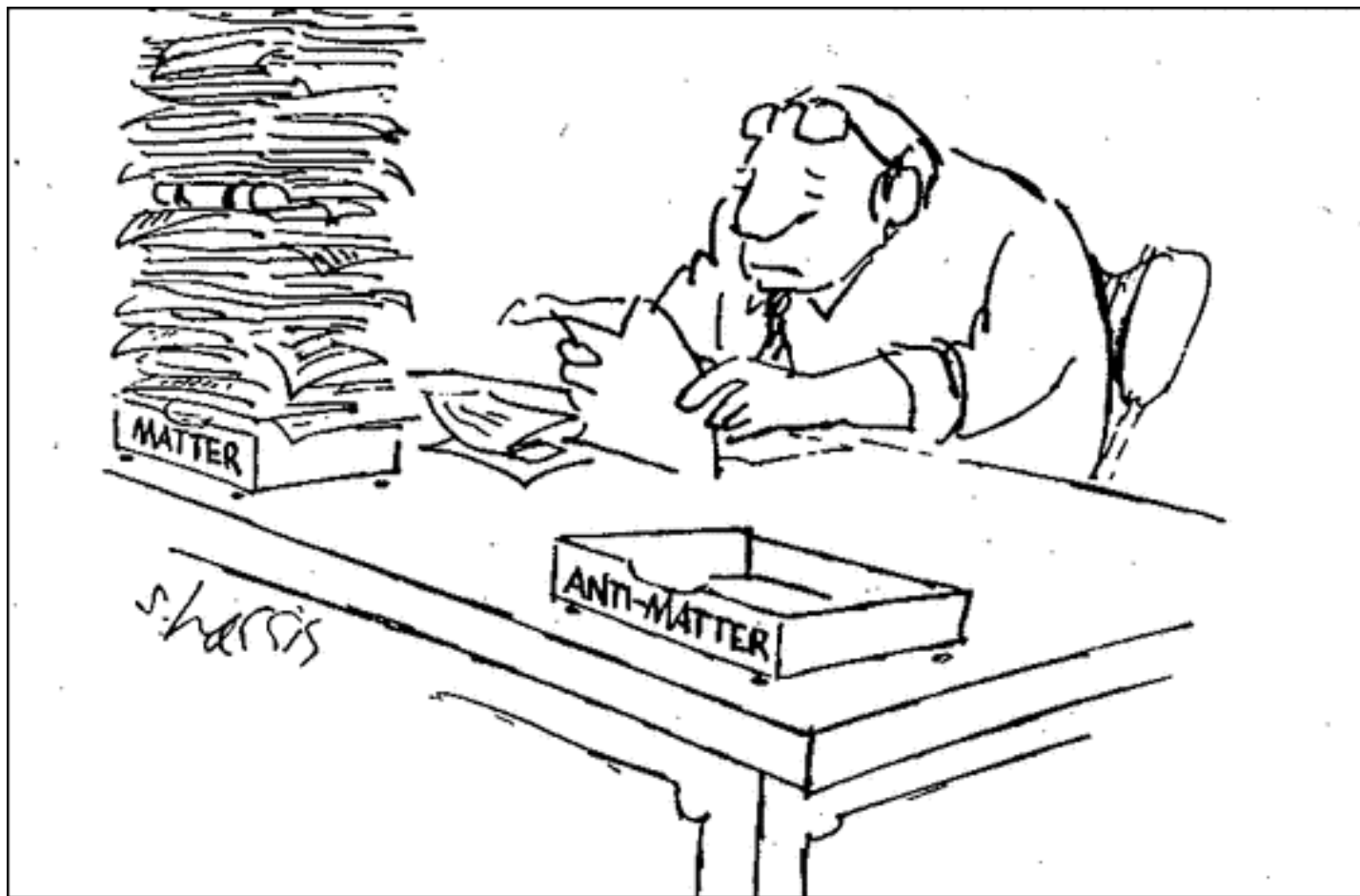


Hmota a antihmota





Paul Adrien Maurice Dirac



- **1926 (24)** - objevil souvislost Poissonových závorek s kvantovou teorií.
- **1926 (24)** - nezávisle na Fermim odvodil statistické rozdělení pro soustavu částic s poločíselným spinem, tzv. Fermi-Diracovo rozdělení.
- **1927 (25)** - Dirac vytváří vlastní formalismus v kvantové teorii a ukazuje ekvivalenci mezi Heisenbergovou a Schrödingerovou kvantovou teorií.
- **1927 (25)** - Dirac navrhuje metodu druhého kvantování - přirozený přechod ke kvantové teorii pole.
- **1927 (25)** - Dirac vytváří 1. model kvantování elektromagnetického pole a pokládá základy kvantové elektrodynamiky.
- **1928 (26)** - Dirac položil základy relativistické kvantové teorie, odvodil slavnou Diracovu rovnici. Předpovídá na základě této rovnice existenci pozitronu (byl objeven v roce 1932).
- **1929 (27)** - cesta kolem světa

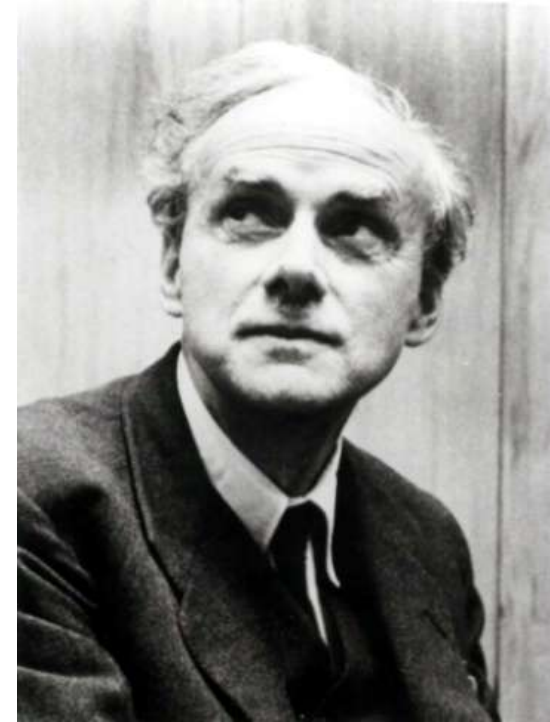


Paul Adrien Maurice Dirac
(1902-1984)

Paul Adrien Maurice Dirac



- **1930 (28)** - Dirac vydává "Principy kvantové mechaniky", knihu, která pro svůj formalismus zpočátku vyvolala bouři nevole.
- **1931 (29)** - **Předpověď existence antihmoty. Nejen elektron, ale každá částice by měla mít svoji antičástici.**
- **1931 (29)** - Předpověď existence magnetického monopólu.
- **1932 (30)** - Objev mnohačasticového formalismu v kvantové teorii, důsledná relativistická formulace kvantové elektrodynamiky. V tomto roce byl objeven Diracem předpovězený pozitron.
- **1933 (31)** - Dirac a Schrödinger získávají NC za kvantovou teorii.
- **1933 (31)** - Teorie děr, základy kvantové teorie polí částic a antičástic.
- **1933 (31)** - Předpověď polarizace vakua, netriviálních dynamických vlastností vakua v důsledku neustálé tvorby částic a antičástic.

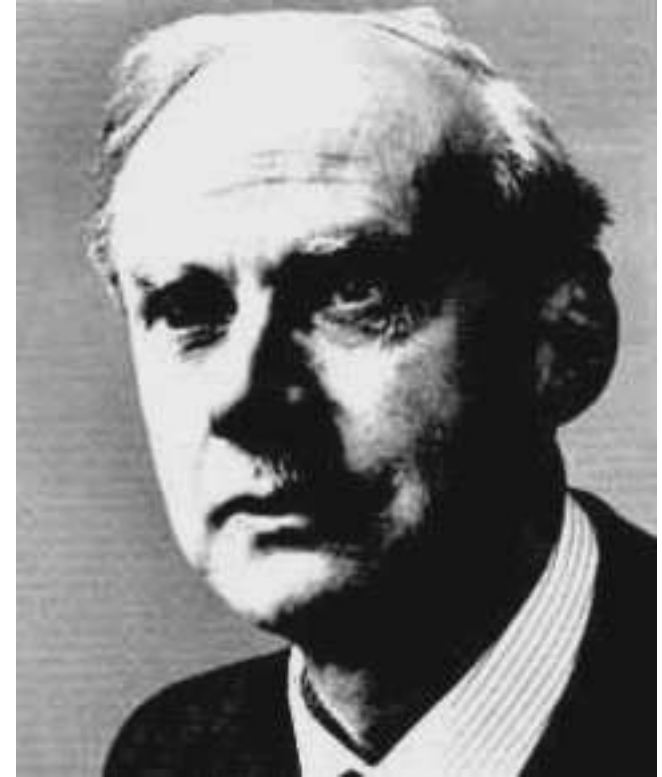


Paul Adrien Maurice Dirac
(1902-1984)

Paul Adrien Maurice Dirac



- **1934 (32)** - Předpověď vzniku velkého počtu částic při srážce dvou vysoce energetických částic. Potvrzeno až za 15 let.
- **1936 (34)** - Dirac vytváří obecnou kvantovou teorii pole.
- **1937 (35)** - Úvahy o možných důsledcích změny gravitační konstanty.
- **1937 (35)** - Teorie kvantování na zakřiveném časoprostoru.
- **1942 (40)** - Použití indefinitní metriky v kvantové teorii pole, odstranění některých dosavadních obtíží.
- **1984 (82)** - 20. 10. 1984 se uzavírá životní dráha jednoho z nejvýznamnějších fyziků 20. století.



