

Antihmota (nejen) ve vesmíru

„Náznak další poruchy,“ rychle pronesl Spock. „Výkon energetického zdroje narůstá exponenciálně. Přetížení a náhlá přeměna veškeré antihmoty na energii proběhne za“

Gene DeWeese: Star Trek – Enterprise v ohrožení

“Chytří lovci stopují konečnou teorii hledáním známek symetrie. Přírodní zákony jsou všechny vyjádřením symetrie, a veškerá fyzika je v jistém smyslu hledáním symetrie.”

T. Ferris: “Zpráva o stavu vesmíru”

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AVČR, 250 68 Řež E_mail: WAGNER@UJF.CAS.CZ WWW: ojs.ujf.cas.cz/~wagner/

1) Úvod

2) Historie

3) Vlastnosti antihmoty

3.1 Symetrie a asymetrie

3.2 Jak antihmotu získat?

3.3 Jak ji skladovat?

4) Jak ji studovat a využití?

4.1 Největší anihilace v historii

4.2 Symetrie – asymetrie?

4.3 Gravitace – antigravitace?

4.3 Jak se využívá nyní?

4.4 Využije se v budoucnu?

5) Závěr



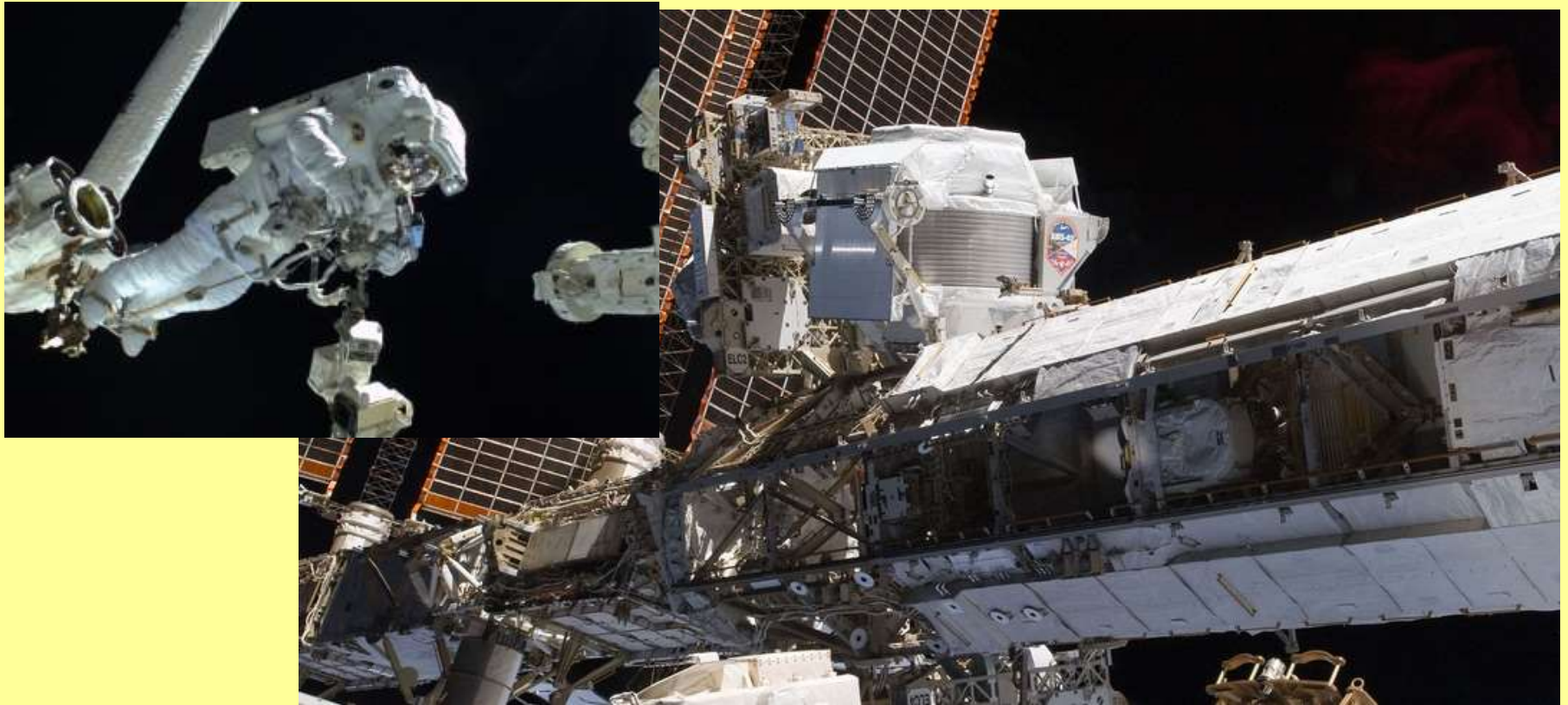
Oprava spektrometru AMS-02

Spektrometr na stanici ISS – měří spektrum antiprotonů a čeká na antihelium

První úvahy – supravodivý magnet – Realizace – normální teplý magnet (rok 2011)

Nedojde tekutý dusík a helium na chlazení – možnost dlouhodobého provozu

V současné době realizace oprav a údržby chladicího systému – další dlouhodobý provoz už hodně za původně očekávanou životnost (první testovací a přípravný výstup Luca Parmitano a Andrew Morgan – 15. 11. 2019)



AMS-02 – Alpha Magnetic Spectrometer je umístěný na kosmické stanici ISS

Úvod

Předpověď – Paul Dirack při řešení pohybové relativistické rovnice v kvantové fyzice – čtyři stavy elektronu (dvojice s různými projekcemi spinu) → jedna dvojice částice, druhá antičástice

Stejně velikosti hodnot veličin pouze opačné znaménko u nábojů

Kreace – možnost vzniku páru částice a antičástice při dodání příslušné energie

Anihilace – při setkání hmoty a antihmoty dojde k jejich zániku, její klidová energie se mění na jinou formu energie

Úzké spojení se symetriemi

C - nábojové sdružení

P – prostorové zrcadlení

T – časová inverze

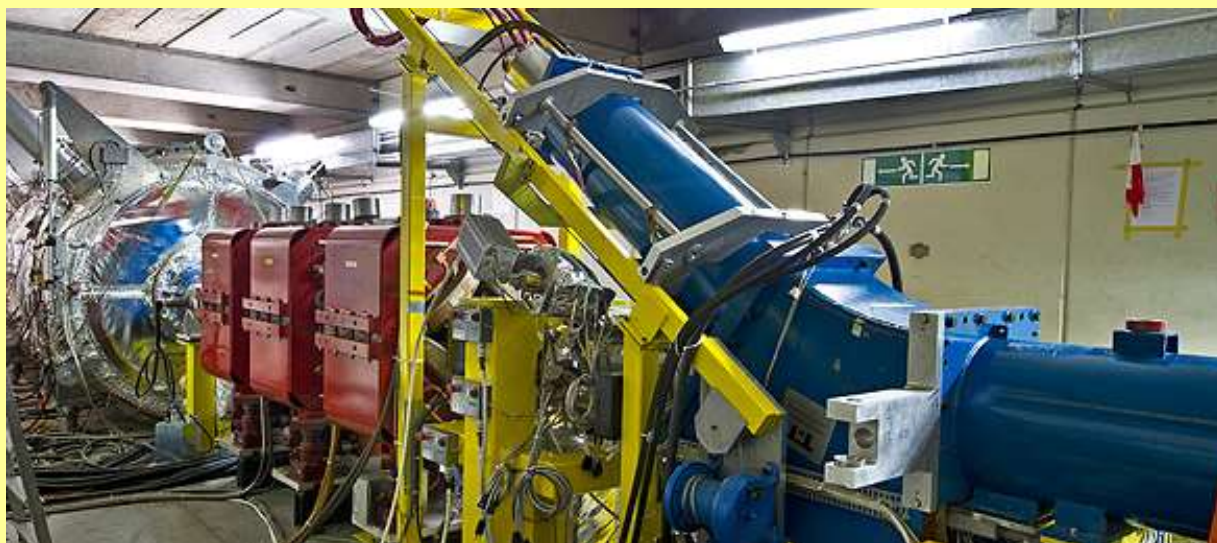
Rozlišení antisvěta v zrcadle od našeho světa

Existujeme → musí existovat rozdíl mezi hmotou a antihmotou

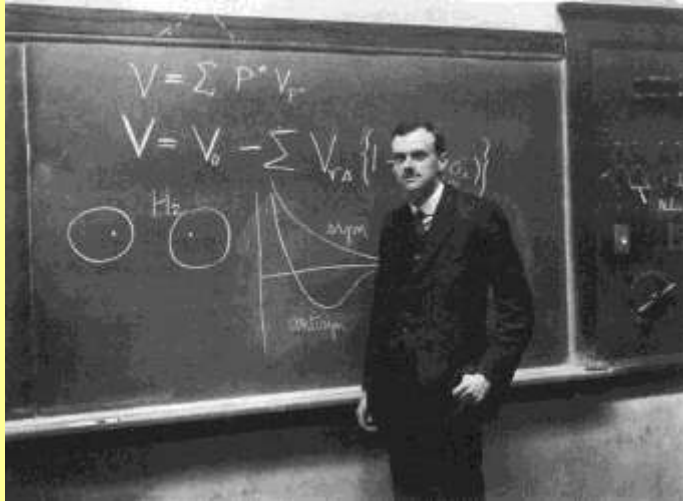


CERN a antihmota

Nejen v Anděle a démoni, ale i reálně



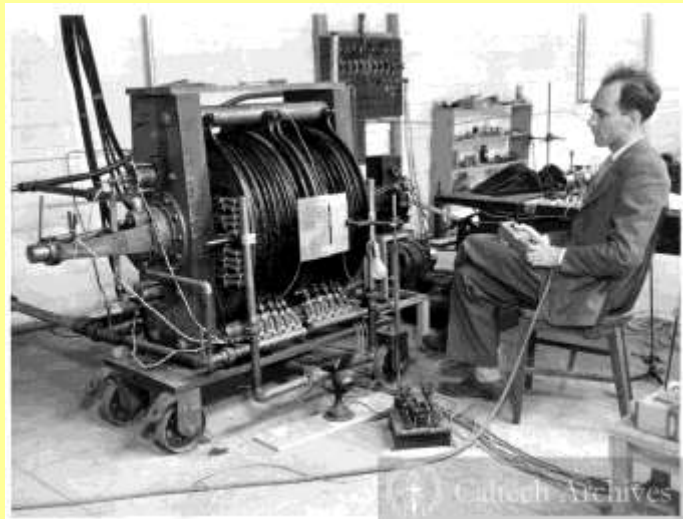
Předpověď a objev



1929 – Dirackova rovnice – kvantová relativistická pohybová rovnice pro fermiony se spinem $1/2$:
4 různá řešení (dvě dvojice s opačně orientovaným spinem)

