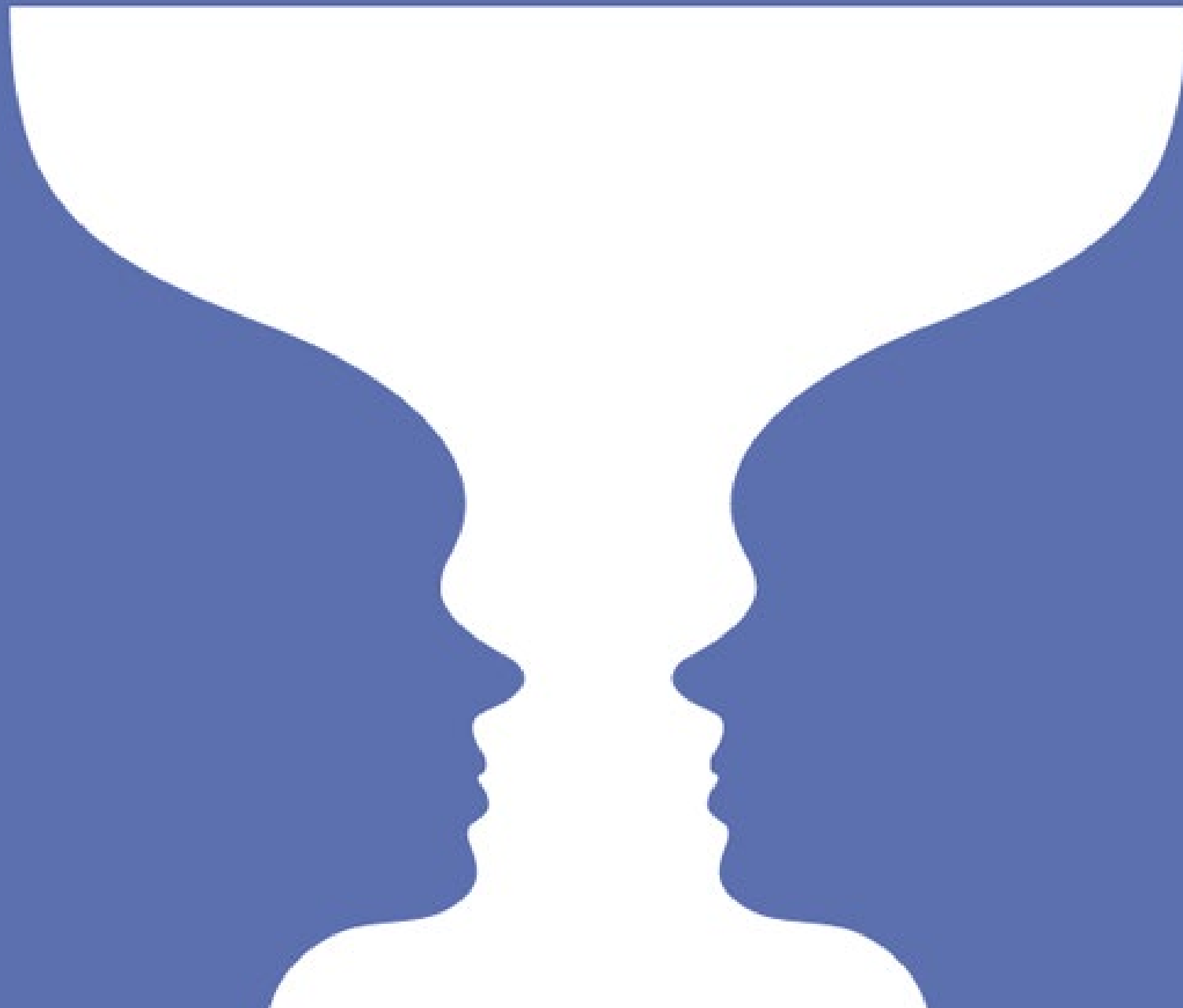
– částicově vlnový dualismus (též → fotoelektrický jev)

- Není to **ani částice ani vlna**, náš mozek **tomu dává interpretaci** – jednou vnímáme jako částici jindy jako vlnění



Dle: Prof. Petr Kulhánek
- MatFyz

Částicově-
vlnový
dualismus –
příklad 1



Částicově-vlnový dualismus – příklad 2

- Obdobně demonstrující dav – vidíme-li z dálky, pozorujeme jakési vlnění
- Pokud se ale objeví nějaký plamenný řečník, všichni se kolem něho shluknou a vytvoří se jakási částice
- Dav opět není ani vlnění ani částice



Dle: Prof. Petr Kulhánek - MatFyz

Částicově- vlnový dualismus – experimenty

Experiment potvrzující vlnový charakter e-:

Interference proudu elektronů na krystalech,
štěrbinový experiment

<https://www.youtube.com/watch?v=JIsPC2BW UI>.

Zajímavý článek + „vědecký“ komiks:

