

Ako vieme, že svet riadi kvantová mechanika?



Juro Tekel
FMFI UK

28.2.2019, Diera do sveta, Lipt. Mikuláš

**Čo je to
kvantová
mechanika?**

$$\psi_0(Q) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-Q^2/2}$$

$$\psi_n(Q) = A_n H_n(Q) e^{-Q^2/2}$$

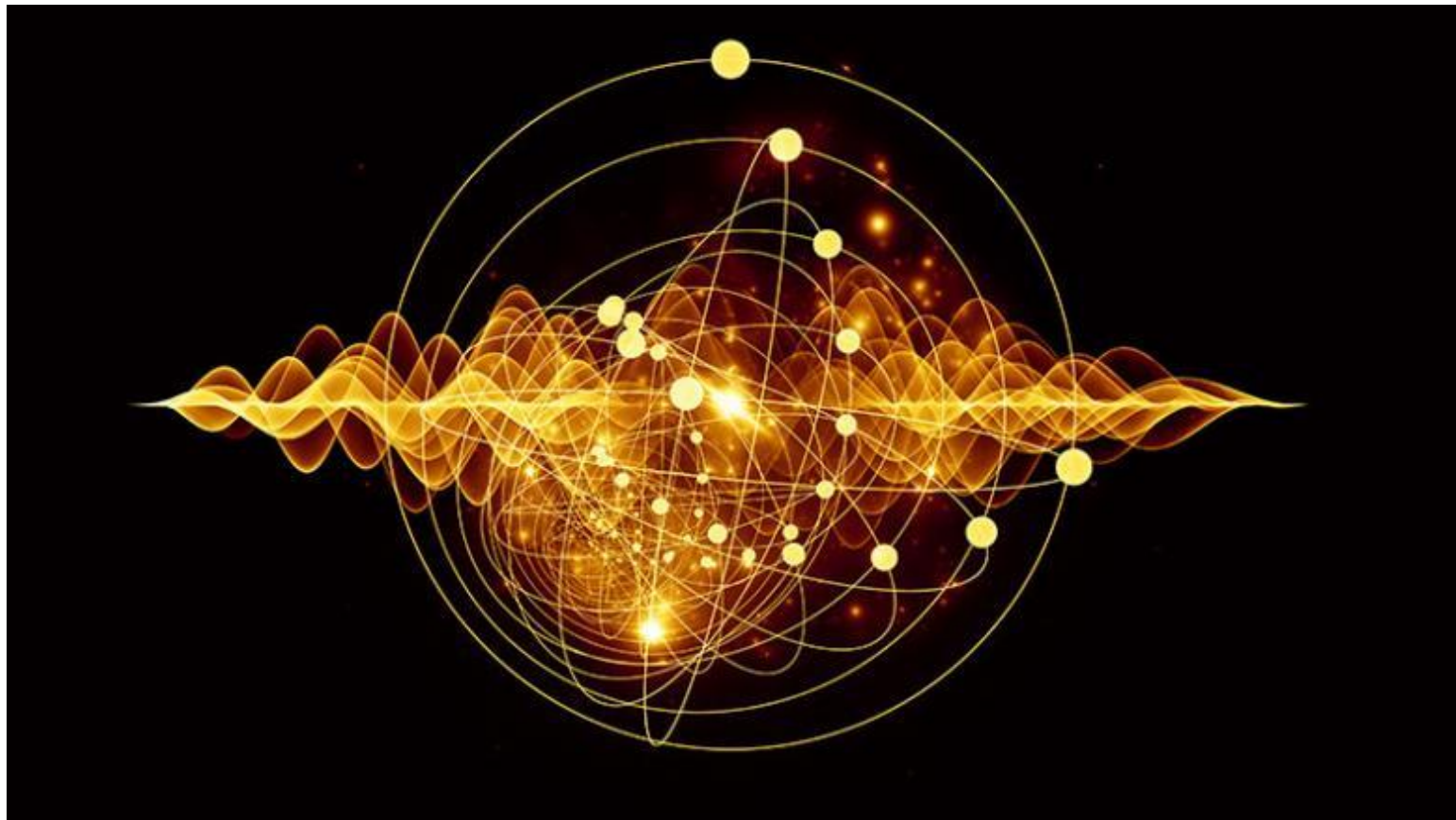
$$\langle \psi | \psi \rangle = \sum_{n=1}^{\infty} |a_n|^2 = 1$$

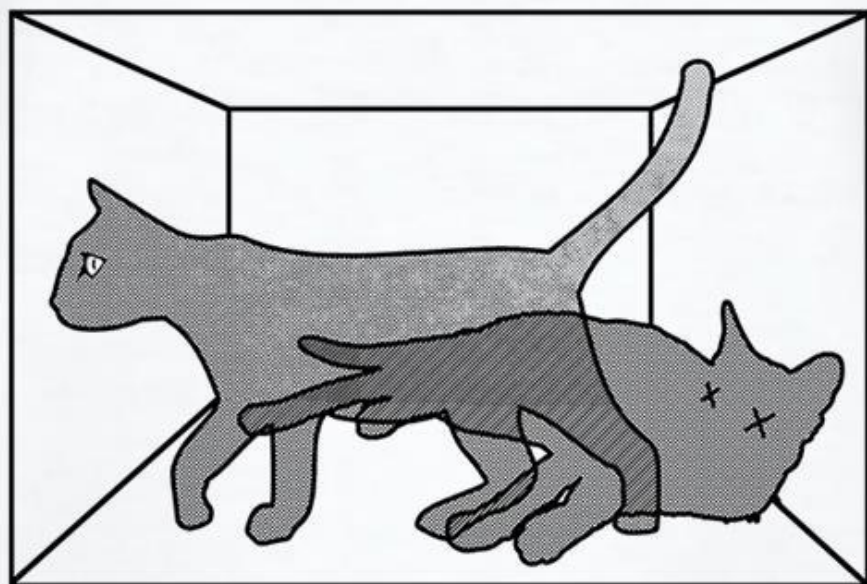
$$\langle f \rangle = \int \psi^*(r,t) f \psi(r,t) dV = \langle \psi | \hat{f} | \psi \rangle$$

$$\langle A \rangle = \sum_{n=1}^{\infty} |a_n|^2 A_n$$

$$\psi(r,t) = \psi(r) \varphi(t)$$

$$\psi(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} |a_n|^2 A_n \left(\frac{-iEt}{\hbar} \left(\frac{d}{dQ^2} + Q^2 \right) \right) \psi$$





**SCHRÖDINGER'S CAT IS
ALIVE**

BUT DOGS CAN OBSERVE
THE WORLD, WHICH MEANS
THAT ACCORDING TO
QUANTUM MECHANICS
THEY *MUST* HAVE SOULS.

