

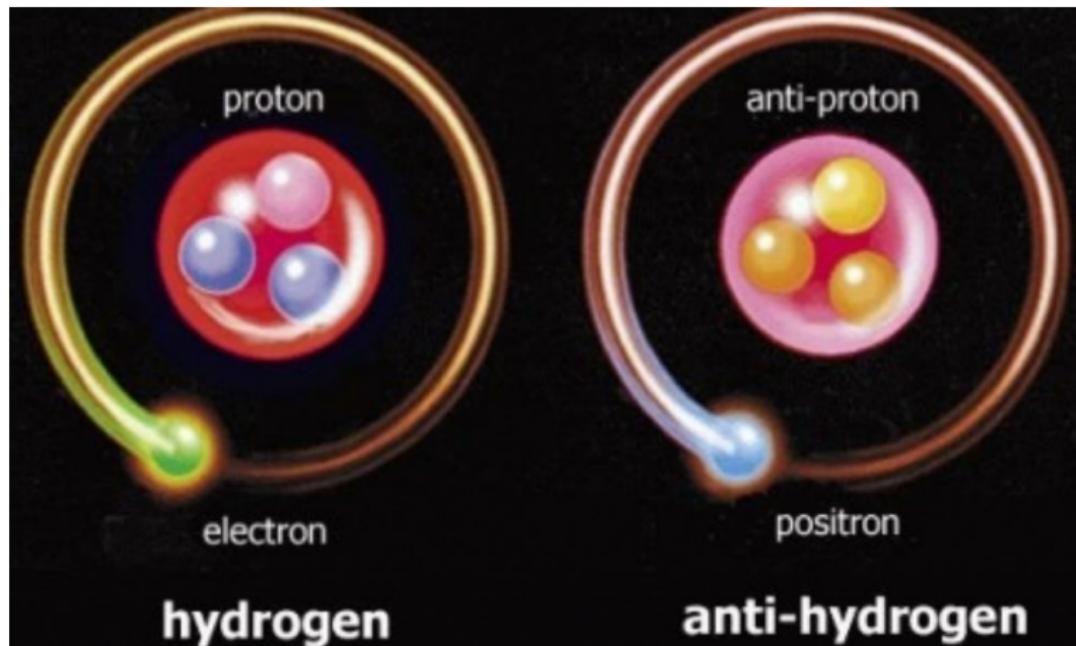
Antihmota: sci-fi vs. realita

Michal Stroff

BrNOC

12. května 2023

O co vlastně jde?



Vodík a antivodík¹

¹Autor: Palahalli R Vishwanath

Počátky

1. pokus o nahrazení Kleinovy–Gordonovy rovnice (1926)

Počátky

1. pokus o nahrazení Kleinovy–Gordonovy rovnice (1926)
2. vznik Diracovy rovnice (1928)

Počátky

1. pokus o nahrazení Kleinovy–Gordonovy rovnice (1926)
2. vznik Diracovy rovnice (1928)
 - ▶ matematický popis veličiny *spin*

Počátky

1. pokus o nahrazení Kleinovy–Gordonovy rovnice (1926)
2. vznik Diracovy rovnice (1928)
 - ▶ matematický popis veličiny *spin*
 - ▶ předpověď existence *pozitronu*

Počátky

1. pokus o nahrazení Kleinovy–Gordonovy rovnice (1926)
2. vznik Diracovy rovnice (1928)
 - ▶ matematický popis veličiny *spin*
 - ▶ předpověď existence *pozitronu*
3. experimentální objev pozitronu (1932)

