



**Pohodlne  
sa usad'te...**

**....a môžeme  
začať**

*Dobrý spánok je zdravší  
ako nudná prednáška*



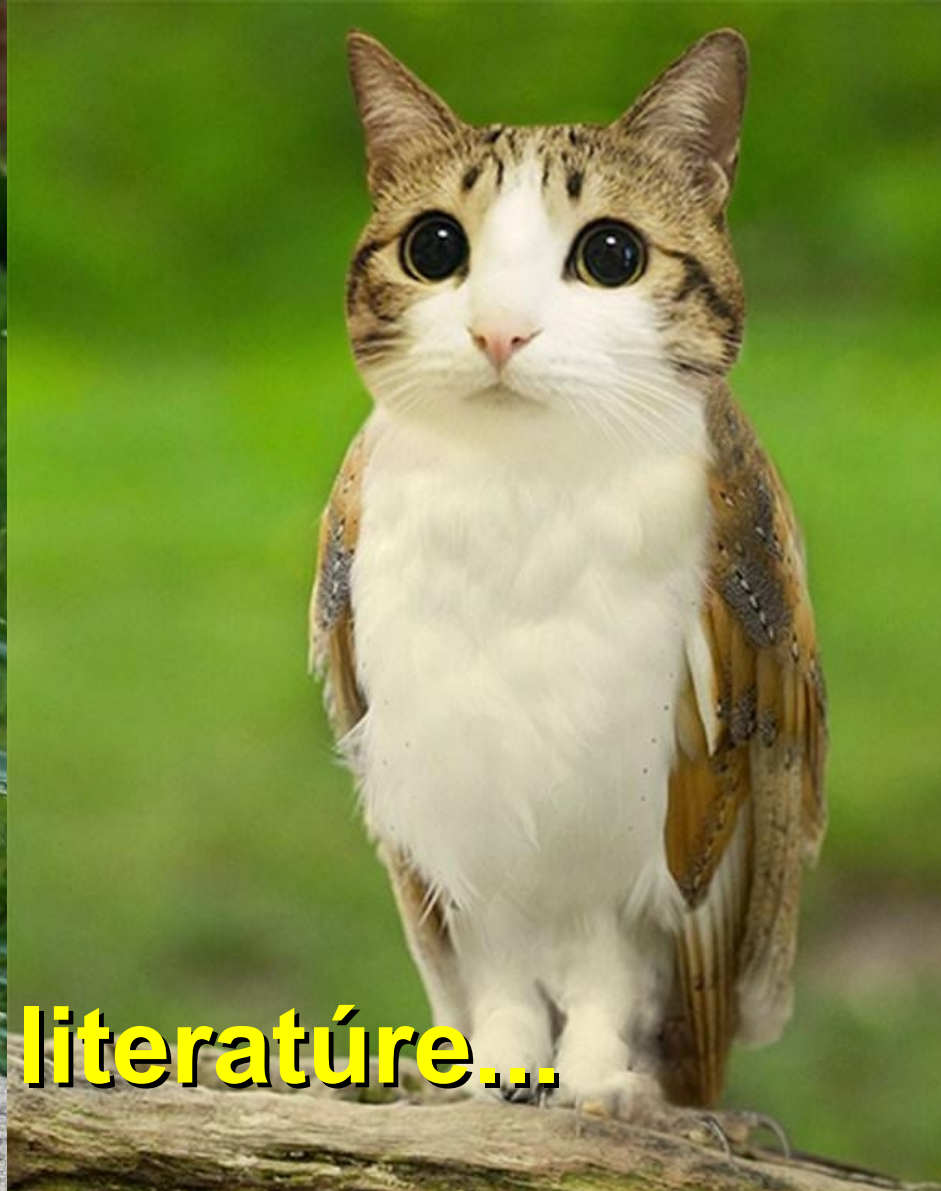
# Antihmota



I. Králik, ÚEF SAV Košice



**V populárnej literatúre...**



## ***“Mal by si spomenúť Dana Browna...”***

- Dôsledným a iniciatívnym ignorovaním objektívnej reality v spojení so slovom “antihmota” a “CERN” môže aj duševne obmedzený autor, neschopný napísať normálny príbeh, zarobiť veľké \$\$\$.
  - ak sa takého výplodu ujme Hollywood, kde objektívna realita a prírodné zákony dostávajú cez držku pravidelne, tak sa na tom zarobí ešte viac \$\$\$
- **FUJKY FUJKY!!!!**

# Tento emzák D. Browna čítal....



- Nevenoval sa riadeniu a teraz tu leží ako odstrašujúci príklad pre malé deti.

**... a tento D. Browna nečítal....**



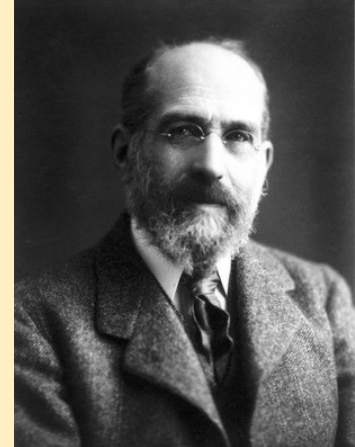
- Vyštudoval fyziku, urobil si PhD a teraz veselo terorizuje galaxiu.

**Na  
počiatku  
boli  
slová  
a  
trocha  
matematiky**

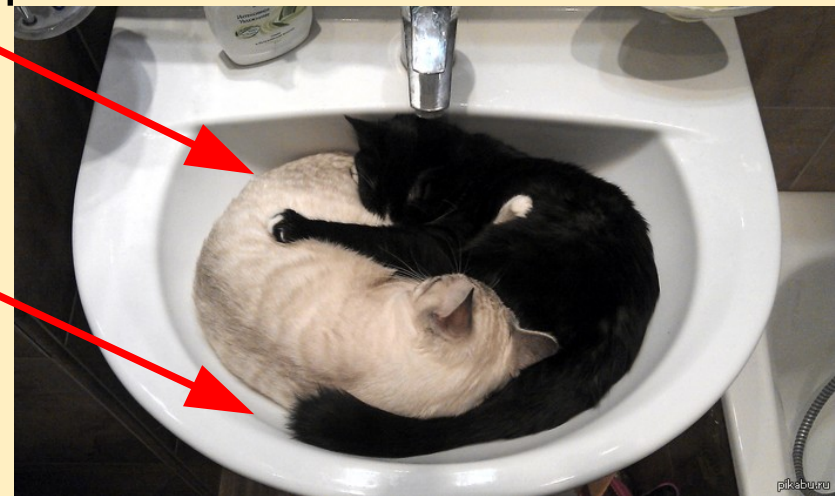




# Anti-Matter



- **Arthur Schuster, Potential Matter.**  
- **A Holiday Dream**, Nature, vol. 58, No. 1503, p. 367, 1898
- atómy sú **zdroje (sources)**, skrze ktoré prúdi neviditeľná kvapalina do 3-rozmerného priestoru
  - atómy - priťahujú sa (gravitačne)
- rovnaký počet **výleviek (sinks)**, udržuje množstvo kvapaliny konštantné
  - iný druh atómov - odpudzujú atómy-zdroje, ale priťahujú sa navzájom
- **Anti-matter** - a máme slovo...
- úvahy tohto typu sa objavovali v tom období u viacerých autorov



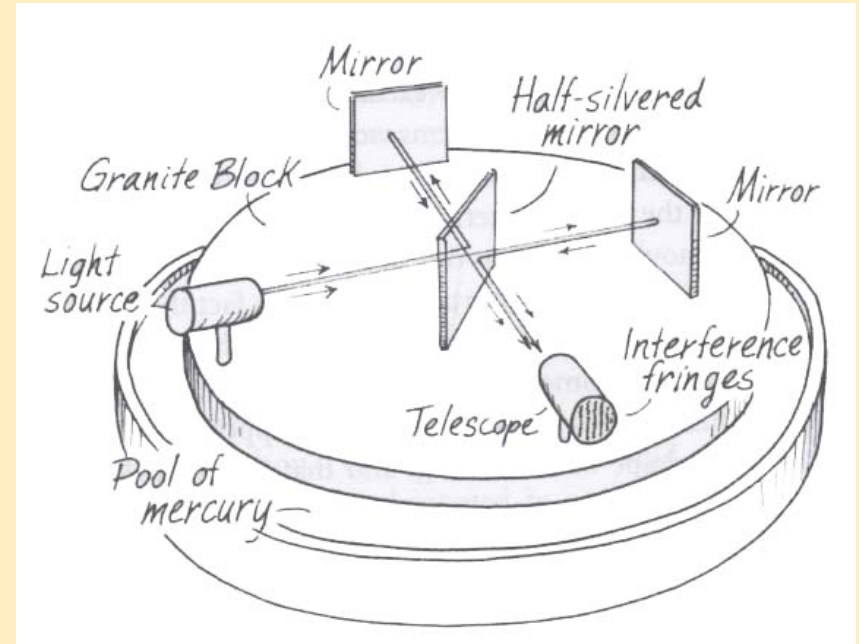
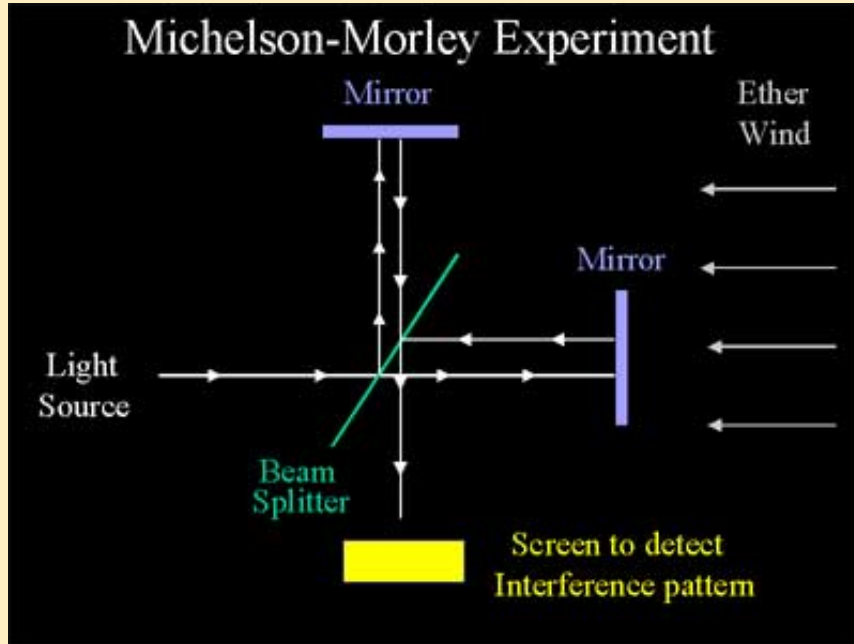
# Rýchlosť svetla a špeciálna teória relativity



# Svetlonosný éter (Luminiferous Æther)

- Koncept éteru sa ťahá históriou vedy už od starých Grékov
- **19. storočie:** Médium, ktorým sa šíri svetlo
  - vlnová povaha svetla
  - vo vákuu sa vlnenie šíriť nemôže - niečo sa musí vlniť
- **1879: J.C. Maxwell** (autor teórie elektromagnetizmu)
  - pohyb Zeme voči nehybnému éteru by mal byť merateľný
- **1887: Experiment Michelsona a Morleyho**
  - neúspech, ktorý viedol k revolúcii vo fyzike

# A.A. Michelson, E.W. Morley a ich experiment



- Porovnávali rýchlosť svetla v dvoch smeroch navzájom kolmých
- Rýchlosť Zeme zvlhľadom na nehybný éter sa mala prejavíť zmenou rýchlosti svetla v jednom smere  
→ pozorovateľný interferenčný vzor

**Najznámejší experiment s negatívnym výsledkom**

## A. Einstein: Postuláty

- Postulát = *predpoklad prijímaný ako pravdivý bez dôkazu*
  - pravdivosť teórie vypovedá o pravdivosti jej postulátov
- **Zákony elektrodynamiky a optiky sú platné pre všetky vzťahné sústavy, pre ktoré platia zákony mechaniky**
  - domnienka povýšená na jeden z postulátov
  - ***Princíp relativity***
- **Svetlo sa šíri vo vákuu konštantnou rýchlosťou  $c$  nezávislou na pohybovom stave svetelného zdroja**
- **Tieto dva postuláty stačia na to, aby sa Maxwellova teória elektromagnetizmu stala platnou aj pre pohybujúce sa telesá**
- Svetlonosný éter je nepotrebný

# A. Einstein: inerciálne vzťahné sústavy

- Transformácia medzi dvoma inerciálnymi sústavami

$$(ct') = \gamma(ct) - \gamma\beta x$$

$$x' = -\beta\gamma(ct) + \gamma x$$

$$y' = x$$

$$z' = z$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

časové a priestorové  
súradnice sa premiešajú  
(analogické rotácii)  
(pri  $\beta=0$ ,  $\gamma=1$  máme niečo  
ako Galileovu transformáciu)

**Čas nie je absolútny**

rýchlosť  $S'$  vzhľadom k  $S$

# Relativistická kinematika

- Kinematika telesa (častice) je určena 4-vektorem energie a hybnosti (alebo **4-hybnosti**)

$$\begin{pmatrix} E \\ c \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

toto sa transformuje rovnako ako 4-vektor súradníc časopriestoru

- Drobný problém s telesom v klúde (nehybnom)

– Klasická mechanika:  $E = 0, \vec{p} = 0$

– V ŠTR by sa to transformovalo:  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$

- ale to by sa nám nič nepohybovalo!!! Každé teleso je v klúde vo vzťahnej sústave spojennej s týmto telesom.