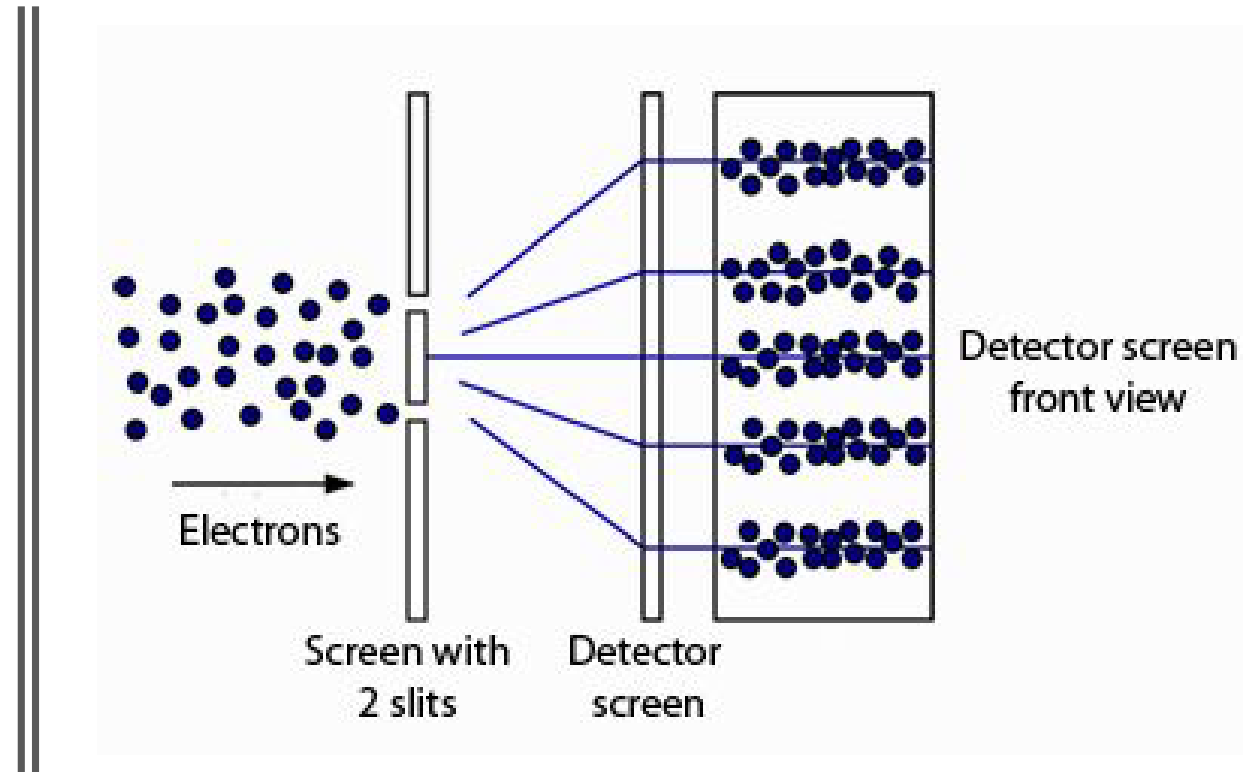
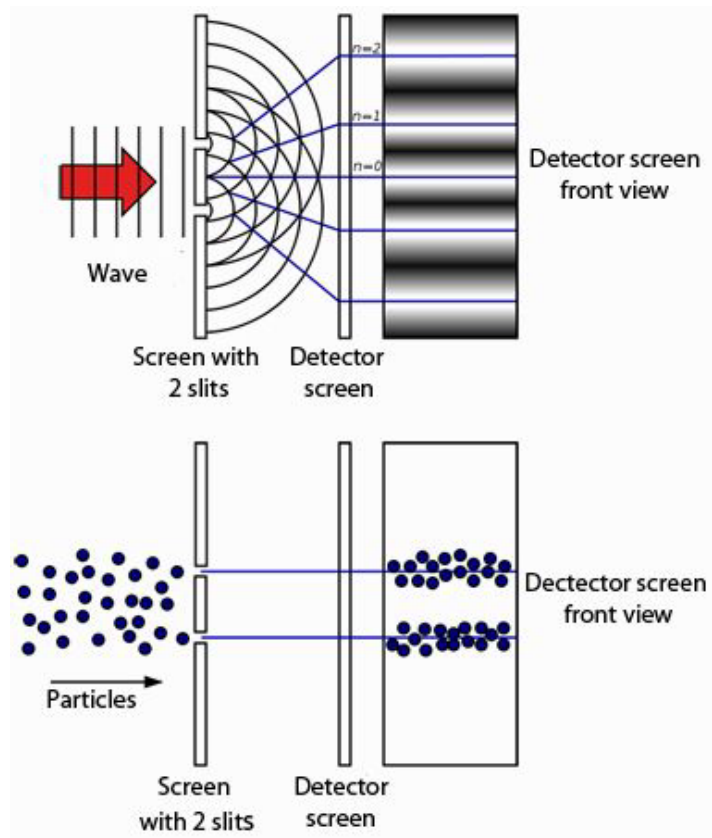
<https://nielsbohr.webnode.cz/zahada-sterbinoveho-experimentu/>

Experiment potvrzující korpuskulární charakter e-:

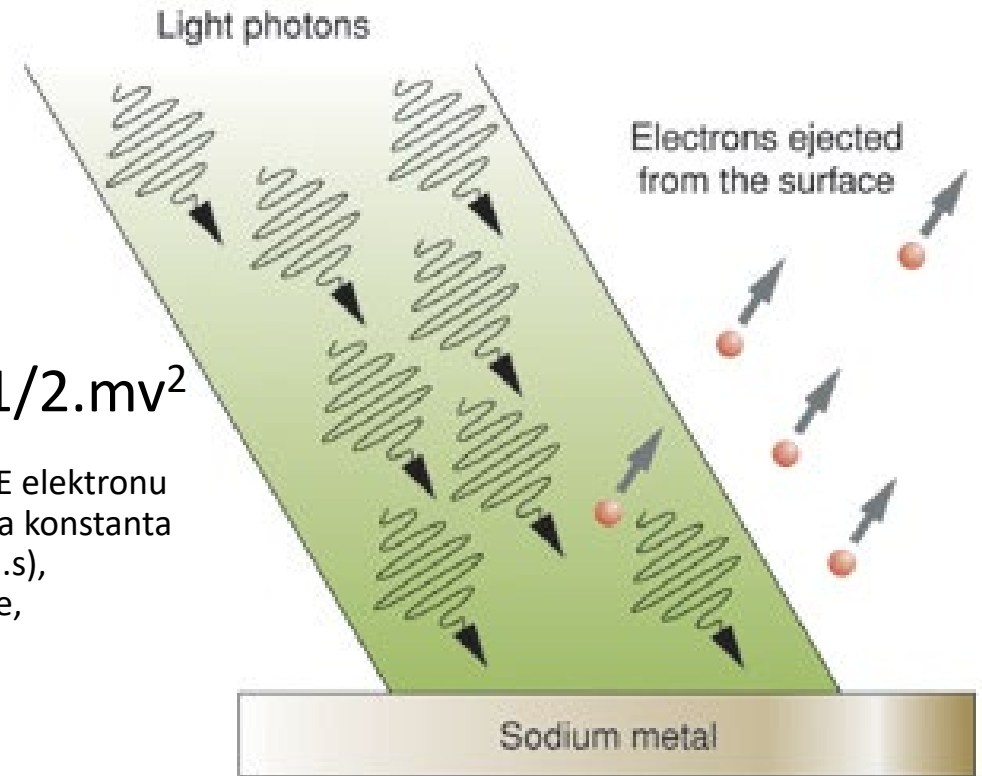
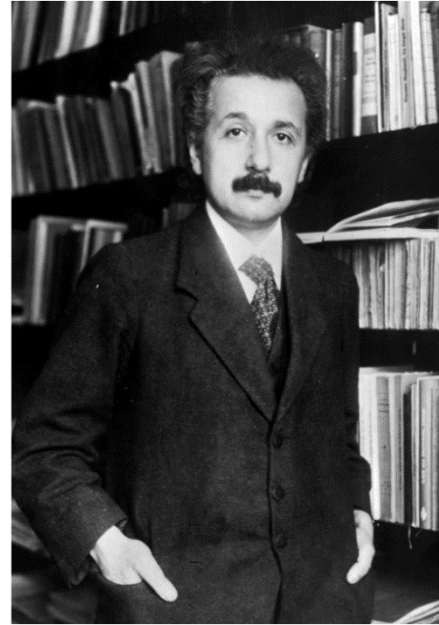
Tok elektromagnetických vln při dopadu na tuhou podložku předává této podložce měřitelnou hybnost (pohyb nebo **fotoelektrický jev**).

<https://www.youtube.com/watch?v=MFPKwu5vugg>

Dvouštěrbinový experiment



Fotoefekt



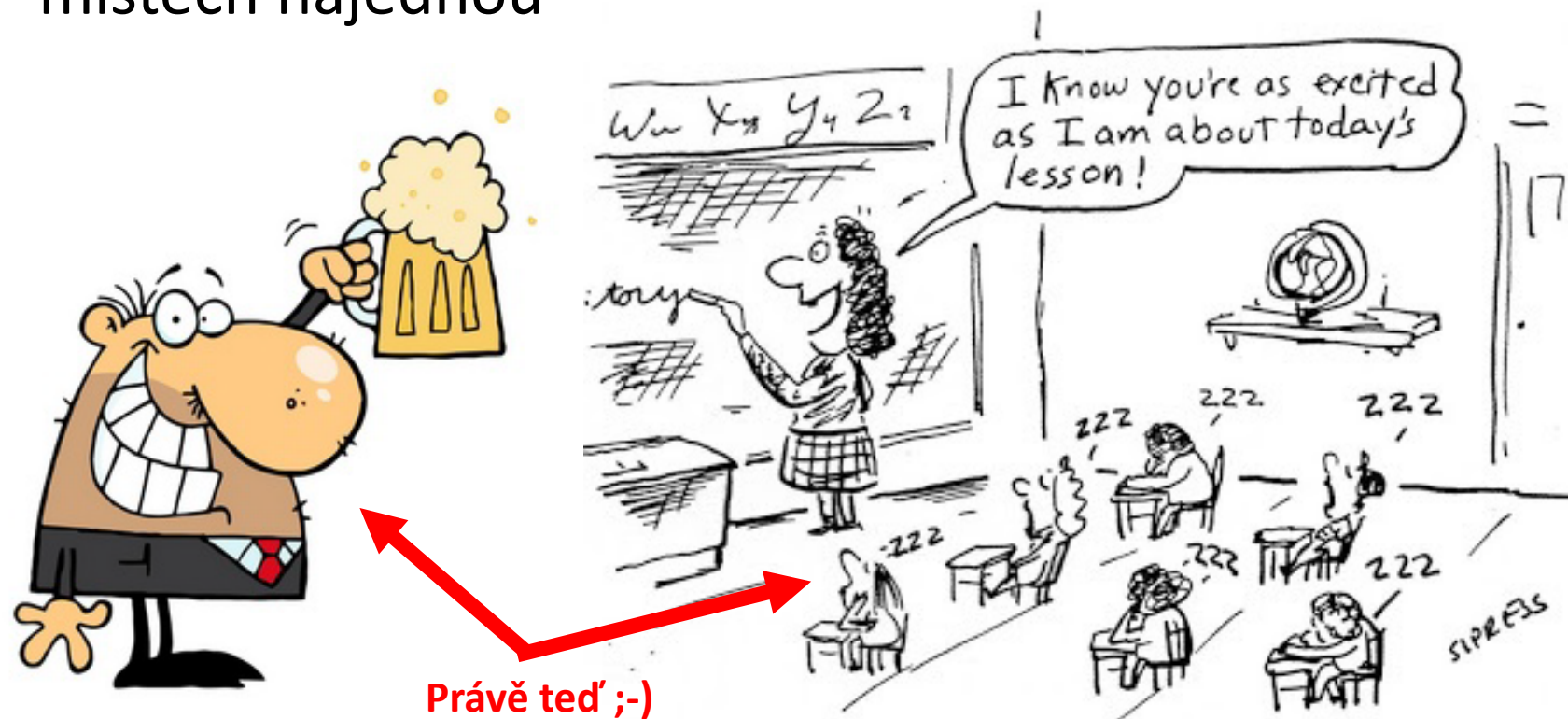
$$h \cdot f = E_v + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