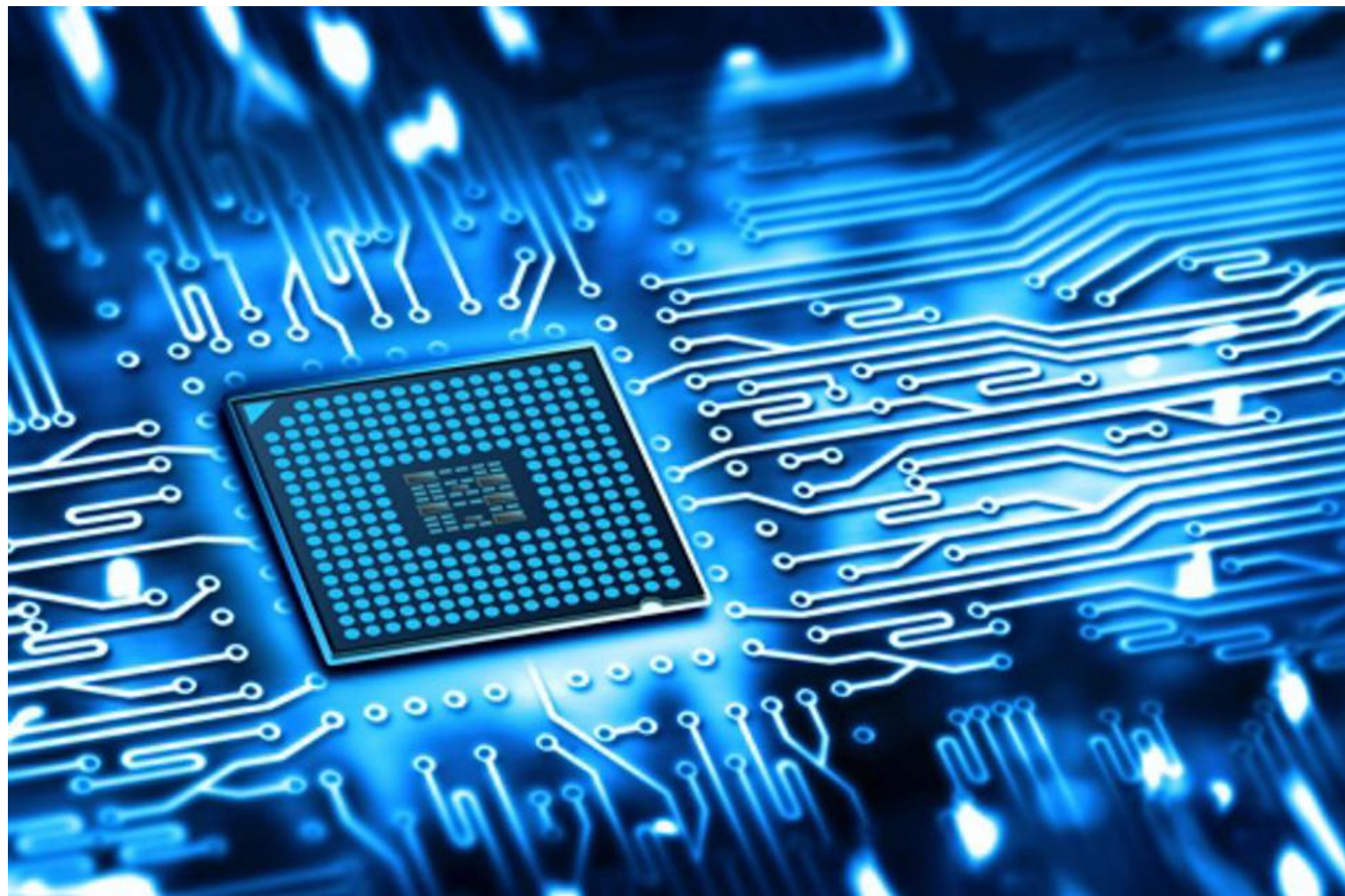


PRO TIP: YOU CAN SAFELY
IGNORE ANY SENTENCE THAT
INCLUDES THE PHRASE
"ACCORDING TO
QUANTUM MECHANICS"