# Relativistická kinematika

- Einstein: **Teleso v kl'ude má nenulovú energiu**
  - kl'udová energia

- Aby pre  $v \ll c$  platilo nerelativistické  $E = \frac{p^2}{2m} + E_0$   
musel zvolit'  $E_0 = mc^2$

kde  $m$  je hmotnosť telesa (častice)

- Relativistickým **invariantom** je **hmotnosť** telesa (častice)

$$m^2 c^2 = \frac{E^2}{c^2} - p^2 = \frac{E'^2}{c^2} - p'^2$$

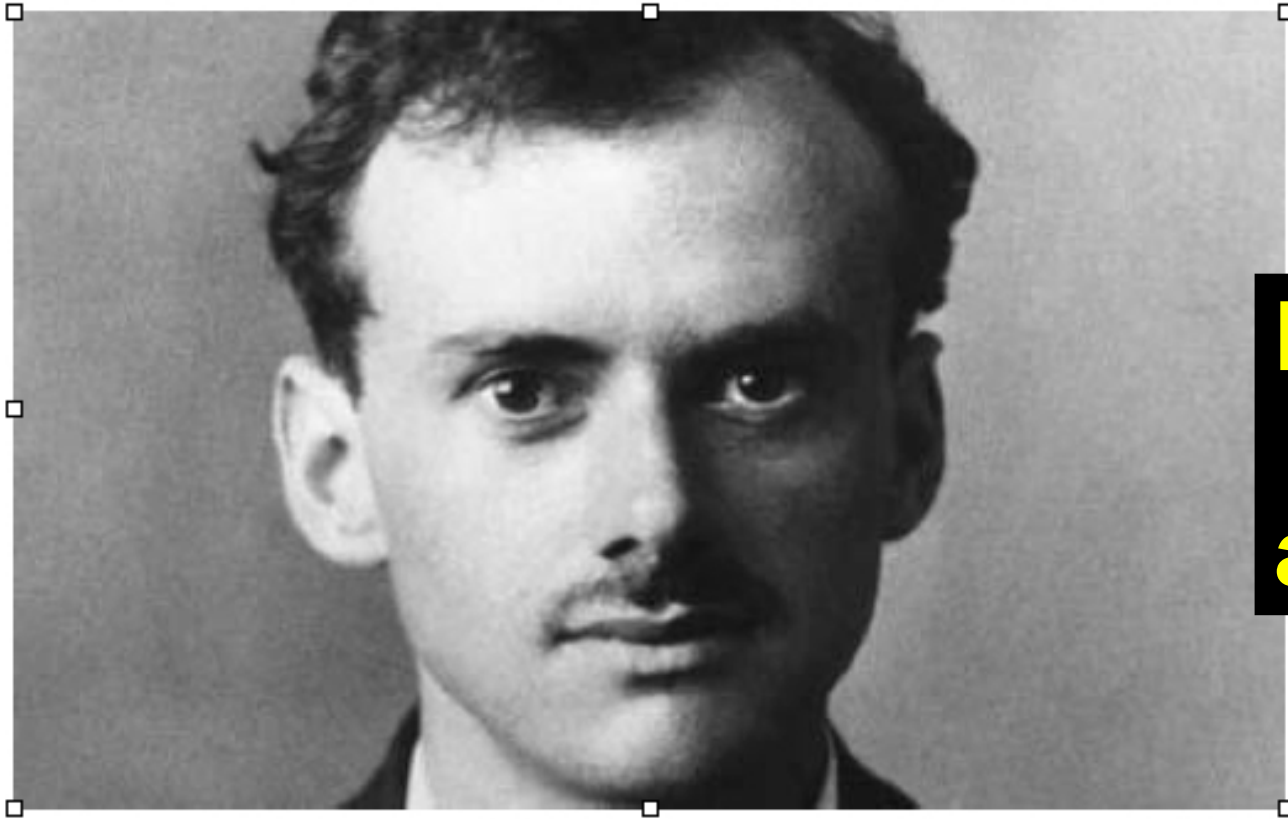
Hmotnosť telesa je rovnaká  
vo všetkých inerciálnych vzťažných  
sústavách



# Energia a hybnosť ŠTR

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

Toto bude mať veľký význam pre existenciu antihmoty...



# P. A. M. Dirac a jeho rovnice

$$\left( \beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t}$$

# 1928: Kvantová mechanika a Špeciálna teória relativity

- **Kvantová mechanika** dokáže popísať atomárne spektrá
  - **1925: E. Schroedinger** - pohybová rovnica
  - **1927: W. Pauli** - spin elektrónu (rukami vložený), nerelativistický pohyb elektrónu v elektromagnetickom poli
- Pohybové rovnice sú **nerelativistické**
- Prvé pokusy o relativistický popis mikrosveta veľký úspech nemali.
- Známe stavebné kamene hmoty:
  - **elektrón** ( $Q=-1q_e$ ,  $m_{\text{elektron}}=0.511 \text{ MeV}/c^2$ , spin  $1/2$ )
  - **protón** ( $Q=+1q_e$ ,  $m_{\text{proton}}=938 \text{ MeV}/c^2$ , spin  $1/2$ )
  - **neutrón** ( $Q=0$ ,  $m \approx m_{\text{proton}}$ , spin  $1/2$ , **nikto ho nevidel, ale každý verí, že existuje** - objavený 1932)

# 1928: Kvantová mechanika a Špeciálna teória relativity

- Kľudová energia elektrónu (hmotnosť) je 0.511 MeV
- Kinetické energie elektrónov v atómoch sú rádovo 1 eV až 1 keV, t.j. 0.000 001 – 0.001 MeV a nerelativistický popis je O.K.
- Energie elektrónov z  $\beta$  rozpadov jadier sú 1-5 MeV
- Ich rýchlosti sú

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E} = \frac{\sqrt{E^2 - m^2 c^4}}{E} = 0.86 - 0.995$$

- Procesy prirodzenej radioaktivity s účasťou elektrónov vyžaduje relativistický kvantovomechanický popis elektrónu

# 1928: Paul Adrien Maurice Dirac

- P. A. M. Diracovi sa podarilo veľmi elegantným spôsobom sformulovať relativistickú kvantovomechanickú rovnicu pre elektrón
- dostal sústavu 4 diferenciálnych rovníc, ktoré mali 4 riešenia

- 2 riešenia: elektrón, spin  $\frac{1}{2}$ ,

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

- **2 riešenia: elektrón, spin  $\frac{1}{2}$**

$$E = -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

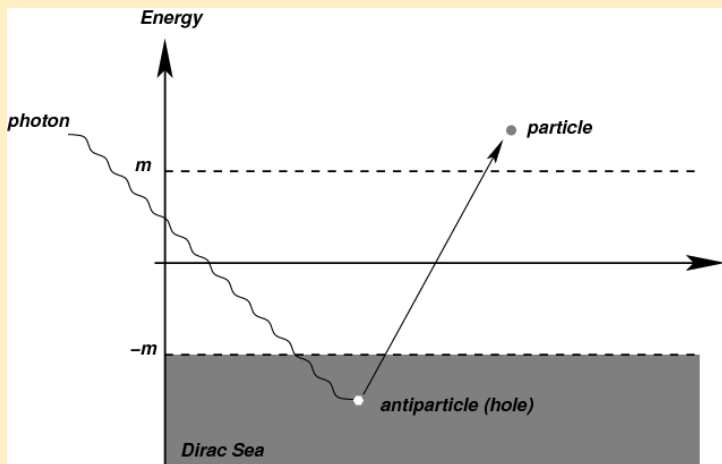
- Neexistoval žiaden fyzikálny argument, ktorým by sa dali vylúčiť stavy s negatívnou energiou.

# Stavy so zápornou energiou?

- Pohyb elektrónu so  $E < 0$  v elektromagnetickom poli sa deje po dráhe po akej by sa pohyboval elektrón opačne nabitý s  $E > 0$ .
  - **elektrón s  $E < 0$  sa pohybuje v elmag. poli ako keby niesol kladný náboj.**
- Elektrón potešil, jeho spin bol “predpovedaný” a nie umelo zakomponovaný do matematického modelu
- Jedine **protón** bol známy ako kladne nabitá častica. Aj keď je omnoho ťažší ako elektrón Dirac sa pokúsil do napasovať na riešenia s  $E < 0$



# Interpretácia (Dirac, 1929)



Kladne nabité diery Dirac sa pokúsil stotožniť s **protónom**

Elektróny a diery pripomínajú to ako sa dívame na polovodiče....

- všetky stavy s  $E < -mc^2$  vo vesmíre sú obsadené (Pauliho vylučovací princíp)
  - **Diracovo more**
- Elektróny s  $E > mc^2$  nemôžu preskočiť do stavu s  $E < -mc^2$
- Ožiarenie elektrónu s  $E < 0$  fotónom s energiou  $E_\gamma > 2mc^2$  ho “vyazí” z mora a uvidíme
  - **elektrón** záporne nabitý
  - kladne nabitá **diera**
- Pri preskoku elektrónu so stavu s  $E > 0$  na voľné miesto v mori, elektrón aj diera zmiznú a vyžiarí sa energia vo forme fotónu(ov) s  $E_\gamma > 2mc^2$

**Obláčiky v sklenenej banke,  
bez ktorých by sme nemali objav**





# Jazykové okienko

- **Cloud:** kondenzovaná vodná para v atmosfére, vysoko nad zemou (**oblak**)
- **Fog:** drobné kvapky vodnej pary rozptýlené v atmosfére blízko zemského povrchu. Výzorne obmedzuje viditeľnosť (menej ako 1km) (**hmla**)
- **Mist:** drobné vodné kvapky rozptýlené blízko zemského povrchu, slabo obmedzujú viditeľnosť (skôr taký **opar**)
  
- **Cloud chamber = obláčiková komora**

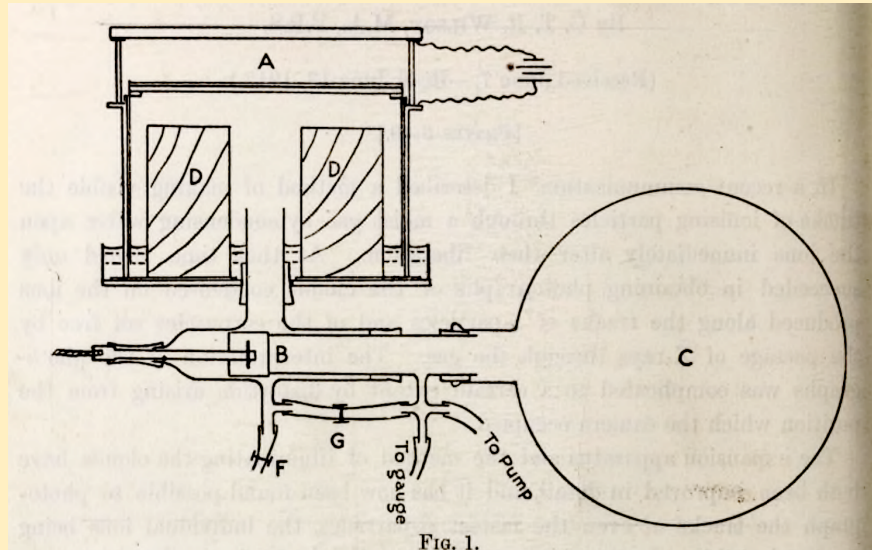


# Princíp činnosti *obláčikovej* komory

- **Presýtená para:** Systém plyn+para môže za určitých okolností obsahovať väčšiu koncentráciu pary ako by mal mať v rovnovážnom stave. V normálnom stave by už malo dôjsť ku kondenzácii pary ale kondenzácia nenastane.
- **Metastabilný stav:** Presýtený stav môže nejaký čas existovať, ale akýkoľvek aj minimálny podnet vedúci k vytvoreniu kondenzačných jadier spôsobí kondenzáciu pary a vytváranie obláčikov
- **Kondenzačné jadro:** zrnko prachu, ionizačná stopa nabitej častice – môže naštartovať kondenzáciu pary. Podľa “poveternostných podmienok” prebehne kondenzácia alebo len v malom okolí kond. jadra alebo sa táto rozšíri do väčšieho objemu.