Paul Adrien Maurice Dirac
(1902-1984)

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} c^2 \quad G_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu} T_{\mu\nu}$$

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\sigma} (g_{\sigma\mu,\nu} + g_{\sigma\nu,\mu} - g_{\mu\nu,\sigma})$$

$$\frac{d^2 x^{\mu}}{ds^2} - \Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} \frac{dx^{\alpha}}{ds} \frac{dx^{\beta}}{ds} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt}$$

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

$$\delta S = \delta \int L dt = 0$$

$$\partial_{\nu} T^{\mu\nu} = 0$$

$$c^2 \nabla^2 \psi = \frac{d^2 \psi}{dt^2}$$

$$n(E) = e^{-\frac{(E-\mu)/kT}{}}$$


$$[\mathbf{x}, \mathbf{p}] = i\hbar \delta_{ij}$$

$$(\nabla^2 - V)\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$



$$(\gamma_{\mu} \partial^{\mu} + \frac{m_0 c}{\hbar}) \psi = 0$$

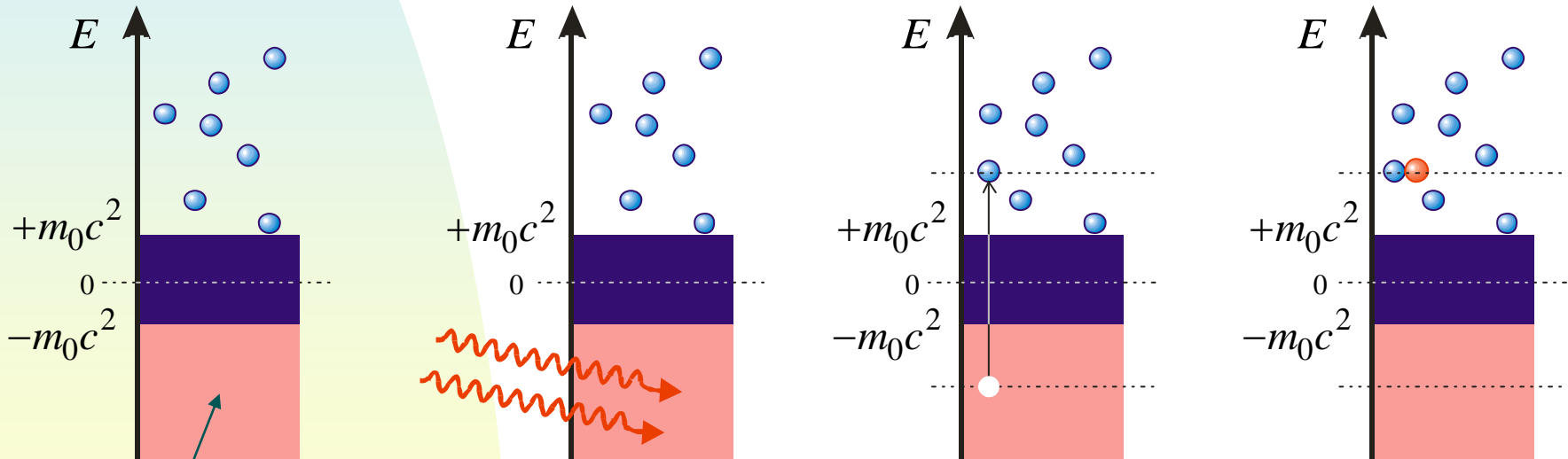
$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$



$\mathcal{L} = g\phi \vec{E} \cdot \vec{B}$

$\mathcal{L} = g\phi (E^2 - B^2)$

Diracovo moře (1928)



Diracovo moře
záporných stavů

díra v moři

≡

antičástice
(pozitron)

Objev pozitronu (1932)



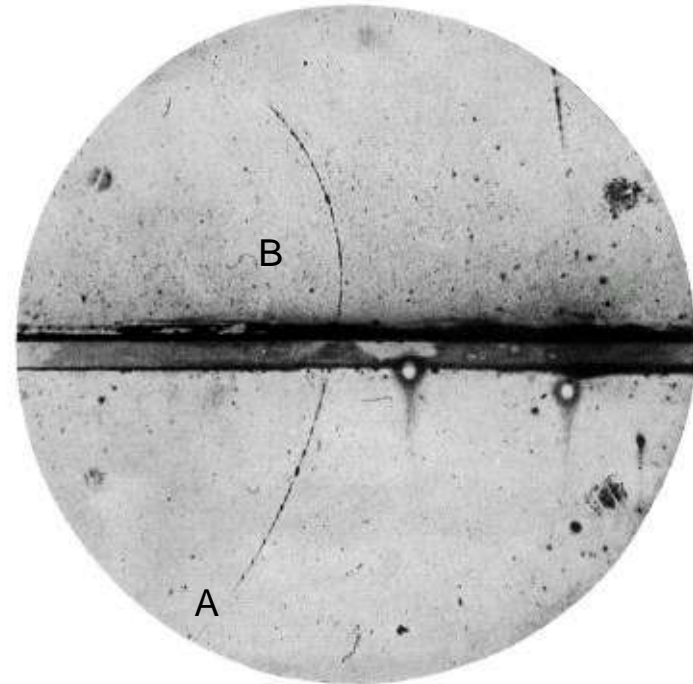
1932 - C. D. Anderson - objev pozitronu ve stopách kosmického záření v mlžné komoře

1933 - P. M. S. Blackett (GB), G. Occhialini (It) - potvrzení

1936 - Nobelova cena za objev pozitronu (Anderson) a za výzkum kosmického záření (Hess)



Carl David Anderson (1905-1991) pracoval pod vedením R. A. Millikana, v roce 1932 objevil pozitron a v roce 1936 mion, těžký elektron.

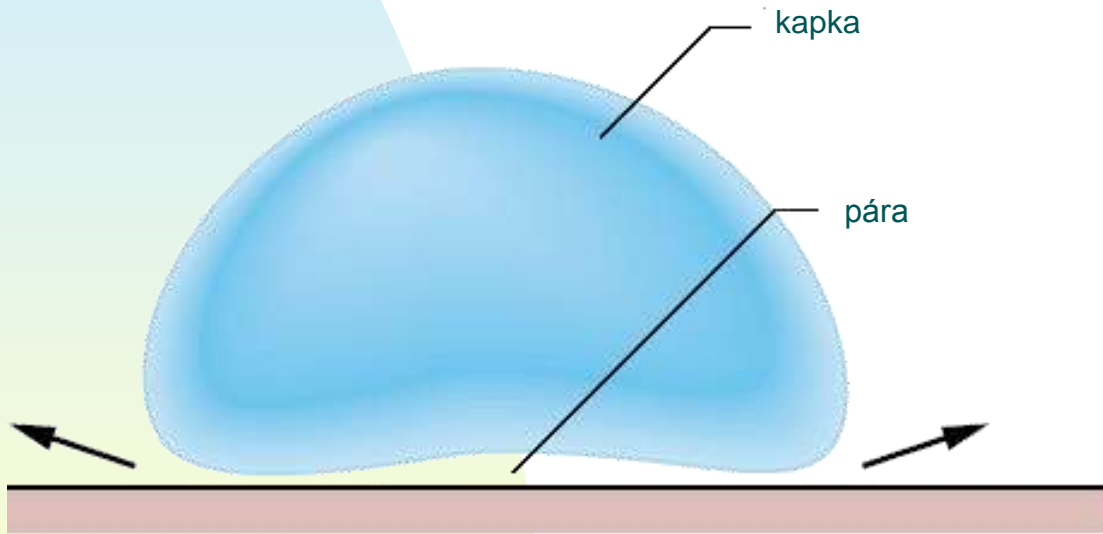


Objevitelský snímek pozitronu. Pozitron s vysokou energií vniká do mlžné komory v místě A. Po průchodu 6 mm tlustým olověným plátem ztrácí část své energie. Ze zakřivení trajektorie v magnetickém poli je možné určit náboj i hmotnost částice.