1.9^m



Railroad Crossing 0.2 mi



LIMIT
40



Speed
30^m
h

NW North River Dr

Arrival

8:15^P
M



GARMIN



Kvantová mechanika

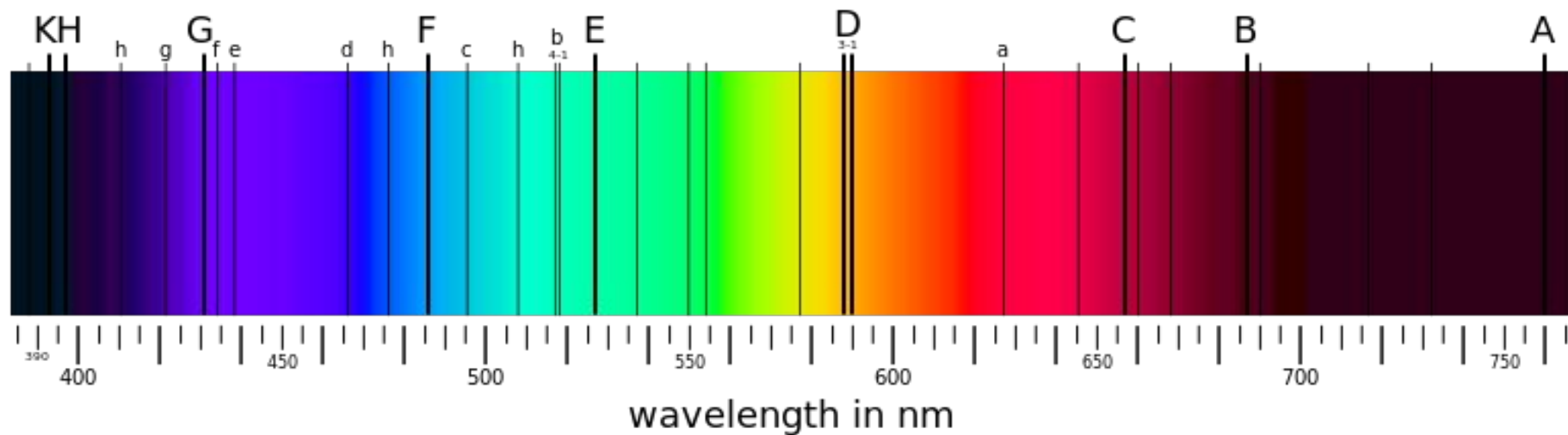
- **Všetko vo svete** - elementárne častice, svetlo, molekuly, mačky, autobusy, planéty - **má vlnové aj časticové vlastnosti**.
- Pre niektoré veci sú výraznejšie vlnové vlastnosti, pre niektoré časticové.
- Časticovosť a vlnovosť vecí sa od seba nedá úplne oddeliť.
- To vedie na veľmi veľa veľmi divných vecí.

Kvantová mechanika

- **Všetko vo svete** - elementárne častice, svetlo, molekuly, mačky, autobusy, planéty - **má vlnové aj časticové vlastnosti**.
 - Pre niektoré veci sú výraznejšie vlnové vlastnosti, pre niektoré časticové.
 - Časticovosť a vlnovosť vecí sa od seba nedá úplne oddeliť.
 - To vedie na veľmi veľa veľmi divných vecí.
-
- Základy kvantovej mechaniky sa objavili do roku **1926**.

**Niečo nebolo
úplne v poriadku
už dávno
predtým**

Slnčné spektrum



Spektrá chemických prvků



Hydrogen



Sodium



Helium



Neon



Mercury

Spekrá chemických prvkov

- V roku 1885 objavil v čiarach prekvapivú štruktúru.
- Charakterizovaná celými číslami.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



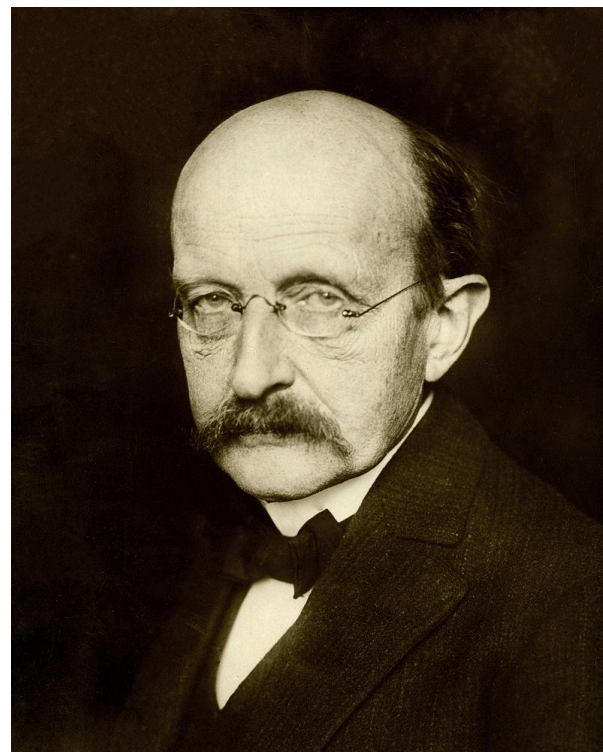
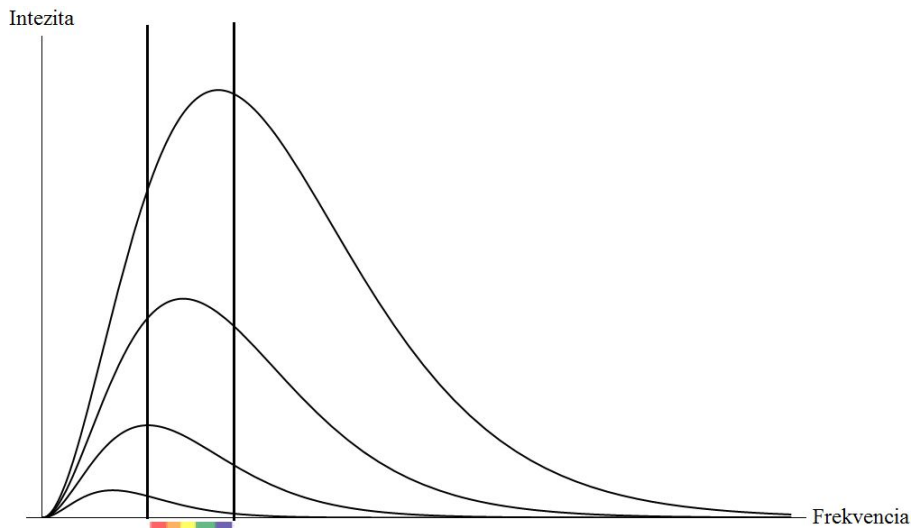
Johann Balmer (1825 - 1898)

Začiatky kvantovej mechaniky



Žiarovka a Max Planck

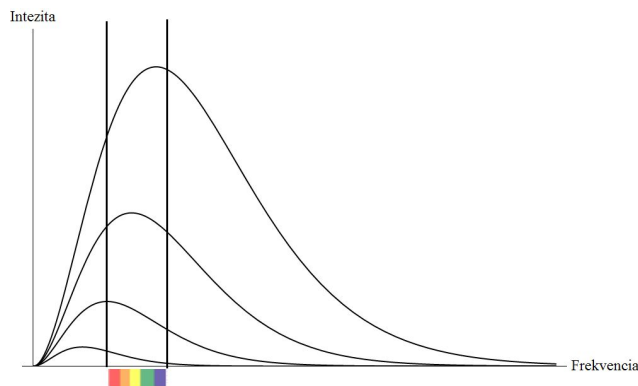
- Ako presne vyzerá svetlo, ktoré vyžaruje rozžeravené vlákno žiarovky?
- Koľko svetla akej vlnovej dĺžky?
- Na **konci 19. storočia**.