# Presýtený stav: adiabatická expanzia

- **C.T.R. Wilson a Wilsonova “obláčiková” komora**
- Rýchla adiabatická expanzia plynu v objeme A nasýtenom parami
- Expanzia plyn a výpary ochladí a zníži tlak v nádobe A
- Plyn s parou sa náhle ocitne v stave presýtenom – je tam viac pary ako by malo byť
- Zmena objemu A, pacovný plyn a para musia byť zvolené tak, aby to celé fungovalo
- Plyn = napr. vzduch
- Para = napr. alkohol
- Ventil B riadiaci expanziu objemu A sa dá pomocou elektromagnetu a elektronického obvodu zosynchronizovať s fotoaparátom (a napr. Geiger-Muellerovým detektorom)

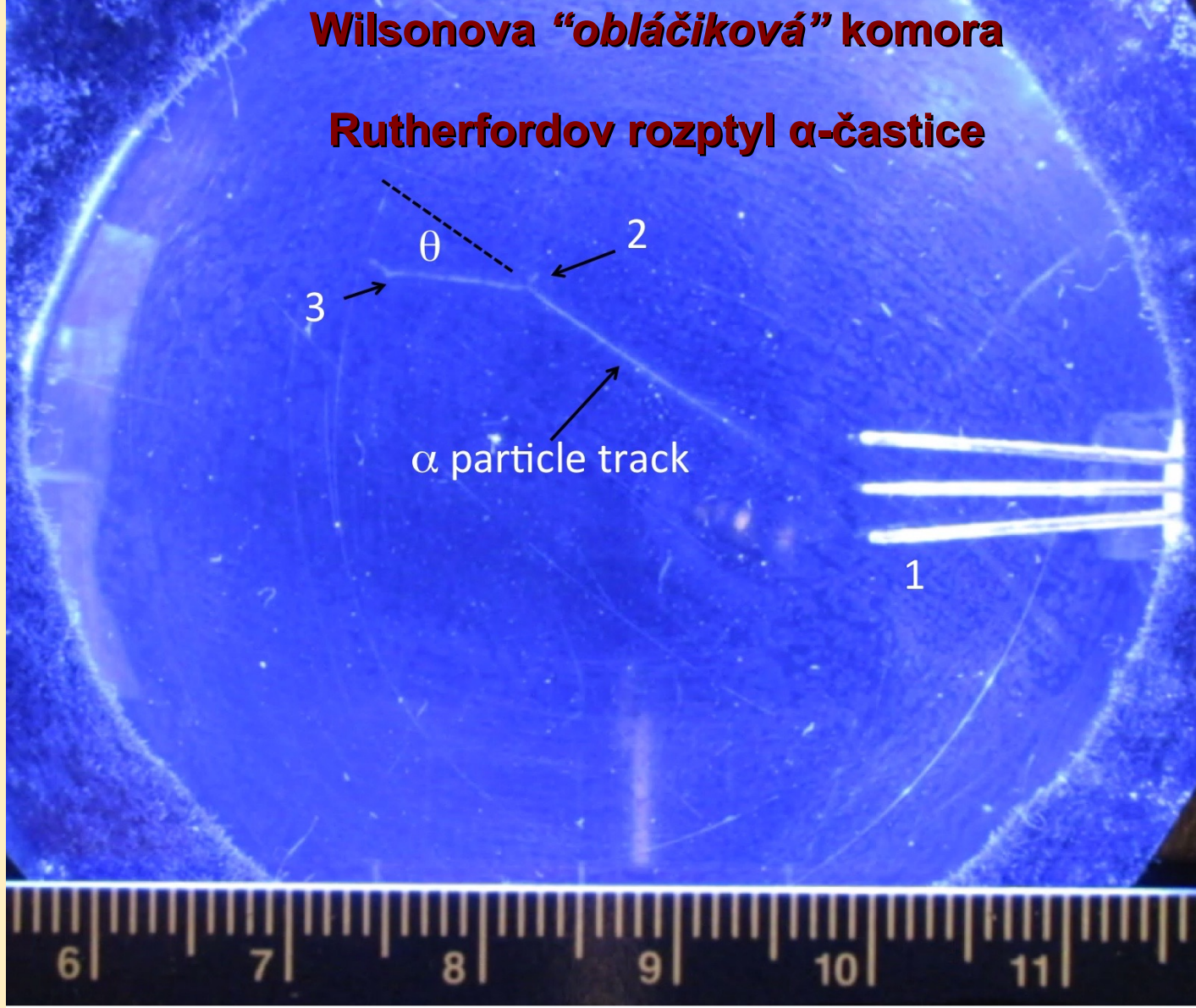


# Wilsonova “obláčková” komora



# Wilsonova "obláčková" komora

## Rutherfordov rozptyl $\alpha$ -částice



# Wilsonova "obláčiková" komora

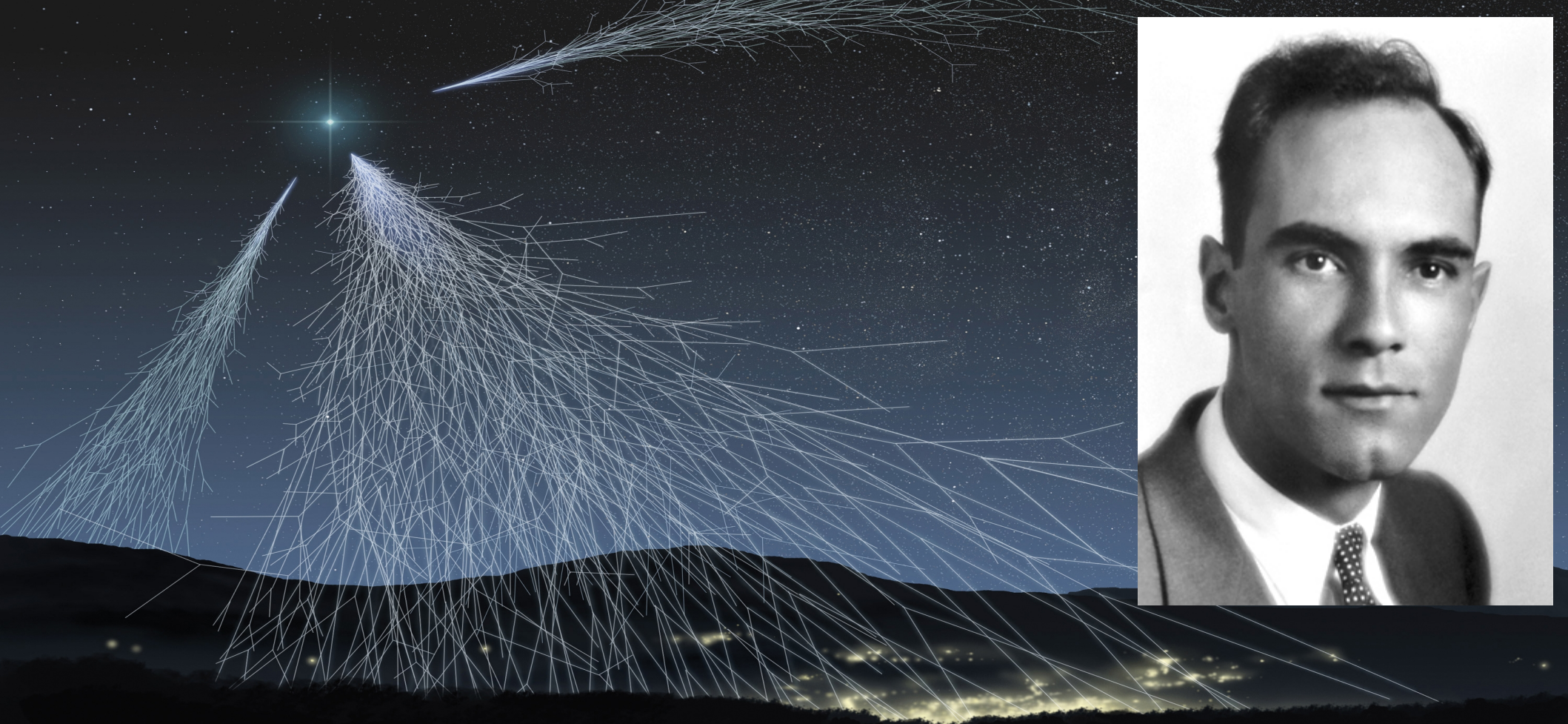
## Osvetlenie dráh $\alpha$ -častíc



**Od slov k činom**



**Objavy**

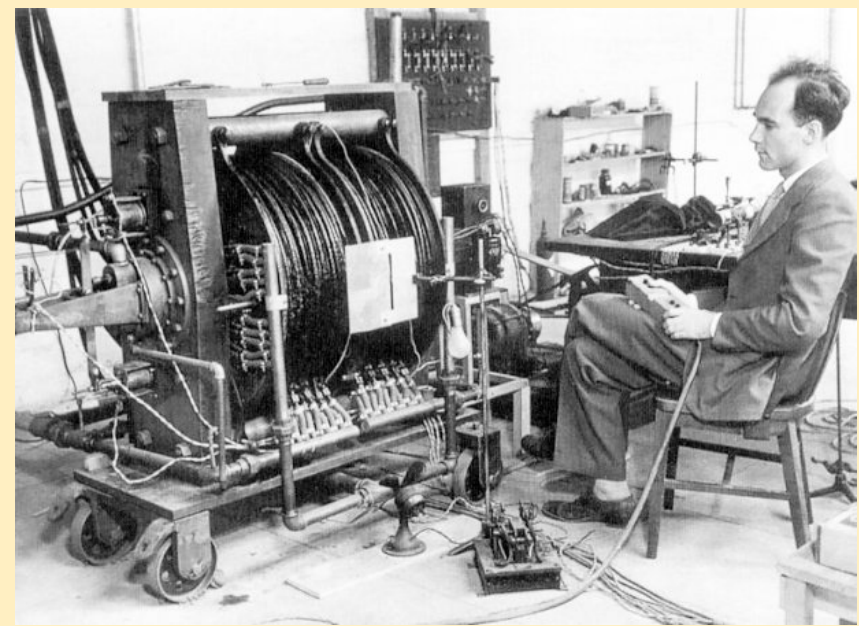
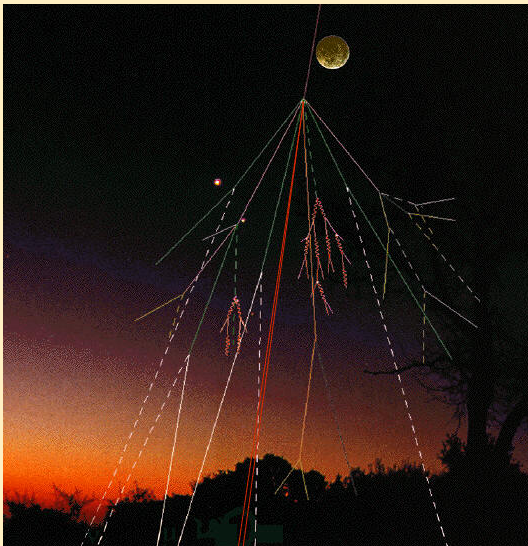


