

# VYPOUŠTĚNÍ KVANTOVÉHO DŽINA

ÚSPĚŠNÉ OMYLY V HISTORII  
KVANTOVÉ FYZIKY

---

**Pavel Cejnar**

Ústav částicové a jaderné fyziky  
MFF UK Praha



Prosinec 2009

# 1) STARÁ KVANTOVÁ TEORIE

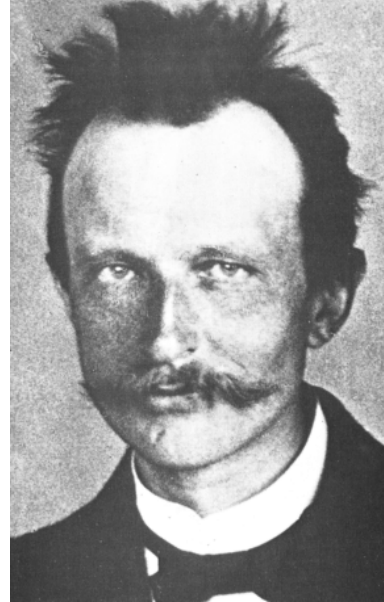


# Světlo jsou částice!

(1900-1905)

19. století: Světlo bylo pokládáno za vlny elektromagnetického pole. To se ale ukázalo být v rozporu s některými jevy (spektrum záření zahřátých těles, fotoelektrický jev)

=> Návrat ke korpuskulární představě: **fotony**.

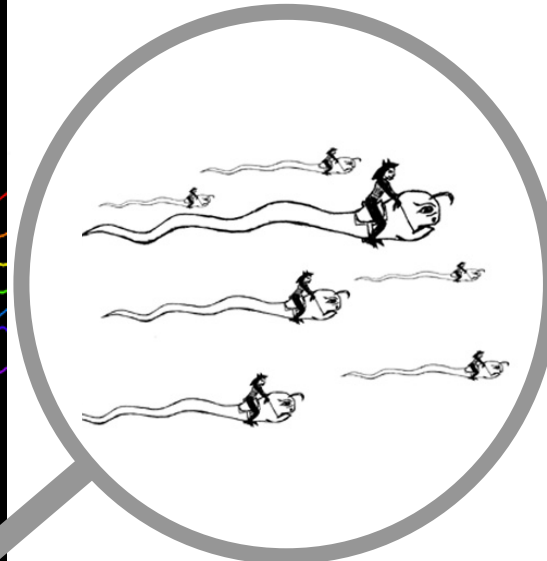


Max Planck (1858-1947)



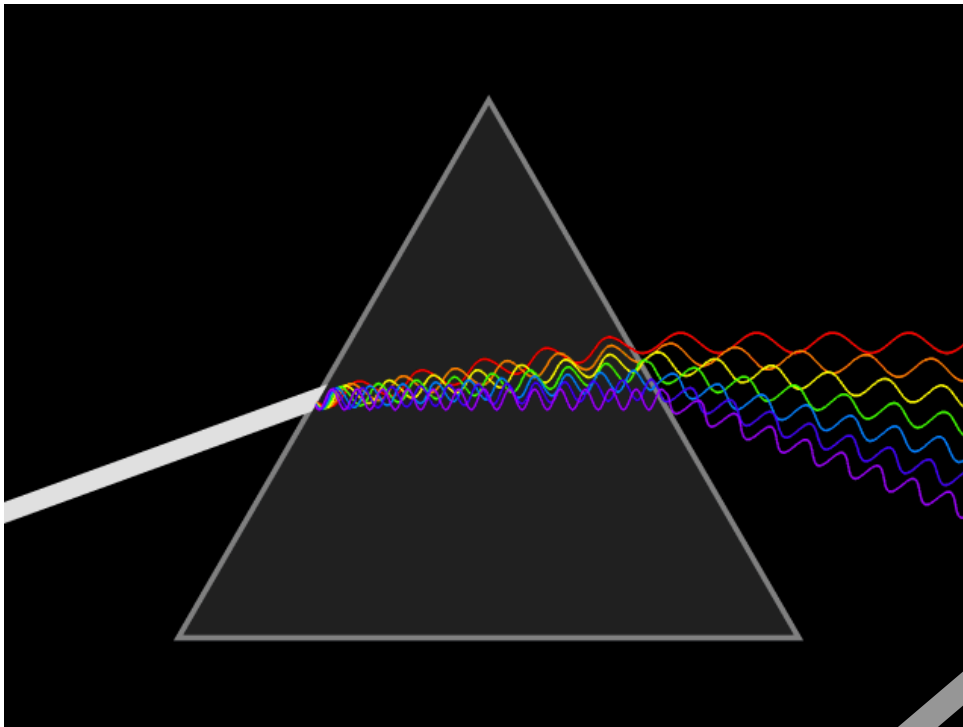
Albert Einstein (1879-1955)

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



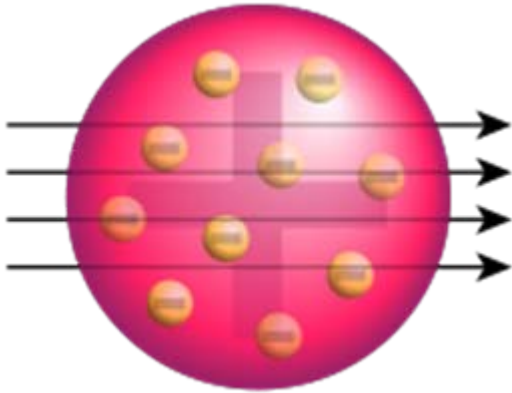
$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$



# Atom má jádro!

(1911)

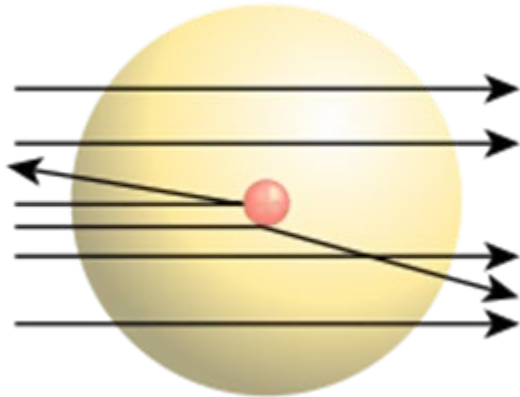


## Pudinkový model atomu

*kladný náboj = pudink*

*elektrony = hrozinky*

Alfa částice by se při průchodu atomem rozptylovaly jen nepatrně



## Geiger-Marsdenův pokus (1909)

Alfa částice se rozptylují i o velké úhly => Kladný náboj atomu je soustředěn do velmi malého jádra

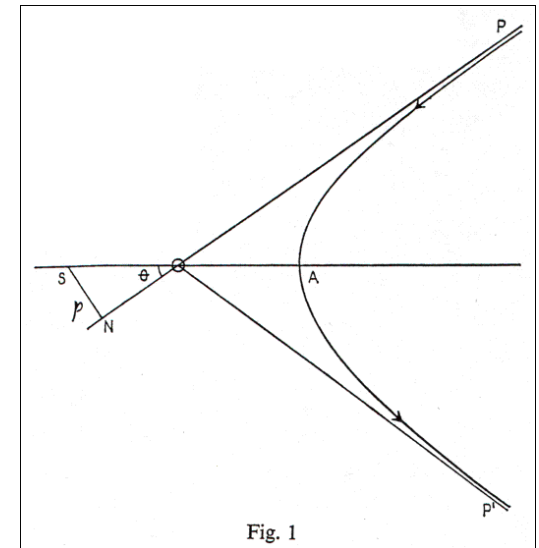
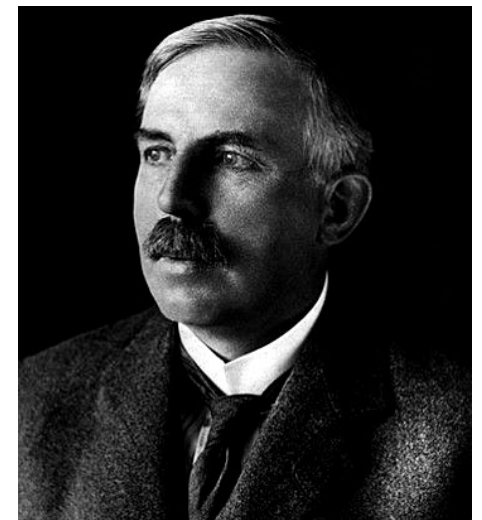


Fig. 1



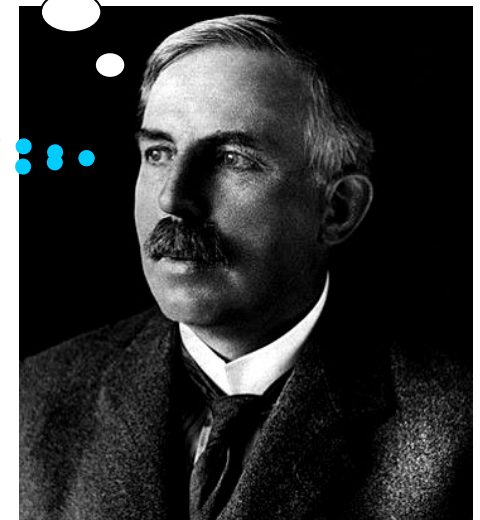
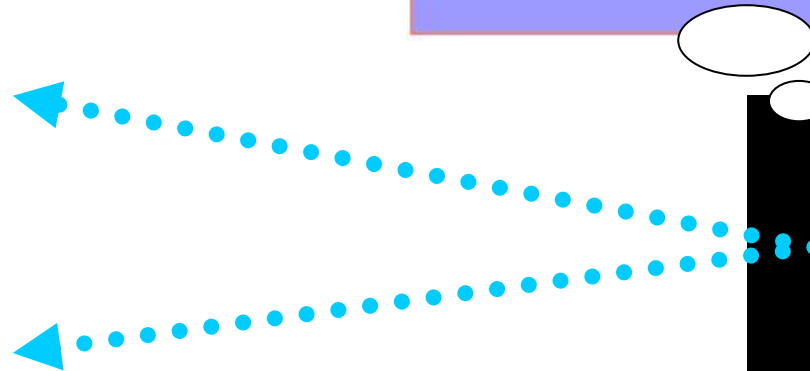
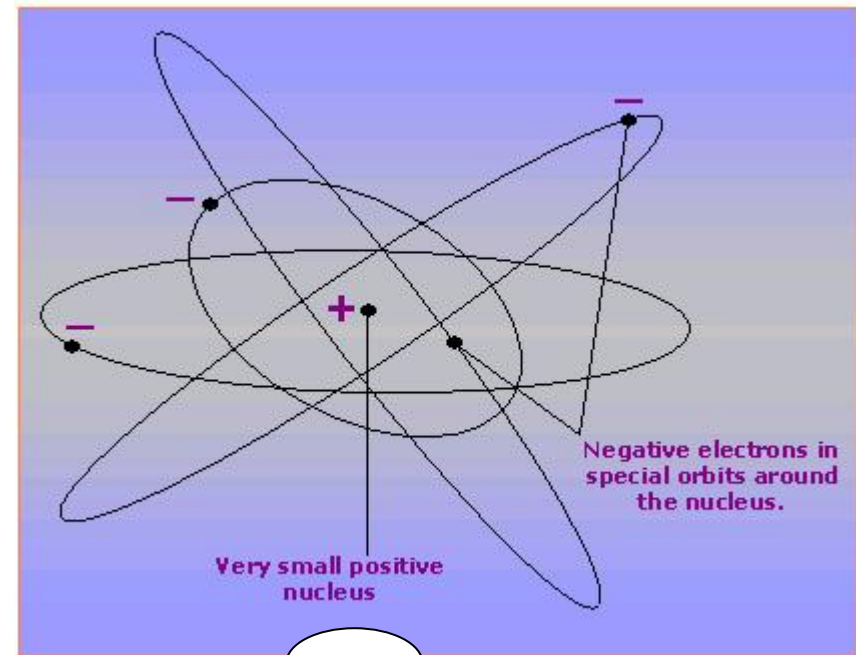
Ernest Rutherford (1871-1937)



# Rutherfordův model atomu

(1911)

Elektrony obíhají kolem atomového jádra podobně jako planety kolem Slunce?