Max Planck (1858 – 1947)

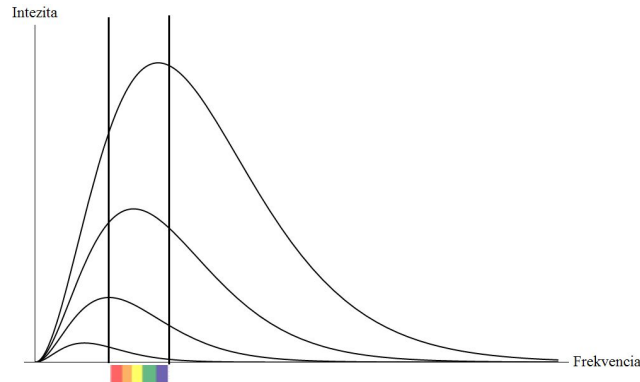
Žiarovka a Max Planck

- **Žiarovka sa nedá rozsvietiť!**
 - Energia elektromagnetického žiarenia je úmerná jeho frekvencií.
 - Svetlo žiarovky by malo obsahovať všetky frekvencie.
- Celá energia, ktorú vláknu pri zahrievaní žiarovky dodáme, sa stratí vo vysokofrekvenčných módoch žiarenia.



Žiarovka a Max Planck

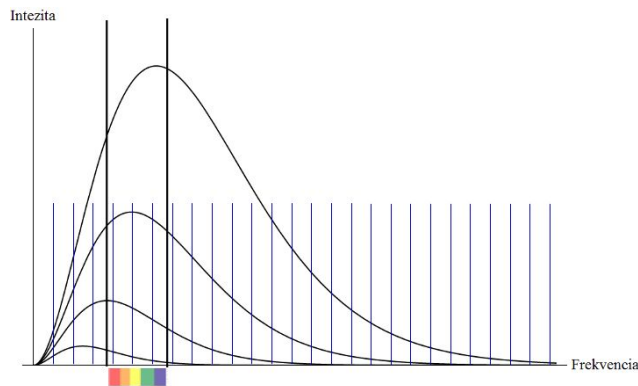
- Rozsvietená žiarovka je nositeľ skazy!
 - Ak sa nám nejakým zázrakom podarilo žiarovku, rozsvietiť, jej svetlo obsahuje nekonečne veľa vysokoenergetického UV žiarenia.



Žiarovka a Max Planck

\hbar

- Riešenie - vlákno žiarovky nevie vyžarovať ľubovoľne, ale **frekvencie sú podelené na intervaly dané Planckovou konštantou**.
- V intervaloch s veľkou frekvenciou nevie byť ľubovoľne málo energie.
- Slabo zahriata žiarovka nevie dať do týchto intervalov dostatok energie.
- Všetko je v poriadku. V dobrej zhode s experimentom.



**Planck bral túto
hypotézu “ako
keby”.**

**Nie ako keby, ale
naozaj**

Fotoelektrický efekt a Einstein

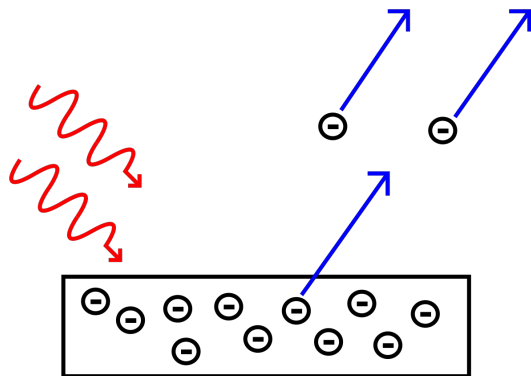
- *Anuus mirabilis* 1905.
- Planckov trik je to isté, ako keby sa svetlo šírilo v balíčkoch.
- Svetlo **SÚ** balíčky, energia balíčka je daná frekvenciou a Planckovou konštantou.
- Slabo zahriata žiarovka nedokáže vytvoriť balíčky s veľmi vysokou frekvenciou.



Albert Einstein (1879 – 1955)

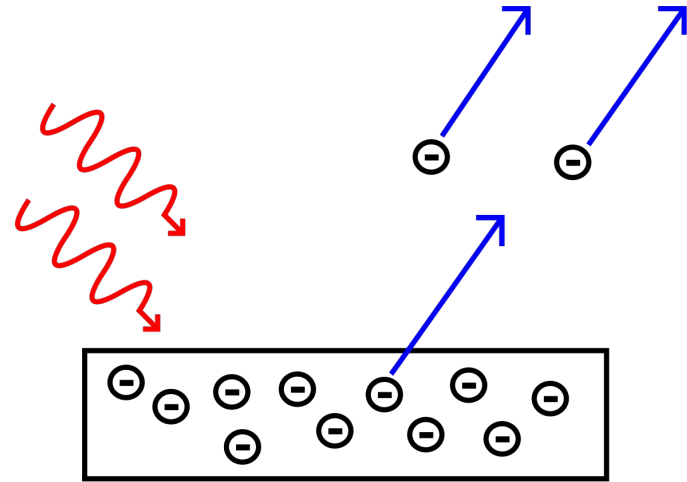
Fotoelektrický efekt a Einstein

- Einstein odvodil Planckove výsledky, avšak všeobecnejšie, elegantnejšie a hlavne fyzikálnejšie.
- Popri tom vyriešil iný veľký problém - **fotoelektrický efekt**.
- Na konci 19. storočia sa zistilo, že dopadajúce UV žiarenie dokáže z kovu uvoľňovať elektróny.