**1932 Carl Anderson: Objav pozitronu  $e^+$**



# Wilsonova obláčiková komora v magnetickom poli

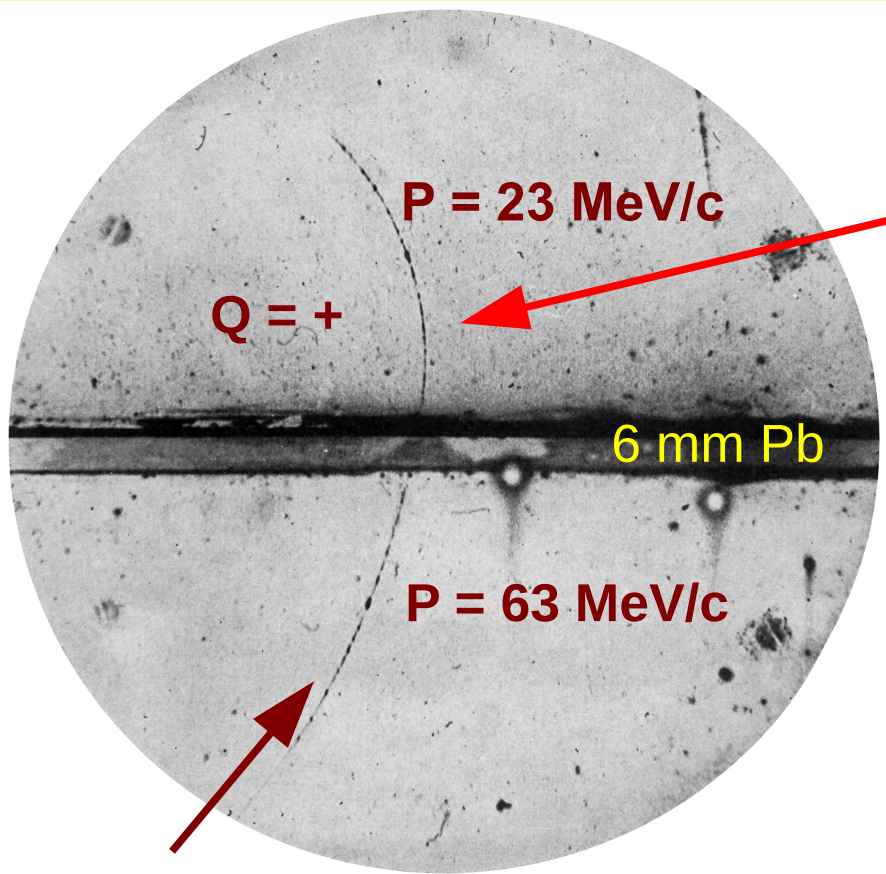
- nabité častice zanechajú  
v komore **kondenzačné**  
**stopy** - dajú sa fotografovať
- zakrivenie dráhy v magnetickom  
poli
- = **náboj** (doľava / doprava)
- = **hybnosť**  $p \sim z B R$



Umelé zdroje vysokoenergetického  
žiarenia (urýchľovače) sa len pomaly  
rodili v hlavách chytrých ľudí

**Kozmické žiarenie** vysoko nad morom  
**trpezlivosť**

**šťastie** (aby príroda poslala niečo  
zaujímavého)



Ak by kladne nabitá  
častica bola protón,  
jeho kinetická energia  
by bola **~ 280 keV**

S takou energiou by  
preletel vo vzduchu  
**~ 5 mm**  
(rýchlo stratí energiu  
ionizáciou)

Pozorovaná dráha je **~ 5 cm**  
t.j. 10x viac

Straty energie ionizáciou a zakrivenie dráh  
v magnetickom poli sú konzistentné  
s hmotnosťou  
kladne nabitej častice  **$m < 20 m_e$**  .... **Pozitrón  $e^+$**



# Upresnenie teórie ....



+

Ťažký protón bol  
v teórii  
nahradený ľahkým  
pozitrónom  
objaveným experimentálne v 1932



Objav pozitronu  
vniesol do fyziky  
očakávanú  
symetriu



# Teória a experiment ....

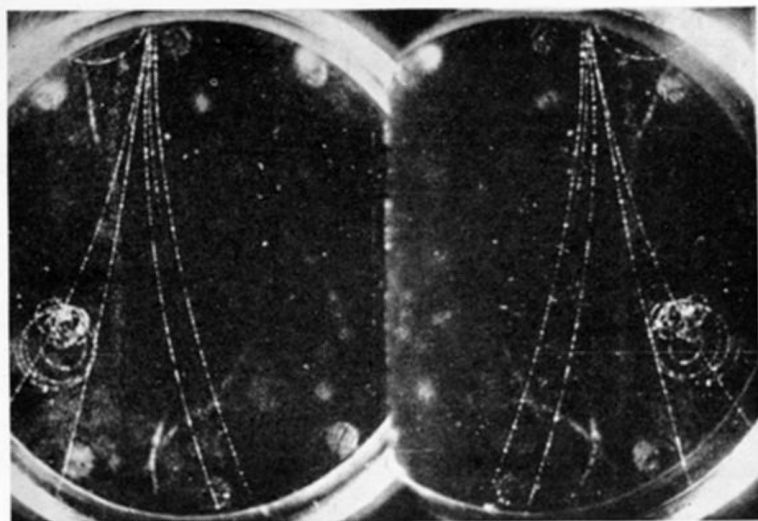
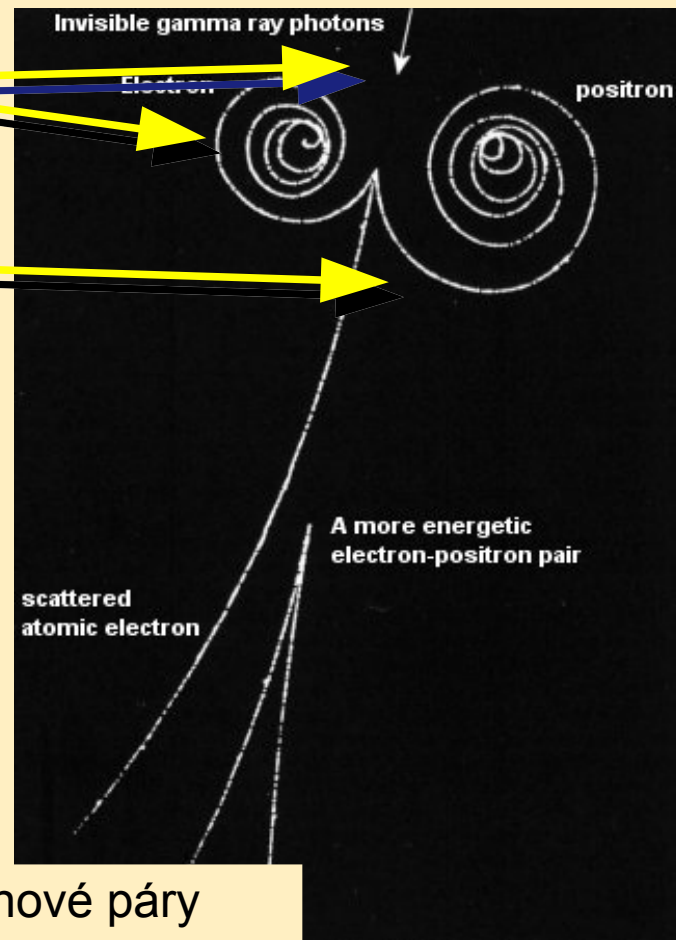
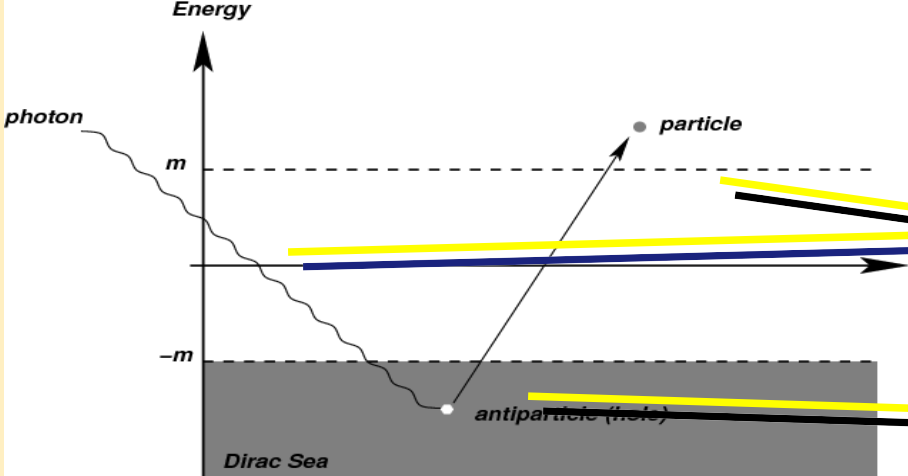
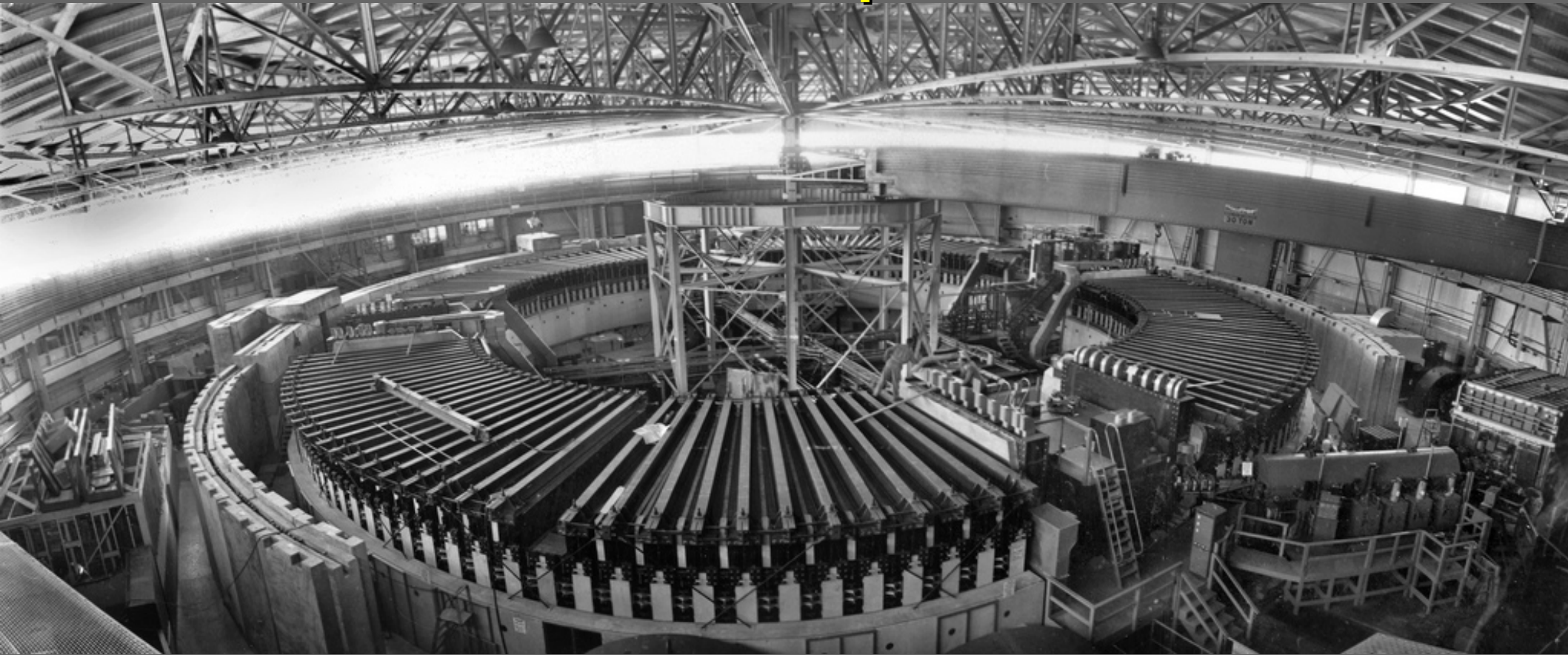


FIG. 1. Pike's Peak, 7900 gauss. An electron shower of three negatrons and three positrons of energies, respectively from left to right, 3.5, 55, 190, 78, 70, 90 MEV. The low energy electrons coincident in time with the shower

3 elektrón-pozitrónové páry  
Pozorované Andersonom

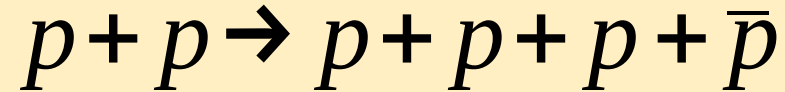
# 1955: Bevatron - Antiprotón



O. Chamberlain, E. Segrè, C. Wiegand, T. Ypsilantis

# Výroba antiprotónu

- Minimálna reakcia vedúca k produkcii antiprotónu



- Experiment s fixným terčikom potrebuje minimálnu energiu zväzku

$$E = 7 m_p c^2 = 6.6 \text{ GeV}$$

- Pri použití jadrového terčíku sa prahová energia trochu zníži
- **BEVATRON**: energia urýchľovača bola projektovaná tak, aby (možno s odretými ušami) mohol vyprodukovať antiprotón
  - Lawrence Berkeley Laboratory, USA