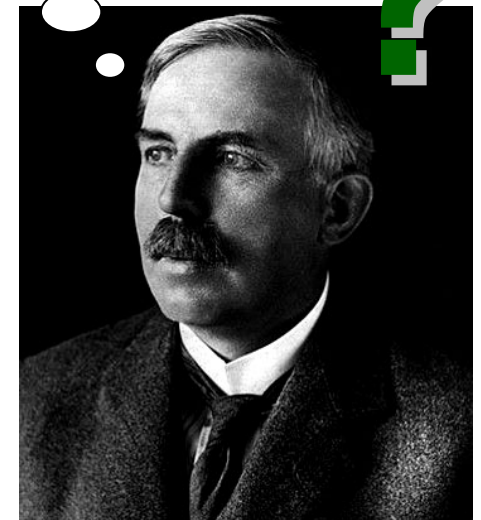
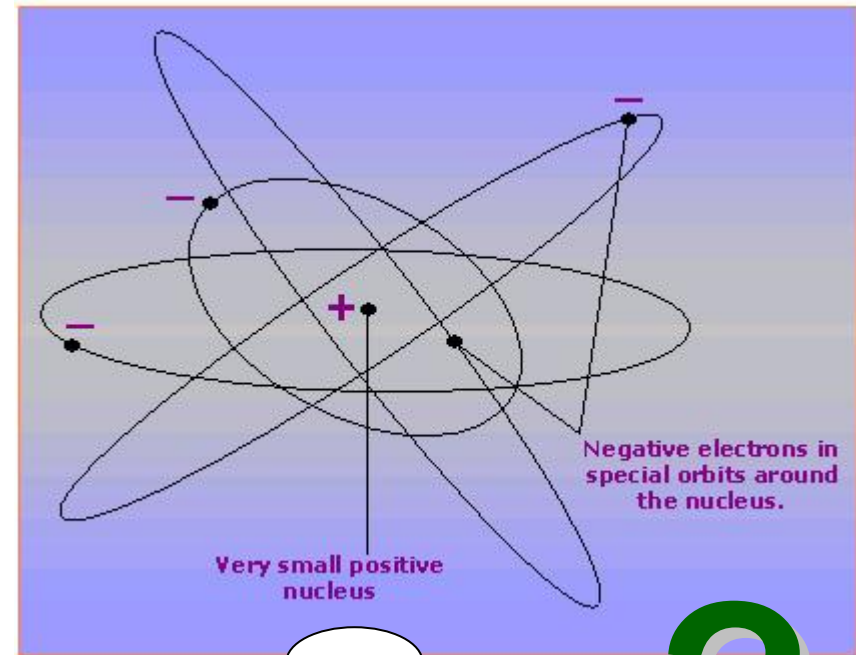
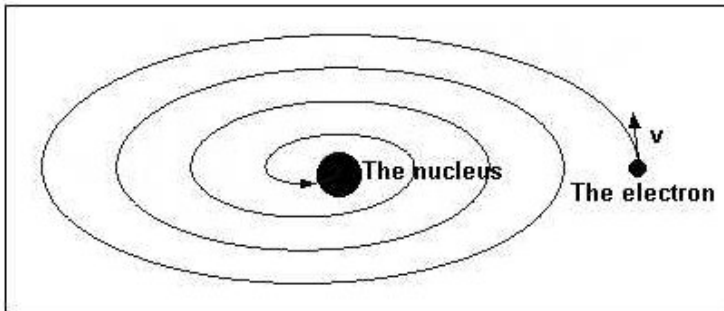
Ernest Rutherford (1871-1937)

# Rutherfordův model atomu

(1911)

Elektrony obíhají kolem atomového jádra podobně jako planety kolem Slunce?

**Problém:** Částice s elektrickým nábojem při nerovnoměrném pohybu vyzařují el.mg. záření a ztrácejí tak energii. *Elektron pokoušející se obíhat kolem jádra by do něj velmi brzy spadl!*



Ernest Rutherford (1871-1937)

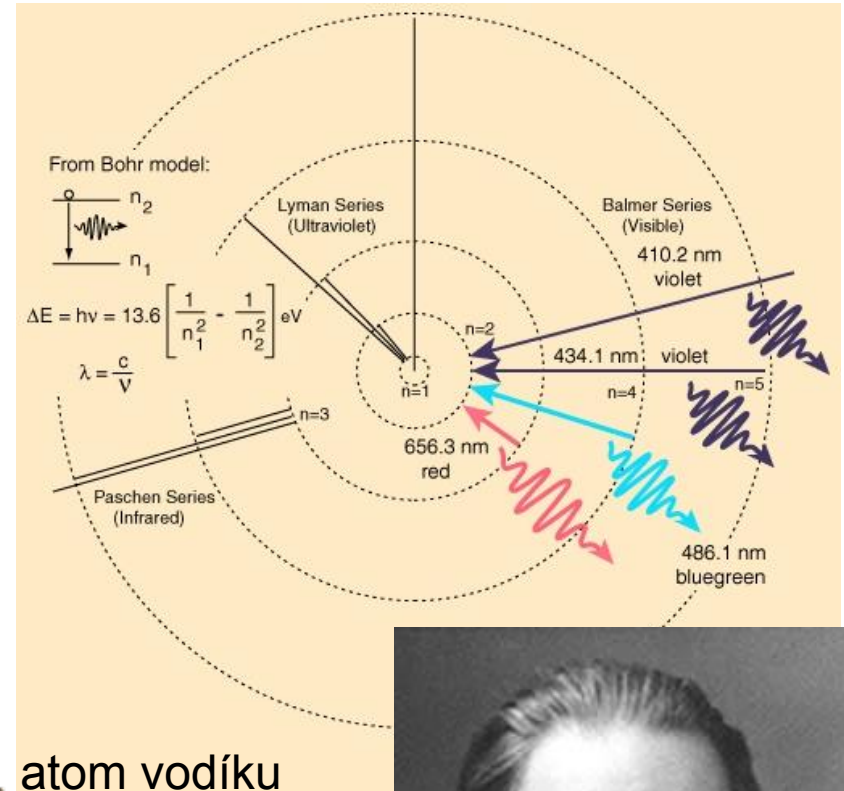


# Bohrův model atomu

(1913)

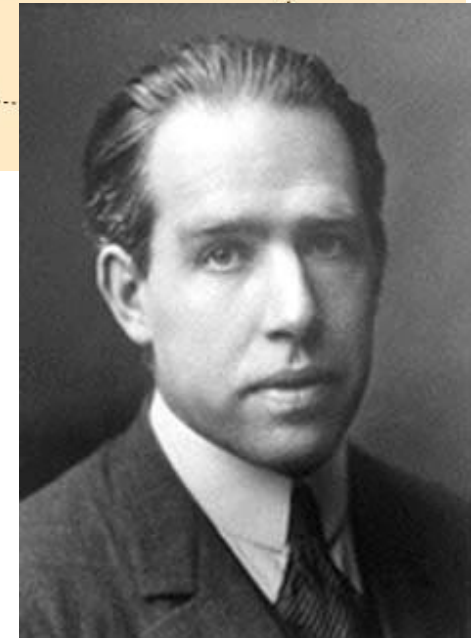
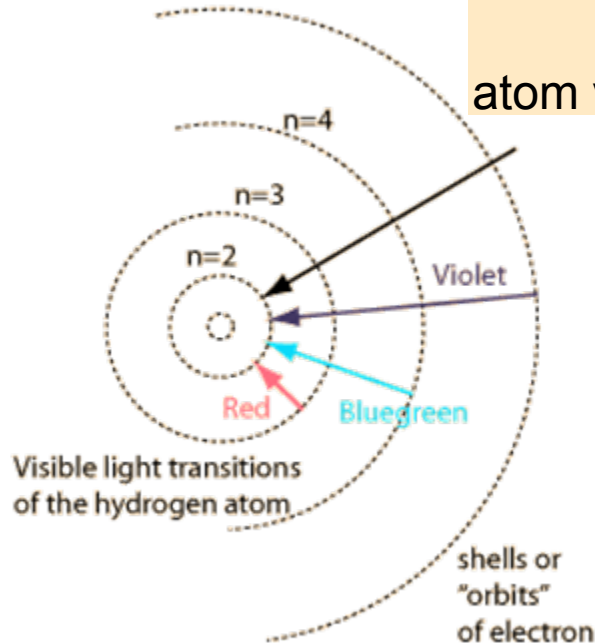
## Bohrovy postuláty:

- Elektron může obíhat jádro atomu jen po některých vybraných dráhách
- Elektron může přijímat/vydávat energii jen po kvantech (fotonech), a to při přeskokcích mezi povolenými dráhami: energie pohlceného/vyzářeného fotonu  $E=h\nu$  je rovna rozdílu energií obou drah



Energy Levels of Hydrogen

$n=4$  ———  
 $n=3$  ———  
 $n=2$  ———  
 $n=1$  ———



Niels Bohr (1885-1962)