Alfvénův svět antihmoty



- ve vesmíru mohou být rozsáhlé oblasti antihmoty
- interakce s hmotou není objemová, ale jen plošná
- hmota a antihmota je oddělena Leidenfrostovými vrstvami
- dnes překonaná teorie



J. G. Leidenfrost: *On the Fixation of Water in Diverse Fire*, International Journal of Heat and Mass Transfer 9 (1966) 1153–1166, překlad latinského originálu z roku 1756.



Hannes Olof Gösta Alfvén
(1908-1995)

Antihmota v současném vesmíru



IMAX (Isotope Matter-Antimatter Experiment):

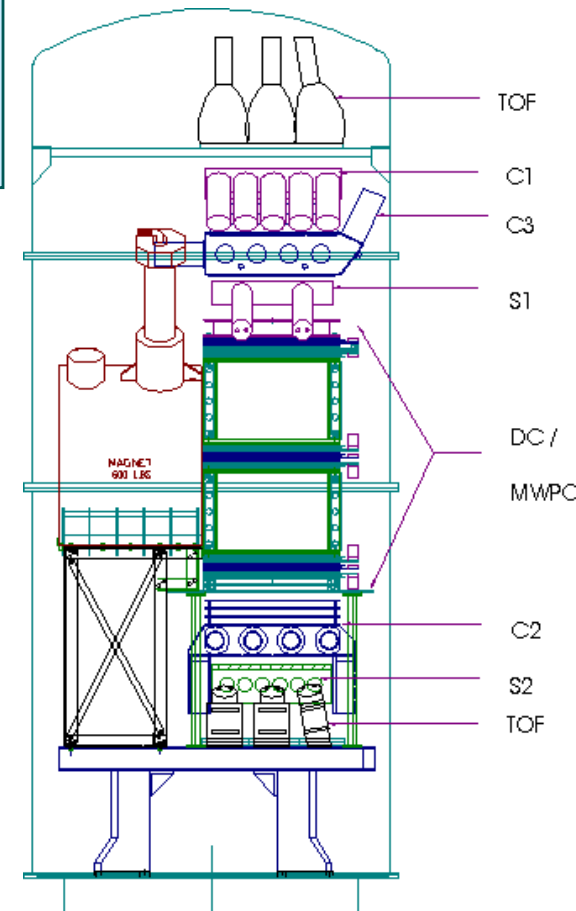
start: Lynn Lake, Manitoba, Kanada,

trvání experimentu: 16 hodin (16.-17.7.1992)

výška: 36 km

měření: spektrum částic kosmického záření
(protony, antiprotony, deuterium, helium-3, helium-4)

citlivost: ~0.2 to ~3.2 GeV/nukleon



Antihmota v současném vesmíru

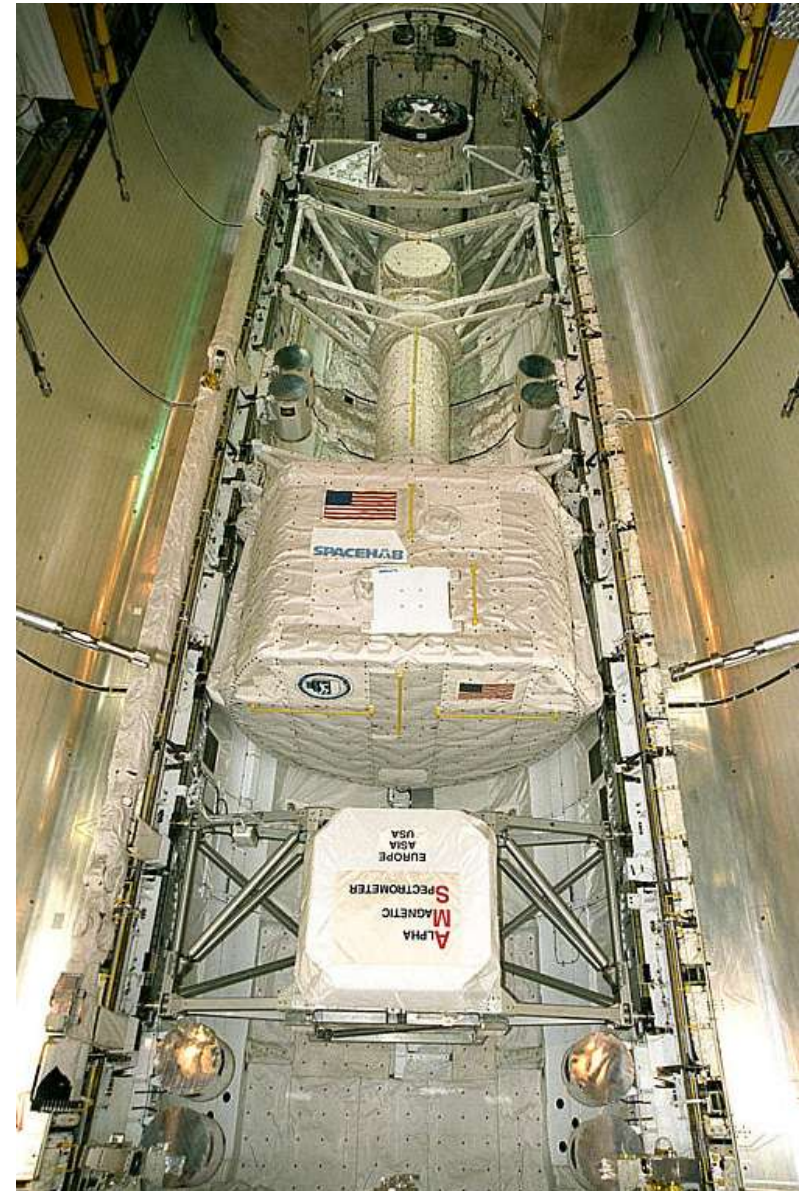
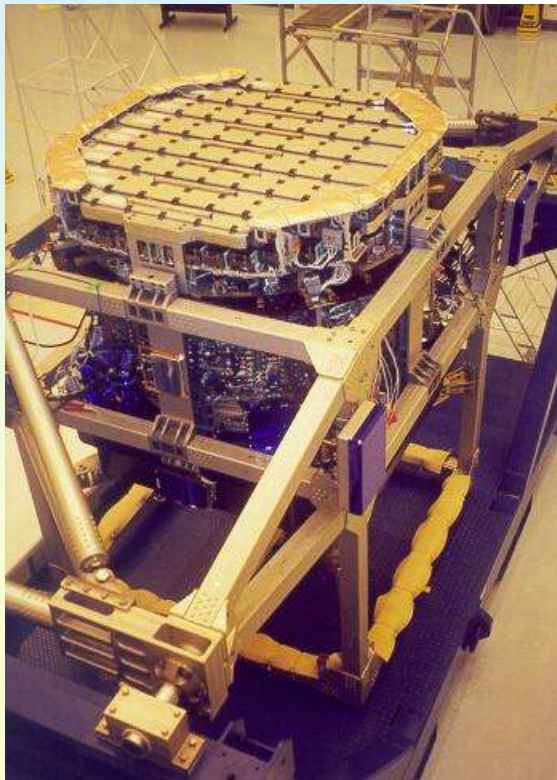