# Detekcia antiprotónu

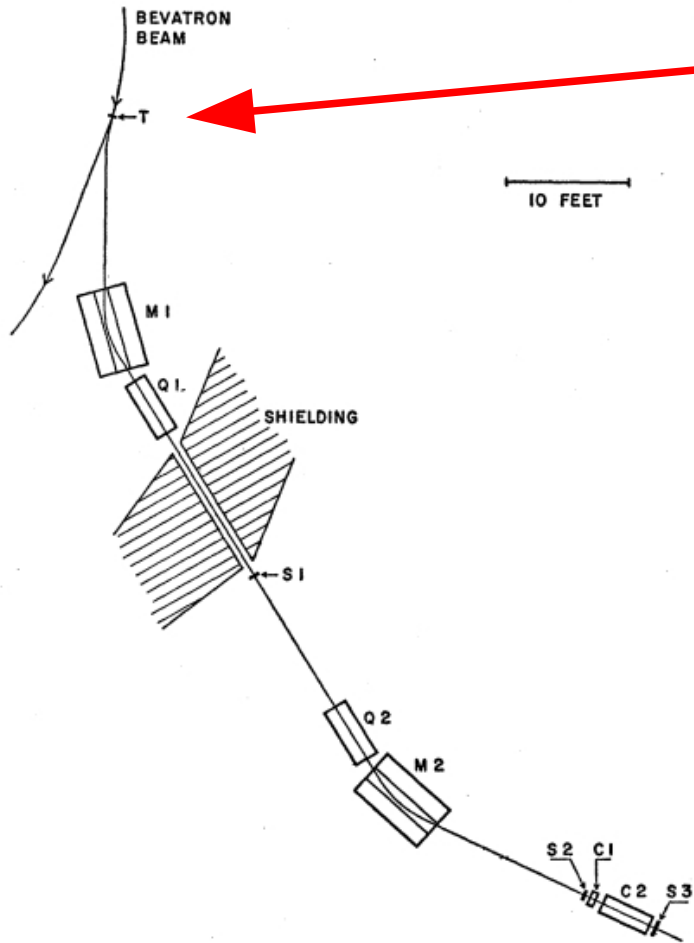


FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.  
For details see Table I.

- **T** - Cu terčik
- v zrážkach protónov s nukleónmi Cu vznikajú rôzne sekundárne častice a môžu sa tam objaviť aj nejaké antiprotóny

# Detekcia antiprotónu

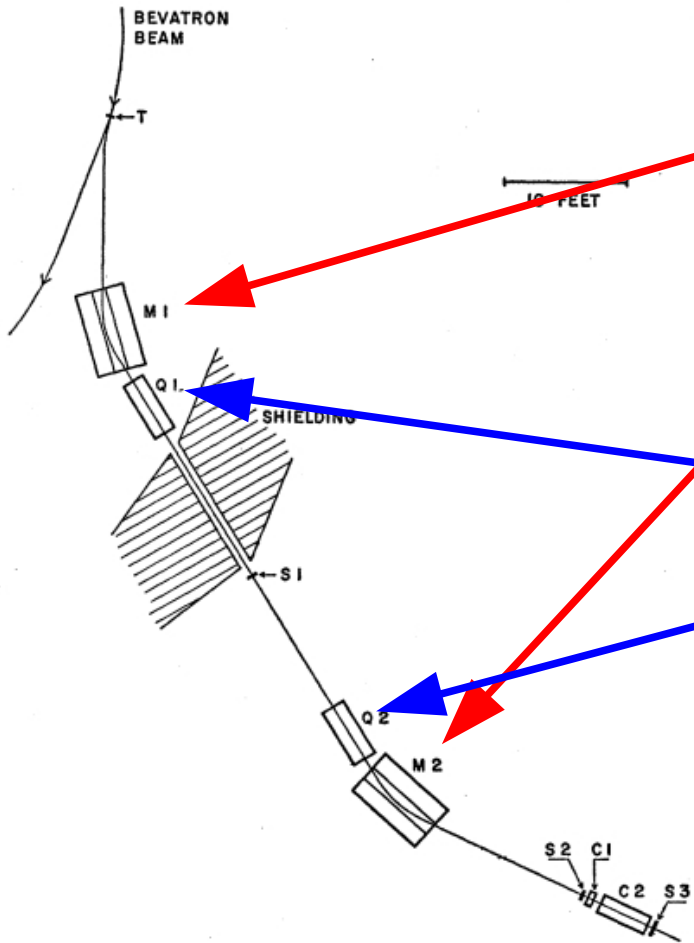


FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.  
For details see Table I.

- **M1, M2** - dipólové magnety
  - zakrivujú záporne nabité častice s hybnoťou **1.19 GeV/c** tak aby preleteli detekčnou sústavou
  - **1.19 GeV/c** je hybnosť antiprotónu pri mierne nadprahovej produkcii
- **Q1, Q2** - kvadrupólové magnety
  - udržiavajú častice na dráhe - fokusujú



# Detekcia antiprotónu

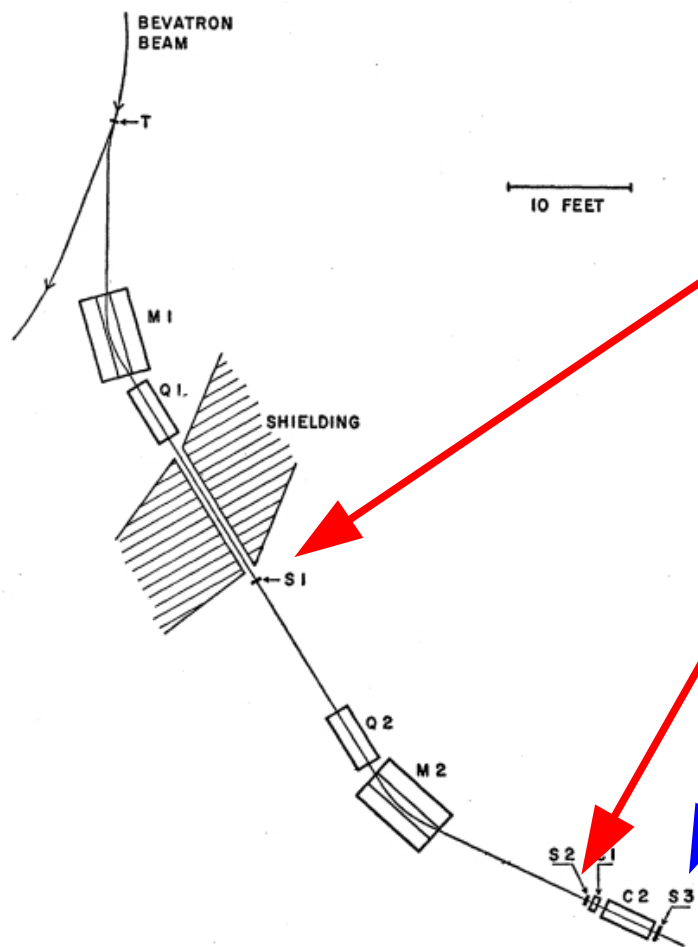


FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.  
For details see Table I.

- **S1, S2, S3** - scintilačné detektory
- poskytujú rýchlu odozvu na prelet nabitej častice

# Detekcia antiprotónu

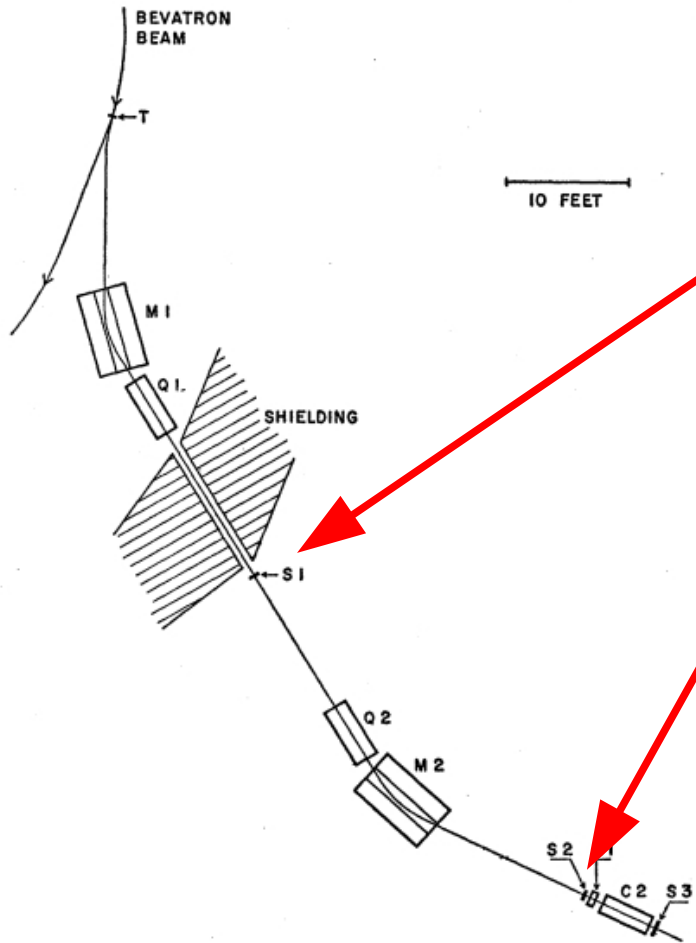
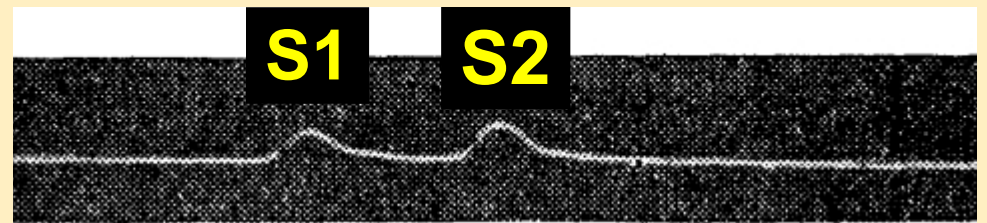


FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.  
For details see Table I.

- **S1, S2**
- vzdialenosť medzi nimi je 40ft = 12.2m
- doba letu (TOF) závisí na rýchlosti častice
$$\beta = \frac{v}{c}$$
- pri hybnosti 1.19 GeV/c

$\pi$	:	$\beta = 0.99$	$\rightarrow$	$TOF = 40 \text{ ns}$
$p, \bar{p}$	:	$\beta = 0.78$	$\rightarrow$	$TOF = 51 \text{ ns}$



# Detekcia antiprotónu

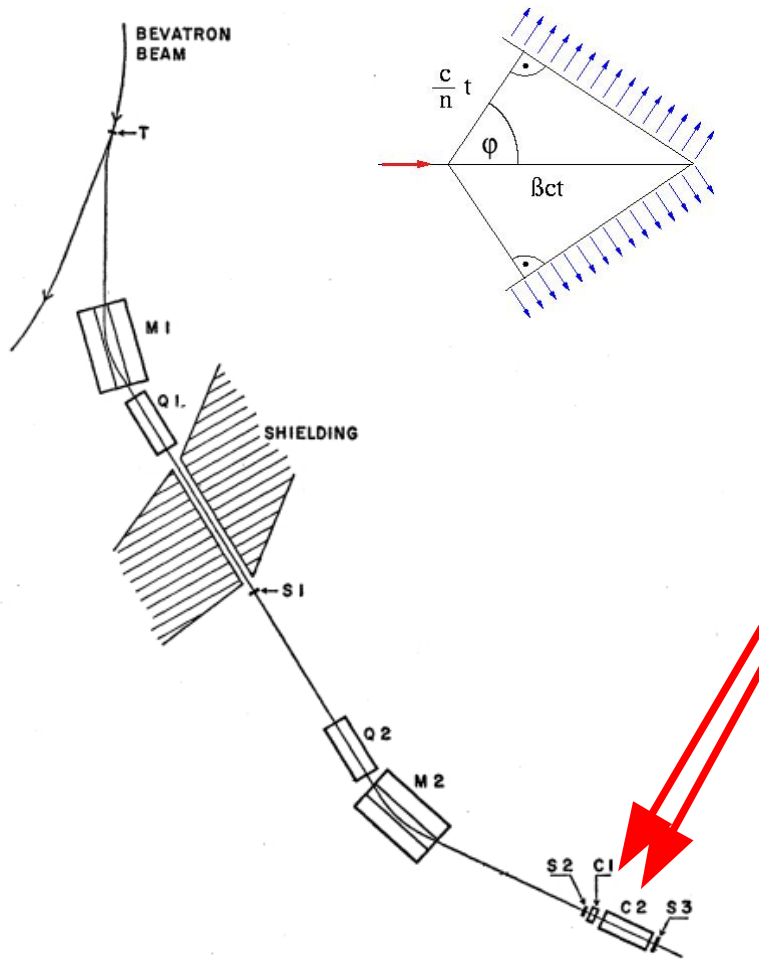


FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.  
For details see Table I.