# Stará kvantová teorie

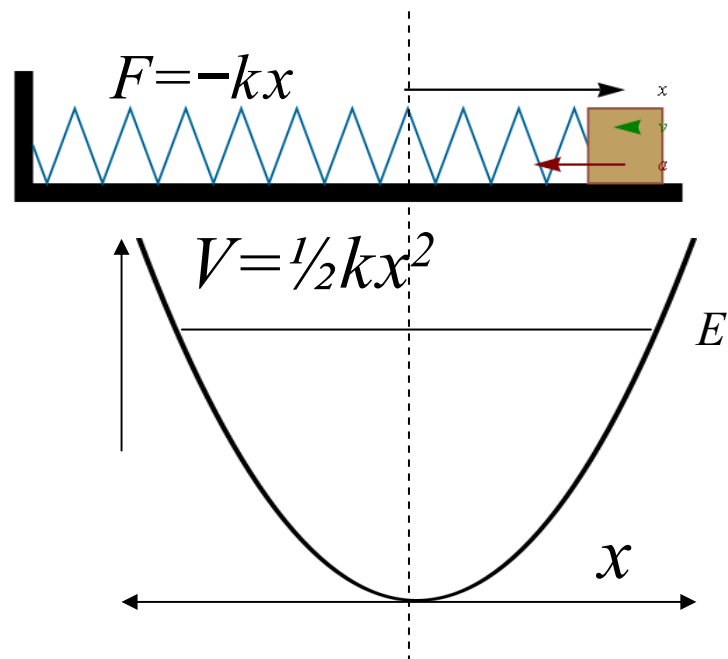
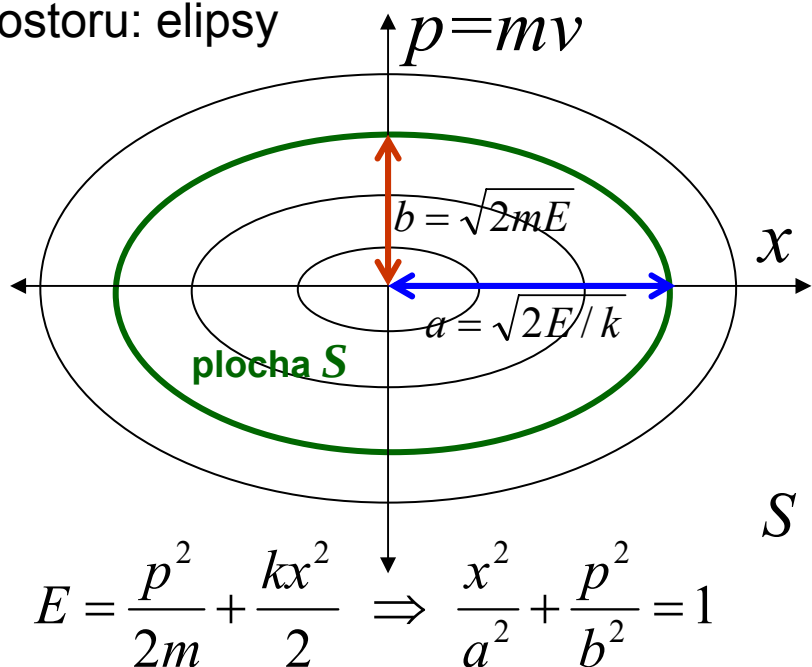
(1913-1920...)

Pokus o vybudování teorie mikrosvěta zkombinováním klasické fyziky s Bohr-Sommerfeldovými kvantovacími podmínkami (výběr „kvantově povolených“ „klasických“ drah částic).

## Příklad: harmonický oscilátor

Harmonický pohyb s kruhovou frekvencí  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

Obraz trajektorií ve fázovém prostoru: elipsy



Kvantovací podmínka:  $S = \left(n + \frac{1}{2}\right)h$

$$S = \pi ab \Rightarrow E = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega$$

$0, 1, 2, 3, \dots$

$\hbar/2\pi$



# Současná kvantová teorie

(1924-1927...)

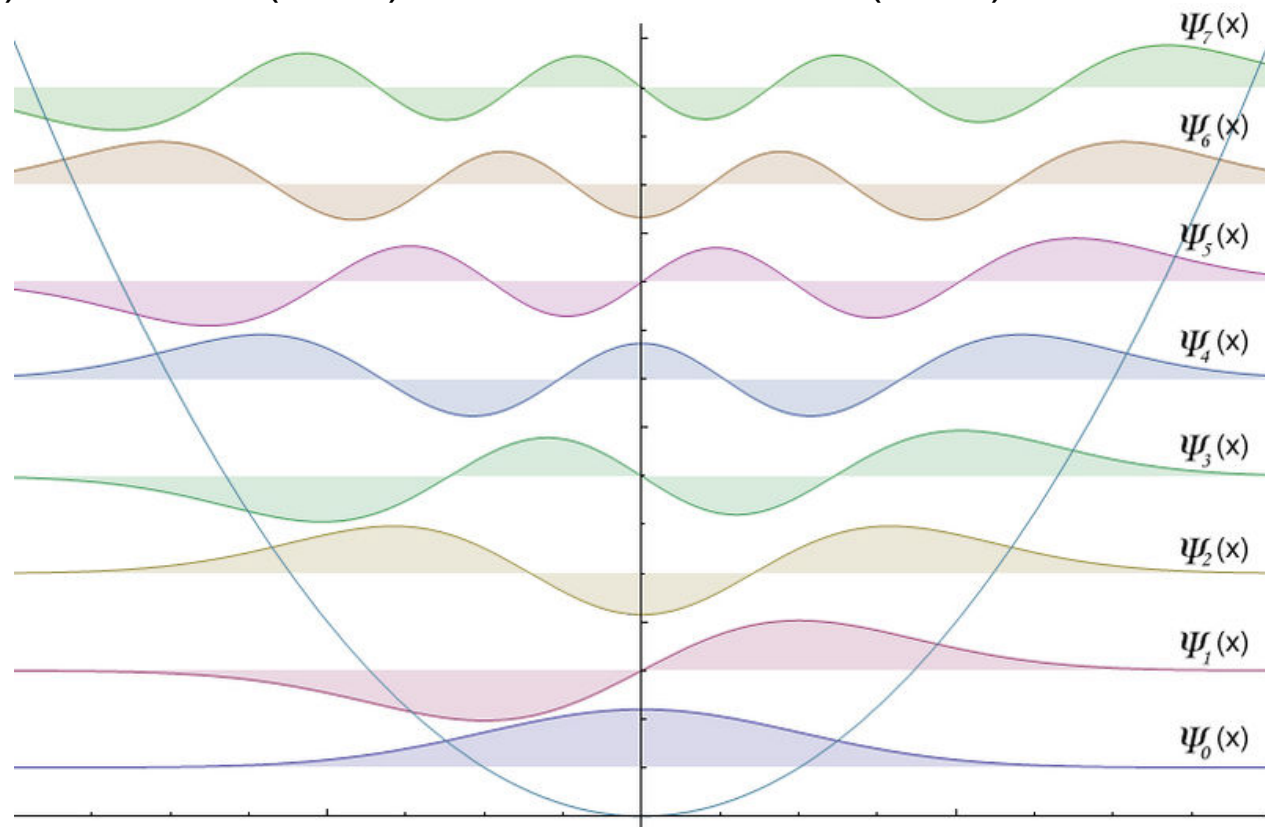
Pokus o vybudování teorie mikrosvěta zkombinováním klasické fyziky s Bohr-Sommerfeldovými kvantovacími podmínkami (výběr „kvantově povolených“ „klasických“ drah částic). **Neúspěch – teorie nebyla „dostatečně bláznivá“ !**

Současná kvantová teorie: Louis De Broglie (1924), Werner Heisenberg (1925), Erwin Schrödinger (1926), Max Born (1927), John Von Neumann (1927)...

**Erwin Schrödinger** (1887-1961)



**Vlny,  
ne částice!**



# Současná kvantová teorie

(1924-1927...)

Pokus o vybudování teorie mikrosvěta zkombinováním klasické fyziky s Bohr-Sommerfeldovými kvantovacími podmínkami (výběr „kvantově povolených“ „klasických“ drah částic). **Neúspěch – teorie nebyla „dostatečně bláznivá“ !**

Současná kvantová teorie: Louis De Broglie (1924), Werner Heisenberg (1925), Erwin Schrödinger (1926), Max Born (1927), John Von Neumann (1927)...



Solvayská konference 1927

|             |            |              |               |                |                |                  |                 |                  |  |
|-------------|------------|--------------|---------------|----------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|--|
|             |            | E. Henriot   |               |                | E. Schrödinger |                  |                 | R. H. Fowler     |  |
|             | A. Piccard | P. Ehrenfest | E. Herzen     | T. de Donder   | E. Verschaell  | W. Pauli         | W. Heisenberg   | L. Brillouin     |  |
| P. Debye    | M. Knudsen | W. L. Bragg  | H. A. Kramers | P. A. M. Dirac | A. H. Compton  | L. V. de Broglie | M. Born         | N. Bohr          |  |
| I. Langmeir | M. Planck  | M. Curieová  | H. A. Lorentz | A. Einstein    | P. Langevin    | Ch. E. Guye      | C. T. R. Wilson | O. W. Richardson |  |

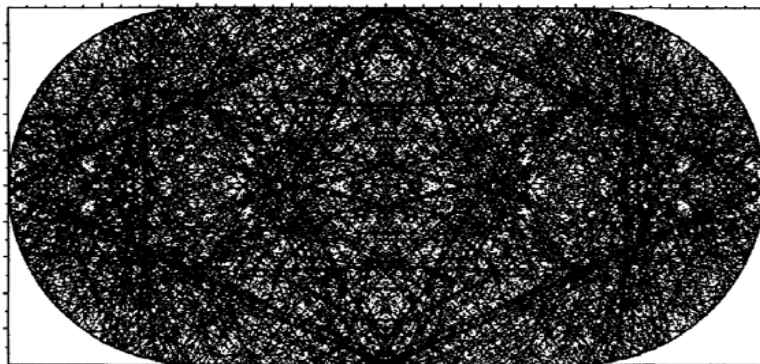
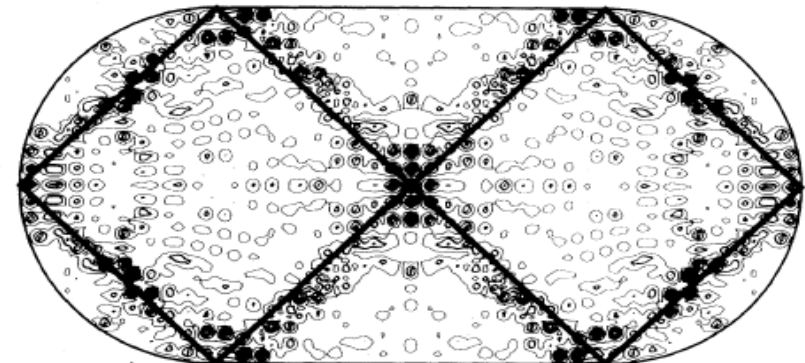
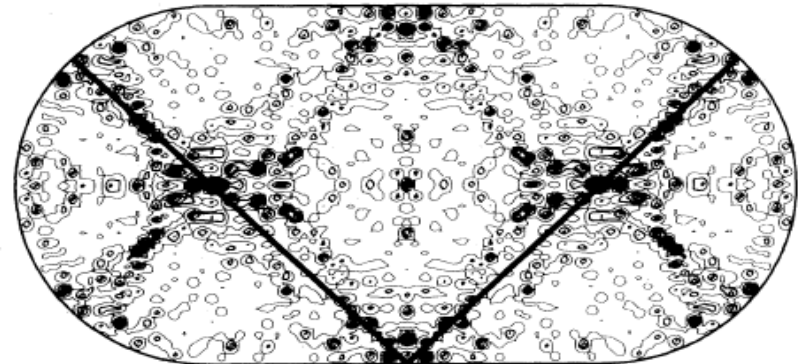
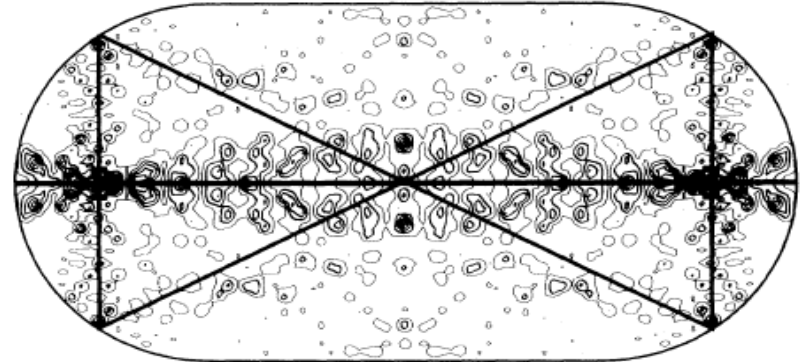
# Stará kvantová teorie: *posmrtný život*

(1970 - současnost)

Korespondence klasické a kvantové mechaniky zůstává velmi zajímavou (dosud nedokončenou) oblastí fyziky. Až v 70. létech vyšla najevo silná provázanost klasických periodických trajektorií a kvantových stavů.