AMS-01 (Alpha Magnetic Spectrometer):

start: raketoplán Discovery, 1998

zařízení: 10 m³, 3 tuny, spotřeba 2 kW

měření: detektor vysoce energetických částic





Antihmota v současném vesmíru



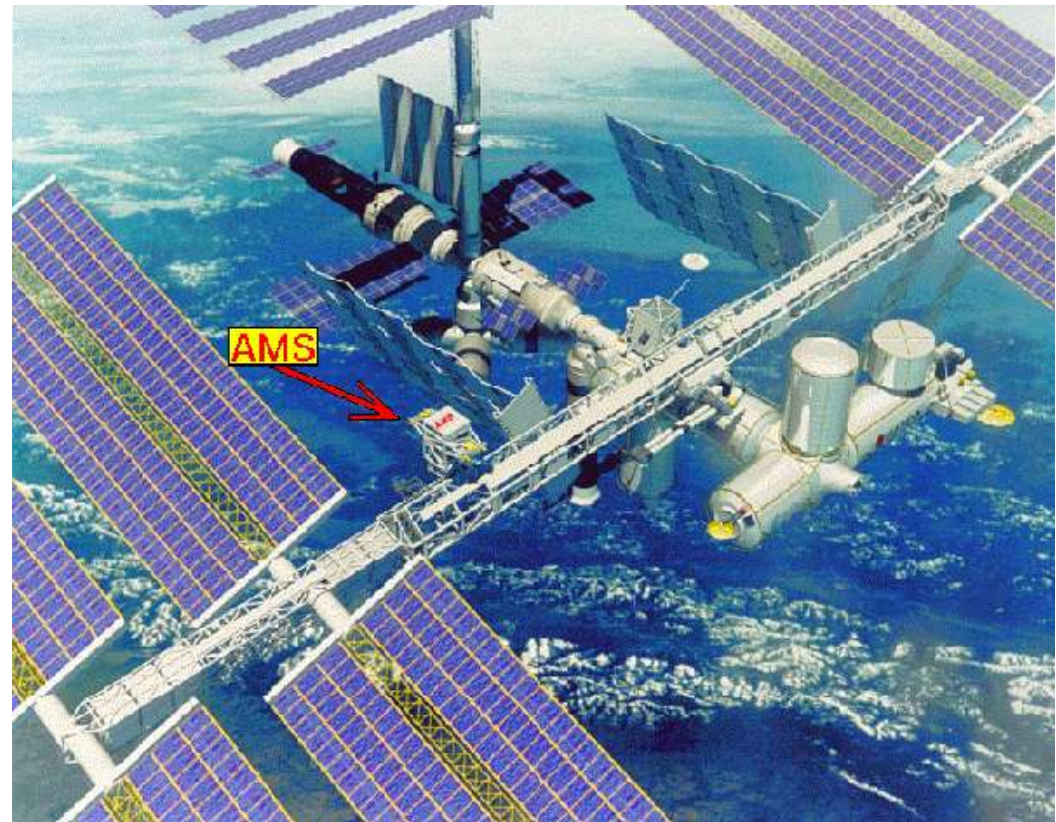
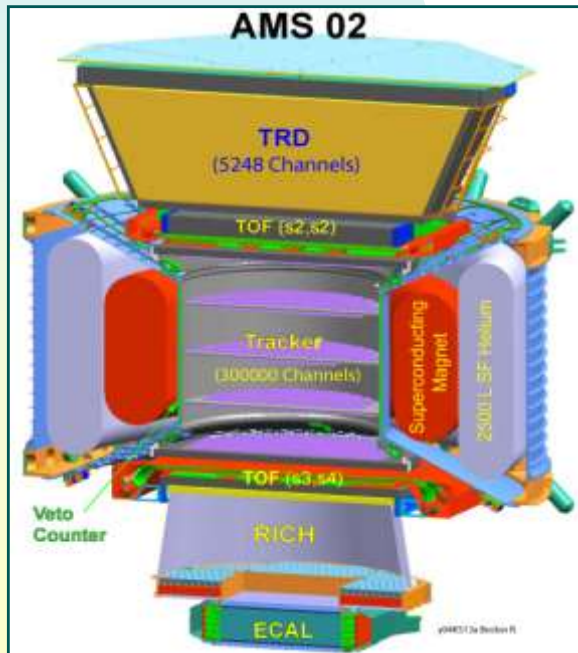
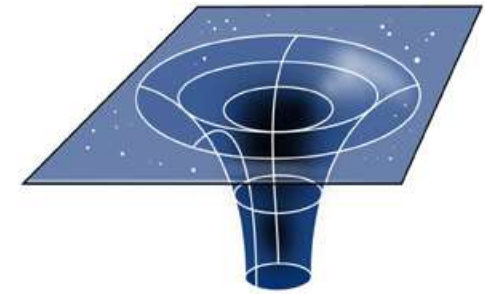
AMS-02

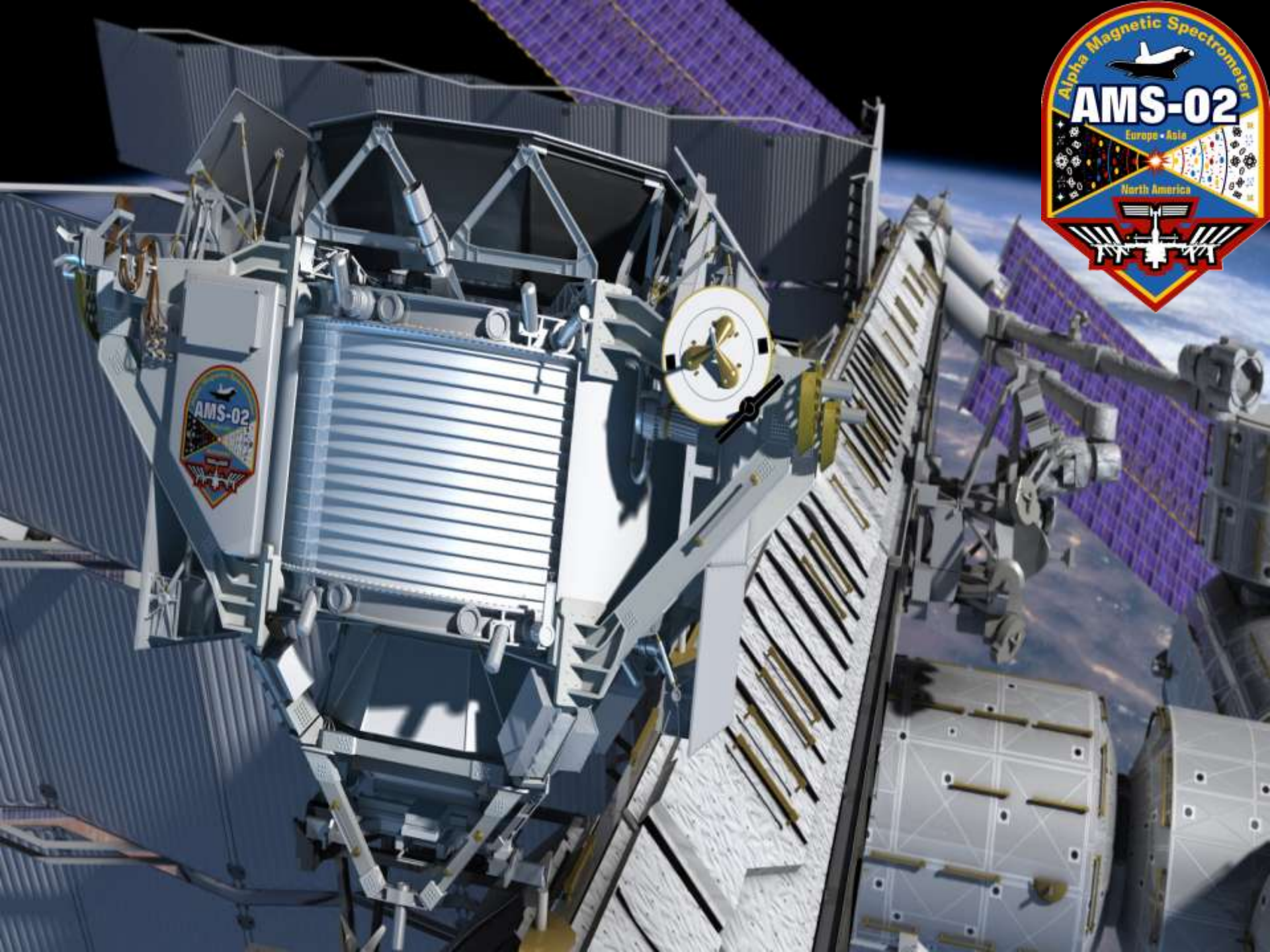
start: prosinec 2010?, mezinárodní kosmická stanice

trvání měření: 3 roky?