Fotoelektrický efekt a Einstein

- Množstvo uvoľnených elektrónov závisí od intenzity svetla, ale ich energia od vlnovej dĺžky.
- Einstein si uvedomil, že presne to sa dá očakávať, ak by svetlo boli spomínané balíčky
 - intenzita svetla = množstvo balíčkov,
 - vlnová dĺžka = energia jednotlivých balíčkov.
- Nobelova cena pre Einsteina v roku 1921.
- Prelomové, lebo dovtedy sa svetlo považovalo za **vlny**.



Fotoelektrický efekt a Einstein

- Vlnové vlastnosti svetla vysvetľovali javy
 - interferencie,
 - difrakcie,
 - polarizácie.
- Avša fotoelektrický jav sa inak ako časticovo vysvetliť nedá.

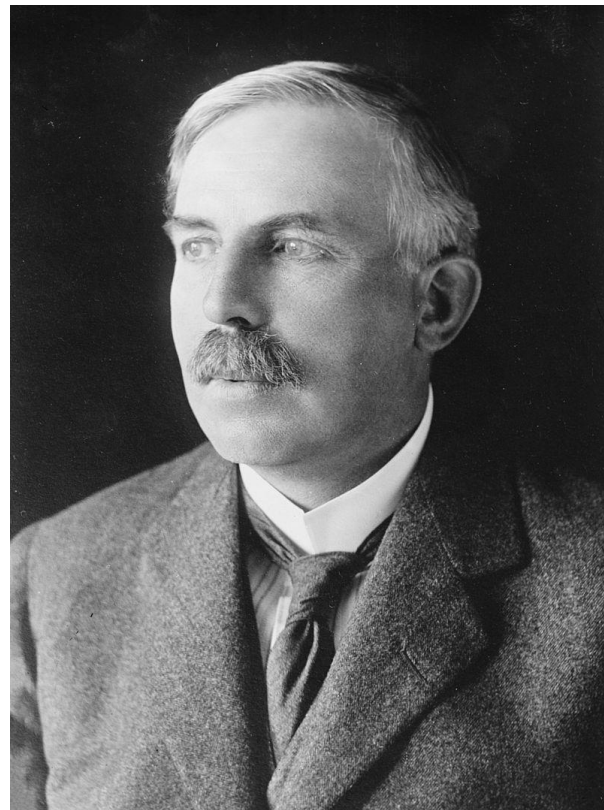


**Svetlo je aj vlna,
aj častice.**

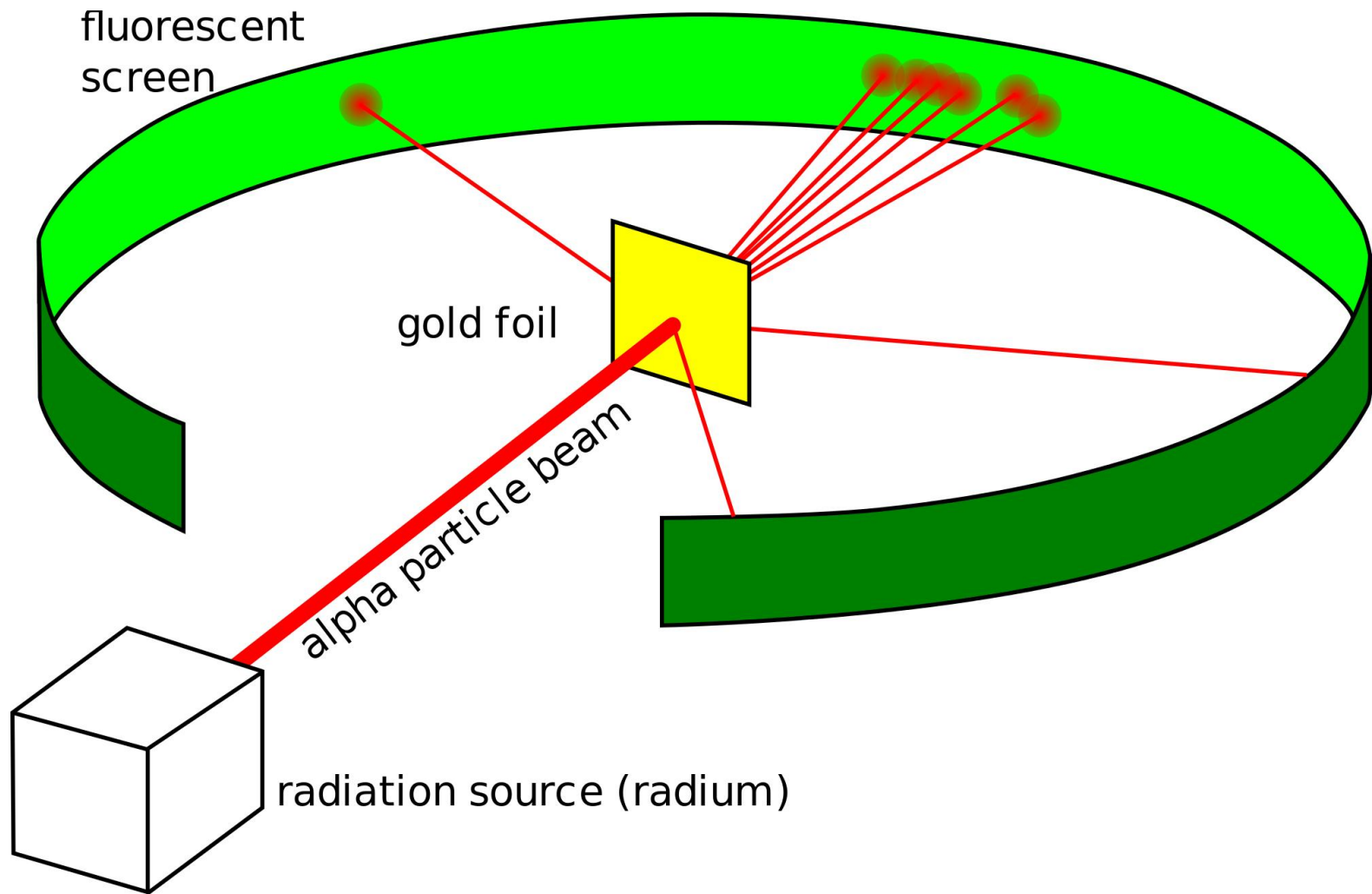
Objev štruktúry atómu

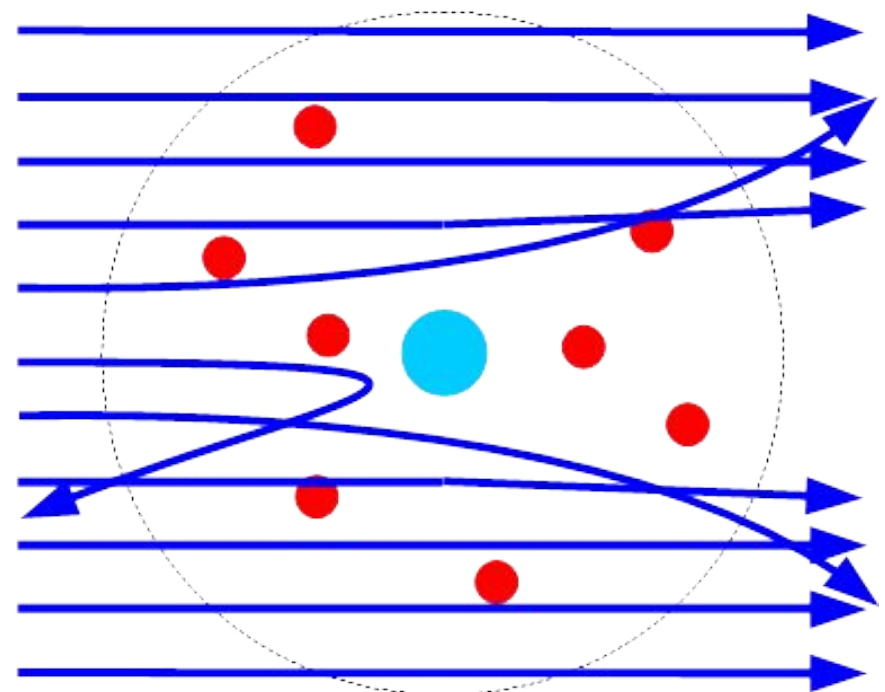
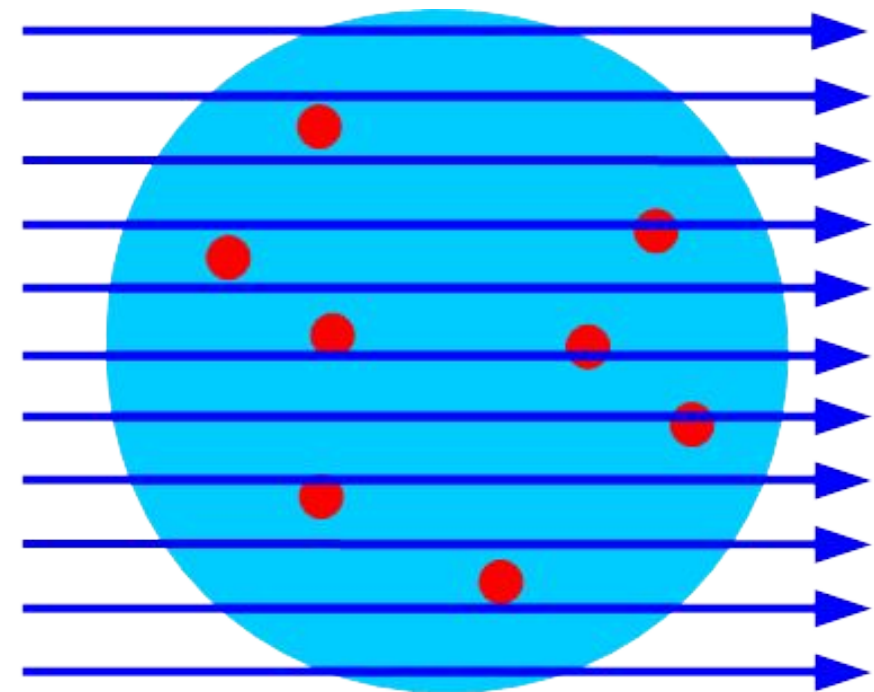
Štruktúra atómu

- V roku **1911** jeden z najprekvapujúcejších objavov vôbec.
- Hmota nie je v atóme rozdelená rovnomerne, ale ohromná **väčšina je sústredená v maličkom jadre.**
- Vedelo sa, že
 - v atóme sa nachádzajú elektróny a kladný náboj,
 - jednotlivé elektróny sú oveľa ľahšie ako atómy.



Ernest Rutherford (1871 – 1937)





Štruktúra atómu

- Kladný náboj, ktorý odpudzuje kladne nabité častice alfa, nie je v atóme rozdelený rovnomerne, ale je koncentrovaný v jeho strede.
- Na častice, ktoré letia blízko stredu atómu, pôsobí veľká odpudivá sila.
- Z výsledkov experimentov Rutherford vypočítal, že má veľkosť asi **jednej sto-tisíciny veľkosti celého atómu**.
- Ak by bol atóm veľký ako futbalové ihrisko, jeho jadro by malo veľkosť jeden milimeter, zrníčko piesku v jeho strede.
- Elektróny obiehajú okolo jadra pod pôsobením elektrickej sily.