**Hustota kvantových stavů:** energetické spektrum kvantových stavů je plně určeno vlastnostmi klasických periodických orbit.

**Kvantové jizvy:** pozůstatky po periodických trajektoriích patrné ve tvaru vlnových funkcí vysoce excitovaných stavů.



## 2) DIRACOVO MOŘE





# Diracova teorie elektronu

(1928)

## Relativistický vztah mezi energií a hybností částice

$$E = mc^2$$

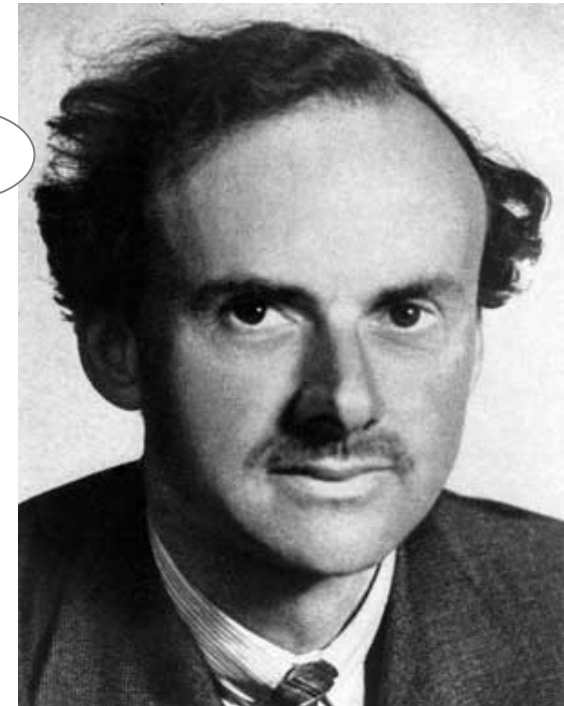
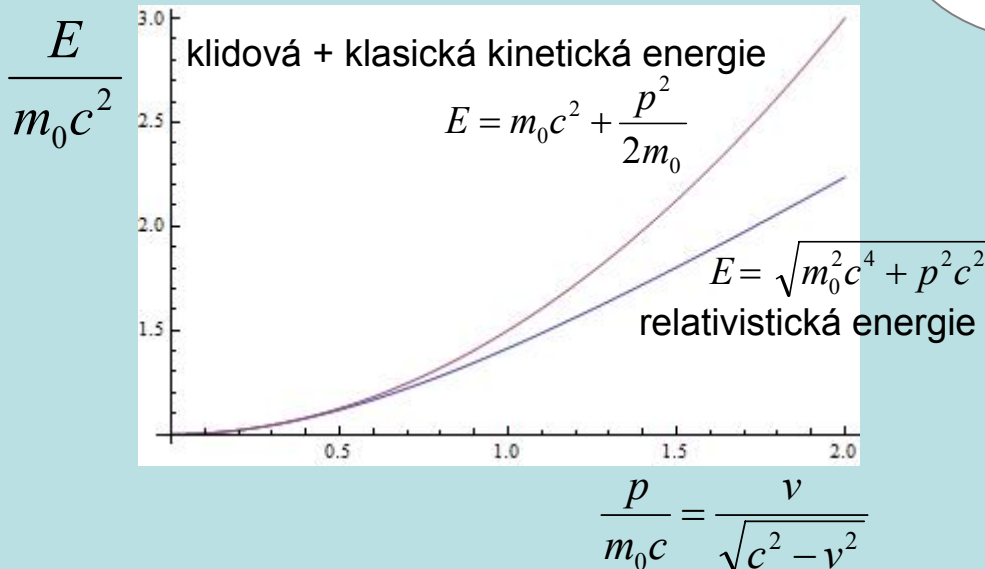
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\Rightarrow E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

$$E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

V klasické relativistické mechanice se bere v úvahu jen znaménko +  
V kvantové mechanice hraje roli také znaménko -

Paul A.M. Dirac (1902-1984)



# Diracova teorie elektronu

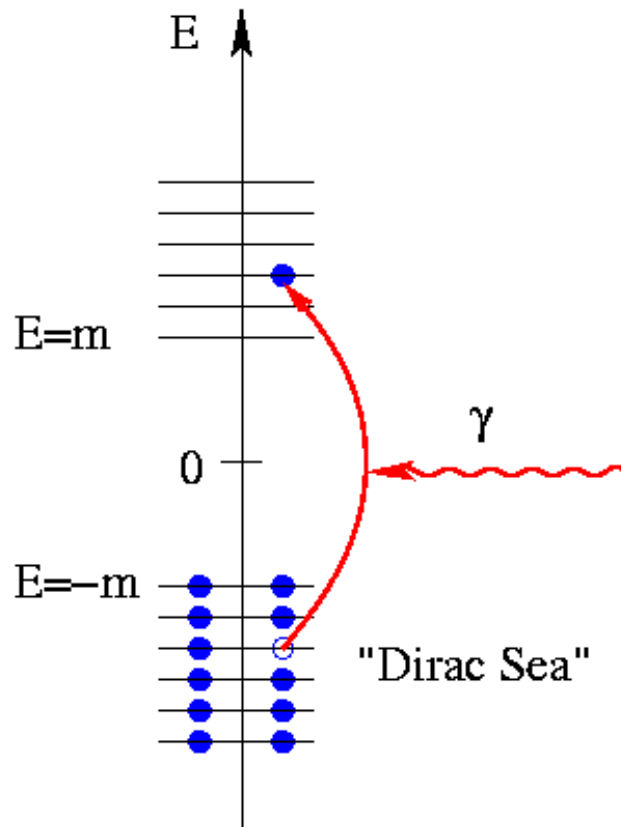
(1928)

*Jak chápat záporné energie elektronu ??*

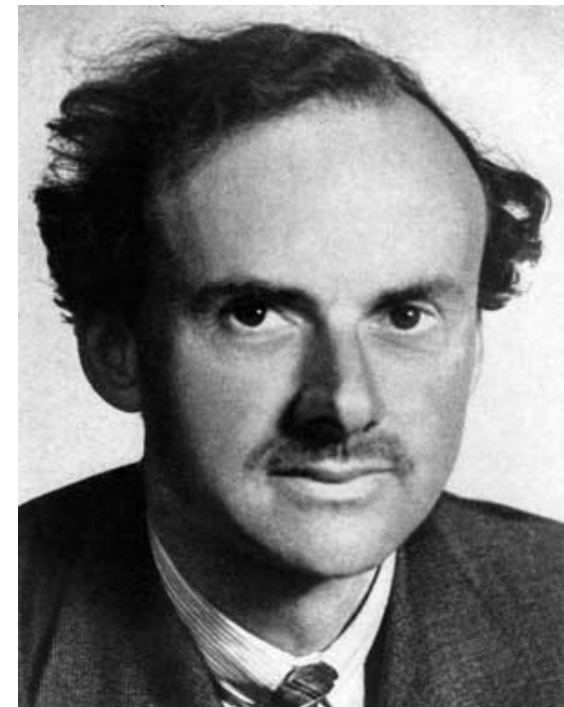
*Proč nedochází ke kolapsu hmoty („pádu“ do  $E \rightarrow -\infty$ ) ???*

**Řešení:** Všechny záporné energetické stavy jsou již obsazené („Diracovo moře“).

- Pauliho vylučovací princip zakazuje přechody do těchto stavů.
- Pokud ale dojde k vyzvednutí elektronu ze záporného do kladného energetického stavu, vznikne v „moři“ zaplněných stavů „díra“, která se bude chovat jako elektron s kladným nábojem - **pozitron**.



Paul A.M. Dirac (1902-1984)