1931 – předpovídaná kladně nabitá částice nemůže být proton, je to nová částice s hmotností elektronu

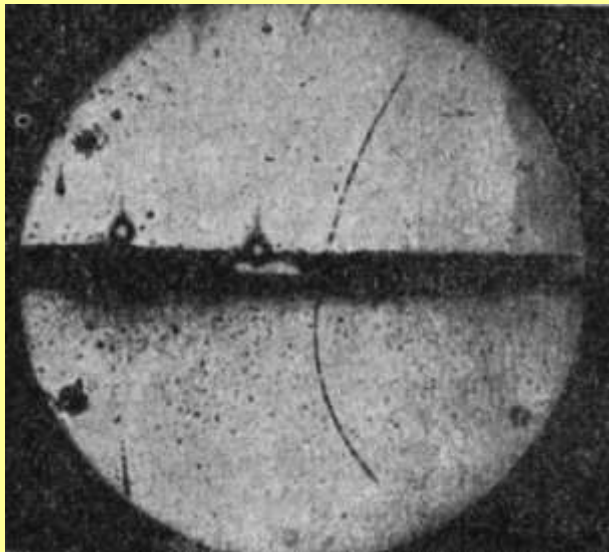
Nobelova cena - 1933



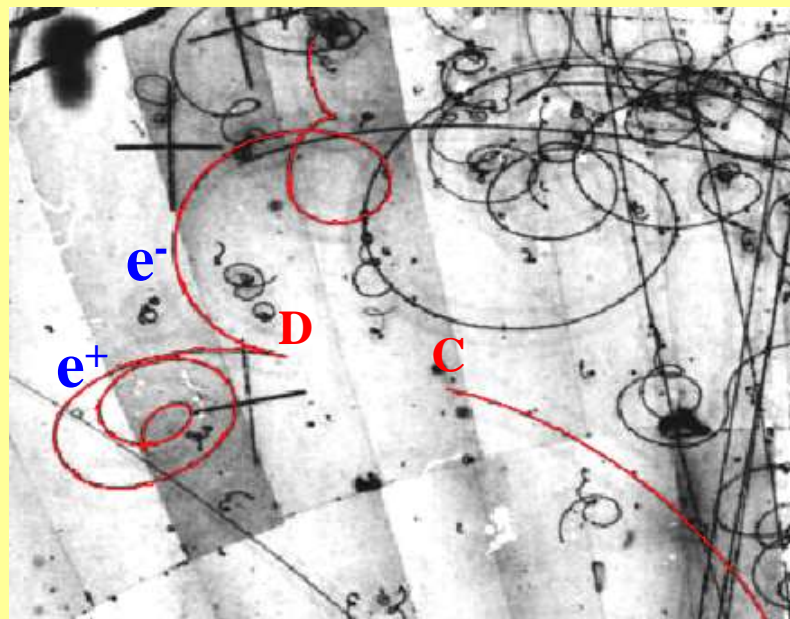
1929 – Dmitrij Skobelcin pozoruje pomocí mlžné komory v magnetickém poli kladně nabitě „elektrony“, nedokáže je vysvětlit (nejen on)

1932 – Carl David Anderson – mlžná komora v magnetickém poli a kosmické záření – stejná míra zakřivení jako elektron opačný směr

Nobelova cena - 1936



Objev pozitronu v kosmickém záření –první snímek

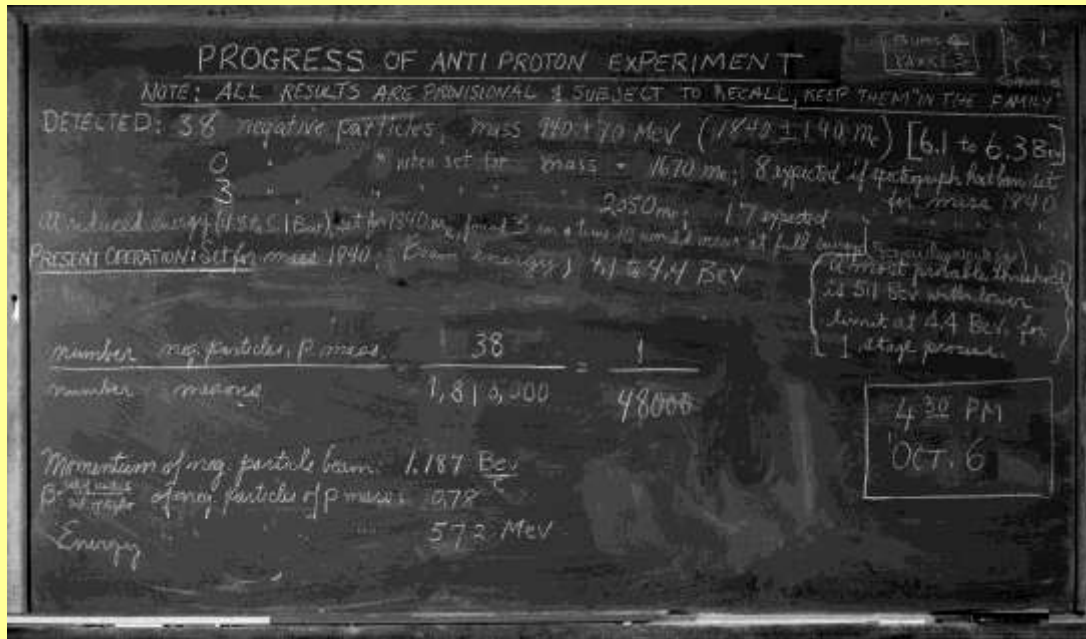


Typický obrázek vzniku elektronu a pozitronu
bublinovou komorou umístěnou v magnetickém poli
Díky opačnému náboji se dráhy těchto částic stáčí v
opačném směru



Anihilace antiprotonu, tentokrát za vzniku několika mezonů pi a K

Produkce antiprotonu



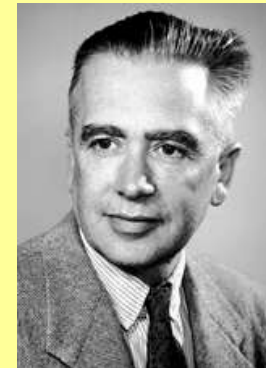
Urychlovač BEVALAC
Energie až 6 GeV

Rok 1954

Nutnost produkovat pár
proton a antiproton

Využití Fermiho pohybu

Antineutron - 1956



Emilio Segrè



Owen Chamberlain

Nobelova cena 1959

Antisvět – zrcadlo našeho světa

Každá částice má má partnera - antičástici

Antiproton + pozitron → antivodík, ...
... antiatomy ... antihmota ... antisvěty

Setkání částice a antičástice → **anihilace**

Možné zobrazované využití (sci-fi):

- 1) zbraně
- 2) zdroj energie pro mezihvězdné lety



V minulých letech měly premiéru dva filmy, ve kterých má antihmota důležitou roli – jde ovšem o fikce

Co by mohl výzkum antihmoty přinést?

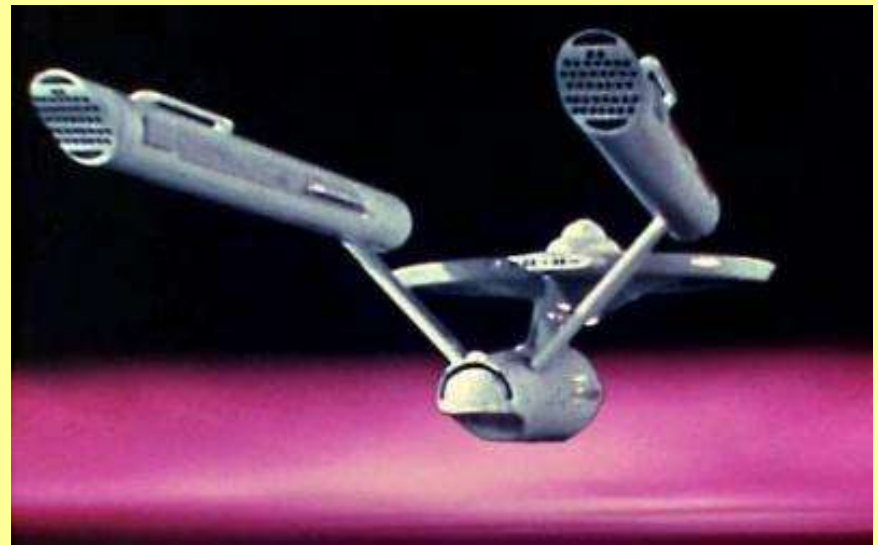
Setkání hmoty a antihmoty – **anihilace** → přeměna hmoty na fotony a mezony → mezony se rozpadají v konečném důsledku na fotony → uvolnění energie: **$E = mc^2$**
přeměna klidové hmotnosti (energie) na energii kinetickou → nejkompaktnější zdroj energie

Ekvivalent pohonu raketoplánu – ~ 100 mg antihmoty

Let k nejbližší hvězdě ($v > 0,02 c = 6\,000\text{ km/s}$) 100 tun lod', 4 000 000 TJ →
jen něco přes 20 kg antihmoty (!! Jen pro energii !!)