E_v = vazebná E elektronu
 h je Planckova konstanta
(6.62×10^{-34} J.s),
 f je frekvence,

- Dopadající záření uvolňuje z kovu elektrony.
- Pro každý kov existuje určitá minimální frekvence f_0 dopadajícího světla, od které počínaje dochází k fotoelektrickému jevu (záření s frekvencí f menší než f_0 není schopno uvolnit elektrony z kovu).
- Kinetická energie vystupujících elektronů **nezávisí na intenzitě dopadajícího světla.**
- Kinetická energie elektronů uvolněných z materiálu **se zvětšuje s rostoucí frekvencí dopadajícího záření.**

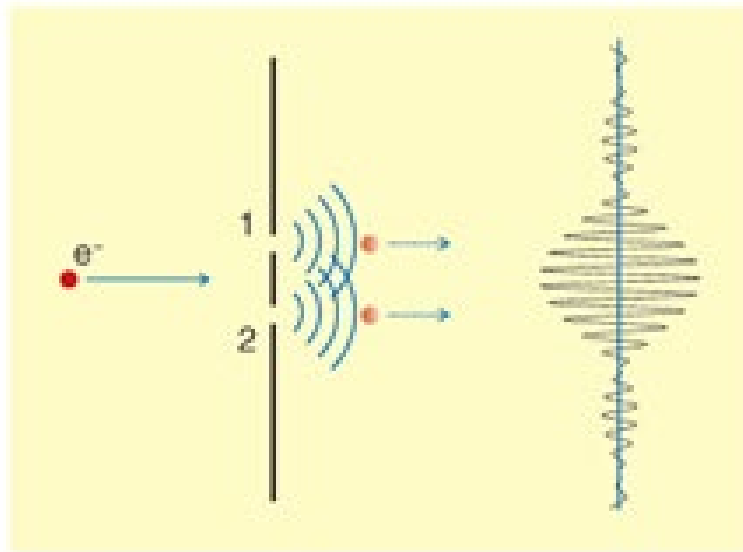
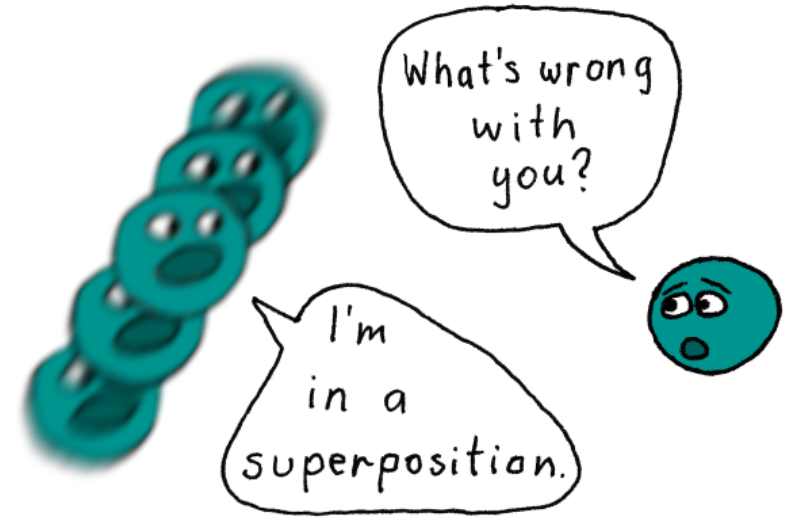
II. SUPERPOZICE STAVU:

- V mikrosvětě můžete sedět zde na přednášce a zároveň popíjet svůj drink v oblíbené hospůdce
- Makro-objekty nemohou být zároveň na více místech najednou

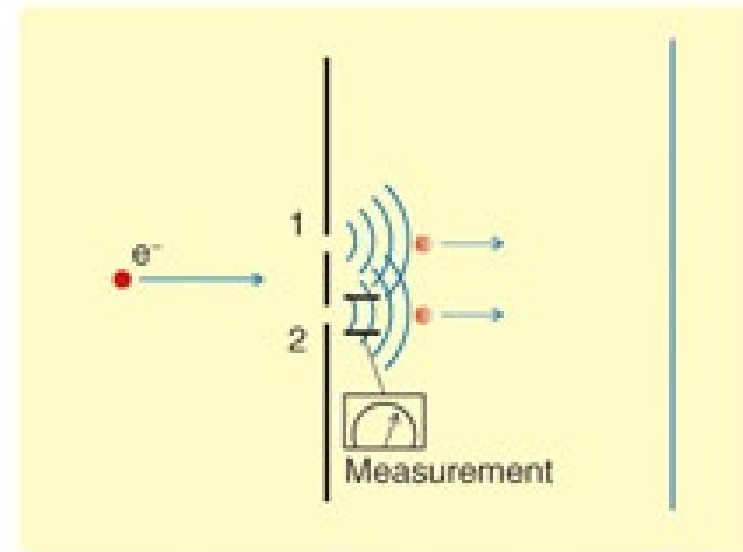


II. SUPERPOZICE STAVU:

- Elektron prochází oběma otvory naráz
- Zároveň se jeví jako částice a vlna → interference sama se sebou (charakteristický dopadový obrazec)
- Platí superpozice stavu



(a) Single-electron interference



(b) No interference: disappearance caused by measurement.