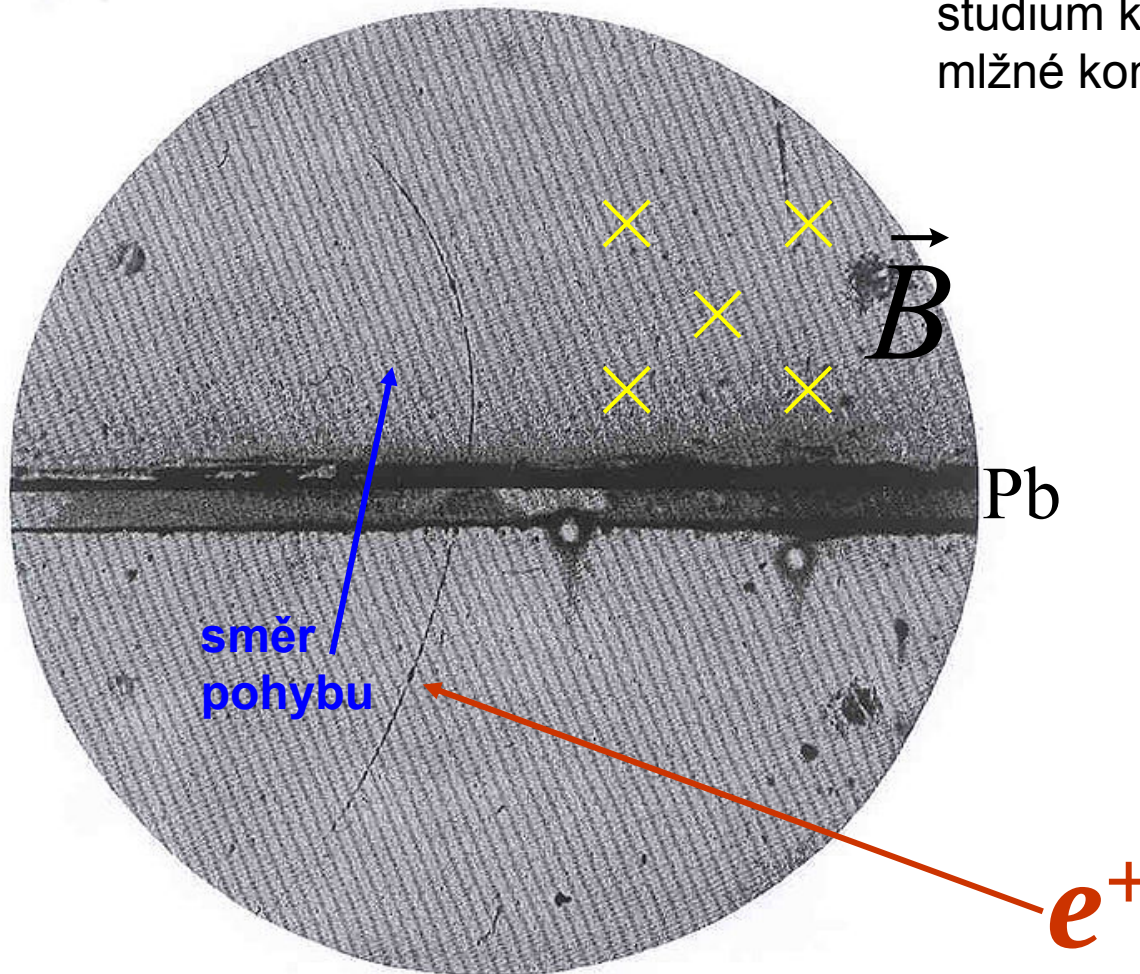


# Diracova teorie elektronu

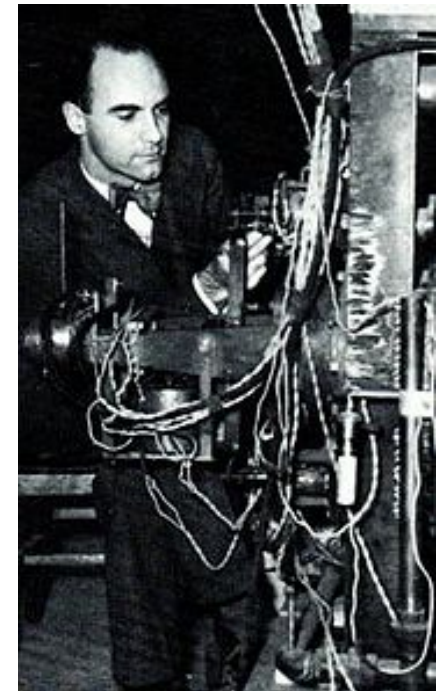
(1928)

- Existence pozitronu experimentálně potvrzena v roce 1932:

studium kosmického záření pomocí  
mlžné komory v magnetickém poli



Carl Anderson (1905-1991)

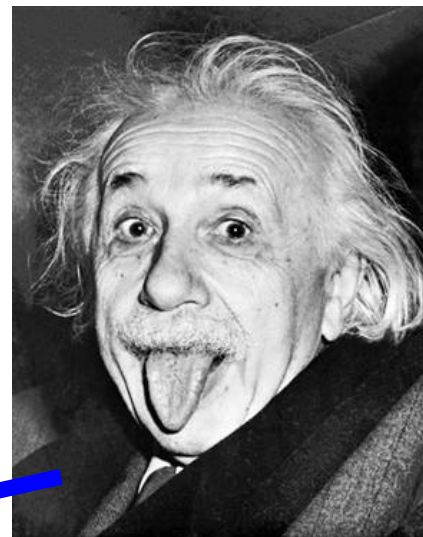


# Diracova teorie elektronu

(1928)

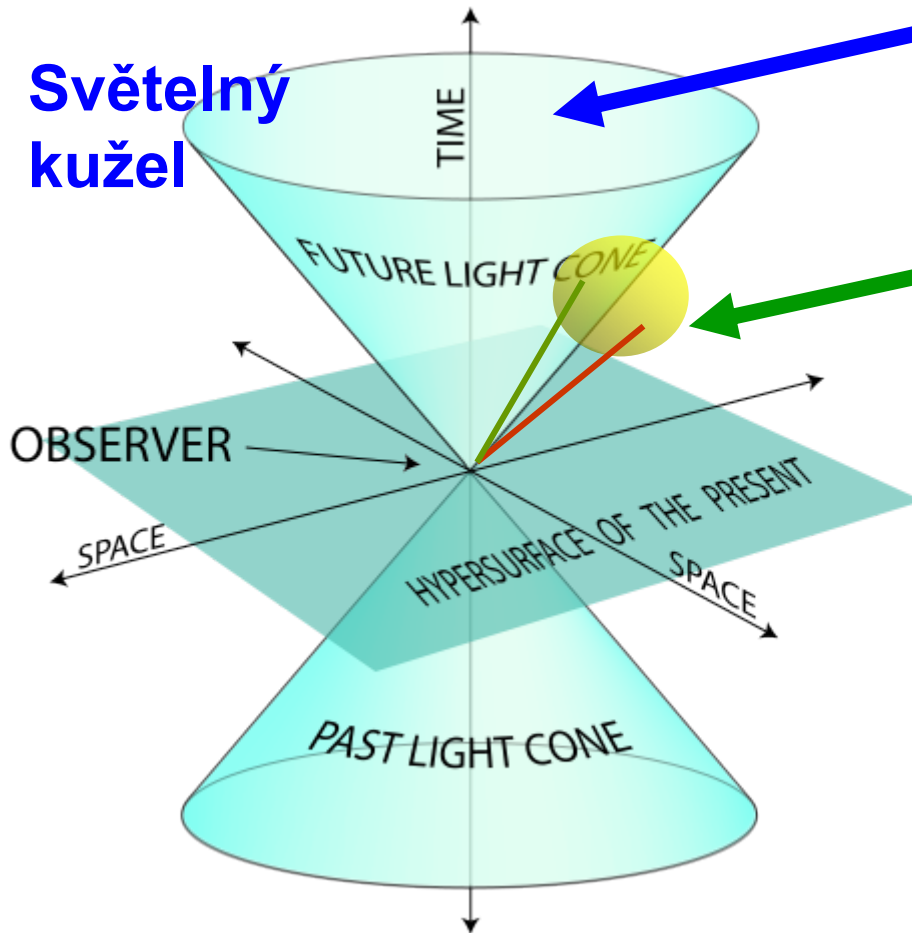
Představa Diracova moře není  
udržitelná – předpokládá například

## nekonečnou hustotu hmoty...



## Werner Heisenberg (1901-1976)

# Světelný kužel



# Princip neurčitosti

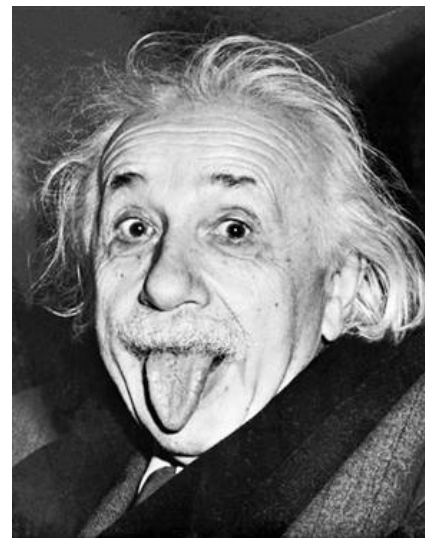
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

...nicméně antičástice jsou nutným  
důsledkem **propojení kvantové  
mechaniky s teorií relativity!**

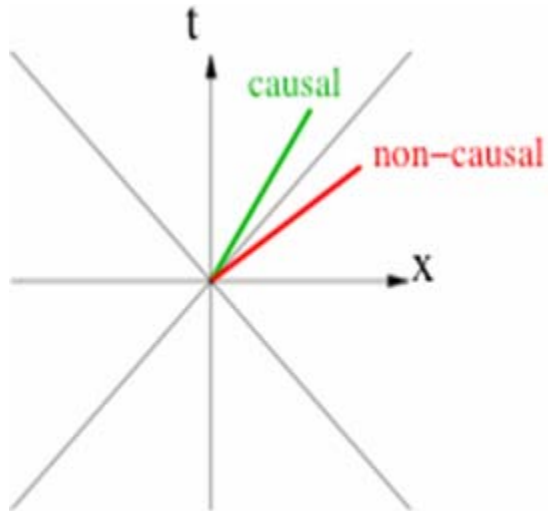


# Diracova teorie elektronu (1928)

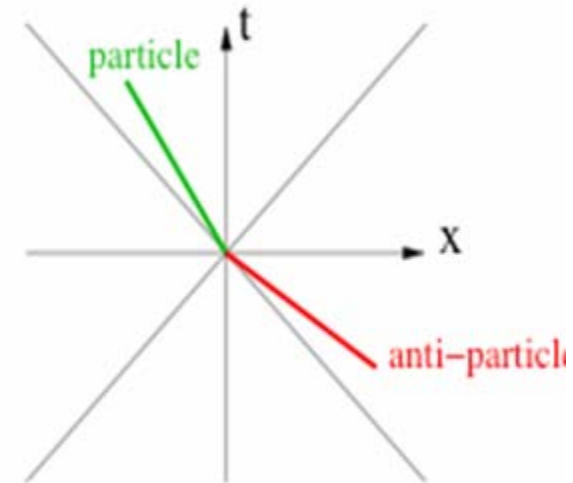
„Nadsvětelná“ částice může být v jiné soustavě viděna jako pohybující se dozadu v čase. Místo takovéto částice zavedeme antičástici pohybující se dopředu v čase s opačným nábojem.