- **C1, C2** - detektory Čerenkovovského žiarenia
- nabitá častica s rýchlosťou väčšou ako je rýchlosť svetla v danom prostredí
- **analóg nadzvukovej rázovej vlny**
- svetlo vyžarované pod uhlom

$$\cos(\phi) = \frac{1}{n\beta}$$

- prstenec svetla okolo dráhy nabitkej častice

# Detekcia antiprotónu

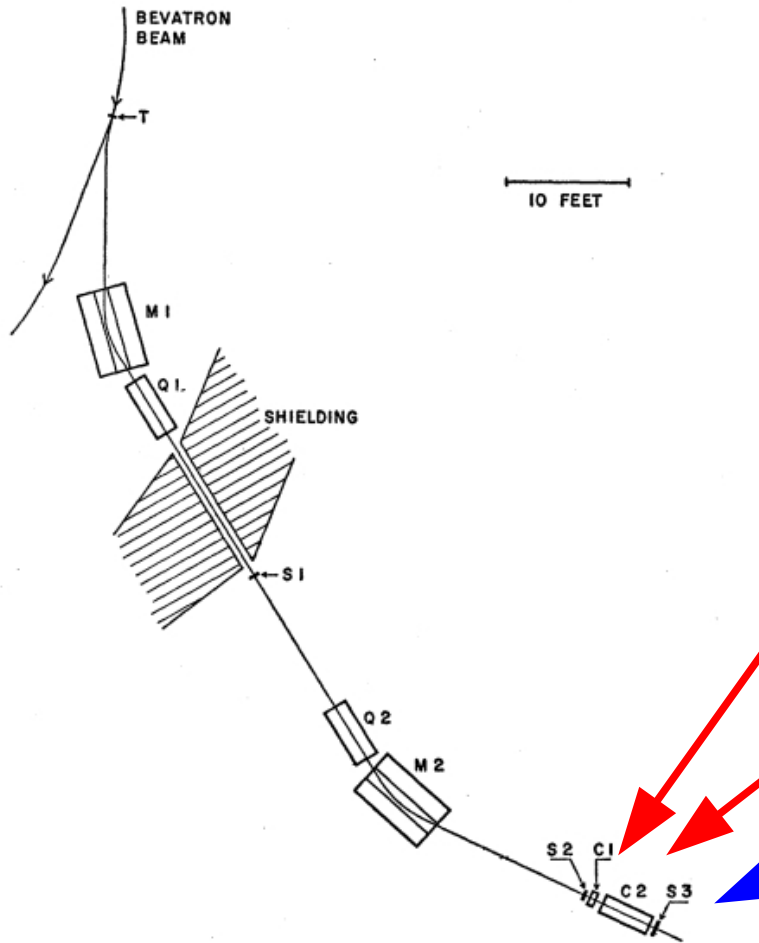
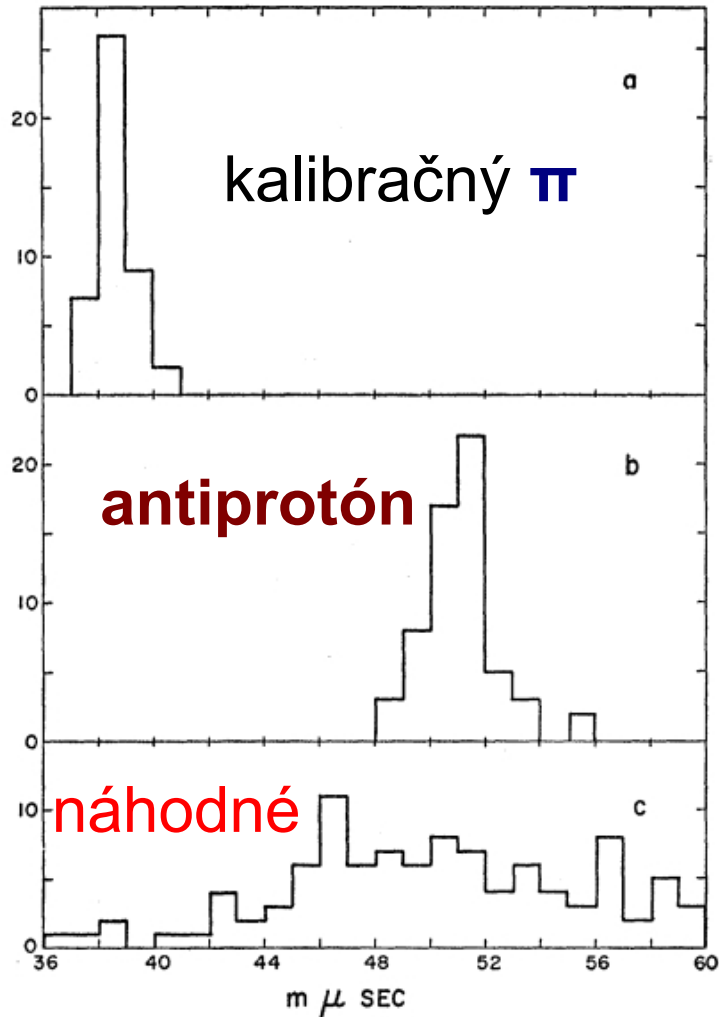


FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.  
For details see Table I.

- **C1, C2** - detektory Čerenkovovského žiarenia
- **C1** registruje iba  $\beta > 0.79$   
indikuje že častica je  $\pi$  (**VETO**)
- **C2** registruje, ak  $0.75 < \beta < 0.78$   
- antiprotón v **S3** by mal mať  $\beta = 0.765$   
vďaka strate energie v materiáloch, cez ktoré preletel

# Identifikácia antiprotónu



- Selekcia pomocou **C2**
- Súčasné meranie TOF so strednou hodnotou **51 ns**
- Doba života častice potrebná na dolet až do **S3**

$$\tau > 10.2 \times 10^{-8} \text{ sec}$$

- Slabé rozpady známych častíc vedú k dobe života

$$\tau \sim 10^{-10} \text{ sec}$$

**TOF**

**Antijadrá**



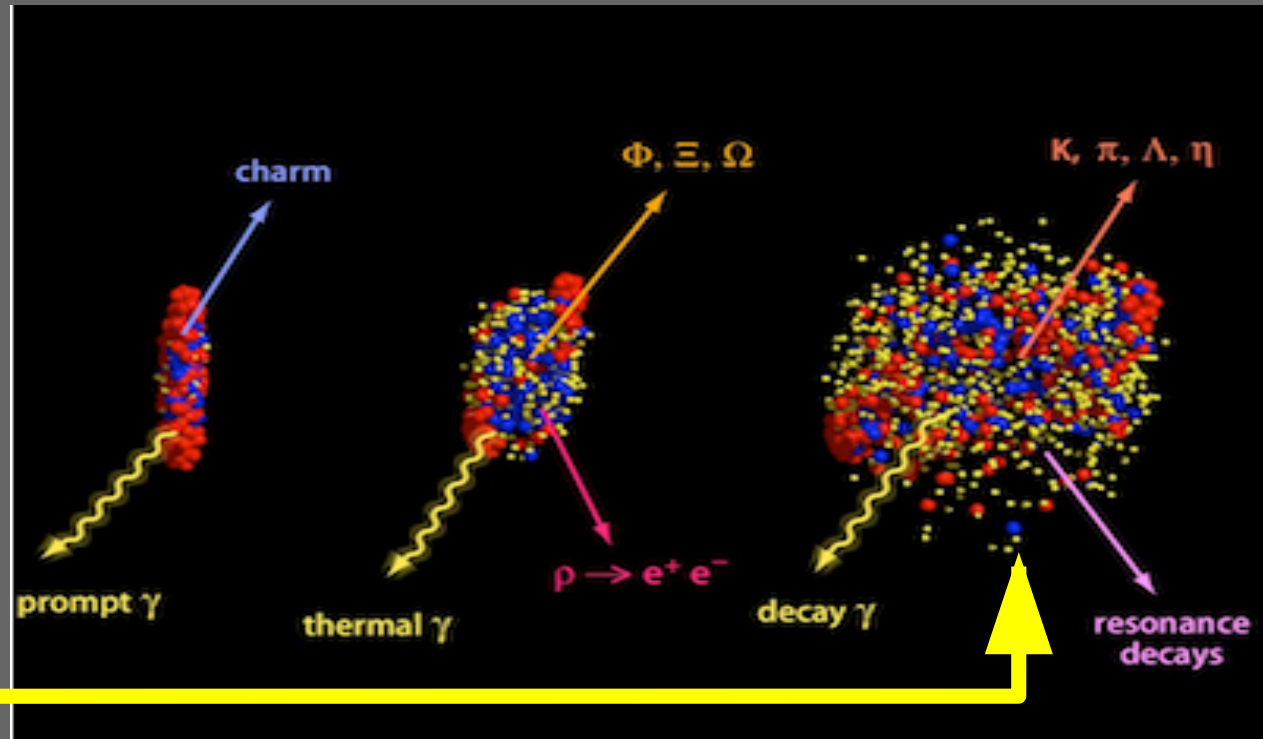
$\bar{d}$

**p+Be @ 19.2 GeV, CERN, 1965**

- Podobná metodika ako u hľadania  $\bar{p}$
- TOF a Čerenkovovské detektory
  - viac sofistikovanejší výber kandidátov
- *“The results reported imply the conclusion that a negative particle exists with a mass equal to  $(1867 \pm 80) \text{ MeV}/c^2$ . The most simple interpretation of these data is to identify this particle with the antideuteron.”*
  - T. Massam, Th. Muller, R. Bighini, M. Schneegans and A. Zichichi, *Il Nuovo Cimento XXXIX, 10, (1965)*

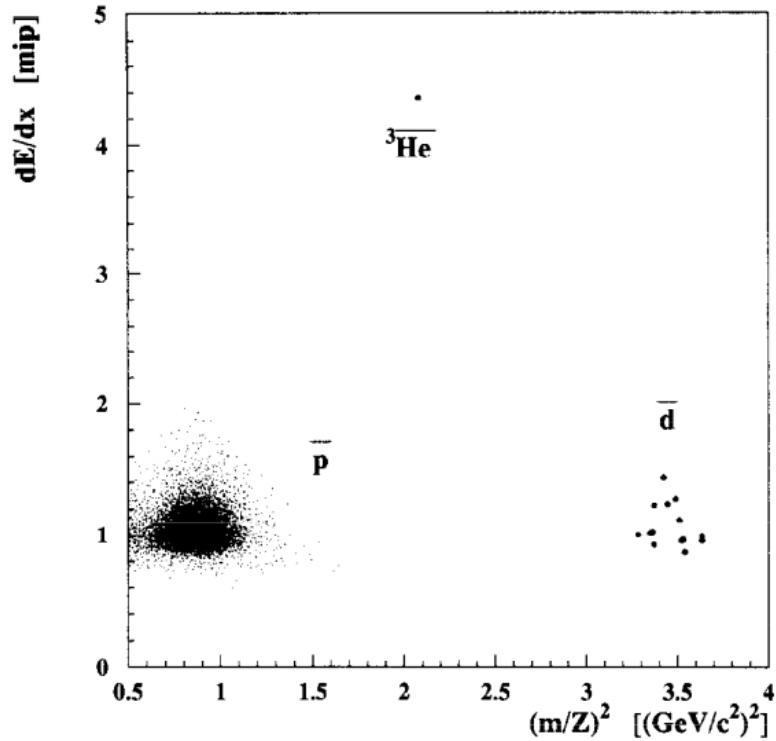
# Antihélium

- Zrážky ťažkých iónov (Pb, Au) pri vysokých energiách
  - hustý, dlhožijúci, mhohočasticový koncový stav
  - kolektívny pohyb - častice letia spolu, majú viac času na vzájomné interakcie
  - **antiprotóny a antineutróny** si ľahšie nájdu partnerov a sformujú antijadro