Problém: Nemáme zdroje antihmoty → musíme ji vyrobit – potřebujeme mnoho energie

Nutná energie větší než klidová energie (hmotnost) páru částice a antičástice (zase **$E = mc^2$**)



Co a k čemu jsou symetrie?

Při změně jedné vlastnosti (fyzikální veličiny) se nezmění jiné vlastnosti (třeba fyzikální popis)



Řada symetrií ve stavbě katedrály po posunutí je stejný tvar

Vzhled dvojhlavé karty se po otočení o 180° nezmění

Symetrie ve fyzice souvisí se zákony zachování

Některé symetrie se zachovávají vždy (aspoň zatím)

Zákon zachování hybnosti \leftrightarrow fyzikální popis světa se nemění, když se posuneme o kus dále

Zákon zachování momentu hybnosti \leftrightarrow fyzikální popis světa se nemění, když je pootočíme

Zákon zachování energie \leftrightarrow fyzikální popis světa se nemění, pokud uplyne nějaký čas



Energie a hybnost se nám neztrácí ani nevzniká

Perpetuum mobile nefunguje



Bez narušení některých by byl svět hrozně nudný

Fyzikální popis světa se nemění při jeho zobrazení v zrcadle \leftrightarrow **zákon zachování parity P**

Fyzikální popis světa se nemění při záměně částic za antičástice \leftrightarrow **zákon zachování C-symetrie**

Fyzikální popis světa se nemění při otočení časové šipky \leftrightarrow **zákon zachování T-symetrie**

Komunikujeme s mimozemšťanem pouze radiově

Jak vysvětlit, co je levá a pravá ruka?



Na blízko

není problém



Na dálku

je problém



Zrcadlová symetrie a její narušení

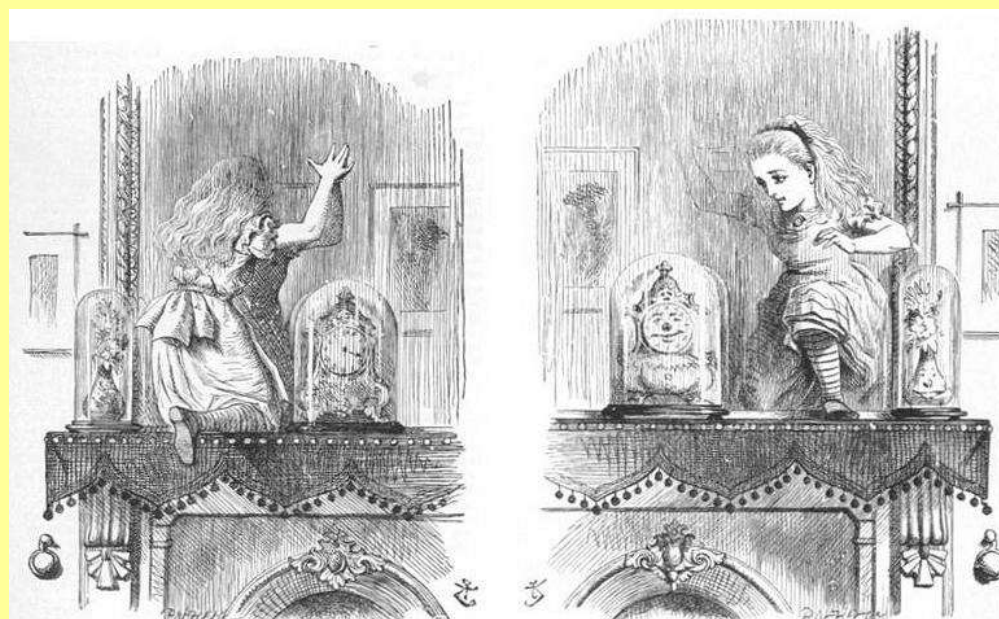
Možnost jak sdělit mimozemšťanům jaká je naše levá a pravá strana dává

Nezachování parity – narušení zrcadlové symetrie

Fyzikální procesy probíhají jinak v levotočivé a pravotočivé souřadné soustavě
levá a pravá strana se liší
obraz v zrcadle je jiný než zobrazovaný jev



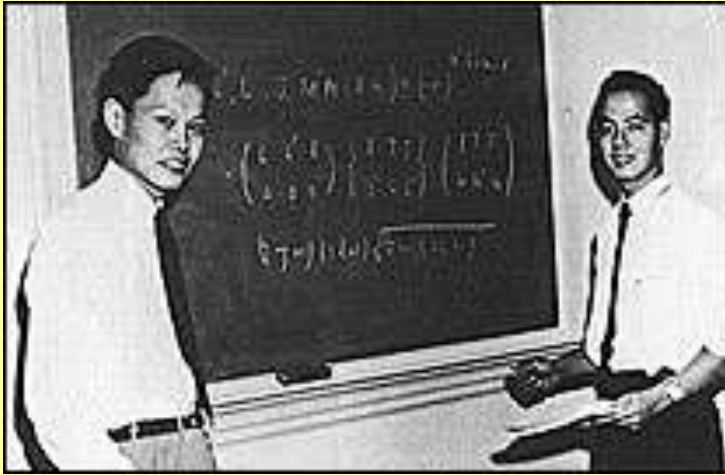
Pokud vidíme stejné objekty, na které můžeme ukázat – není problém



Jinak: šup s Alenkou za zrcadlo – Jaký je tam svět?

Možnost narušení zrcadlové symetrie

Jak v mikrosvětě?



Chen Ning Yang a Tsung-Dao Lee
1922 1926

Silná a elektromagnetická interakce – zrcadlová symetrie platí

Slabá interakce – otázka zůstává otevřená

Zkoumání jevů, kde je zároveň hybnost a moment hybnosti

Navržení experimentů pro ověření této možnosti

Beta rozpad a produkce a rozpad podivných částic

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG,† *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in β decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

RECENT experimental data indicate closely identical masses¹ and lifetimes² of the θ^+ ($\equiv K_{\pi 2}^+$) and the τ^+ ($\equiv K_{\pi 3}^+$) mesons. On the other hand, analyses³ of the decay products of τ^+ strongly suggest on the grounds of angular momentum and parity conservation that the π^+ and θ^+ are not the same particle. This poses

PRESENT EXPERIMENTAL LIMIT ON PARITY NONCONSERVATION

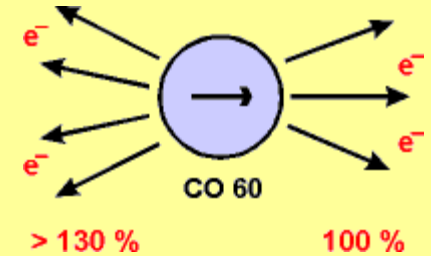
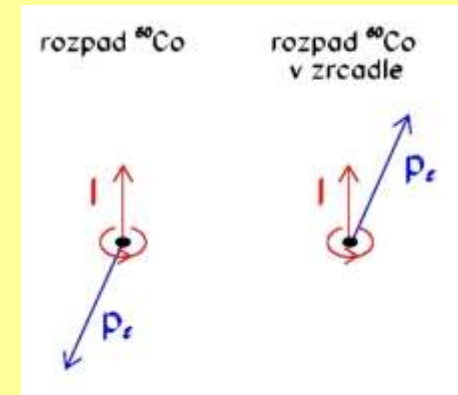
If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned, together with small admixtures of states having opposite parity. The

Narušení zrcadlové symetrie v rozpadu beta

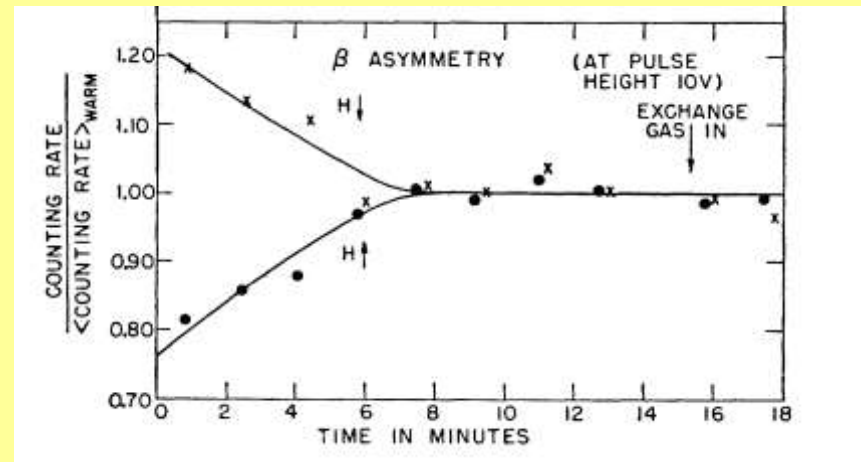


Chien-Shiung Wu
(1912 - 1997)

- Orientovaná jádra ^{60}Co
- velmi nízké teploty
- magnetické pole
- uspořádání elektronů v atomu
- orientace jader



Porovnání výletu elektronu do úhlu θ a $(180^\circ - \theta)$



Výsledek z publikace C.S. Wu

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG,† *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity experiments are suggeste

červen 1956

nd in hyperon and meson decays is examined. Possible conservation in these interactions.