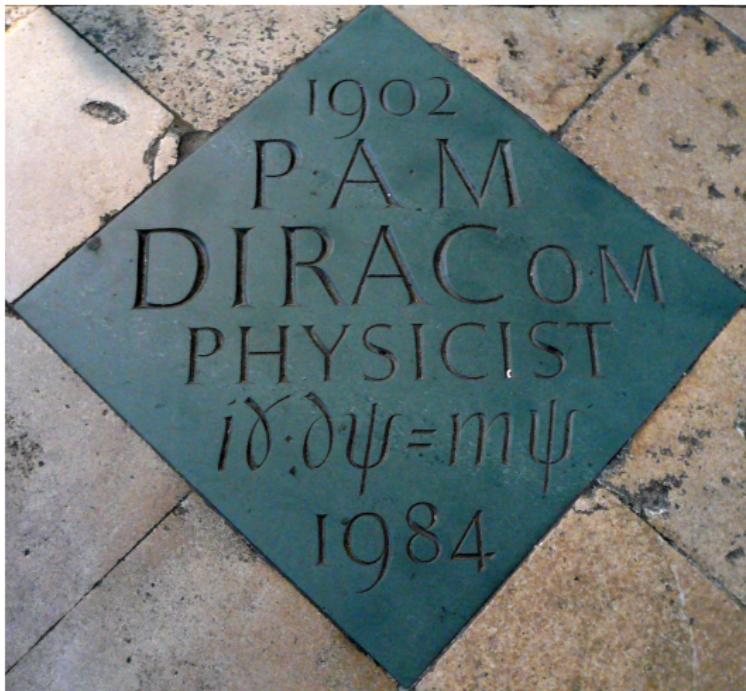
Počátky

1. pokus o nahrazení Kleinovy–Gordonovy rovnice (1926)
2. vznik Diracovy rovnice (1928)
 - ▶ matematický popis veličiny *spin*
 - ▶ předpověď existence *pozitronu*
3. experimentální objev pozitronu (1932)

$$(i\nabla - m)\psi = 0$$

Diracova rovnice

Diracova rovnice



Diracova pamětní deska ve Westminsterském opatství²

²Autor: Stanislav Kozlovskiy

Řešení Diracovy rovnice

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)/\hbar}$$

vlnová funkce volné částice

Řešení Diracovy rovnice

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)/\hbar}$$

vlnová funkce volné částice

- ▶ Z čeho rovnice vychází?

Řešení Diracovy rovnice

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)/\hbar}$$

vlnová funkce volné částice

- ▶ Z čeho rovnice vychází?

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

Řešení Diracovy rovnice

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)/\hbar}$$

vlnová funkce volné částice

- ▶ Z čeho rovnice vychází?

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

- ▶ Kolik řešení má tato rovnice?

Řešení Diracovy rovnice

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r} - Et)/\hbar}$$

vlnová funkce volné částice

- ▶ Z čeho rovnice vychází?

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

- ▶ Kolik řešení má tato rovnice?

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

Diracovo moře

- ▶ Existují fermiony se zápornou energií?

Diracovo moře

- ▶ Existují fermiony se zápornou energií?
- ▶ Dle Diraca ano!

Diracovo moře

- ▶ Existují fermiony se zápornou energií?
- ▶ Dle Diraca ano!
- ▶ Tyto částice se zápornou energií zaplňují prostor, vytváří tak tzv. *Diracovo moře*.

Diracovo moře

- ▶ Existují fermiony se zápornou energií?
- ▶ Dle Diraca ano!
- ▶ Tyto částice se zápornou energií zaplňují prostor, vytváří tak tzv. *Diracovo moře*.
- ▶ Díra v Diracově moři odpovídá *antičástici* daného fermionu.

Diracovo moře

- ▶ Existují fermiony se zápornou energií?
- ▶ Dle Diraca ano!
- ▶ Tyto částice se zápornou energií zaplňují prostor, vytváří tak tzv. *Diracovo moře*.
- ▶ Díra v Diracově moři odpovídá *antičástici* daného fermionu.
- ▶ Původní Diracova představa se týkala elektronu a pozitronu.

Diracovo moře

- ▶ Existují fermiony se zápornou energií?
- ▶ Dle Diraca ano!
- ▶ Tyto částice se zápornou energií zaplňují prostor, vytváří tak tzv. *Diracovo moře*.
- ▶ Díra v Diracově moři odpovídá *antičástici* daného fermionu.
- ▶ Původní Diracova představa se týkala elektronu a pozitronu.