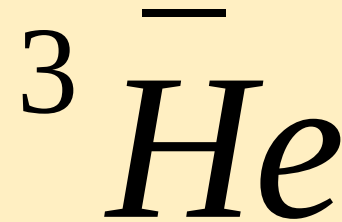




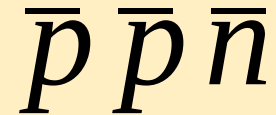
# CERN, NA52, Pb-Pb @ 158 GeV/c, 1996



Pozorovaný jeden prípad  
produkcie



V 2003 publikovaných  
5 detekovaných prípadov  
viazaného stavu

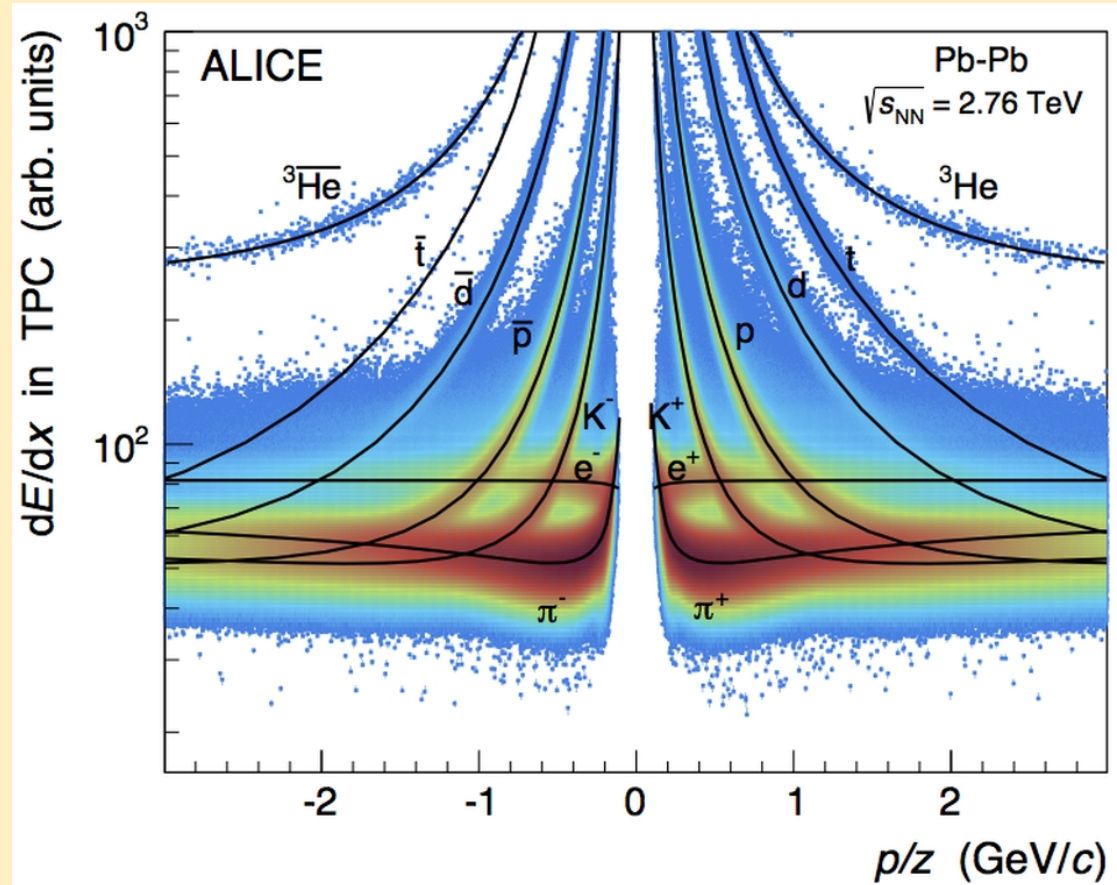


$$\left(\frac{m}{Z}\right)^2 = \left(\frac{p}{Z}\right)^2 \left[ \left(\frac{t_{TOF}}{L}\right)^2 - \frac{1}{c^2} \right]$$

# Ľahké jadrá a antijadrá v zrážkach Pb-Pb pri $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV v experimente ALICE

$$\frac{dE}{dx}$$

z TPC



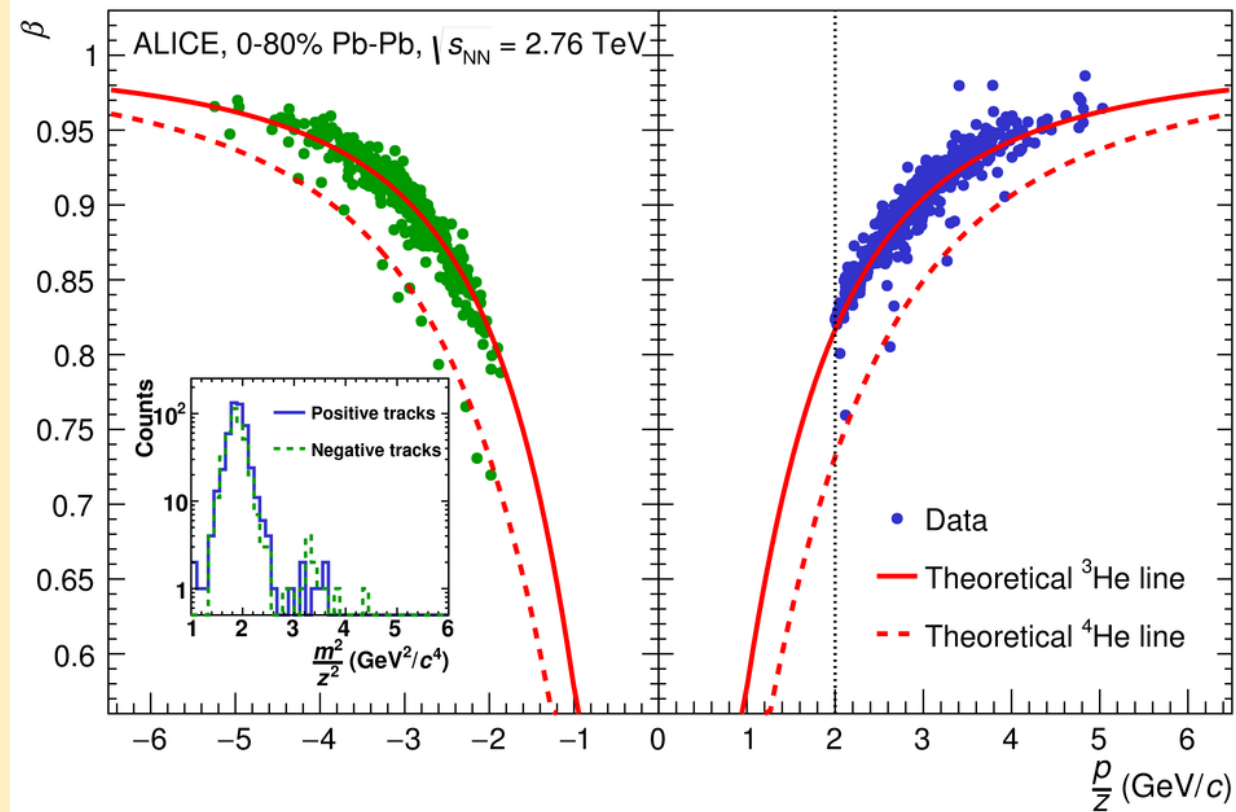
# ALICE: Produkcia ${}^4\text{He}$ a ${}^4\bar{\text{He}}$ v Pb-Pb pri $\sqrt{s_{\text{NN}}}=2.76$ TeV

Najt'azšie objavené antijadro bolo na RHIC-u experimentom STAR (STAR, Nature **473**, 253 (2011)).

Okrem experimentu ALICE zatiaľ nikto ďalší podobné meranie nezopakoval.

S. Acharya et al.,  
Nucl. Phys. **A971**, 1, (2018)

${}^4\bar{\text{He}}$  objavené



# Antiatómy



# Problémy, problémy, problémy...

- $\bar{p}$  sa produkujú v zrážkach ako pomerne vysokoenergetické častice  
 $E \sim 1000 \text{ MeV}$
- **väzbová energia nukleónu energia v jadrách je pre najľahšie z nich  
 $\sim 1\text{-}3 \text{ MeV}$** 
  - trocha pošťuchovania z okolia znesú bez toho aby sa rozpadli
- **v H stačí energia  $13.6 \text{ eV} = 0.000\ 0136 \text{ MeV}$  na to, aby elektrón vyletel z atómu**
  - $\bar{p}$  a  $e^+$  musia byť súčasťou prostredia s minimálnym vzájomným pohybom (teplotou)

# Problémy, problémy, problémy...

- **Antijadro je nabité**
  - zanechá stopu a jeho vlastnosti sa dajú merať nedeštruktívne
  - dá sa nasmerovať kam treba (napr. vhodnými magnetmi)
- **Antiatóm je neutrálny**
  - je problém ho udržať na mieste
  - dá sa detekovať vtedy, keď je zničený v procese annihilácie

# Uskladnenie $\bar{H}$

- Neutrálny antihydrogén môže byť chytený v nehomogénnom magnetickom poli za magnetický moment
- Rekordné časy uskladnenia antivodíka boli  $\sim 1000$  sec. (2011, CERN)
- Možnosti výroby a manipulácie s antivodíkom nie sú na tej úrovni, aby sa na ňom dali robiť presné merania
  - ale novinárom sa také veci páčia
    - *asi preto lebo čítajú D. Browna ...*

# Interakcia antihmoty s hmotou



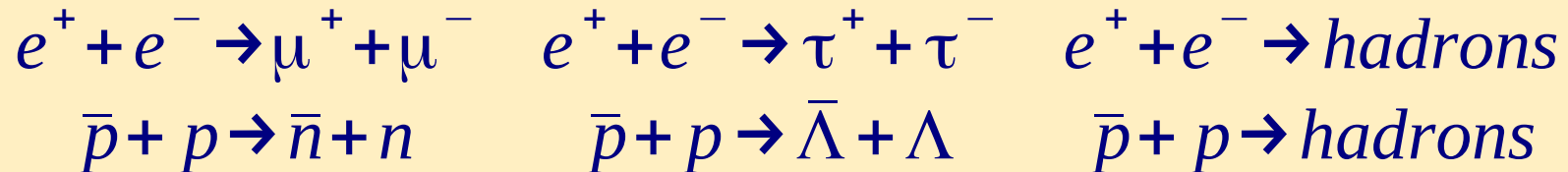


# Antihmota + Hmota = ?

- **Exotermická reakcia**

- aby prebehla nepotrebuje žiadne energetické “nakopnutie”,
  - netreba prekonávať žiadne bariéry
- uvoľní sa energia  $E \geq 2mc^2$

- pri vyšších energiách zrážky budú prebiehať rôzne reakcie



- v koncovom stave

$$\begin{array}{l} \sum Q = 0 \\ \sum B = 0 \\ \sum_{i=e,\mu,\tau} L_i = 0 \end{array}$$

# Uvoľnená energia v jednom procese

- Chemické horenie            0.000 003 MeV
- Jadrové štiepenie        200 MeV
  
- Jadrová fúzia                18 MeV    vyššia hustota energie
  
- $\bar{p} p$  annihilácia v kl'ude             $1876 \text{ MeV} = 2 m_p c^2$



# Populárna predstava...



=



$e^+ + e^-$

A objaví sa mohutný záblesk svetla....