**Atómy sú ako
minuatúrne
slnečné sústavy.**

**Atómy ako
mini-sústavy by
nemali existovať**

Klasický atóm je nestabilný

- Elektrické náboje pri zrýchľovaní vyžarujú elektromagnetické žiarenie, ktoré odnáša časť ich energie.
- Telesá zrýchľujú aj pri pohybe po kružnici, pretože sa mení smer ich rýchlosti.
- Elektróny obiehajúce okolo jadra by za nepatrný zlomok sekundy všetku svoju energiu vyžiara a spadli do neho.
- Tak, ako ich objavil Rutherford, **atómy nemali vo svete riadenom klasickou fyzikou existovať.**

**Atómy ako
mini-sústavy by
nemali
existovať, sú
nestabilné.**

Částice sú vlny

Častice sú vlny

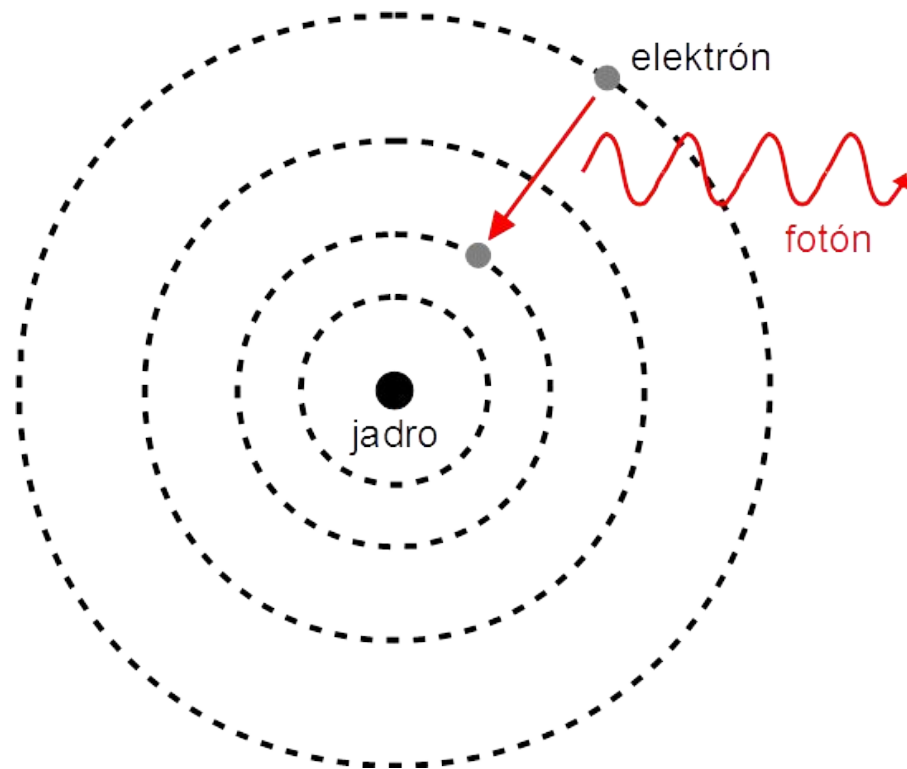
- Prvý krok v roku 1913 Rutherfordov študent.
- Elektróny môžu v atóme obiehať **iba po istých konkrétnych dráhach**.
- Na nich energiu nestrácajú.



Niels Bohr (1885 – 1962)

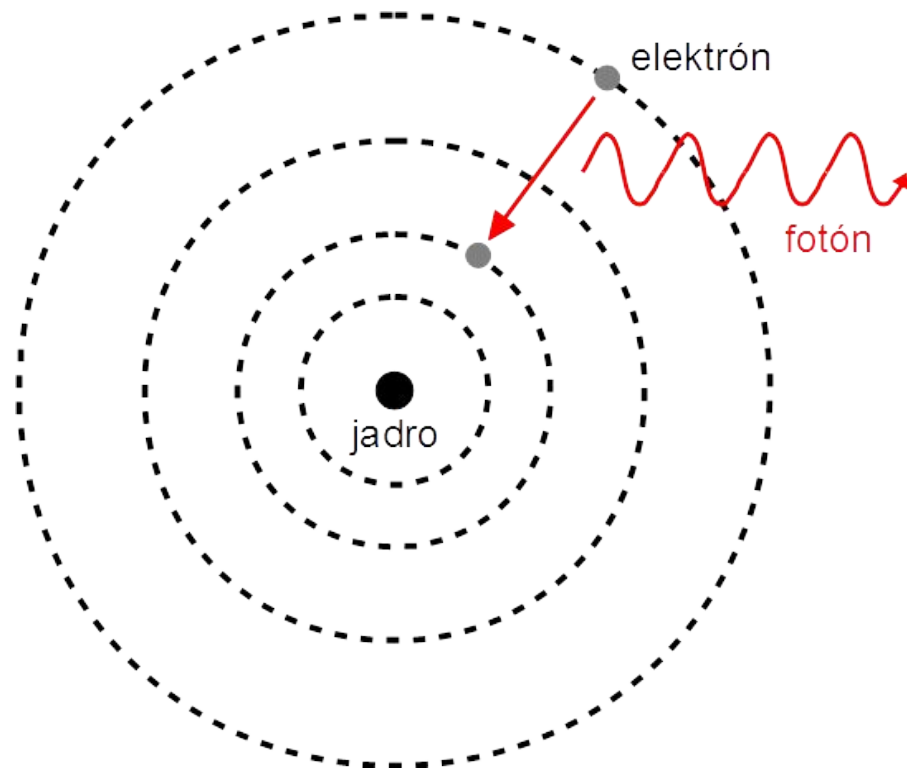
Častice sú vlny

- Pri prechode medzi dráhami elektrón vyžiari fotón.
- Tak vznikajú čiary v spektrách prvkov.
- Moment hybnosti elektrónu nemôže byť ľubovoľný, ale môže byť iba celočíselným násobkom Planckovej konštanty.
- **Prepojenie črtajúcich sa kvantových vlastností hmoty s kvantovými vlastnosťami svetla.**



Častice sú vlny

- Takýto model predpovedal frekvencie čiar **pre vodík**.
- Pre zložitejšie prvky to nefungovalo.
- Bohrov model nevysvetľoval prečo sa elektróny správajú práve takto.
- Ani zovšeobecnenia modelu neviedli k správnym výsledkom.