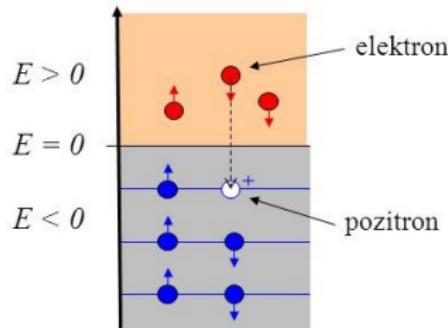
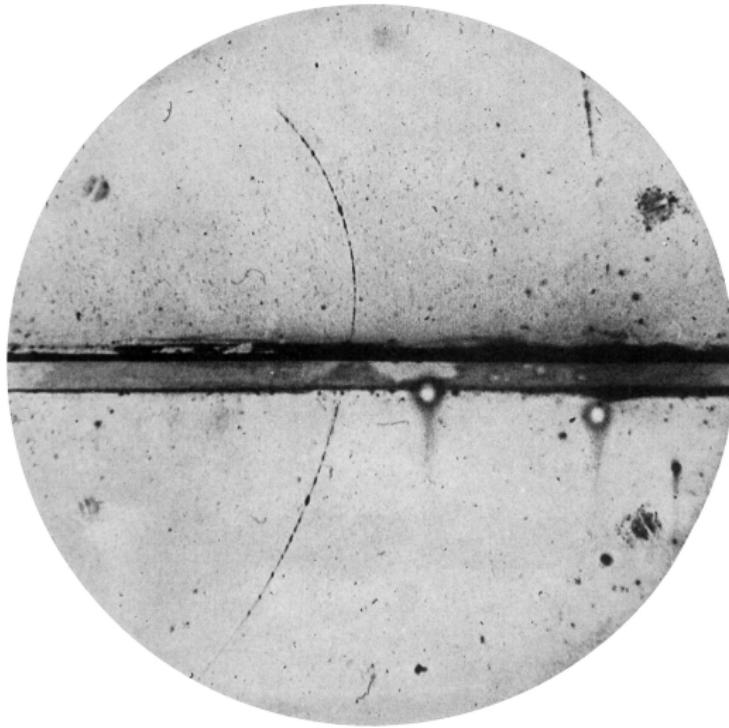


Schéma Diracova moře³

³Jakub Čížek

Objev pozitronu



Carl David Anderson (1932)

Kvazičástice?

Je pozitron pouze kvazičástice?

Feynmanova–Stückelbergova interpretace

- ▶ Elektron:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} - E_e t)/\hbar}$$

Feynmanova–Stückelbergova interpretace

- ▶ Elektron:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} - E_e t)/\hbar}$$

- ▶ „Elektron“ se zápornou energií (a hybností):

$$\psi^-(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi^- \\ \chi^- \end{pmatrix} e^{i(-\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} + E_e t)/\hbar}$$

Feynmanova–Stückelbergova interpretace

- ▶ Elektron:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} - E_e t)/\hbar}$$

- ▶ „Elektron“ se zápornou energií (a hybností):

$$\psi^-(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi^- \\ \chi^- \end{pmatrix} e^{i(-\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} + E_e t)/\hbar}$$

- ▶ Časová reverze (T):

$$T e^{i(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} - E_e t)/\hbar} = e^{i(-\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} + E_e t)/\hbar}$$

Feynmanova–Stückelbergova interpretace

- ▶ Elektron:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \end{pmatrix} e^{i(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} - E_e t)/\hbar}$$

- ▶ „Elektron“ se zápornou energií (a hybností):

$$\psi^-(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} \varphi^- \\ \chi^- \end{pmatrix} e^{i(-\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} + E_e t)/\hbar}$$

- ▶ Časová reverze (T):

$$T e^{i(\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} - E_e t)/\hbar} = e^{i(-\mathbf{p}_e \cdot \mathbf{r} + E_e t)/\hbar}$$

- ▶ Pozitron odpovídá elektronu „cestujícímu zpět v čase“.



jako Feynmanova a Wheelerova hypozéza, že
pozitron je elektron cestující zpět v čase?

Trailer

Majoranovy fermiony

$$i\cancel{D}\psi - m\psi^c = 0$$

Majoranova rovnice

ψ – vlnová funkce fermionu

ψ^c – vlnová funkce antičástice daného fermionu

Majoranovy fermiony

$$i\cancel{D}\psi - m\psi^c = 0$$

Majoranova rovnice

ψ – vlnová funkce fermionu

ψ^c – vlnová funkce antičástice daného fermionu

- ▶ Majoranova rovnice popisuje fermiony, které jsou samy sobě antičásticí.

Majoranovy fermiony

$$i\cancel{\partial}\psi - m\psi^c = 0$$

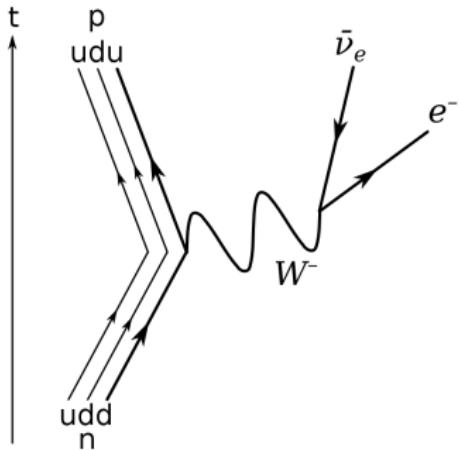
Majoranova rovnice

ψ – vlnová funkce fermionu

ψ^c – vlnová funkce antičástice daného fermionu

- ▶ Majoranova rovnice popisuje fermiony, které jsou samy sobě antičásticí.
- ▶ od italského fyzika Ettora Majorany (1937)

Neutrino



β^- rozpad:

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

β^+ rozpad:

$$p \longrightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Dvojitý beta rozpad

Probíhá rozpad bez uvolnění neutrin?