hmotnost: 6 700 kg

supravodivý magnet, Čerenkovův detektor, EM kalorimetr

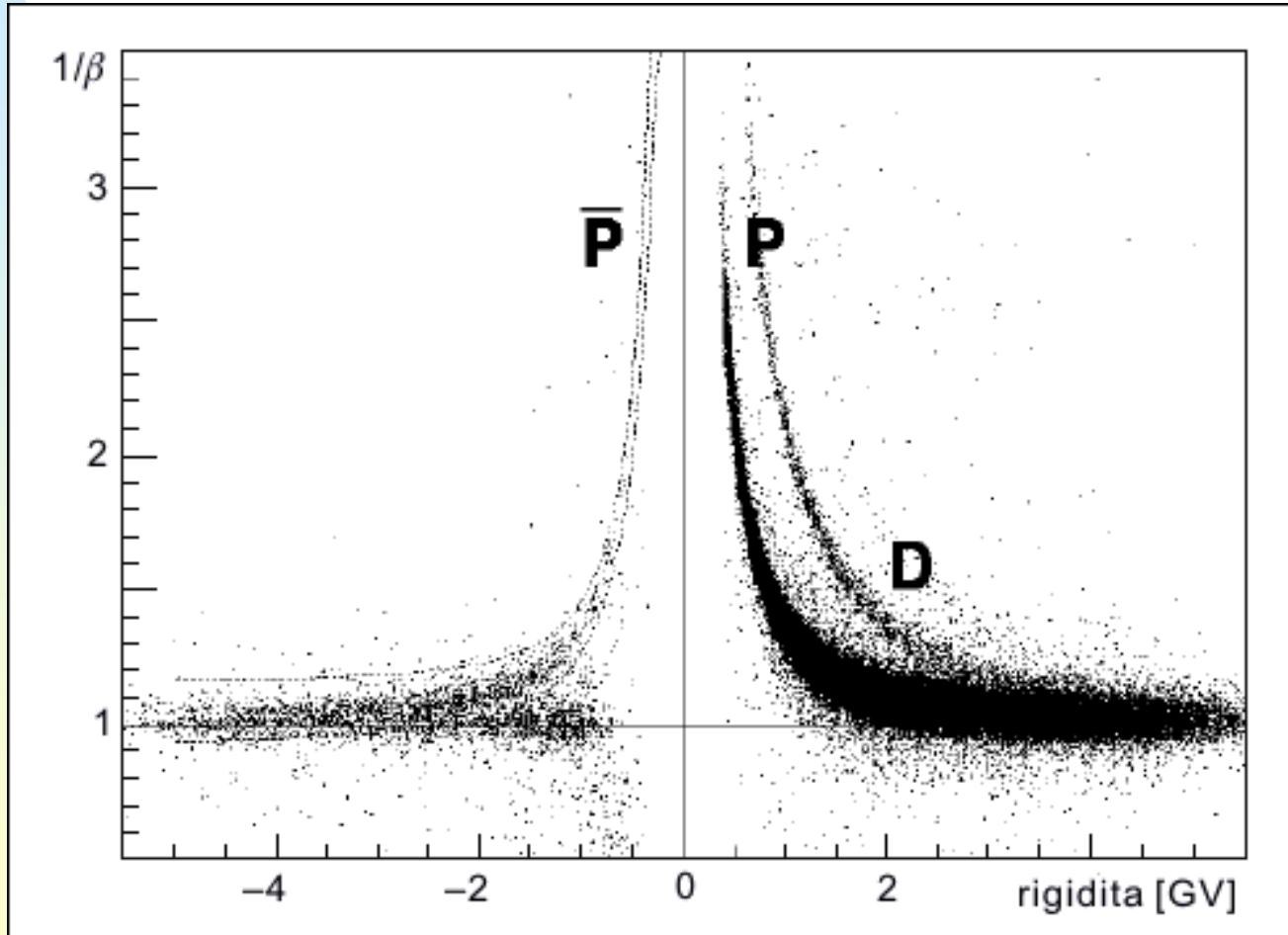




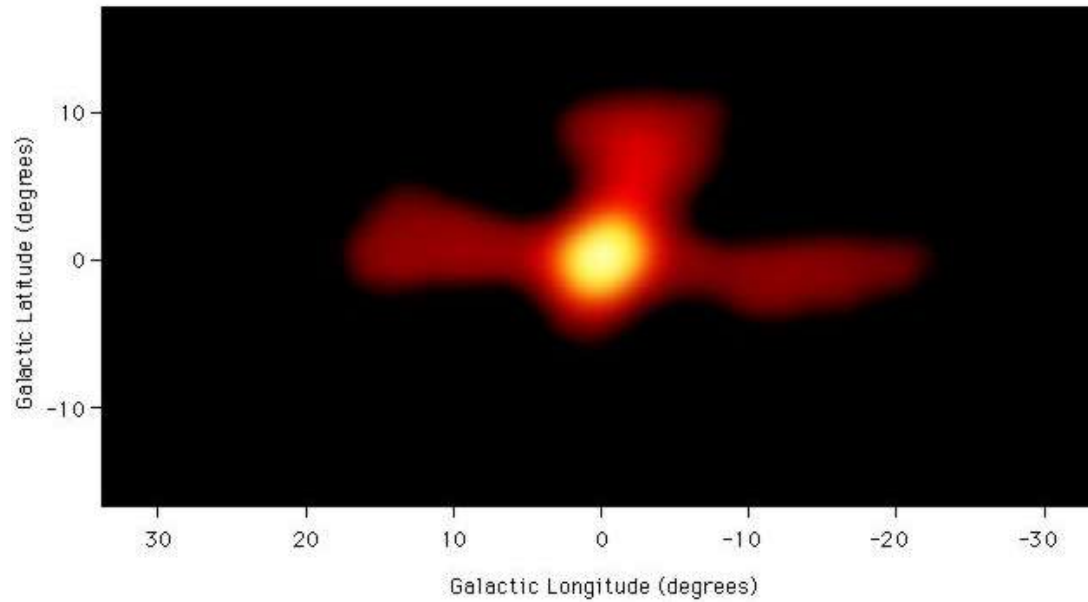
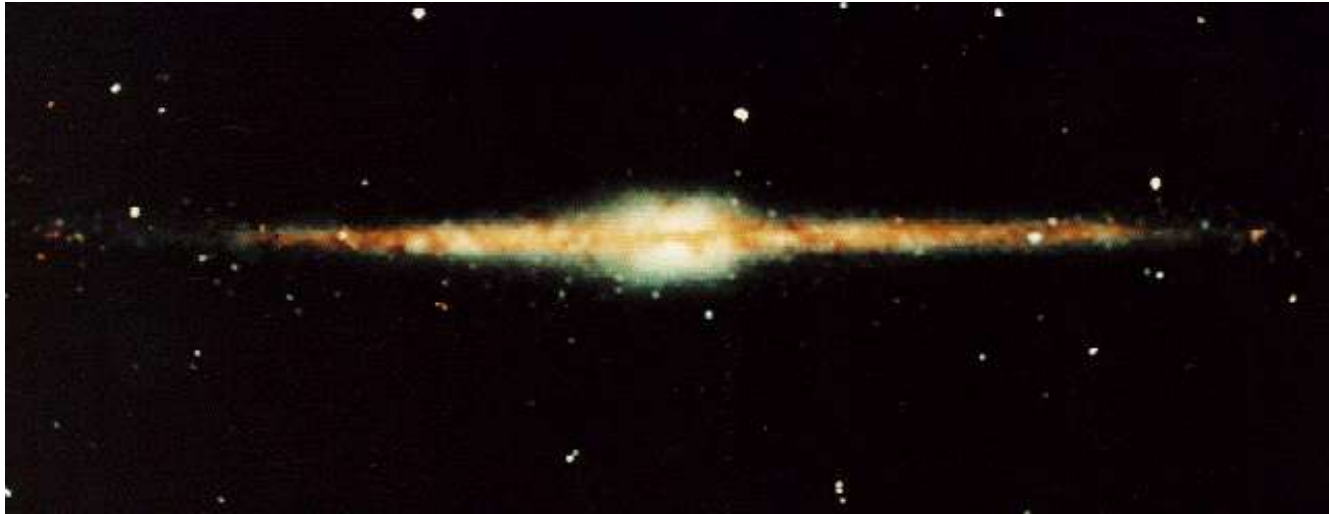
Experiment Bess-Polar (1993-2005)