RECENT experimental data on the τ^+ ($\equiv K_{\pi 3}^+$) mesons. On the grounds of angular momentum that the π^+ and π^0 are not the

Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*

C. S. WU, *Columbia University, New York, New York*

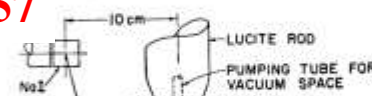
AND

E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPE, AND R. L. M. HALL, *National Bureau of Standards, Washington, D. C.*

(Received January 15, 1957)

leden 1957

... isotropy alone provides a reliable measure of nuclear polarization. Specimens were made by taking good single crystals of cerium magnesium nitrate and growing on the upper surface only an additional crystalline layer containing Co^{60} . One might point out here that since the decay of Co^{60} involves a change of spin of



IN a recent paper¹ on the question of parity in weak interactions, Lee and Yang critically surveyed the existing experimental information concerning this question and reached the conclusion that there is no existing evidence either to support or to refute parity conservation in weak interactions. They proposed a number of experiments in beta decays and hyperon and meson decays which provide the necessary evidence for parity conservation or nonconservation. In beta decay, one could measure the angular distribution of the electrons coming from the beta decays of polarized nuclei. If an asymmetry in the distribution between θ and $180^\circ - \theta$ (where θ is the angle between the orientation of the parent nuclei and the momentum of the electrons) is observed, it provides an unequivocal proof that parity is not conserved in the decay. This asymmetry effect has been observed in the case of oriented Co^{60} .



Chen Ning Yang (35 let) a Tsung-Dao Lee (31 let)

Nobelova cena 1957

Parita ve slabých interakcích se nezachovává



θ^+ a τ^- jsou jedna částice K^+ mezon

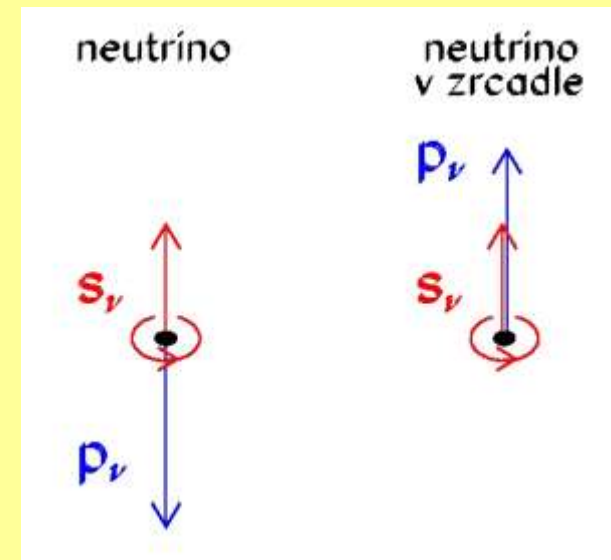
Další narušení zrcadlové symetrie

Sto procentní narušení zrcadlové symetrie

Existují pouze **levotočivá neutrína** (helicita -1) a **pravotočivá antineutrína** (helicita $+1$)

pouze P transformace \rightarrow levotočivé neutrino na pravotočivé neutrino

Svět lze rozlišit lehce od zrcadlového světa podle Toho zda má levotočivé či pravotočivé neutrino



Jak definovat levou a pravou stranu pro mimozemšťana?

Lehká neutrální částice, která se pozoruje při rozpadu neutronu je pravotočivá

Existuje celá řada dalších narušení zrcadlové zejména v procesech, které jdou čistě slabou interakcí – její efekty nejsou překryty vlivy silné a elektromagnetické interakce, které obě zrcadlovou symetrii striktně zachovávají

Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon*

RICHARD L. GARWIN,† LEON M. LEDERMAN, AND MARCEL WEISSKOPF

Physics Department, Nevis Cyclotron Laboratories, Columbia University, Irvington-on-Hudson, New York, New York

(Received January 15, 1957)

LEE and Yang¹⁻³ have proposed that the long held space-time principles of invariance under charge conjugation, time reversal, and space reflection (parity) are violated by the "weak" interactions responsible for decay of nuclei, mesons, and strange particles. Their hypothesis, born out of the $\tau-\theta$ puzzle,⁴ was accompanied by the suggestion that confirmation should be sought (among other places) in the study of the successive reactions:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu, \quad (1)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu. \quad (2)$$

They have pointed out that parity nonconservation implies a polarization of the spin of the muon emitted

Jak definovat levou a pravou stranu pro mimozemšťana?

Lehká neutrální částice, která se pozoruje při rozpadu neutronu je pravotočivá

!!! Pozor !!! Platí jen pokud víme, že je z hmoty !!! Pozor !!!



Symetrie vůči záměně částic za antičástice

Záměna znamének nábojů (záměna částic za antičástice a naopak)

Šup ze světa do antisvěta a naopak

Pokud symetrie platí – fyzika je stejná pro svět i antisvět

V mikrosvětě se narušuje – viz existence pouze pravotočivého antineutrína a levotočivého neutrína

Rozpad antijádra ^{60}Co má opačnou asymetrii v emisi elektronu vůči spinu antijádra

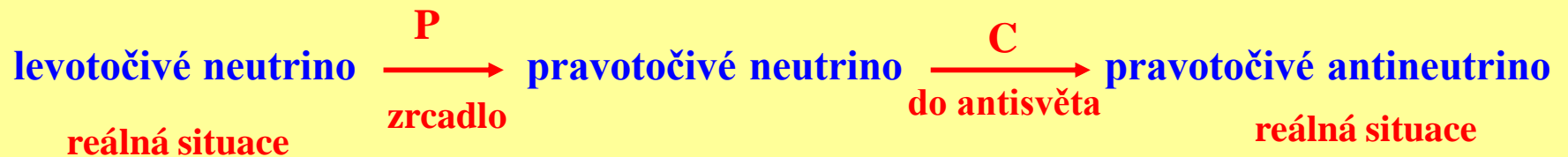


Pokud lze definovat levou a pravou stranu (například se mimozemšťané podívají na stejné galaxie) stačí se zeptat, jestli je neutrální částice vznikající při rozpadu neutrálního baryonu z jader, které je tvoří.

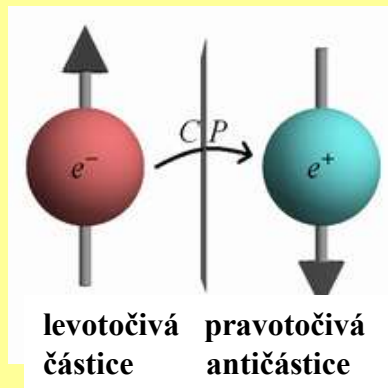
Kombinovaná CP symetrie

!! Pokud nevíme jestli nejsou mimozemšťané z hmoty, tak **jsme zase v háji !!**

Narušení zrcadlové symetrie se kompenzuje narušením C-symetrie v opačném směru

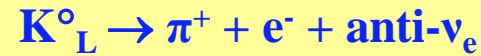
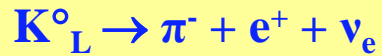


rozpad beta ^{60}Co probíhá **stejně** jako rozpad beta antijádra ^{60}Co



Přece jen existují procesy, kde se narušuje CP symetrie

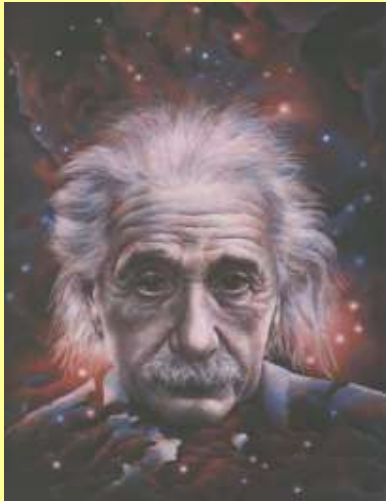
Asymetrie se projevuje také v rozpadech těchto částic, kde se vyskytnou elektrony a pozitrony



$$\Delta = \frac{(K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e) - (K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e)}{(K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e) + (K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e)} = (0,327 \pm 0,012) \times 10^{-2}$$

Takže pozitron a antihmotu lze definovat tak, že je to ta nabitá lehká částice, která se v rozpadu K_L^0 produkuje ve větší míře

Pokud platí speciální teorie relativity – platí že skok za zrcadlo, do antisvěta a obrácený tok času nezmění fyzikální zákonitosti – CPT teorém