Werner Heisenberg (1901-1976)



Pozorovatel I

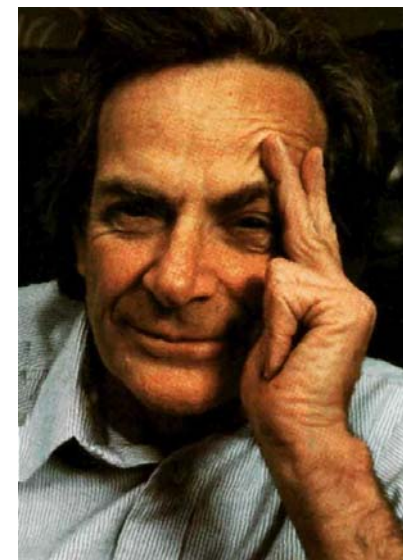


Pozorovatel II

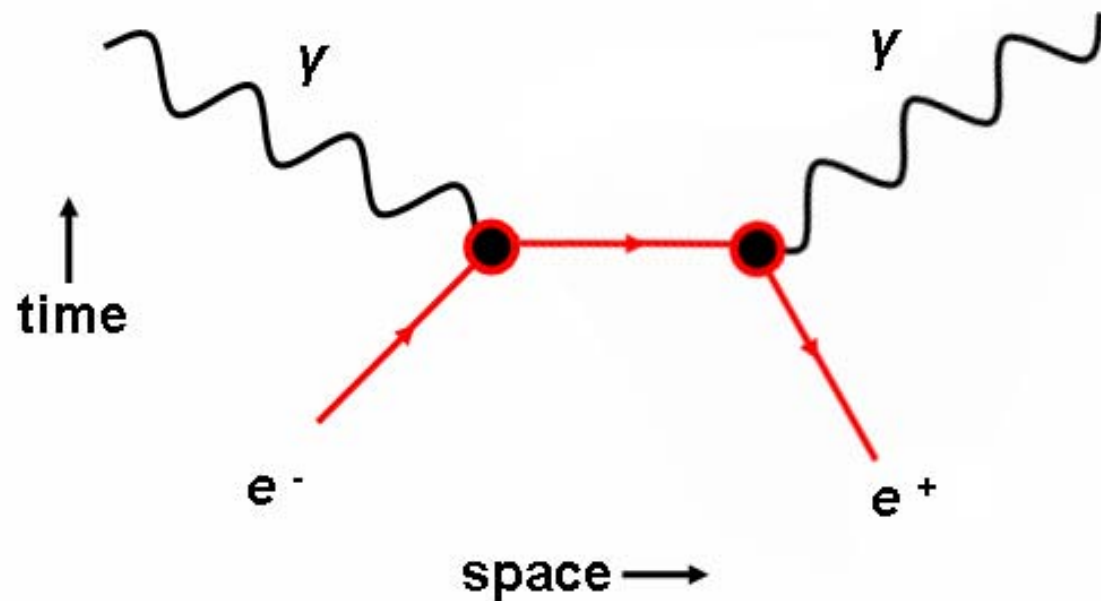
# Současná teorie antičástic

(1932 – současnost)

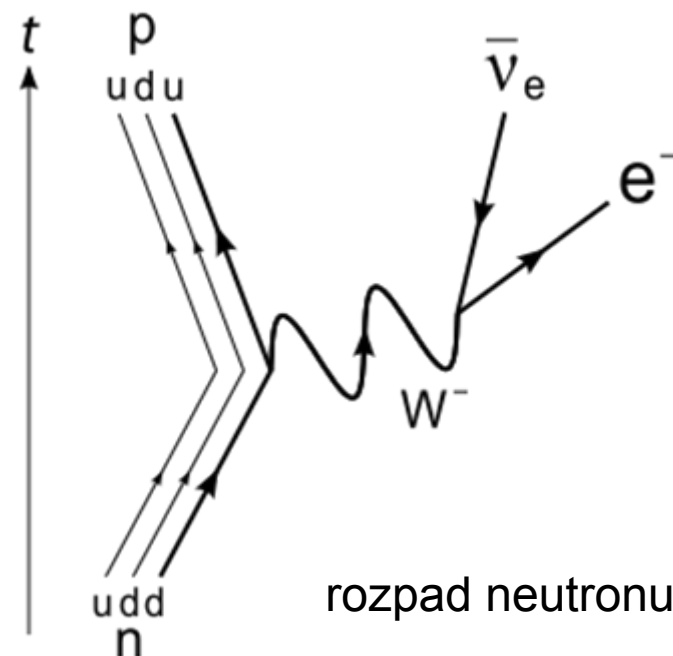
Antičástice jsou běžnými účastníky fyzikálních procesů, stejně jako částice. Dají se vytvořit v laboratoři, ale předpokládá se, že antihmota ve vesmíru zanikla po Velkém třesku v anihilaci s hmotou, které bylo o něco víc.



Richard Feynman (1918-1988)



elektron-pozitronová anihilace



rozpad neutronu

# Současná teorie antičástic



## Quarks



up



down



top



bottom



strange



charm

## Anti-quarks



## Leptons



electron



electron neutrino



muon



muon neutrino



tau



tau neutrino

## Anti-leptons

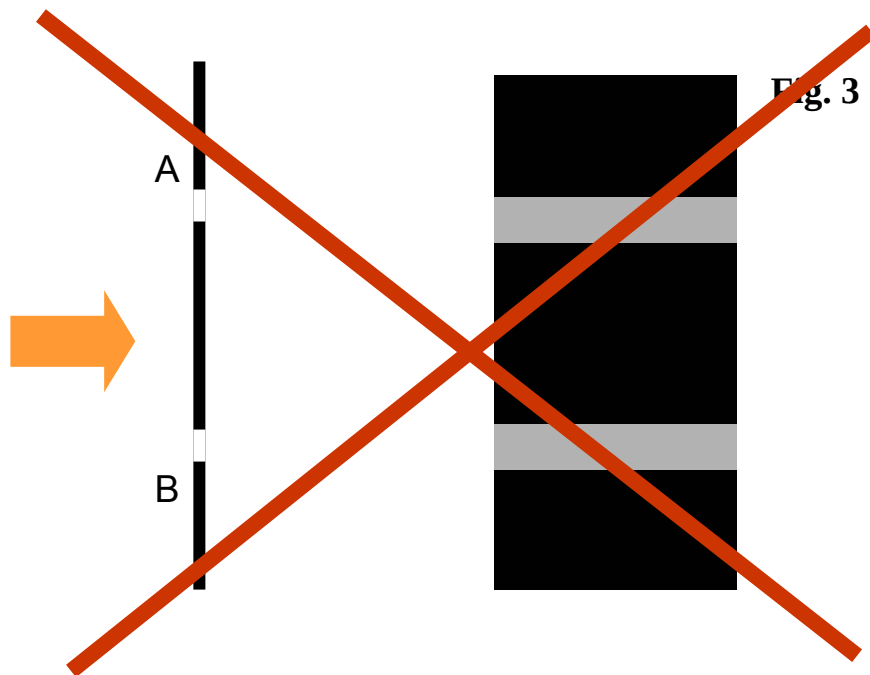
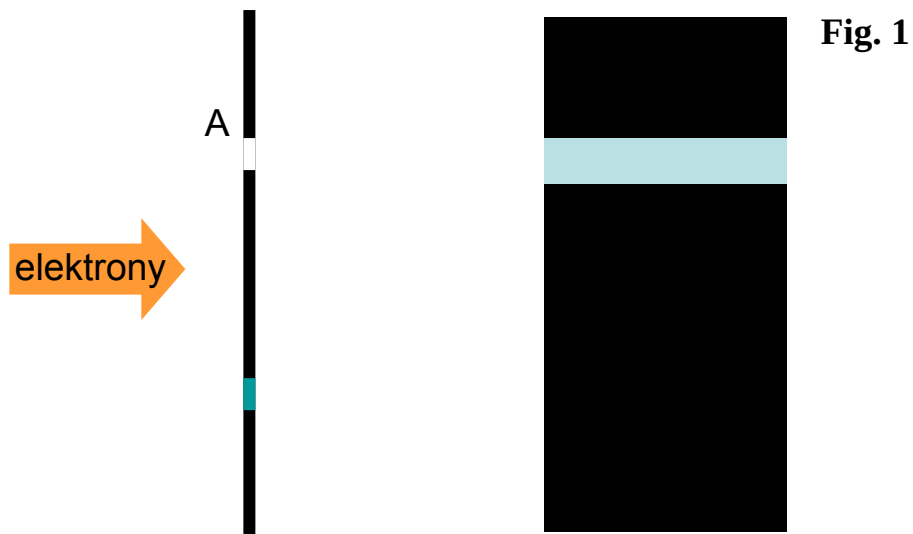