Záhadné vlastnosti mikrosvěta

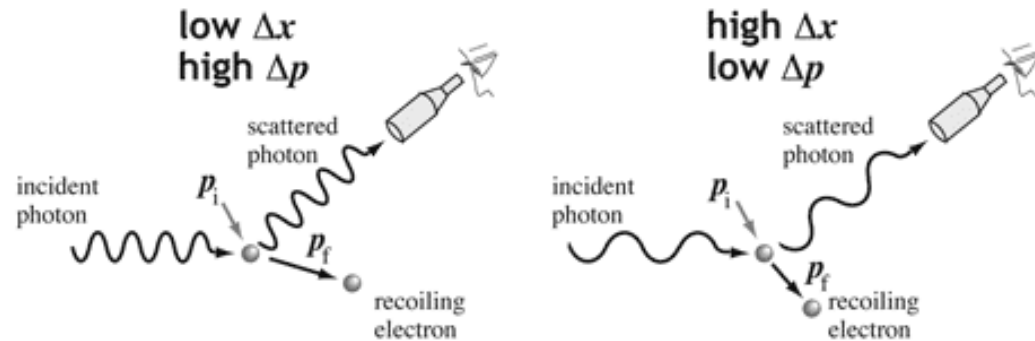
III. Heisenbergův princip neurčitosti



The Heisenberg Uncertainty Principle

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

Δx = uncertainty in position
 Δp = uncertainty in momentum
 $\hbar = h / 2\pi$



A high frequency (short wavelength) photon gives a more accurate measurement of position, but it causes a greater uncertainty in the momentum of the recoiling electron. The act of measurement itself limits how well-defined the electron's position and momentum can be. The indeterminacy derives from the quantum wave nature of the electron itself.

- *kanonicky sdružené veličiny [poloha a hybnost atd.] můžeme současně určit pouze s určitou minimální nepřesností.*

Více např. zde:

<https://nielsbohr.webnode.cz/zahada-sterbinoveho-experimentu/>

- **Velký otvor**, kterým pouštím světlo – prošlo hodně částic, znám dobře rychlost částice, ale nevím, kudy přesně prošla (poloha)
- A naopak, použiji-li **velmi malý otvor**, budu přesně vědět, kudy částice prošla (pozici), ale nebudu moci změřit její rychlost
- Malá štěrбина totiž vlnu ohne – zpřesnění jednoho měření znepřesní měření jiné -> Heisenbergovy rovnice neurčitosti
- **Nemožnost měření pozice a rychlosti zároveň (např. rčení W. Pauliho „Člověk může vidět svět s p-okem [okem hybnosti] a může jej vidět s q-okem [okem polohy], avšak pokud bude chtít otevřít obě oči současně, potom bude zmatený.**

The "Measurement Problem"

➤ A low energy probe (large wave length) wouldn't know find where electron is.

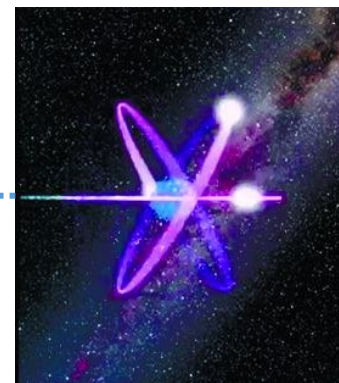
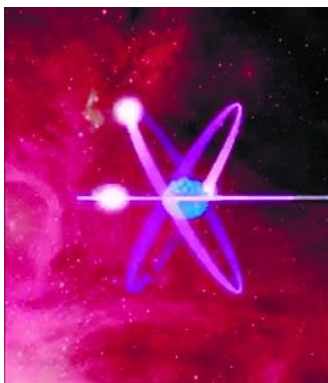
➤ A high energy probe (short wave length) will move it from where it was.

Způsob interakce (měření)
má zásadní vliv na výsledek



Záhadné vlastnosti mikrosvěta

- **VI. Nedeterminismus** kvantové teorie (mikrosvěta) – Experimenty v kv. teorii nejsou opakovatelné → statistika, nelze předpovědět, jak experiment dopadne
- **V. Princip nerozlišitelnosti** – dvě stejné částice nelze rozlišit (označit)
- **VI. Kvantová provázanost** – určením stavu jedné částice je ovlivněn stav druhé částice