900 milionů událostí
2,14 terrabytů dat

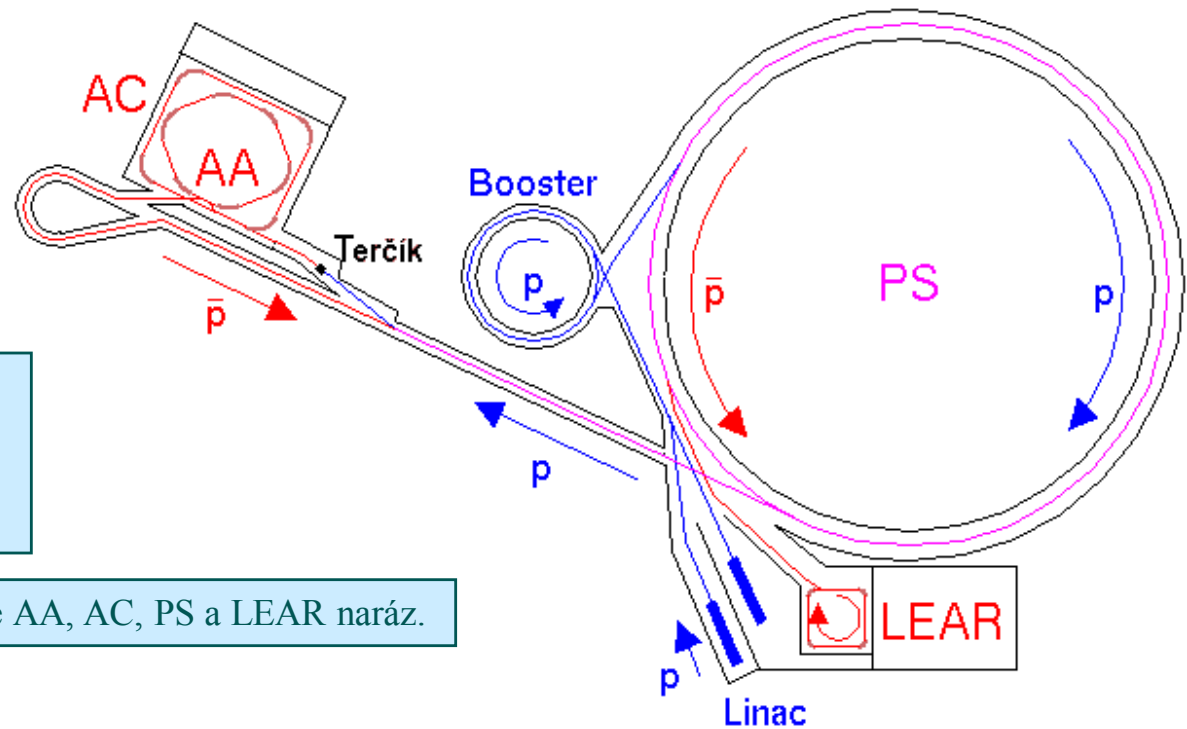


Antihmota v současném vesmíru



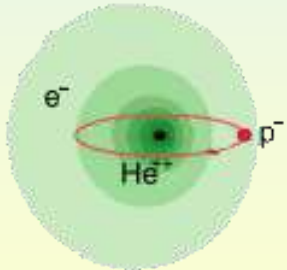
rozdělení
pozitronů

Antiproton Decelerator - CERN



AA - Antiproton Accumulator
AC - Antiproton Collector (1986)
PS - Proton Synchrotron
LEAR - Low Energy Accelerator Ring

AD - přebudován z AA, zastává funkce AA, AC, PS a LEAR naráz.



Exotické atomy - hélium
s antiprotonem v obalu.
Experiment ASACUSA

Protony urychlené v PS se nastřelí na terčik (Ir, Cu). Na jednu srážku z milionu vzniká proton antiprotonový pár. 10 trilionů protonů zasáhne cíl jednou za minutu terč a tak se vytvoří 10 milionů antiprotonů.

[ASACUSA](#) - atomární spektroskopie a srážky využívající pomalé antiprotony,
[ATHENA](#) - výroba antivodíku a přesné experimenty,
[ATRAP](#) - využití chladného antivodíku pro precizní laserovou spektroskopii.

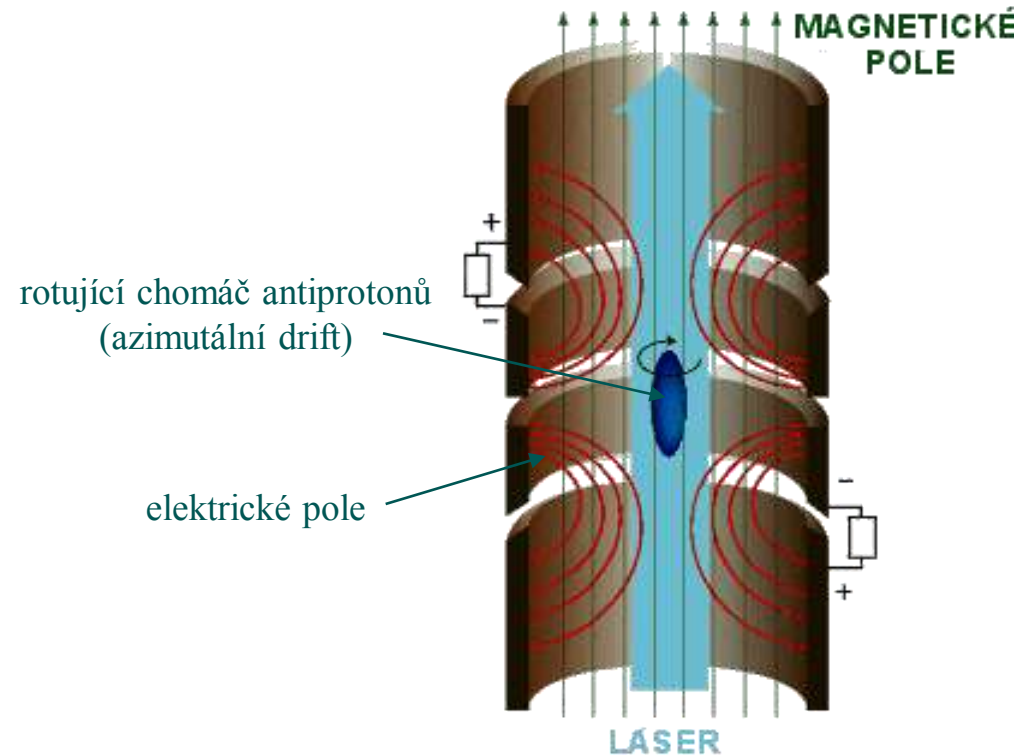
Výroba antivodíku (experiment ATHENA)



- 50 000 atomů v jednom cyklu
- zachycení v Penningově pasti
- zpomalení na teplotu 15 K
- měření frekvence přechodů 1-0

AD vyprodukuje okolo 20 milionů antiprotonů v krátkých pulsech ve stosekundových intervalech a přibližně kolem 3 000 z nich je po zachycení a ochlazení možné použít pro výrobu antivodíku.

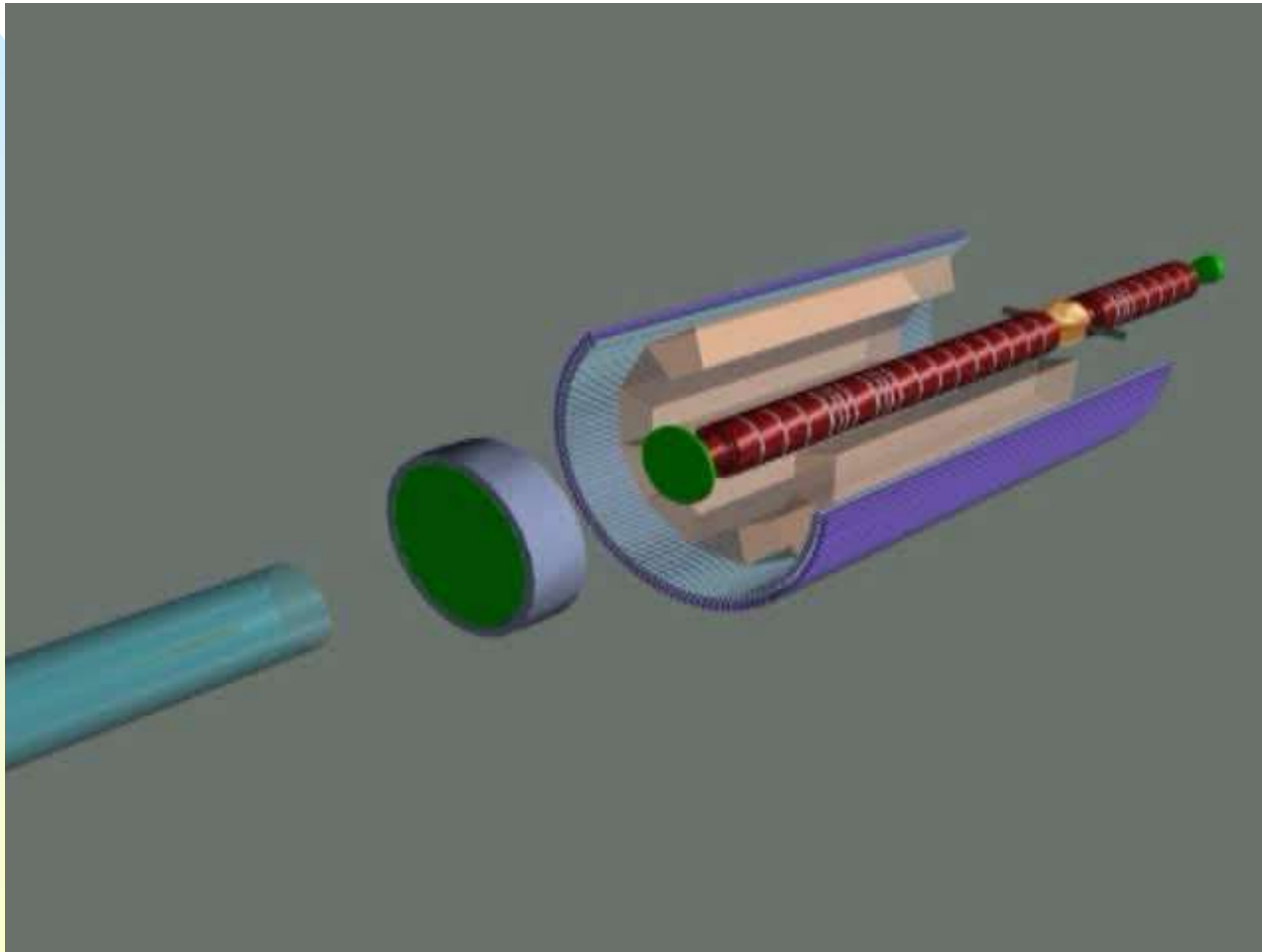
Potřebné pozitrony do atomárních obalů se získávají z radioaktivního rozpadu Na 22. Pozitrony se zachytávají v další Penningově pasti.