Narušení CP symetrie + CPT teorém → narušení T symetrie

Popis narušení kombinované CP symetrie

Vysvětlení narušení v rámci kvarkového modelu Nobelova cena 2008



Toshihide Maskawa



Makoto Kobajaši

652

Progress of Theoretical Physics, Vol. 49, No. 2, February 1973

***CP*-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction**

Makoto KOBAYASHI and Toshihide MASKAWA

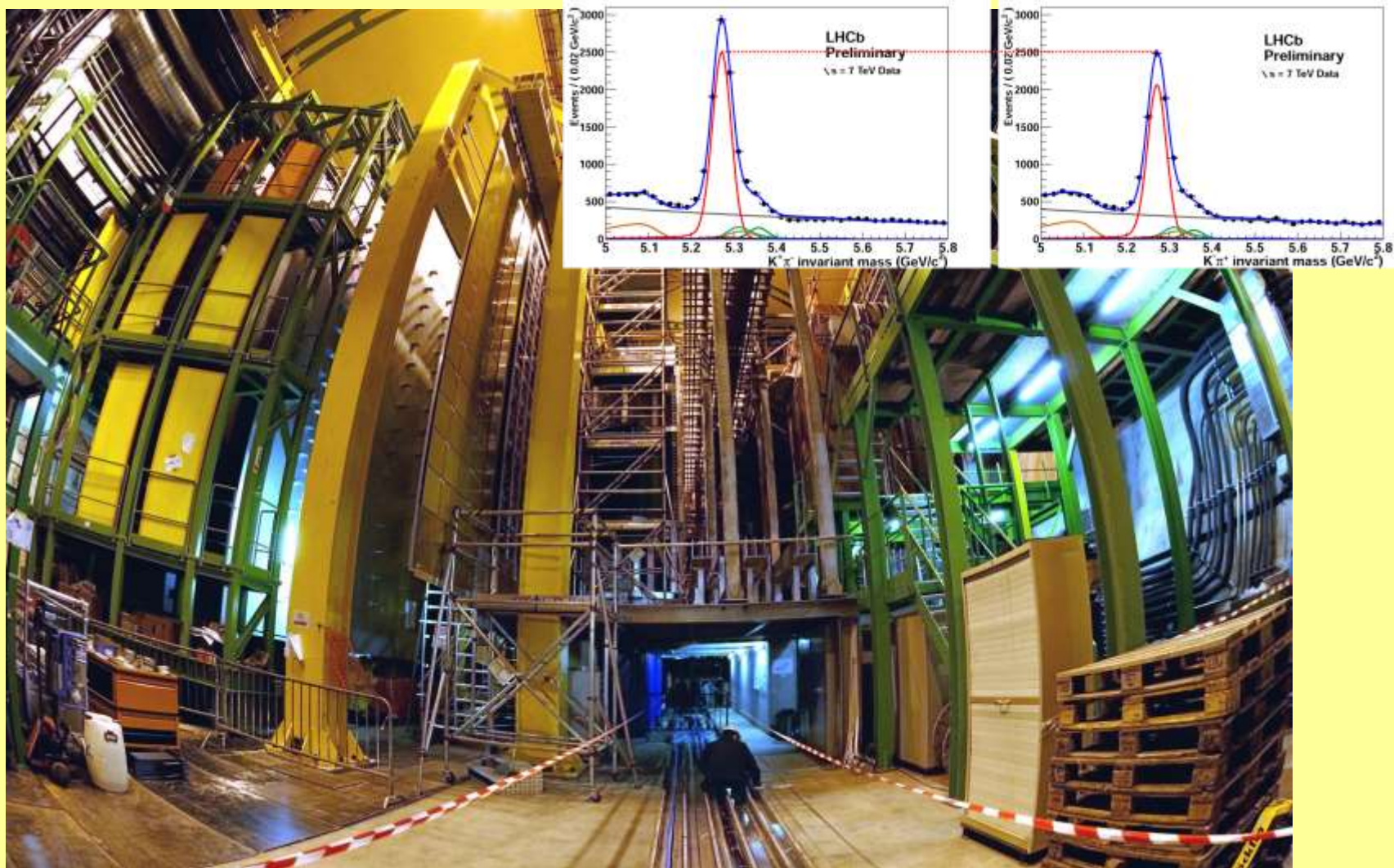
Department of Physics, Kyoto University, Kyoto

(Received September 1, 1972)

In a framework of the renormalizable theory of weak interaction, problems of *CP*-violation are studied. It is concluded that no realistic models of *CP*-violation exist in the quartet scheme without introducing any other new fields. Some possible models of *CP*-violation are also discussed.

When we apply the renormalizable theory of weak interaction¹⁾ to the hadron system, we have some limitations on the hadron model. It is well known that there exists, in the case of the triplet model, a difficulty of the strangeness changing neutral current and that the quartet model is free from this difficulty. Furthermore, Maki and one of the present authors (T.M.) have shown²⁾ that, in the latter case, the strong interaction must be chiral $SU(4) \times SU(4)$ invariant as precisely as the conservation of the third component of the isospin I_3 . In addi-

Experimenty v CERN (hlavně LHCb) studují rozdíly mezi částicemi a antičásticemi



Studium rozdílu mezi hmotou a antihmotou, světem a antisvětem

První problém: produkce antimoty – nemáme doly na ní

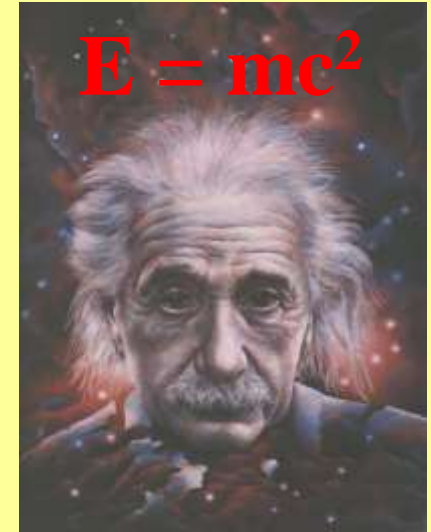
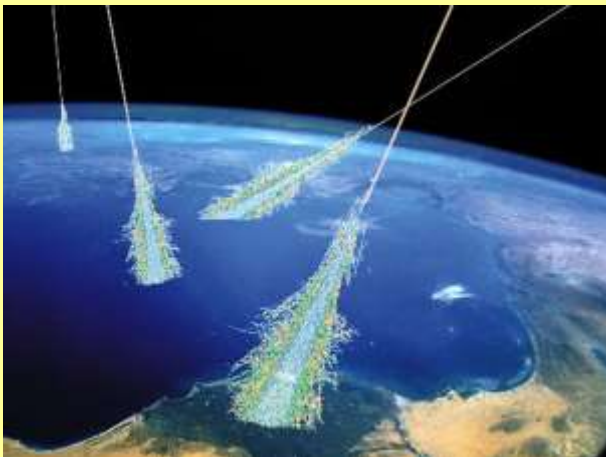
Jak mohou antičástice vznikat?

- 1) Přeměna kinetické energie ve srážce na klidovou energii částic a antičástic – většinou vzniká dvojice částice a antičástice – **hlavně produkce antiprotonů a antineutronů**

Urychlovače – stroje na produkci antičástic

Produkce antičástic ve srážkách jader kosmického záření

- 2) Některé reakce – například rozpad beta plus (vzniká pozitron), rozpady mezonů a mionů v kosmickém záření



Velmi malá efektivita této produkce

(nevadí při vědeckém výzkumu, problém pro energetické využití)

Účinnost výroby antiprotonů (nyní) – 10^5 protonů ($E_p=120$ GeV) na jeden antiproton →
→ $1,2 \cdot 10^{16}$ eV/antiproton → $1,16 \cdot 10^{21}$ J/g . **Efektivita 10^{-8} .**

v současnosti se produkuje okolo 10 ng antiprotonů za rok (CERN a FERMILAB)

Současné metody umožňují – zlepšení o 3-4 řády

Energie potřebná k výrobě antihmoty je pak nejméně o čtyři řády větší než uvolněná → na výrobu antihmoty pro mezihvězdný let 40 let o řád větší výkon než všechny současné jaderné reaktory



Laboratoř FERMILAB (urychlovač TEVATRON využívá jeden z neintensivnějších svazků antiprotonů)

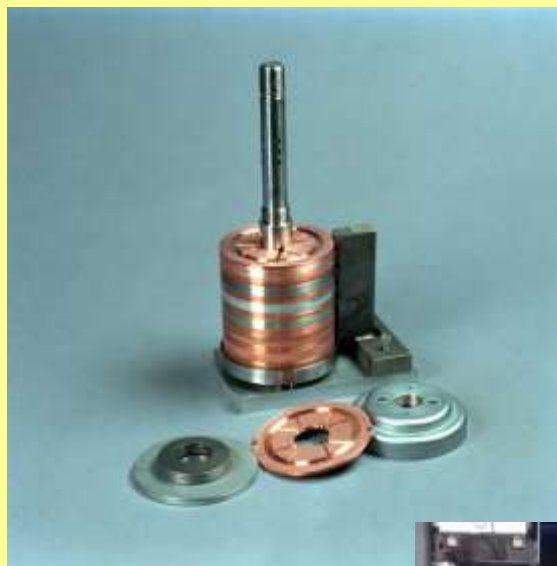
Co nejefektivnější urychlovač a „sběr“ vzniklých antiprotonů



Co nejefektivnější produkce antiprotonů



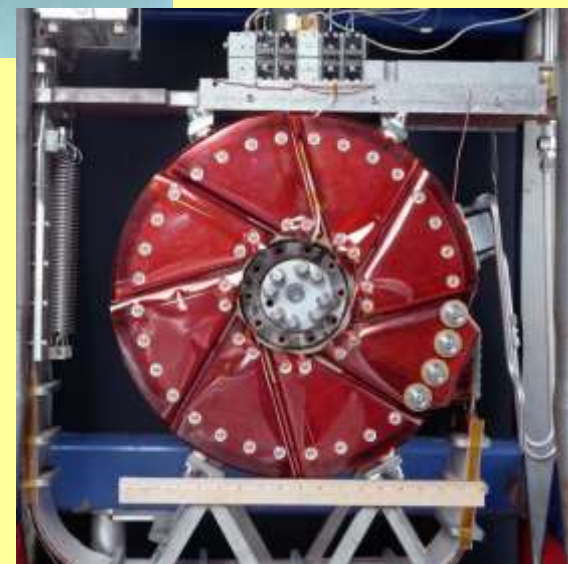
V CERNu – urychlovač PS



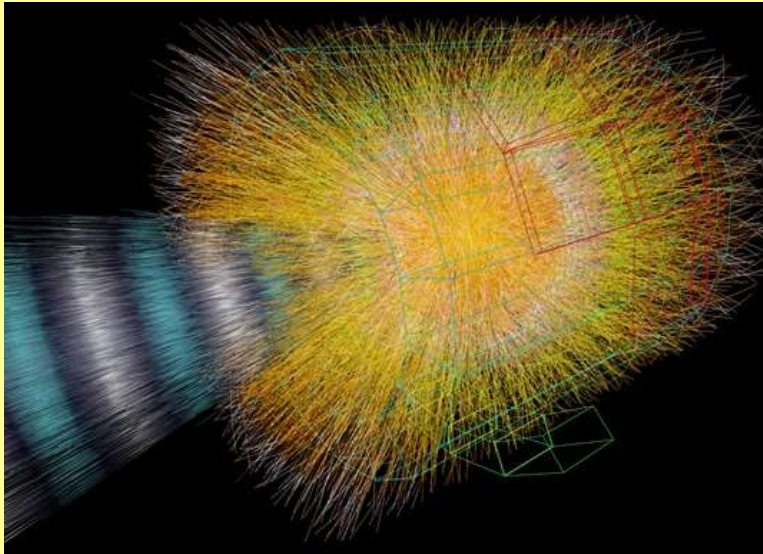
Terč z niklu určený pro produkci antiprotonů pro urychlovač TEVATRON ve FERMILABu