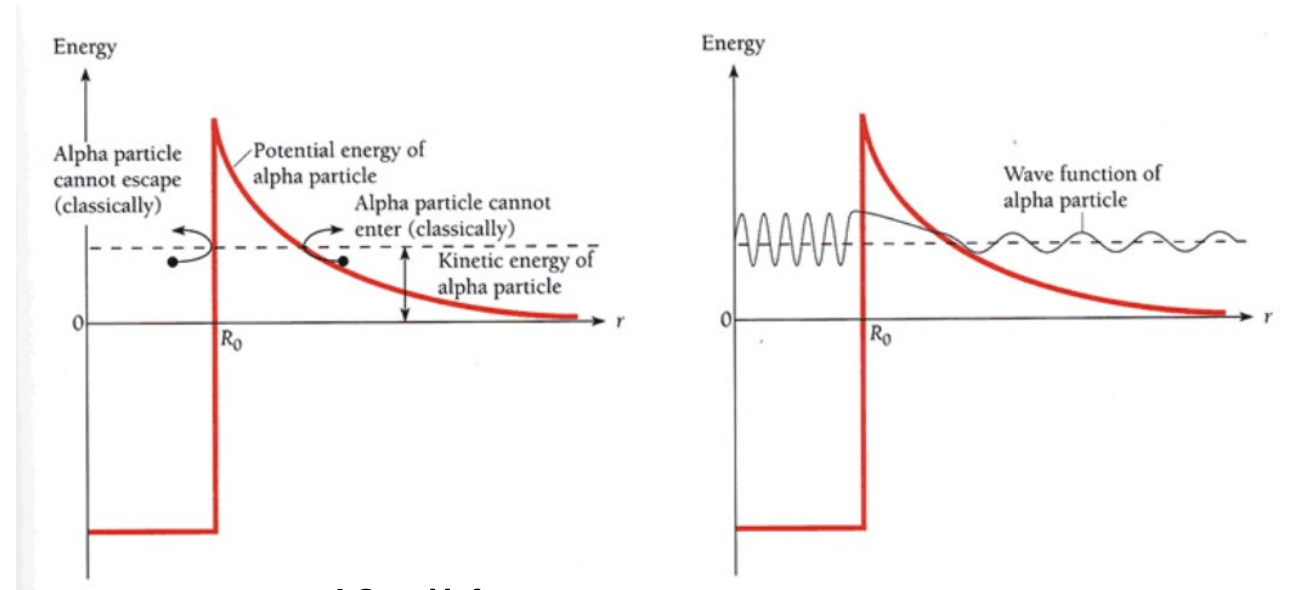


Záhadné vlastnosti mikrosvěta

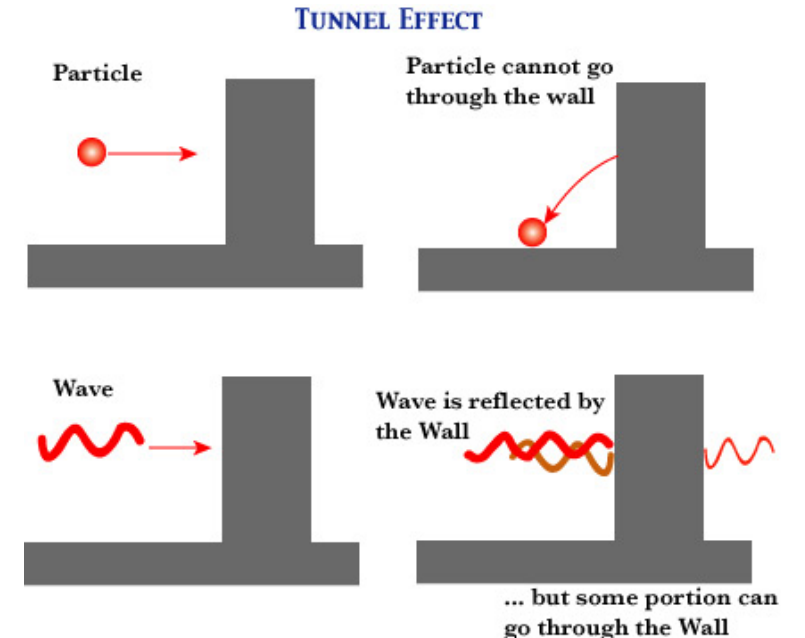
- **TUNELOVÝ EFEKT**

- částice mohou prostupovat zakazanými oblastmi (přes překážku, na kterou nemají energii) – tunelový jev

you may imagine the wall as the "wall of potential", in that any particle must have an energy, greater than a certain amount, for going through it and appearing on the other side. But even when the particle has a lower energy than that, it can go through the wall, just as a wave can appear on the other side (since its oscillation can go through the wall). Since particles as well as light have particle-wave duality, matter (with an appropriate energy) can go through the wall according to quantum mechanics. This can explain the spontaneous disintegration of radioactive substances (such as radium); even though the strong interaction within the nucleus forms a high wall of potential, alpha-disintegration can occur because of the tunnel effect.



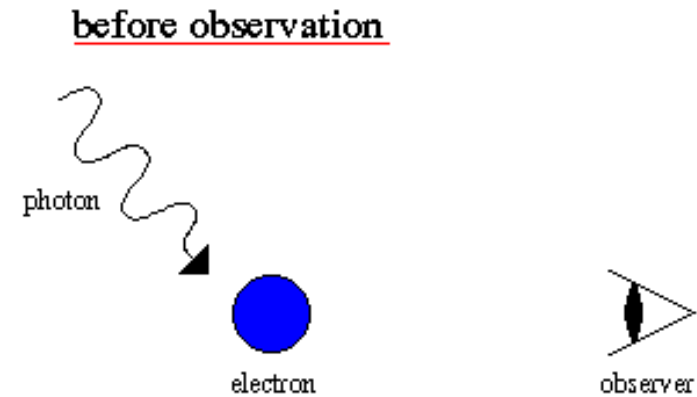
Emise alfa částic



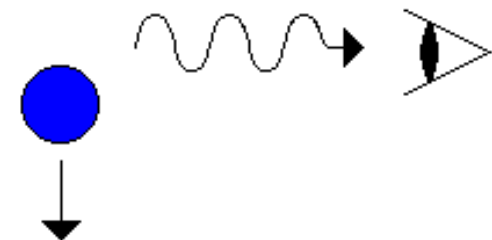
MĚŘENÍ SE STÁVÁ SOUČÁSTÍ VÝSLEDKU

- Asi nejpodivnější: Sami se stáváme součástí experimentu
- Měříme-li stůl, měření mu neublíží. Musí na něj ale dopadat fotony, abychom ho mohli změřit – alespoň jeden foton se od stolu musí odrazit, aby bylo možné zjistit jeho polohu
- V mikrosvětě ale foton měřenému systému ublíží
- **Akt měření objekt velmi silně naruší, většinou úplně zlikviduje.**
- Změřím-li polohu elektronu na základě fotonu, co se od něj odrazil, změnil jsem stav elektronu. Pokud pak změřím jeho rychlost, dostanu něco zcela jiného, než pokud bych rychlost měřil jako první a pak až jeho pozici!!!
- **MĚŘENÍ JE SOUČÁSTÍ KVANTOVÉ TEORIE**