$\bar{p} + p$

# Figy borovú....

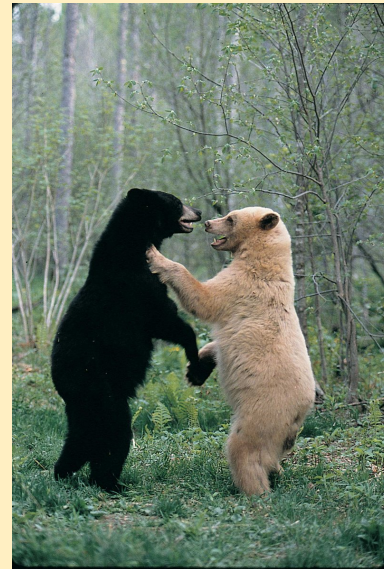


$$e^+ + e^-$$

Dominantná interakcia

**elektromagnetická**

≠



$$\bar{p} + p$$

**silná**

$$e^+ + e^-$$

## Annihilácia v klúde

$$\bar{p} + p$$

Dominantný kanál

Silne potlačený proces

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma \gamma$$
$$E_\gamma = 0.511 \text{ MeV}$$

$$\bar{p} + p \rightarrow \gamma \gamma$$

Viac fotónov by tiež šlo, ale pravdepodobnosť reakcie s počtom fotónov silne klesá

Fotóny sa môžu produkovať pri rozpadoch neutrálnych mezónov (nie všetkých)

$$\bar{p} + p \rightarrow \textit{neutral mesons}$$

Na produkciu iných častíc nemáme dost' energie

Nastane asi v 3.5% prípadov annihilácie, ostatné sú

$$\bar{p} + p \rightarrow \textit{charged mesons}$$

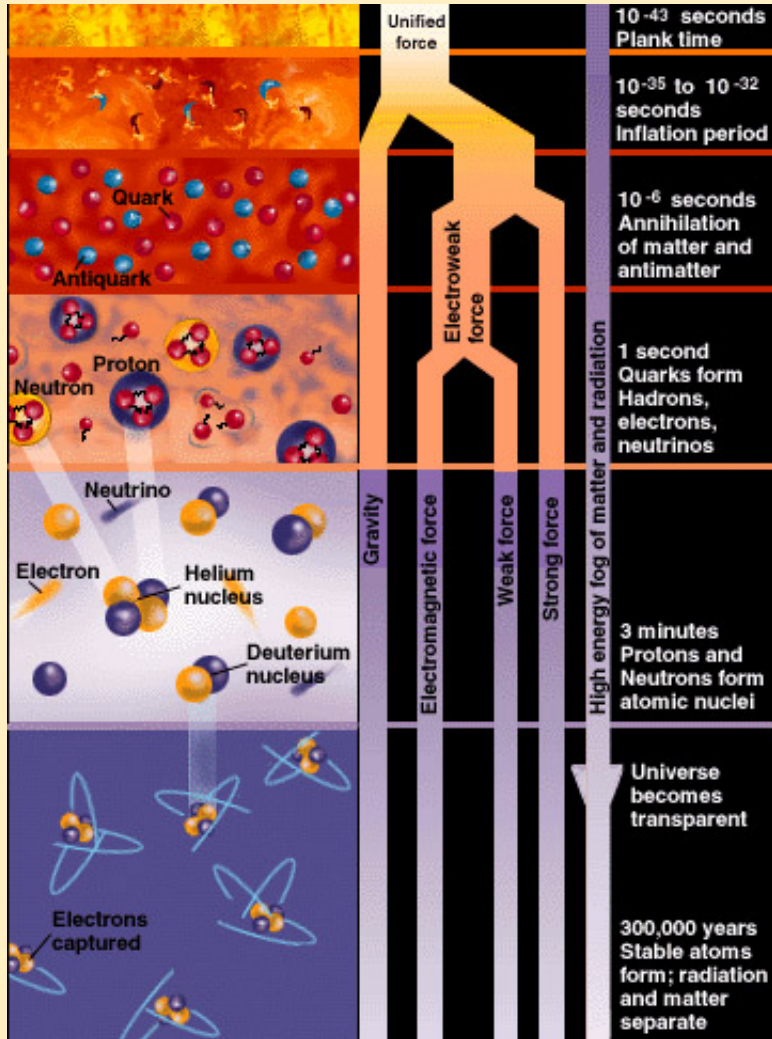
Ktoré sa postupne rozpadnú na

$$e, \nu$$

**Kam sa podela antihmota?**



# Big Bang a krátko po ňom



Hmota: **50%** Antihmota: **50%**

symetrický vesmír

**10<sup>-6</sup> sec:** Annihilácia hmoty a antihmoty

Asymetria Hmota:Antihmota  
**1.000,000,001 : 1.000,000,000**

asymetrický vesmír

Hmota: **100%** Antihmota: 0

+

vesmír plný žiarenia

# CERN, simultánne meranie $\bar{p}, H^-$ 1999

- antiprotón a vodíkový anión ( $eep$ ) zachytené súčasne v Penningovej pastičke
  - niekedy sa darilo ich udržať až 5 dní

$$\frac{\frac{q}{m}(\bar{p})}{\frac{q}{m}(p)} = -0.999\,999\,999\,91(9)$$

**Presnosť  $9 \times 10^{-11}$**

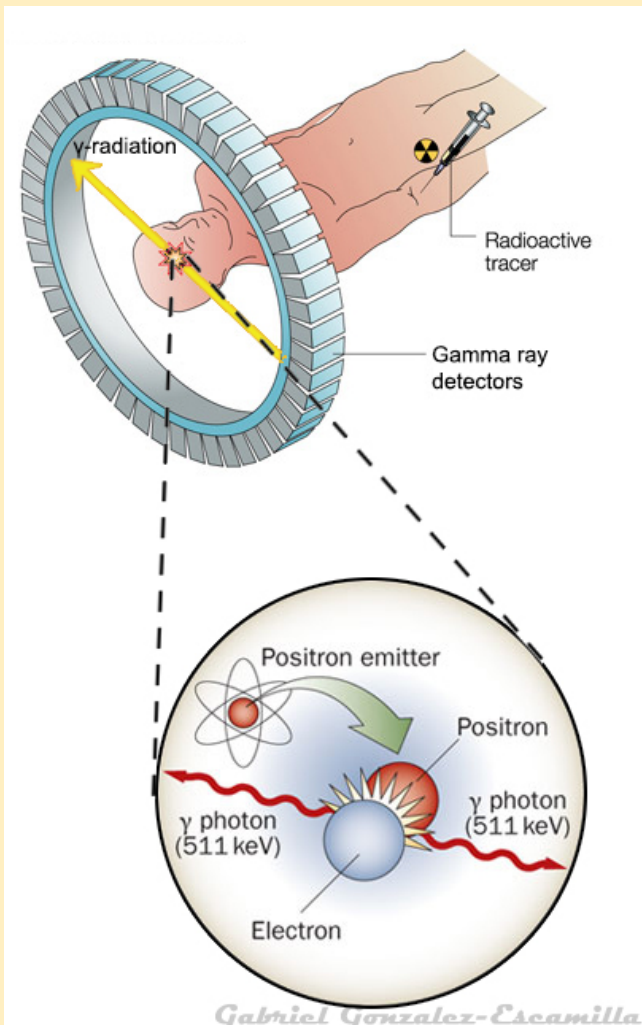
**Doteraz žiadne experimentálne meranie neprinieslo evidenciu o možnej asymetrii medzi hmotou a antihmotou.**



**Praktické  
využitie  
antihmoty**

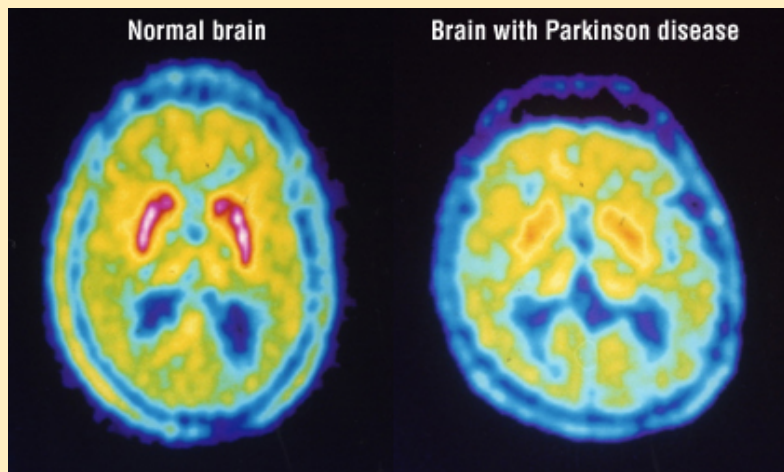
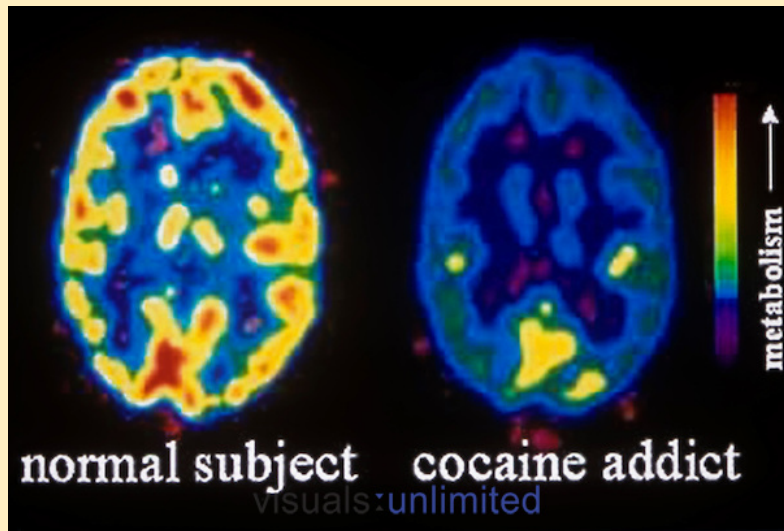


# PET - Positron Emission Tomography

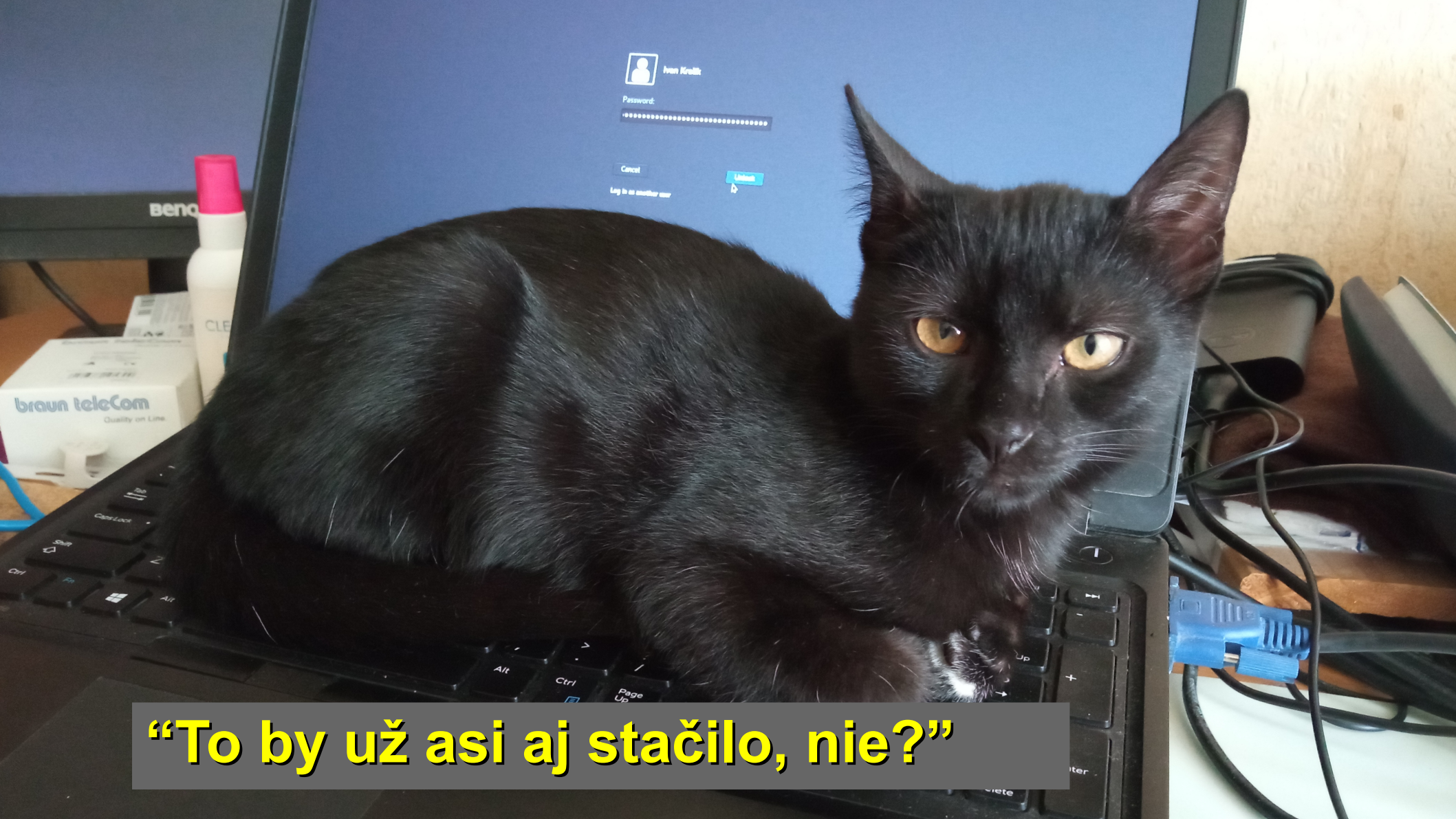


- Do krvi sa pacientovi vstrekuje malé množstvo látky obsahujúcej izotop emitujúci pozitrony ( $\beta^+$  rozpad)
- Emitovaný pozitron annihiluje s elektrónom tkaniva
- Spracovaním uhlových charakteristík súčasne emitovaných fotónov sa dá získať obraz činnosti ohránov pacienta

# PET - Positron Emission Tomography



- Aktívna látka je v krvi - vzniknutý obraz hovorí niečo o metabolizme a fungovaní orgánov
- lekár tak môže sledovať patologické zmeny napr. v mozgu človeka a určiť diagnózu



**“To by už asi aj stačilo, nie?”**