Čočky sloužící k oddělení antiprotonů od dalších částic



Produkce těžších antijader

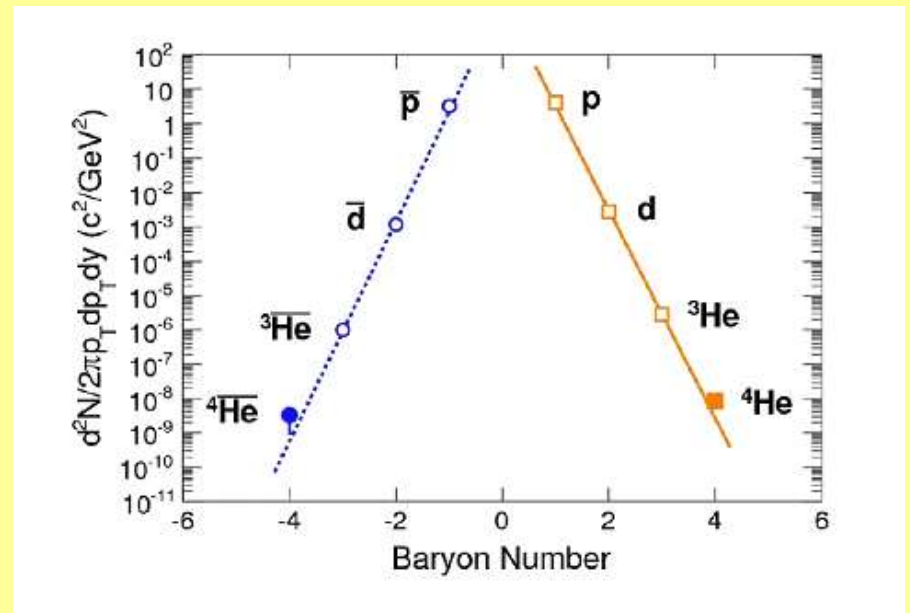
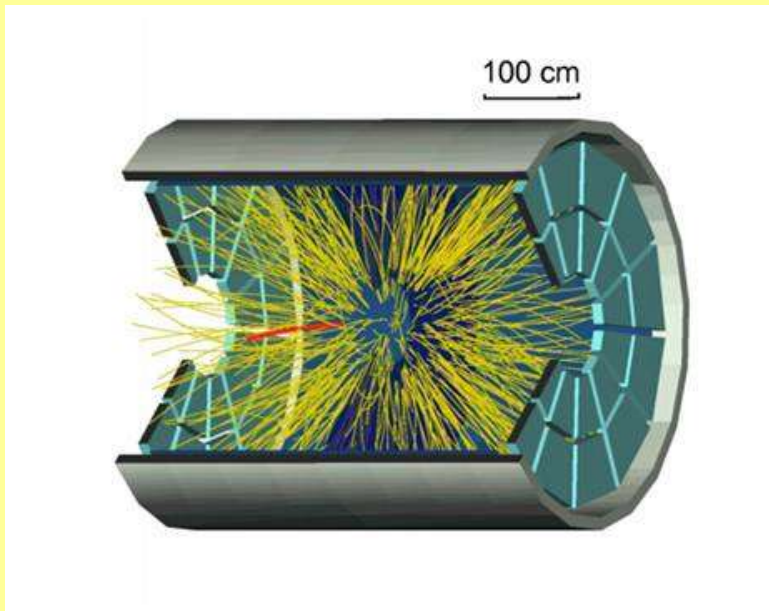


Vše postaveno na náhodě a miliardách miliard srážek

Potřebné antineutrony a antiprotony musí vzniknout ve stejný čas, letět stejným směrem a stejnou rychlostí

Dlouhé měsíce srážek pro vyprodukování pár desítek jader antihelia 4

Nyní RHIC i LHC



Druhý problém: jak antihmotu skladovat?

Hlavní problém – zabránění kontaktu s hmotou a anihilaci

Nabitá plazma (antiprotony) – magnetické pasti – testováno, možnosti až měsíce problémem je omezená hustota plazmatu – v řádu 10^{10} antiprotonů na cm^3

Neutrální antivodík

- 1) je třeba vyprodukovat antivodík
- 2) získat mikrokuličky zmrzlého H_2
- 3) Udržet je (elektrické, magnetické pole) vzdálené od hmoty

Produkce antivodíků: zachycení zpomalených a ochlazených antiprotonů a pozitronů ve stejné magnetické pasti (dokážeme jich zatím produkovat desítky tisíc)

Hledají se cesty k jejich zachycení v magnetické pasti (mají magnetický moment) velmi intenzivní magnetická pole – supravodivé magnety

1g antiprotonů (antivodíků) obsahuje 10^{24} částic

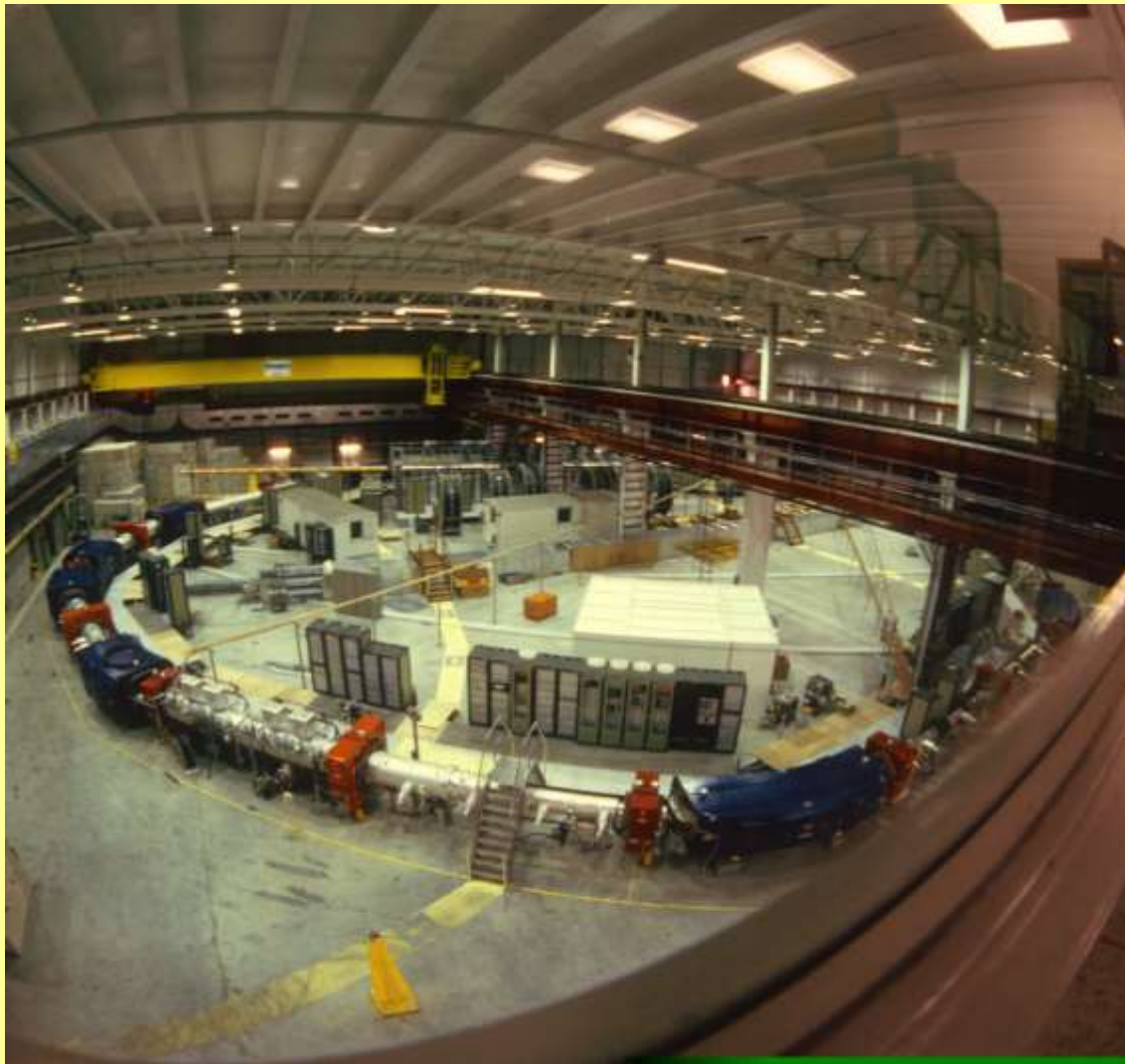
Úplně otevřená otázka jak antivodík efektivně vyrábět a skladovat