Measurement Problem in Quantum Mechanics



after observation

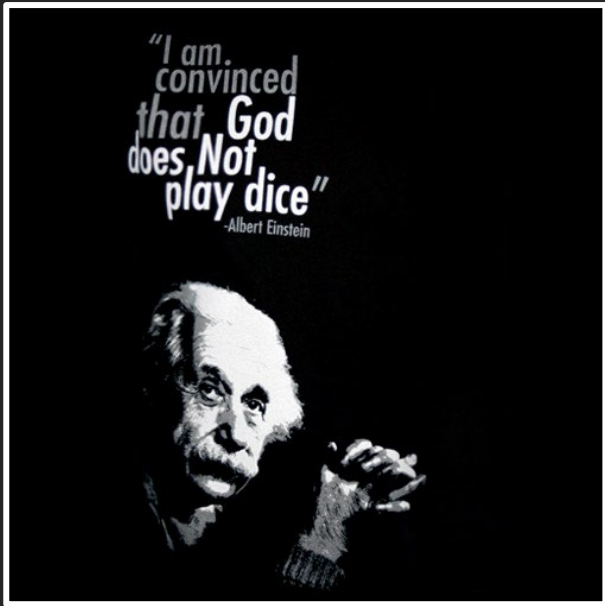


the act of observing effects the position and energy of electron

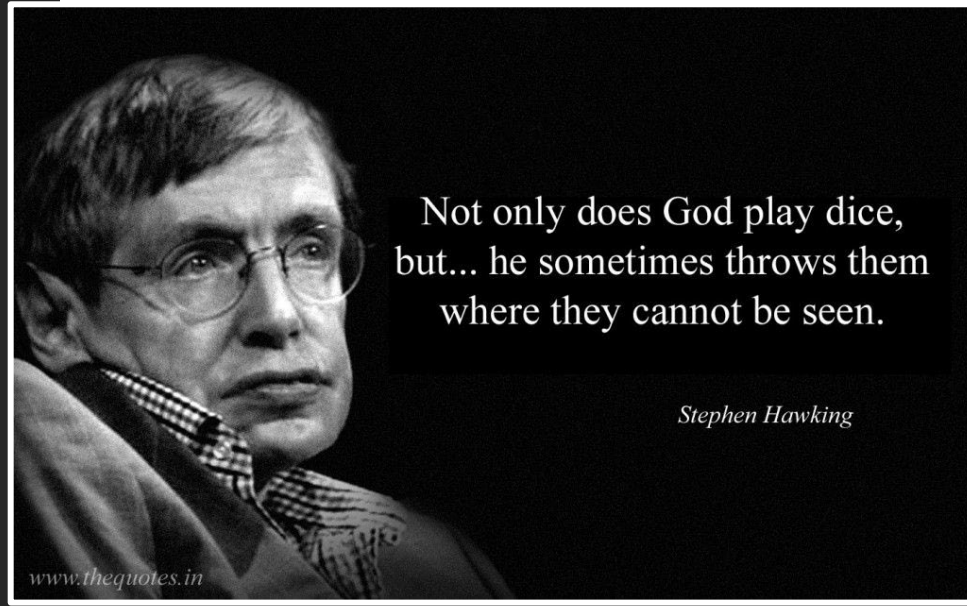
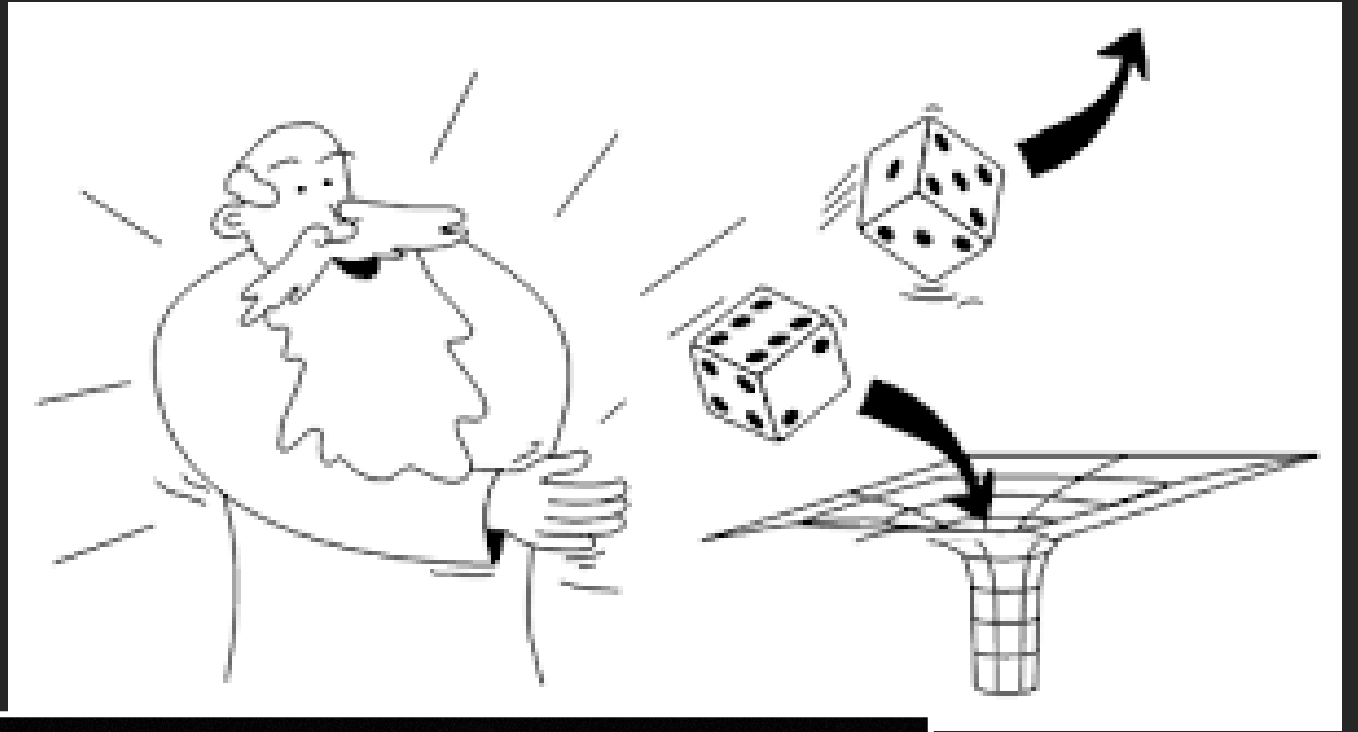
MĚŘENÍ SE STÁVÁ SOUČÁSTÍ VÝSLEDKU