### 3) SKRYTÉ PARAMETRY

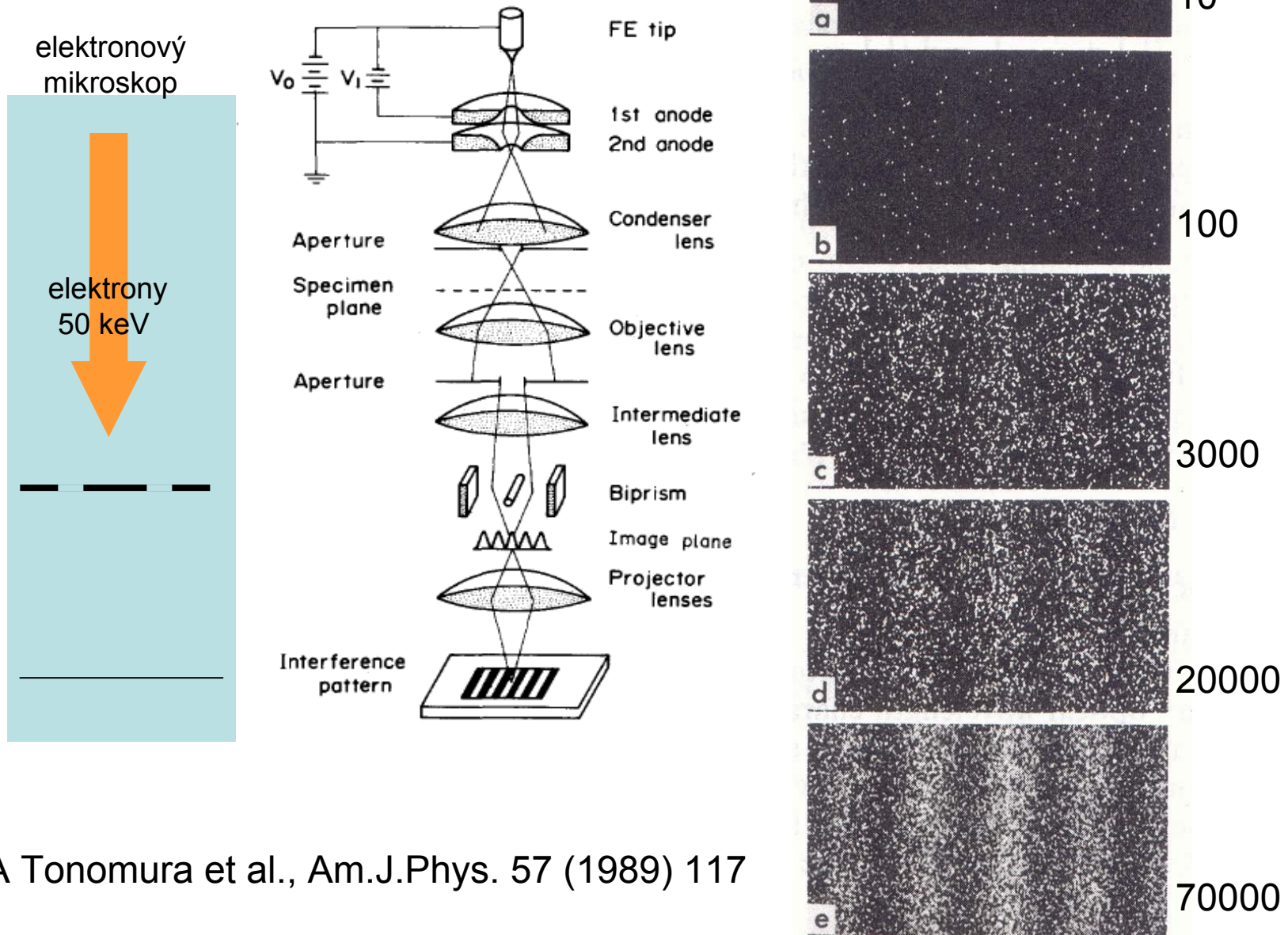




# Dvoušterbinový experiment



# Dvoušterbinový experiment



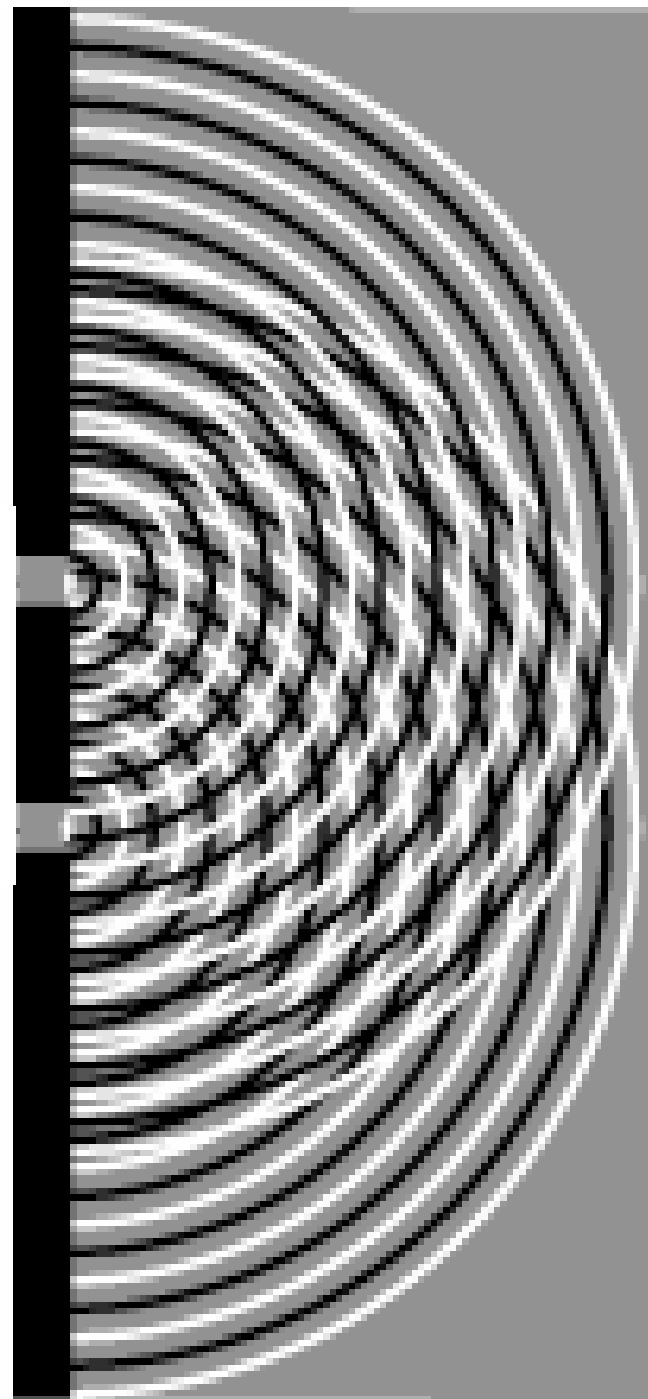
# Kvantová mechanika



**Vlny, ne částice!**

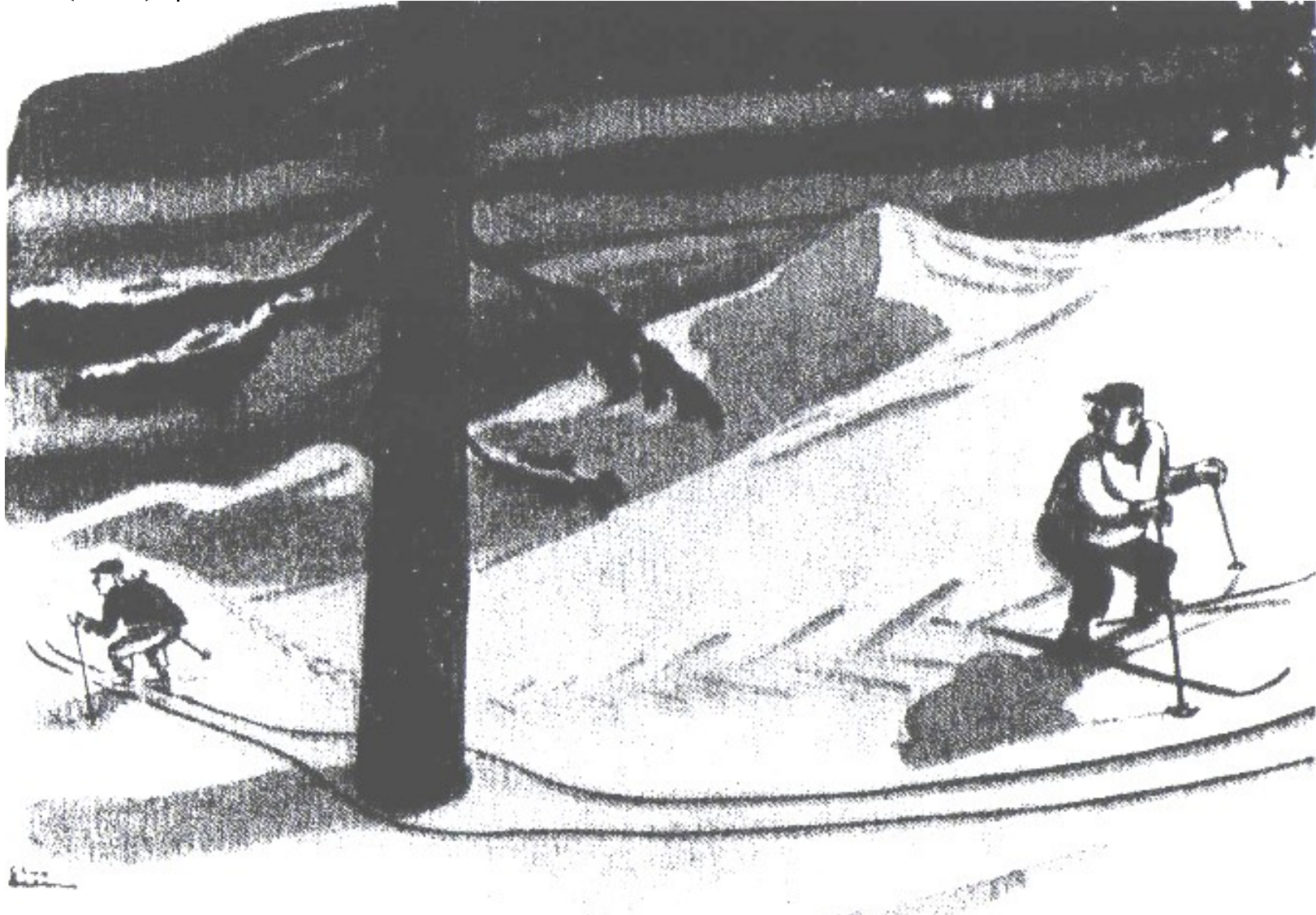
Interferenční chování kvantových částic se vysvětluje jejich vlnovou povahou. Schrödinger zavedl vlnovou funkci

$$\Psi(\vec{r}, t)$$



# Dvoušterbinový experiment

„Kvantové vlny“ si však musí uchovat také částicové vlastnosti. Vlna prochází oběma šterbinami, ale částice je vždy registrována v jednom místě! Interpretace vlnové funkce:  $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$  určuje hustotu pravděpodobnosti nalezení částice v místě  $\vec{r}$ .





1) Nevěřím, že  
Bůh hraje v kostky.

Neradíte Bohu,  
co má dělat!

2) Fyzika  
zkoumá skutečné  
jevy v přírodě.

Žádný jev není jevem, dokud  
není zaznamenaným jevem!

3) Kvantová mechanika obsahuje skrytý  
předpoklad okamžitého působení na dálku.

Ale toto působení nemá  
charakter přenosu informace.

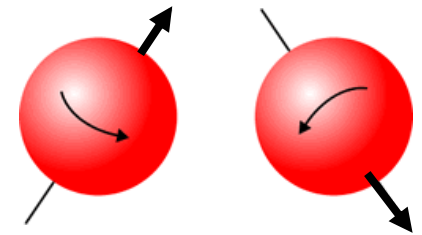
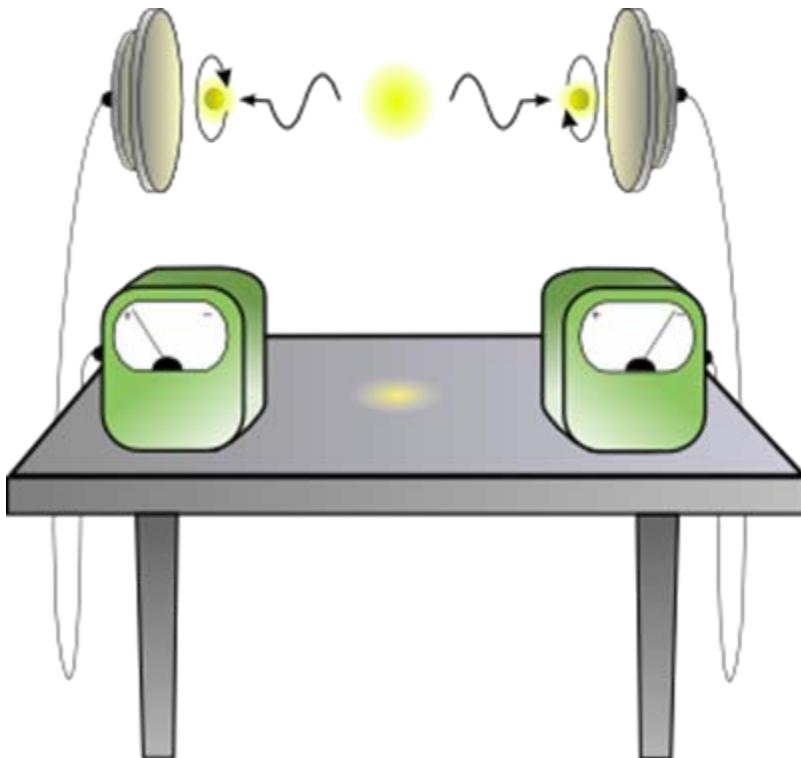
# Paradox EPR (Einstein, Podolsky, Rosen)

Uvažujme dvojici kvantových částic vylétajících do různých směrů, jejichž kvantový stav je popsán vlnovou funkcí

*„kvantově provázaný stav“*

$$\Psi = \Psi(\uparrow\downarrow) + \Psi(\downarrow\uparrow)$$

Tj. buď  $(\uparrow \leftrightarrow \downarrow)$ , nebo  $(\downarrow \leftrightarrow \uparrow)$