Magnetická past na Pensylvánské universitě

Pro masovou produkci antivodíku – nutný zpomalovač

Celkový pohled na systém shromažďující antiprotony v laboratoři CERN:



Produkce většího množství chladného antiprotonu:

Antiprotony ze zpomalovače se dále zpomalí chladnými elektrony v první magnetické pasti

Pozitrony z rozpadu ^{22}Na jsou zpomaleny ve druhé pasti

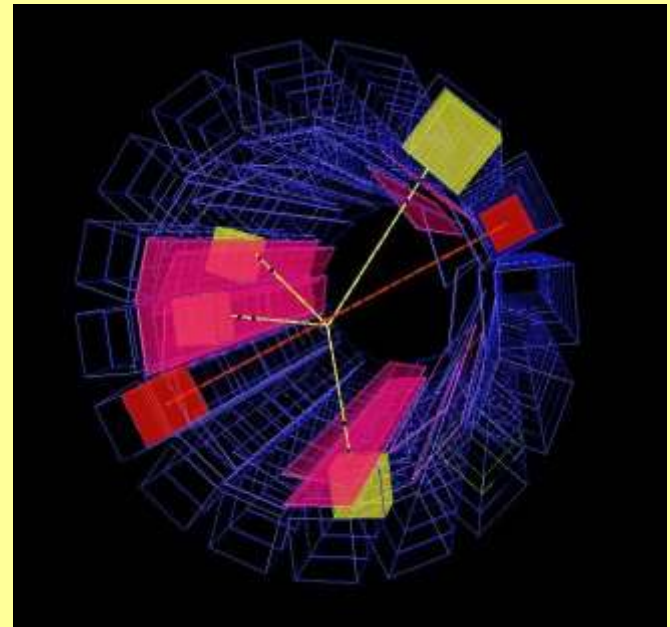
Ve třetí pasti se antiprotony a pozitrony smíchají

Neutrální antiproton z ní vyletí a na stěnách anihiluje

Rok 2002 - ATHENA produkuje prvních 50000 antiprotonů



Experiment ATHENA v CERNu pro produkci antiprotonu a detekci jeho anihilace



Jeden případ anihilace antiprotonu - vznik 4 mezonů π (p^+ anti- p) a 2 γ ($e^+ e^+$)

**Po zpomalení se antiprotony dostávají do haly s antiprotonovými experimenty
(produkce antiprotonů a antivodíků)**



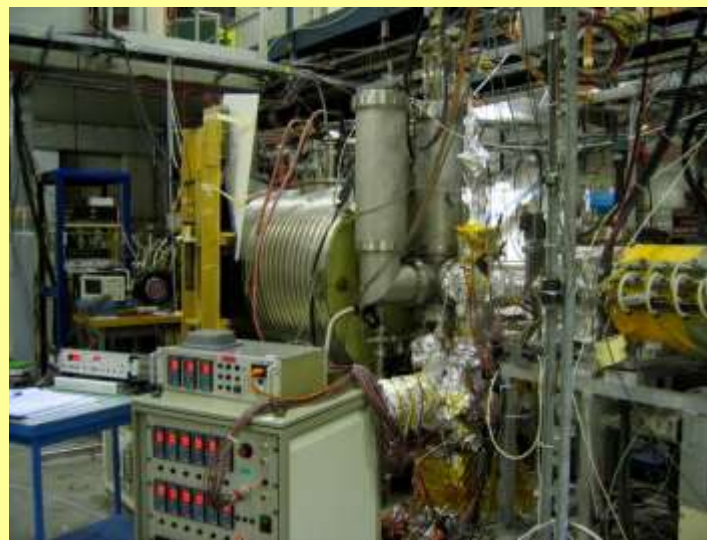
Experimentální hala



Ještě další zpomalení před experimentem ASACUSA



Experiment ASACUSA



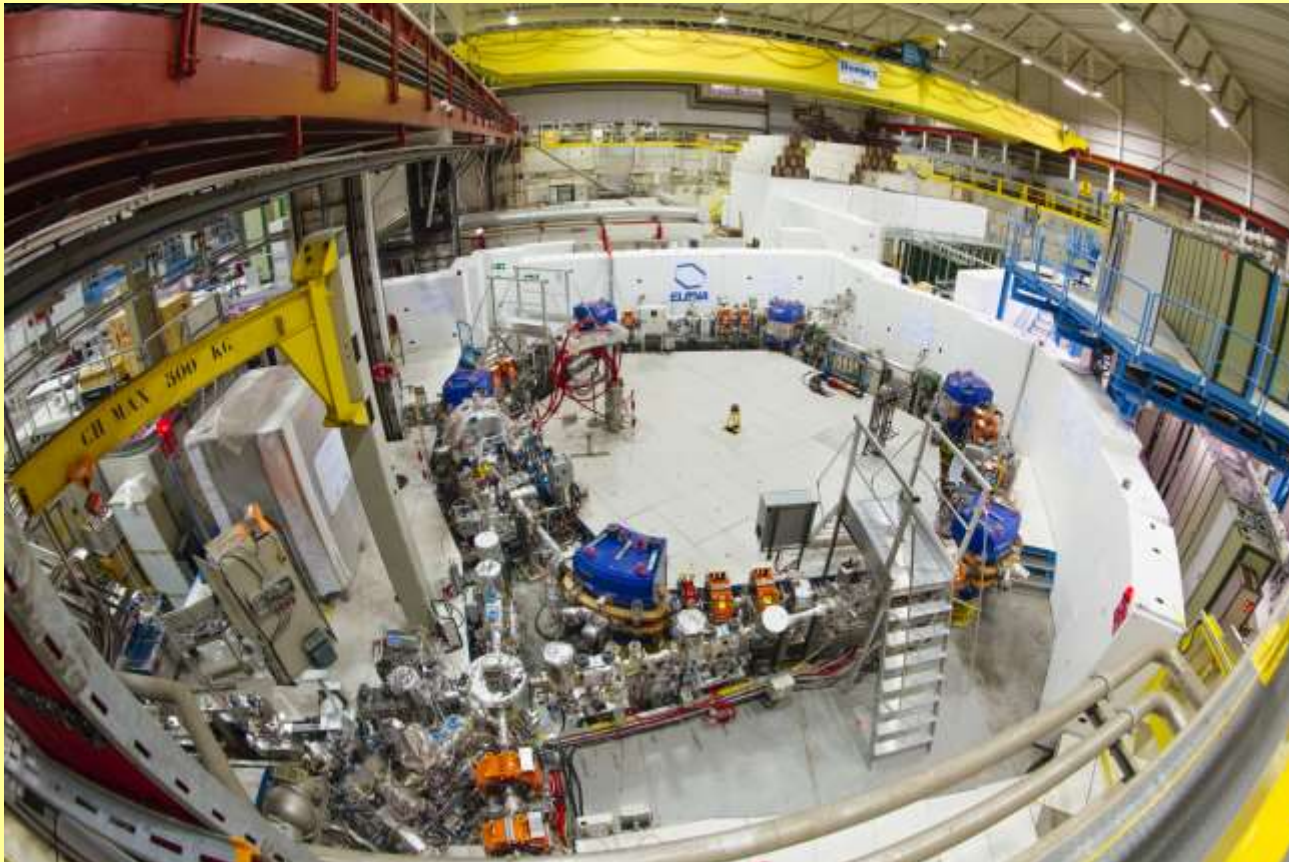
Experiment ALPHA

ELENA – Extra Low ENergy Antiproton

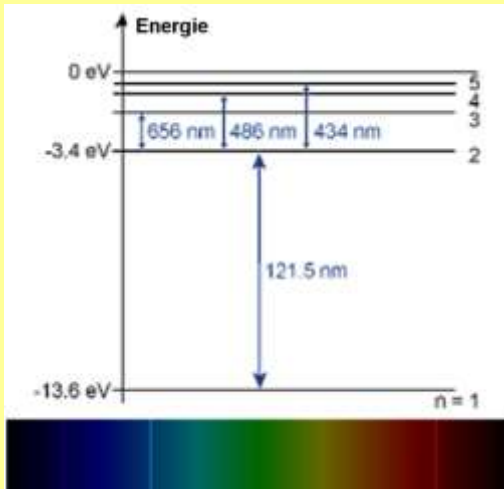
Navazuje na antiprotonový zpomalovač, který má obvod 183 m a zpomalí antiprotony na energii 5,3 MeV –

ELENA pak zpomalí antiprotony na 0,1 MeV a umožní efektivně zachytit velmi vysoký počet antiprotonů do pasti (10 až 100 krát více).