- Sekera – štípu dříví, odštěpky jsou pokaždé menší než byl původní celek – ve všech smyslech – menší bude hmotnost třísek, jejich objem, počet atomů v nich atd.
- V mikrosvětě ale k rozbití nějaké částice můžeme použít pouze jinou urychlenou elementární částici, tzn. **musíme do systému dodat hmotnost a energii → zlomky, které z toho vylétnou budou mít tak větší hmotnost než měl původní celek**



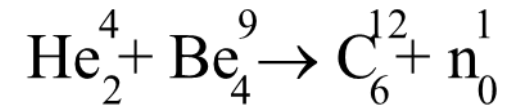


versus



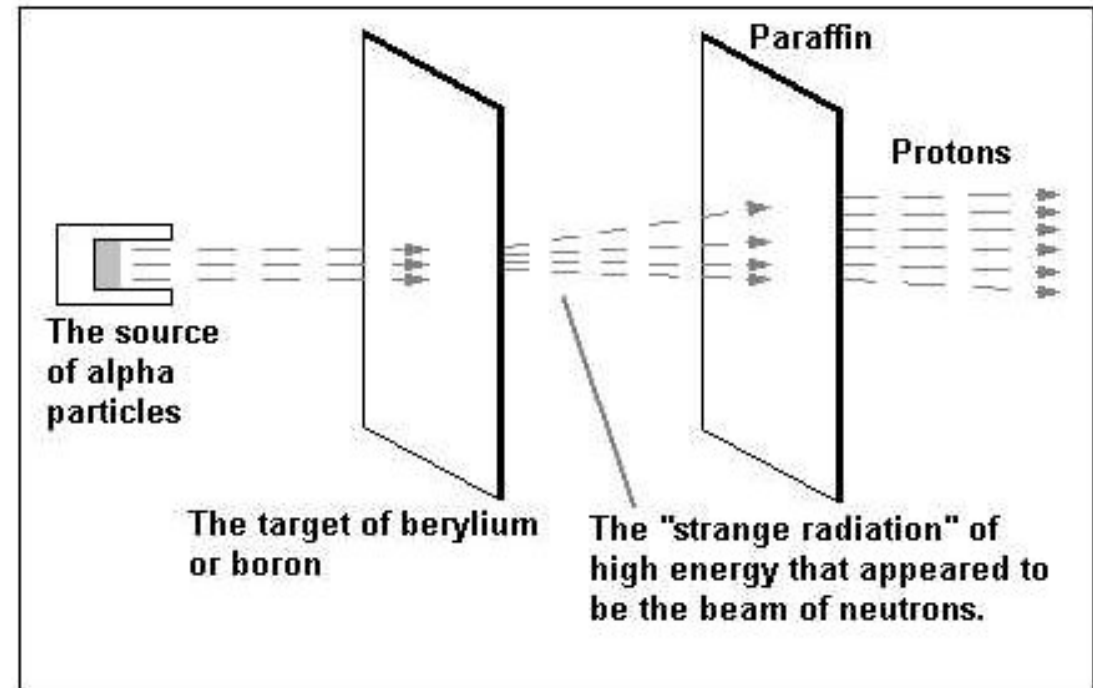
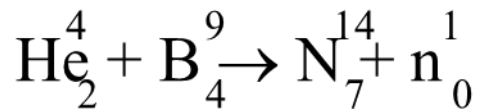
Objev neutronu

- V roce 1930 bombardovali **Walter Bothe** a **H. Becker** berylium ${}^9_4\text{Be}$ částicemi $\alpha \rightarrow$ pozorovali emisi energetického záření, které se nezahýbalo v magnetickém poli.



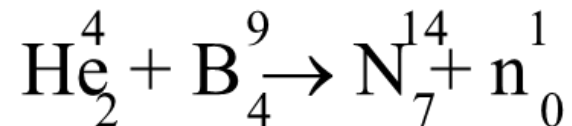
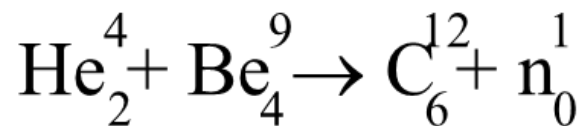
- Zprvu se domnívali, že se jedné o záření γ .
- Později manželé **Iréne a Fréderick Joliot Curieovi** zjistili, že toto záření vyráží protony z parafínu.

- **Chadwick** pochopil, že probíhají reakce (níže).
- Hmotnost neutronu určil ze znalosti hmotností ${}^{11}_5\text{B}$ a ${}^{14}_7\text{N}$.



Objev neutronu

- 1932 **James Chadwick** (1935 Nobelova cena za fyziku) – pracoval s Rutherfordem, objev neutronu
- Později vyšlo najevo, že němečtí vědci objevili neutron ve stejnou dobu. Ale objevitel **Hans Falkenhagen** se obával zveřejnění svých výzkumů.
- Když se Chadwick dozvěděl o Falkenhagenovu objevu, nabídl mu, že se o Nobelovu cenu podělí. Falkenhagen ale skromně odmítl.



James Chadwick



Hans Falkenhagen