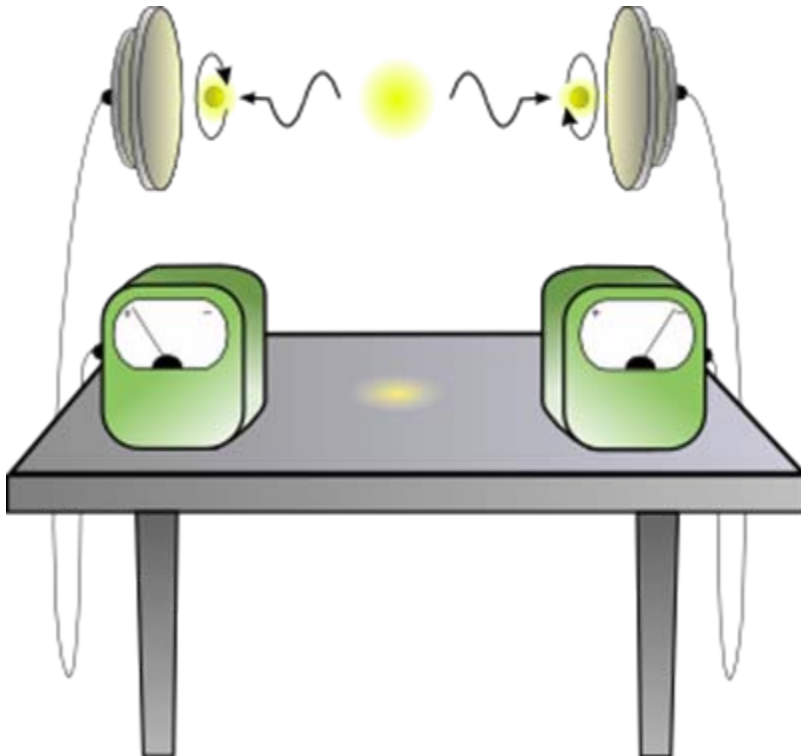
$\Psi$  neurčuje vlastnosti každé z obou částic jednoznačně. Teprve měření na jedné z částic určí vlastnosti druhé částice.

# Paradox EPR (Einstein, Podolsky, Rosen)

Kvantová mechanika je jen provizorní, neúplná teorie. Její pravděpodobnostní charakter vyplývá z existence dosud **skrytých parametrů** částic. V úplné teorii bude vše jasné, stejně jako je jasné, jaké ponožky má pan Bertlmann.

Les chaussettes  
de M. Bertlmann  
et la nature  
de la réalité

Fondation Hegel  
juin 17 1980



O cca 50 let později se ukázalo, že teorie, o které Einstein snil (tj. **lokální teorie se skrytými parametry dávající stejné výsledky jako kvantová mechanika**) **neexistuje!**

John Bell  
(1928-1990)

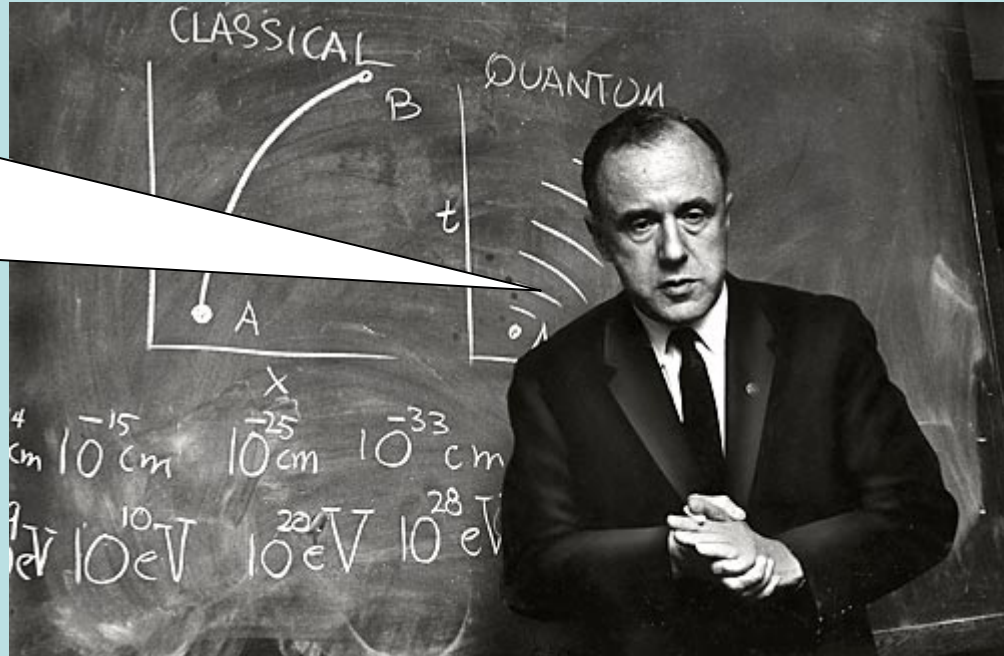




To, co nazýváme „realita“ se skládá z propracované papírové konstrukce představ a teorií upevněné mezi několika železnými pilíři pozorování.



**John Archibald Wheeler** (1911-2008)



### Hra dvaceti otázek:

Jeden účastník hry je poslán ven z místnosti, ostatní se domluví na nějakém slově, dotyčný se vrátí a začne se ptát: 'Je to živé?' 'Ne.' 'Je to na Zemi?' 'Ano.' Otázky jdou od jednoho k druhému, dokud slovo není uhodnuto. .... Nakonec se zeptáte, jestli to slovo je 'mrak'. 'Ano,' zní odpověď a všichni se smějí. Vysvětlují, že se dohodli nedomlouvat dopředu žádné slovo. Každý mohl na jakoukoliv vaši otázku odpovědět 'ano' i 'ne', jak se mu chtělo. Nicméně když odpověděl, musel mít na mysli nějaké konkrétní slovo slučitelné s odpověďmi na všechny předchozí otázky.....

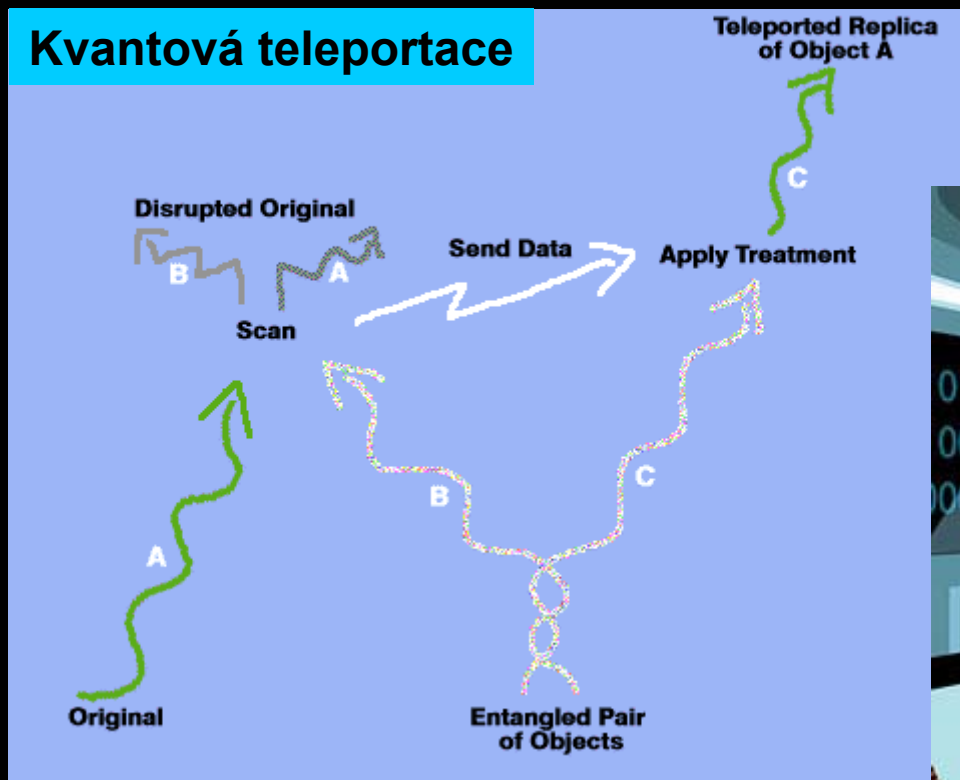
### Cestovatel a automobil:

„Setkat se s kvantovým světem je cítit se jako cestovatel z daleké země, který poprvé v životě vidí automobil. Ta věc má zjevně dávat nějaký užitek, a to podstatný, jenže jaký? Člověk může otevřít dveře, stáhnout a vytáhnout okénko, zapnout a vypnout světla a snad i protočit startér, to všechno bez znalosti hlavního smyslu. Svět kvant je ten automobil. Používáme ho v tranzistoru k řízení strojů, v molekule k přípravě anestetika, v supravodiči k vytvoření magnetu. Je možné, že celou dobu postrádáme to hlavní, totiž roli kvantových principů v konstrukci vesmíru?“



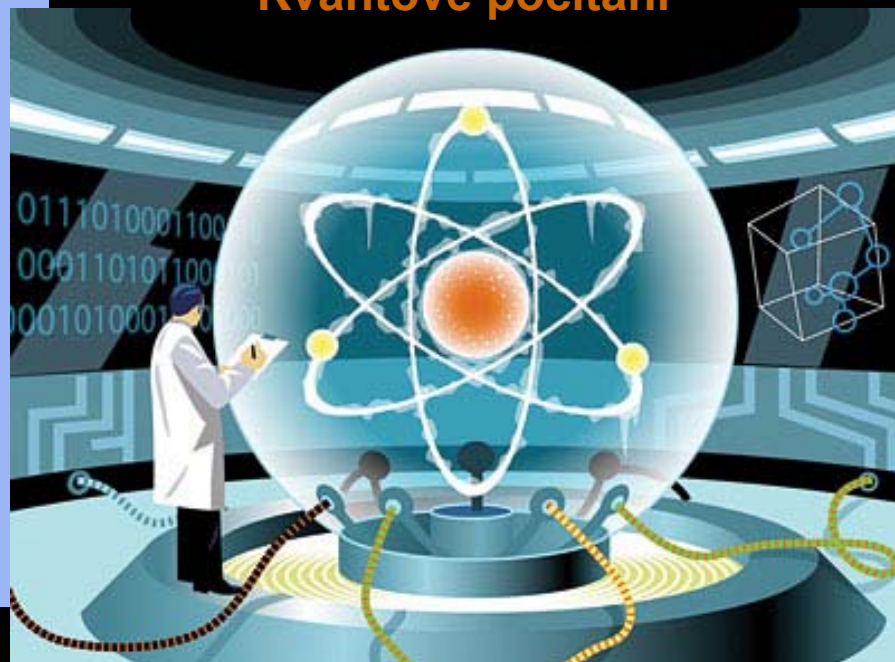
Dnešní fyzikové o správnosti kvantové mechaniky již vesměs nepochybují, spíše se pokoušejí vzájemné provázanosti kvantových objektů prakticky využít...

## Kvantová teleportace



Přenos vlnové funkce z jednoho kvantového objektu (např. fotonu) na jiný

## Kvantové počítání



Využití kvantových korelací pro urychlení některých typů výpočtů (např. faktorizace)

**Budoucnost patří provázanosti !**