Častice sú vlny

- V roku 1924.
- Ak sa svetlo môže správať ako vlna a aj ako častica, prečo by podobné vlastnosti nemohli mať **aj elektróny, protóny a ďalšie častice hmoty?**
- Definitívny krok od klasickej fyziky ku kvantovej.
- Jeden z dôsledkov dostal Bohrov model.
- Vlnové vlastnosti elektrónov potvrdené pri odraze od krištálov v roku 1926.



Louis de Broglie (1892 – 1987)

**Je jasné, že
mikrosvet
funguje inak.
Ostáva nájst'
zákony tohto
sveta.**

Vlnová rovnice

Vlnová rovnica

- Cieľom bolo vrátiť spojitosť do mikrosveta.
- V rokoch 1925-26 vypracoval rovnicu pre spojité vlny, popisujúce častice.
- Až z jej riešení dostaneme diskkrétne hodnoty energií.

$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$



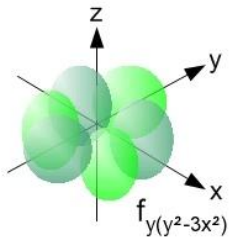
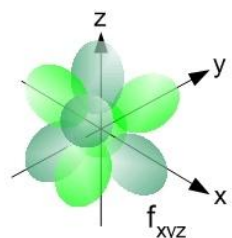
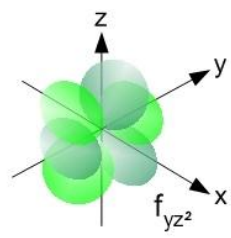
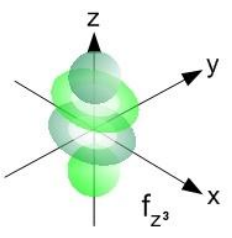
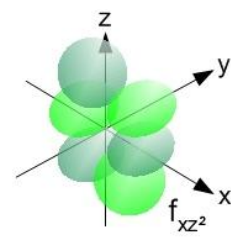
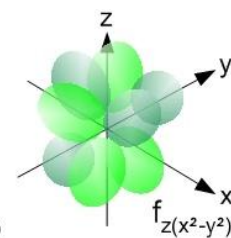
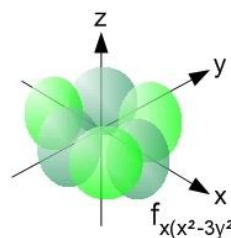
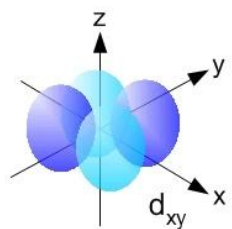
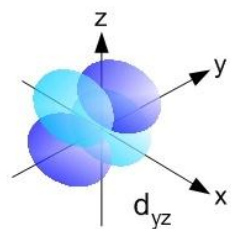
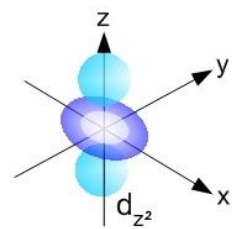
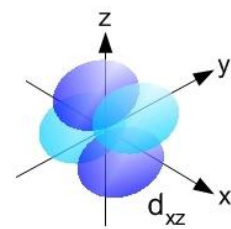
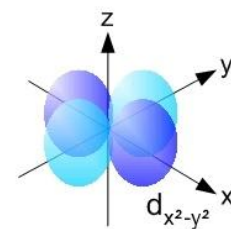
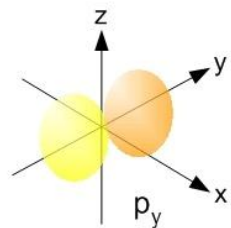
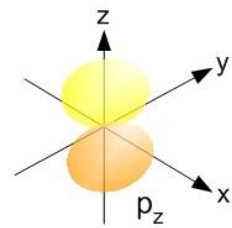
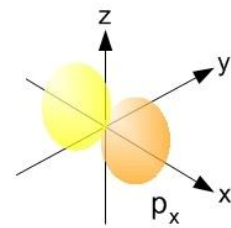
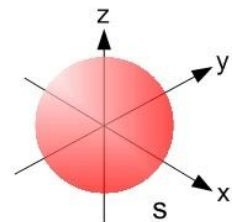
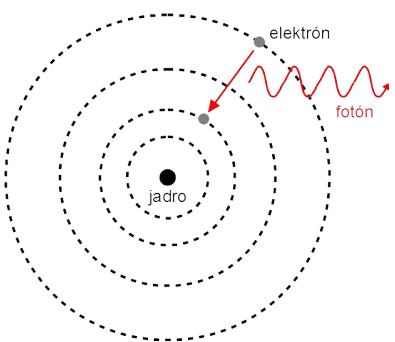
Erwin Schrödinger (1887 – 1961)

Vlnová rovnica

- Aká je interpretácia Ψ ?
- Nemôže byť nič priamo materiálne.
- Ešte v roku 1926 interpretácia ako **pravdepodobnosti výskytu častice**.



Max Born (1882 – 1970)



**Pravdepodobnosti
sú posledná
skutočne
kvantová
ingrediencia.**

Kvantová mechanika

Kvantová mechanika

- Píše sa rok 1926.
- Kvantová mechanika ešte zďaleka nie je hotová, ale jej kontúry sú jasné.
- A je jasné, že v mikrosvete častíc je svet úplne iný.
- Pre veľké veci väčšina prekvapivých vlastností vymyzne.

h

**Keby svet nebol
kvantový, vyzerá
veľmi inak aj pre
nás veľkých.**

**Na záver malá
reklama**

Séria článkov **Ako to vieme?** v **QUARKU**

- Každý mesiac roku 2019 **v časopise Quark môj článok** na podobnú tému.
- Január - Ako vieme, že existujú atómy?
- Február - Ako vieme, že aj atómy sa z niečoho skladajú?
- Marec - **Ako vieme, že svet riadi kvantová mechanika?**
- Apríl - Ako vieme, že Zem obieha okolo Slnka?



**Ďakujem za
pozornosť!**