Dvojitý beta rozpad

Probíhá rozpad bez uvolnění neutrin?



- ▶ Ano, neutrina jsou Majoranovy fermiony.

Dvojitý beta rozpad

Probíhá rozpad bez uvolnění neutrin?



- ▶ Ano, neutrina jsou Majoranovy fermiony.
- ▶ Ne, neutrina jsou Diracovy fermiony.

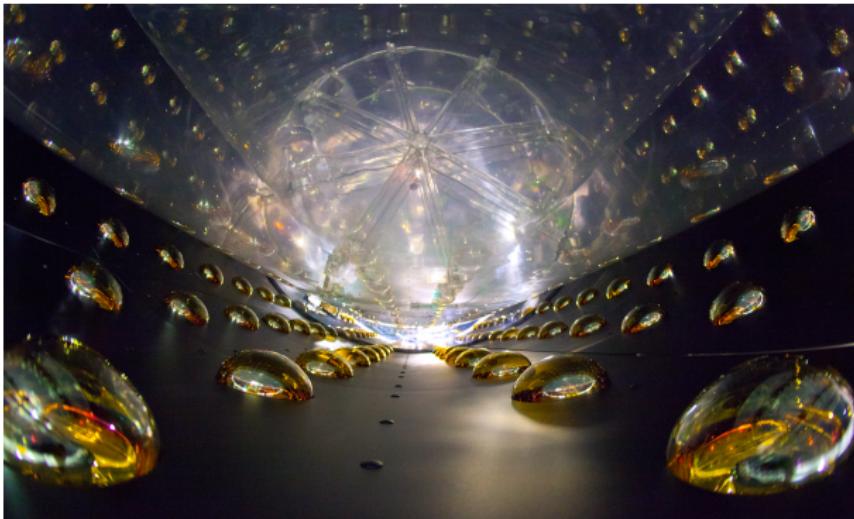


Experiment?

- ▶ průlet neutrin na Zemi: $6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

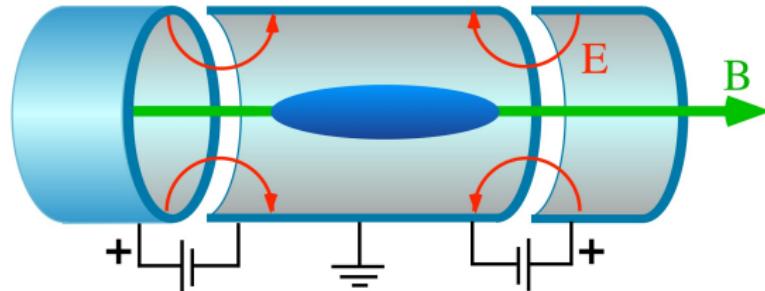
Experiment?

- ▶ průlet neutrin na Zemi: $6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
- ▶ Za celý život zachytíte nejpravděpodobněji právě 1 neutrino.



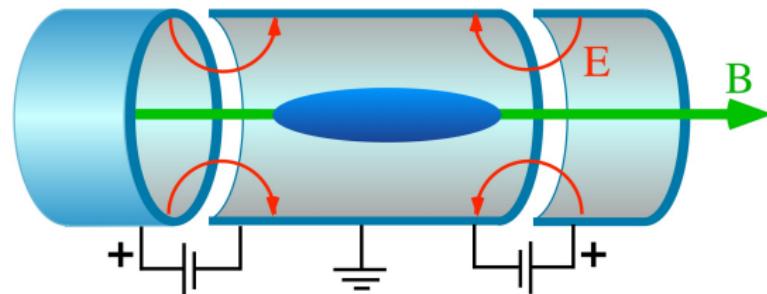
Daya Bay detektor (Čína)