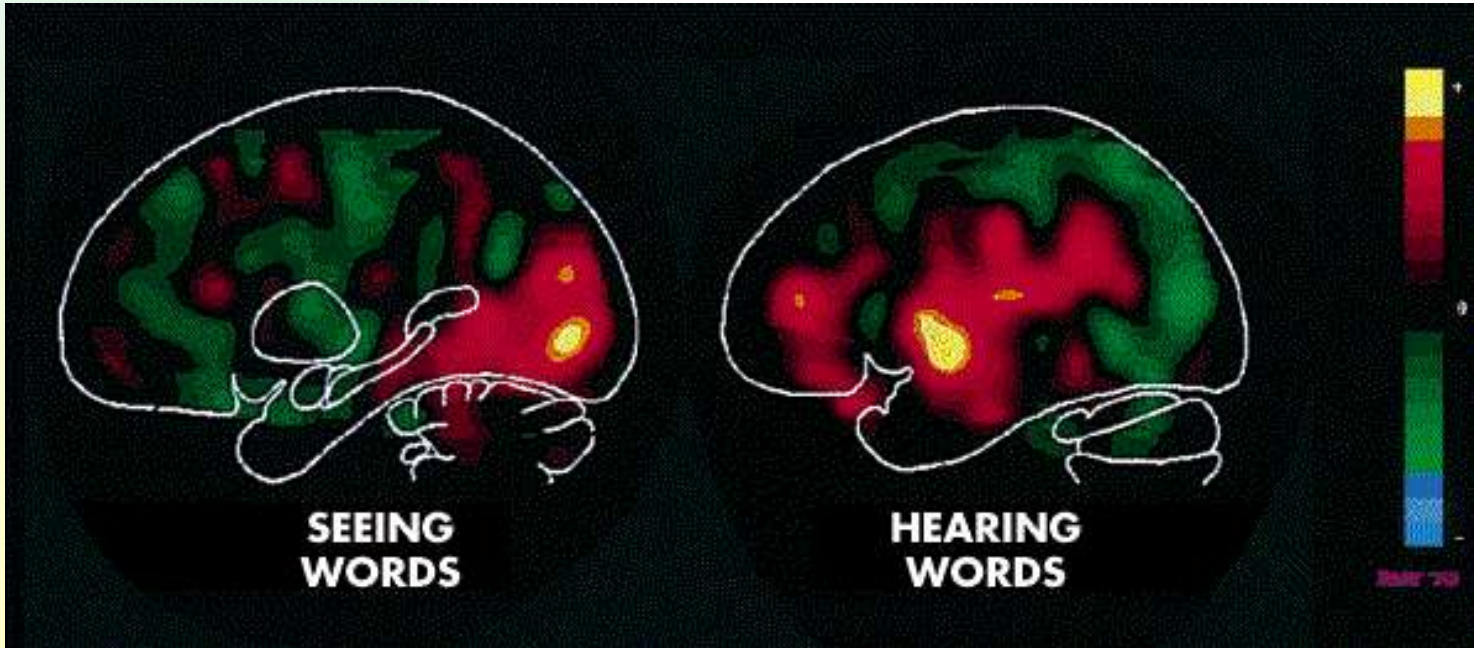
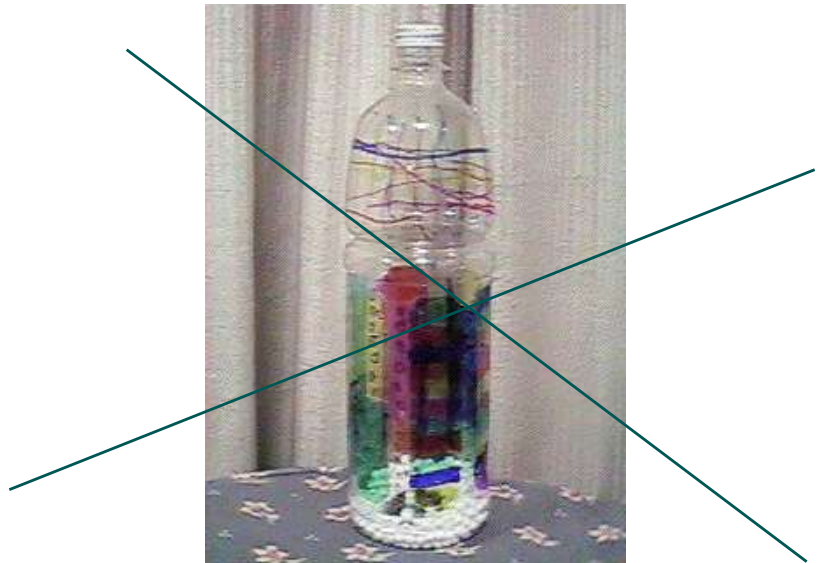
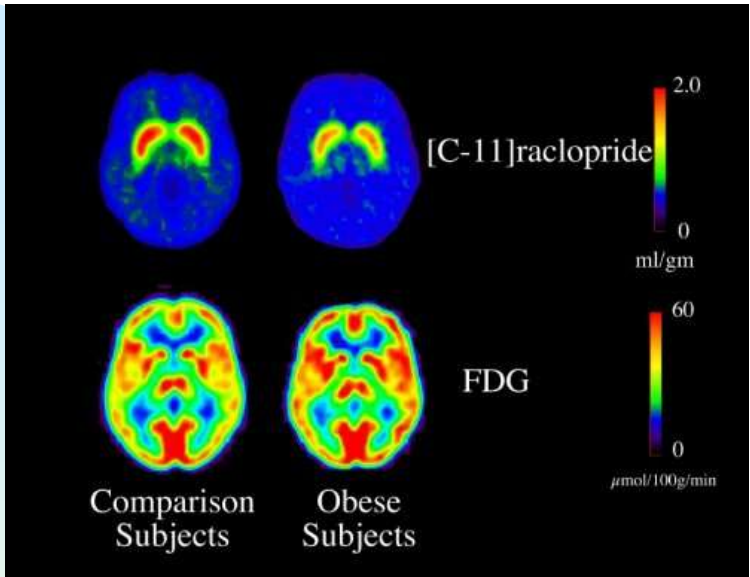
Penningova past pro antiprotony

Pro výrobu antivodíku použijeme kolem 70 miliónů pozitronů zchlazených na 15 K. Potom kolem 10 000 antiprotonů (shromážděných během tří AD cyklů) vystřelíme do pozitronového mračka. Antiprotony vznikají jen tehdy, když přebytek energie a momentu hybnosti odnese třetí částice (tříčásticová rekombinace) nebo foton (zářivá rekombinace).