První antiprotony 2017, postupně všechny experimenty mezi lety 2019 - 2020



Využití neutrálního antiprotonu ke studiu symetrií



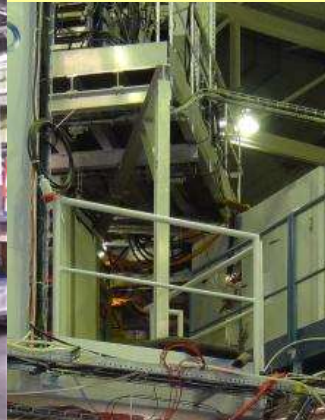
- 1) Světlo vyzařovaného antiprotonem - ALPHA
- 2) Pád antiprotonu v gravitačním poli - AEGIS



Do projektu AEGIS i projektů na LHC jsou zapojeni naši studenti – FJFI ČVUT Praha

Nové ALPHA II zařízení

První měření přechodů v atomu antivodíků – využití laserů



**Proměřeno už několik přechodů v antivodíku – naposledy čára Lyman alfa (121,6 nm)
Publikováno v Nature březem 2018
Předtím to byl přechod 1S – 2S (21 cm) Přesnost v řádu 1/ 100 000 000**



ALPHAg, GBAR a AEgIS

Měření pádu antihmoty v gravitačním poli Země – 11. 2018 první testy
Současná situace: experimenty připraveny, dva roky přestávka na modernizaci
a vylepšení systémů urychlovačů – experimenty s pozitroniem



Největší anihilace v historii našeho vesmíru

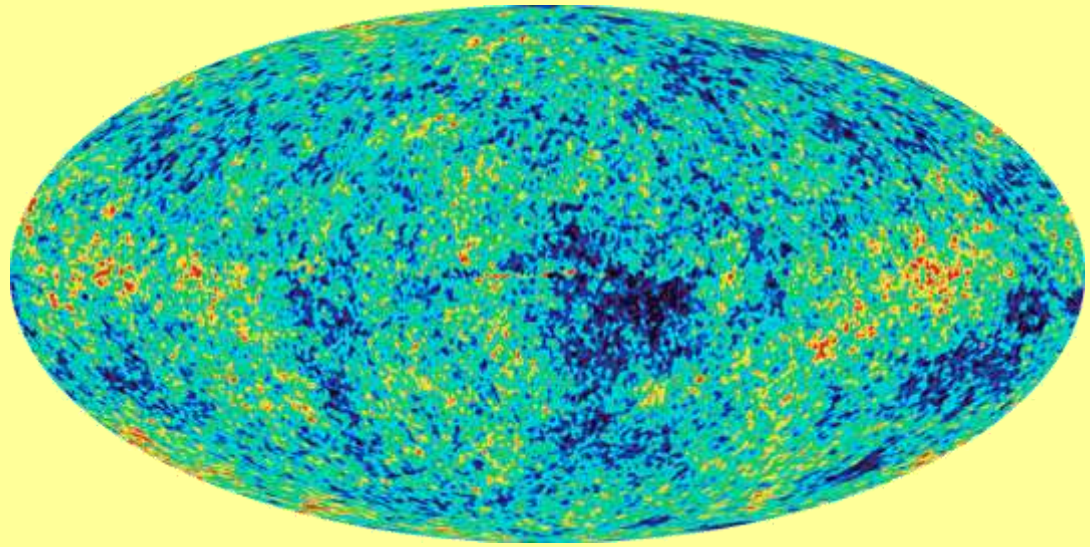
Počátek vesmíru → téměř shodné množství hmoty a antihmoty → obrovská anihilace (vzniká reliktní záření) – malý přebytek hmoty zůstává (1 z 10^9 protonů)

Přebytek hmoty je důsledkem rozdílů ve vlastnostech hmoty a antihmoty

Poznání počátku vesmíru – nutnost poznání rozdílů ve vlastnostech hmoty a antihmoty



Velká anihilace v představách tvůrců seriálu Star Trek



Největší anihilace v našem vesmíru nastala na jeho počátku a jejím pozůstatkem je reliktní záření

Existují antislavy a antimozemšťané?

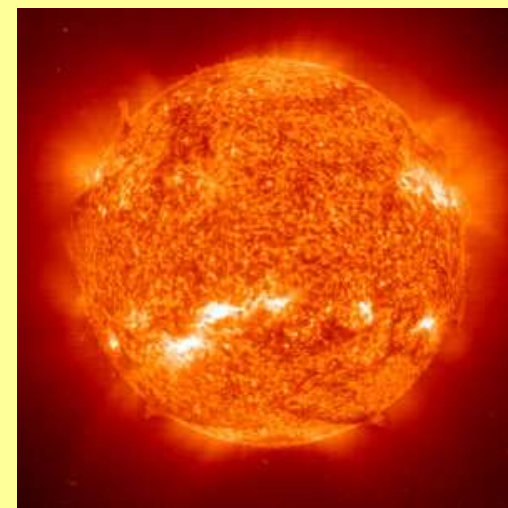
Všechny těžší prvky než helium ve hvězdách



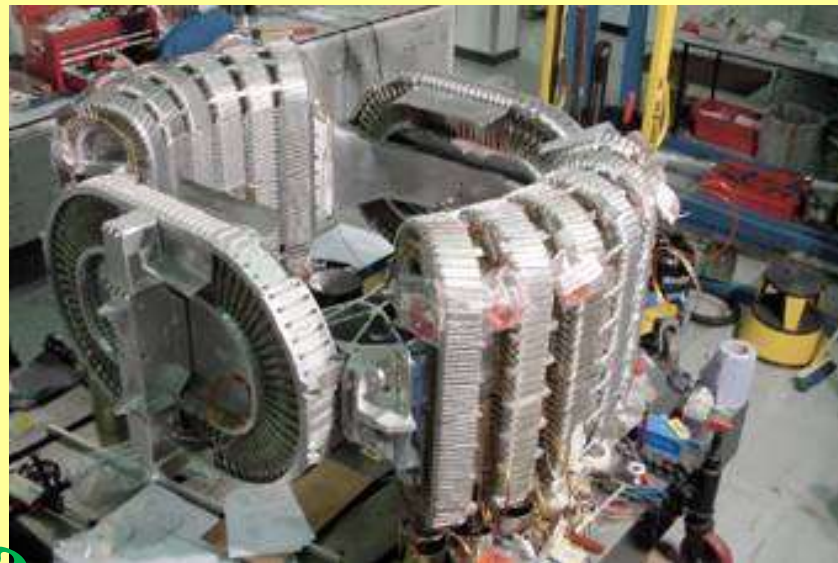
Aby byly antiplanety a antiorganismy musí být antihvězdy

Existují? – Pomocí světla se to nepozná !

Na rozhraní hmoty a antihmoty anihilace a záření gama
- nepozorujeme



Hledání antihmoty v našem vesmíru

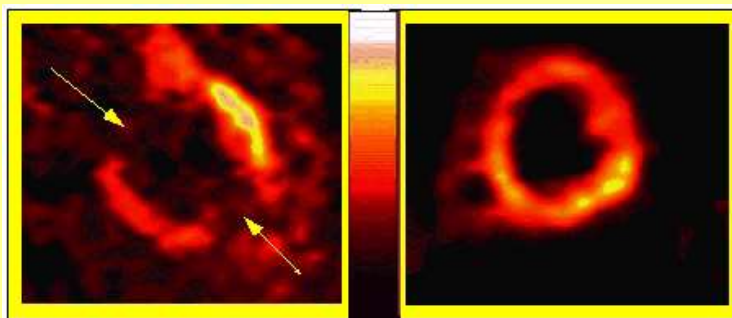


Jsou někde antihvězdy ?

Příklady využití pozitronové emisní tomografie

Srdce zasažené infarktem

Využívané radioizotopy:
 ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F



Zdravé srdce

Typická PET kamera a
komerční cyklotron IBA cyklone 10/3



PET radiofarmaka se připravují i na urychlovači a v laboratořích Ústavu jaderné fyziky AVČR:



Mezihvězdný let a jeho problémy

Velká vzdálenost – nejbližší hvězdy ~ 4 sv.l., do 15 sv.l. pouze desítky hvězd

Časové omezení (doba lidského života) – let ne delší než 100 let

Rychlost – ne menší než několik procent rychlosti světla

Energetická náročnost: nejméně desítky milionů TJ, výkony v řádu desítek GW

Řešení pohonu fúzí či antihmotou (jinou reálnou cestu zatím nevidíme) → velká loď, velké hmotnosti

Další problém: kosmické záření a interakce relativistické lodi s mezihvězdným prostředím



Mezihvězdný let

Vzdálenost: > 4 sv.r.

Uvažujeme automaty nebo let bez návratu (cesta desítky let ale ne stovky)

Požadovaná rychlost: > 0,1 c = 30 000 km/s

Lod' 1000 tun, potřebná energie (i brzdění) – téměř 900 000 000 TJ

Zhruba 24 násobek produkce elektrické energie v zemích OECD v roce 2010

Bez započtení účinnosti konverze je třeba výkon motoru lodi TW

Potřeba paliva (!! jen z energetického hlediska !!):

Jaderné štěpení: 11 000 tun - pozor jen čistý štěpný materiál, všechn se musí štěpit

Termojaderná fúze: 3 000 tun – efektivita fúze opět stoprocentní

Anihilace: 10 tun antihmoty

Produkce potřebné antihmoty i při vylepšení metod (poměr mezi dodanou energií a získaným ekvivalentem čtyři řády) bude potřeba o pět řádů více energie než vyrobily všechny elektrárny zemí OECD v roce 2010.

Nutná podmínka: vyřešení efektivní a bezpečné produkce jaderné energie na Zemi



Závěr



- 1) Každá **částice** má svého antihmotného partnera - **antičástici**
- 2) Při setkání částice a antičástice dochází k **anihilaci**
- 4) Nejsou doly na antihmotu – **produkce pomocí urychlovače** (nyní pouze 10 ng ročně)
- 3) Problém s uchováváním – **magnetické pasti** (malá hustota)
- 4) Reliktní záření – pozůstatek **prvotní anihilace**
- 5) **Studium antihmoty** – rozdílů mezi hmotou a antihmotou, testování fundamentálních fyzikálních zákonitostí a symetrií – **v čele výzkumu je CERN**
- 6) Současné **praktické využití v lékařství** – diagnostické metody (PET).
- 7) Nutnost zefektivnit produkci a uchovávání – možnost využití ke kosmickým cestám, zpočátku kombinace s termojadernou fúzí
- 8) Je třeba najít možnosti uchovávání antivodíku v kapalně nebo pevné fázi