Penningova past



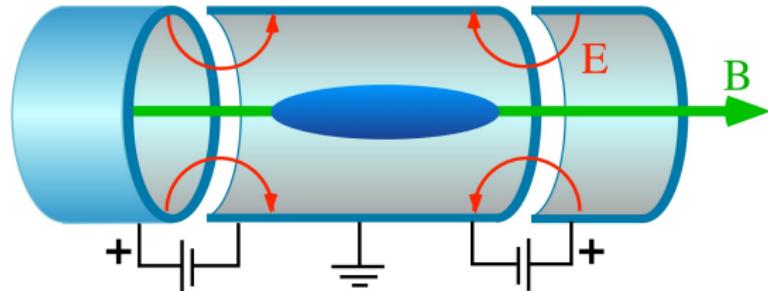
- ▶ pokus o udržení antihmoty

Penningova past



- ▶ pokus o udržení antihmoty
- ▶ měření energie přechodu pozitronu ze stavu $1s$ do $2s$ v „atomu“ antivodíku

Penningova past



- ▶ pokus o udržení antihmoty
- ▶ měření energie přechodu pozitronu ze stavu $1s$ do $2s$ v „atomu“ antivodíku
- ▶ měření hyperjemného rozštěpení v „atomu“ antivodíku

Andělé a démoni



Bomba z antihmoty⁴

⁴Autor: Miloš Kuřátko

Shrnutí

1. Diracova rovnice

1. Diracova rovnice
2. Diracovo moře

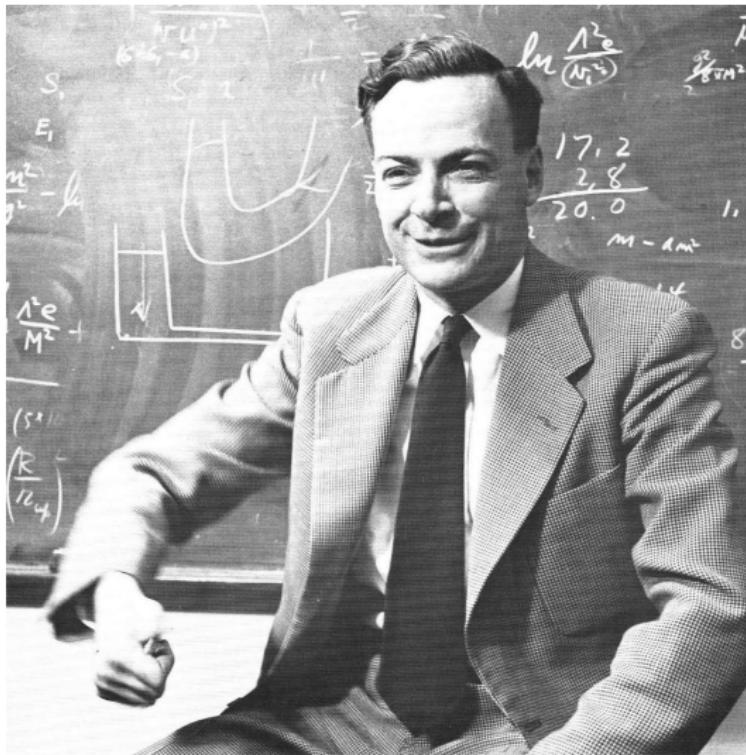
1. Diracova rovnice
2. Diracovo moře
3. Feynmanova–Stückelbergova interpretace

1. Diracova rovnice
2. Diracovo moře
3. Feynmanova–Stückelbergova interpretace
4. Majoranova hypotéza

1. Diracova rovnice
2. Diracovo moře
3. Feynmanova–Stückelbergova interpretace
4. Majoranova hypotéza
5. pátrání po Majoranových částicích

1. Diracova rovnice
2. Diracovo moře
3. Feynmanova–Stückelbergova interpretace
4. Majoranova hypotéza
5. pátrání po Majoranových částicích
6. izolování antihmoty

Děkuji za vyslechnutí!



- ▶ KLÍMA, Jan, VELICKÝ, Bedřich. *Kvantová mechanika I.* Praha: Karolinum, 2016.
- ▶ FEYNMAN, Richard P., LEIGHTON, Robert B., SANDS, Matthew. *Feynmanovy přednášky z fyziky 3.* Praha: Fragment, 2018.
- ▶ KULHÁNEK, Petr. *Vybrané kapitoly z teoretické fyziky I.* Praha: AGA, 2020.
- ▶ SCIASCIA, Leonardo. *Zmizení Ettora Majorany.* Praha: Triáda, 2017.