Výroba antivodíku

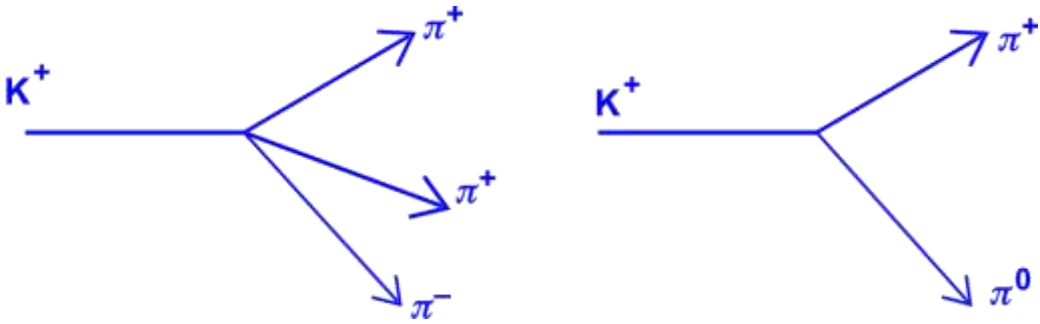


PET (Positron Emission Tomography)



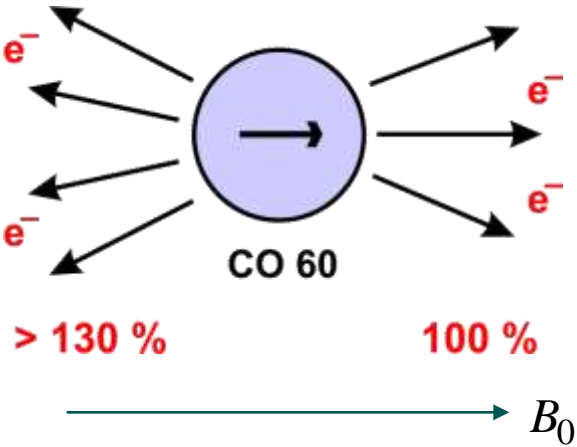
P invariance

- **1956** narušení P invariance při rozpadu K^+
- **1956** návrh experimentu s rozpadem $Co\ 60$ (T. D. Lee, C. D. Yang, NC 1957)
- **1957** experiment s $CO\ 60$
Realizace S. V. Wu, Columbia University, 30 % narušení
- **neutrina** - 100 % narušení, existují jen levotočivá neutrina.



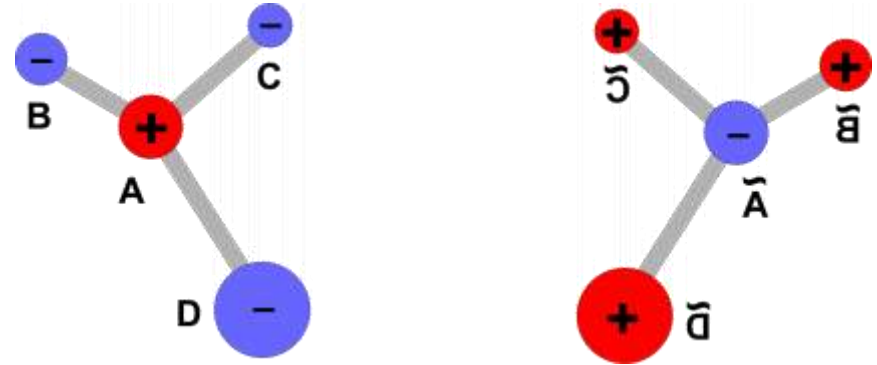
Chien-Shiung Wu
(1912-1997)

Tsung-Dao Lee
(1926)



CP invariance

• **1964** pozorovány rozpady levotočivého K_L^0 mezonu na piony π^+ a π^- , které sice málo, ale přece jen narušují i CP symetrii (z 22 700 případů bylo 45 ± 9 narušeno). (J. W. Cronin, V. Fitch, NC 1980)



James Cronin
(1931)



Val Fitch
(1923)

kvark \leftrightarrow antilepton
antikvark \leftarrow lepton

Narušení CP invariance v důsledku intermediálních částic X a Y v čase 10^{-30} s po velkém třesku v poměru $10^9+1 : 10^9$ ve prospěch hmoty.



T invariance



1990-1996 experimenty na zařízení LEAR v CERNu
 (od roku 1997 LEIR - Low Energy Ion Ring).
1998-1999 teoretické zpracování, ohlášení objevu narušení T symetrie.
2000 potvrzení v laboratoři FERMILAB

$$p^- + p^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + K^0$$

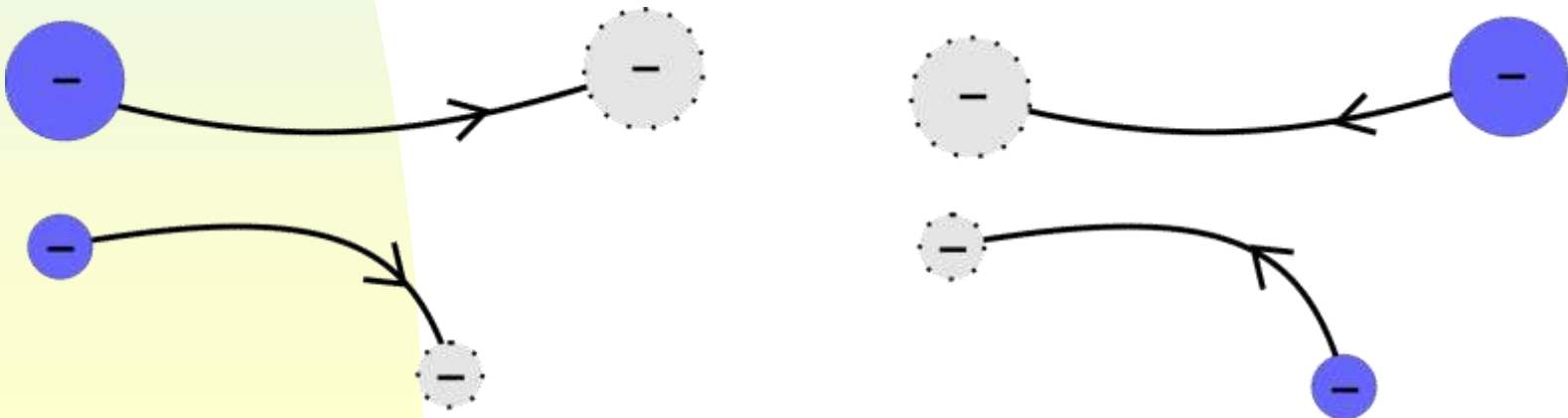
$$p^- + p^+ \rightarrow K^+ + \pi^- + \bar{K}^0$$

Urychlené antiprotony nalétávají na protony terče, vzniká systém interagujících neutrálních kaonů.

$$K^0 \rightarrow e^- + \bar{\nu} + \pi^+$$

$$\tilde{K}^0 \rightarrow e^+ + \nu + \pi^-$$

Oba kanály rozpadu by měly být stejně zastoupené, byl ale naměřen rozdíl.



C invariance - BABAR (1999-2004)

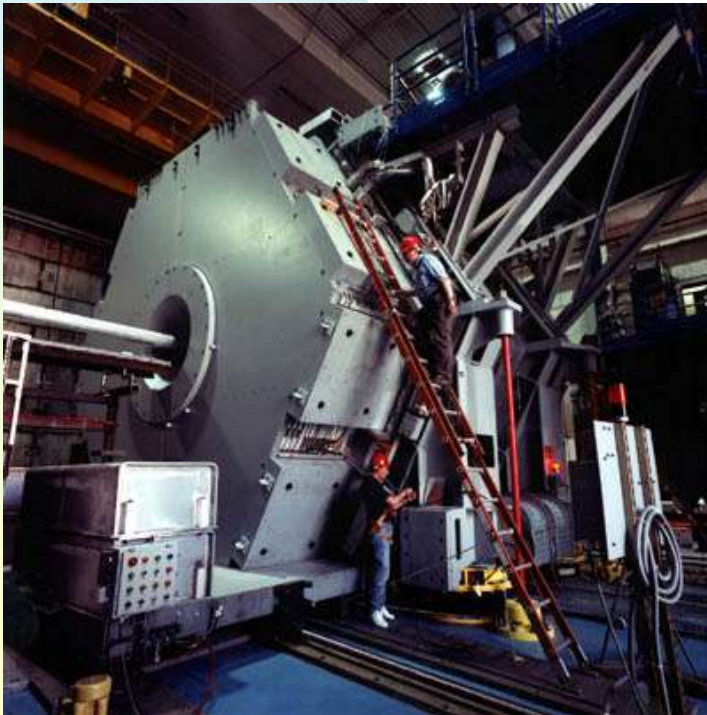
Byl sledován rozpad částice $B^0 = db'$. Z mnoha kanálů reakce byl zvolen relativně vzácný rozpad



Měly by se objevovat stejné počty párů ($K^+ \pi^-$) a ($K^- \pi^+$).

V experimentu bylo detekováno 910 párů ($K^+ \pi^-$) a jen 695 párů ($K^- \pi^+$).

Způsob rozpadu hmoty a antihmoty tak probíhá prokazatelně odlišně.



Sacharovovy podmínky



- 1) **narušení CP symetrie v silné interakci**
- 2) **inflační fáze**
- 3) **nestabilita protonu**