Ani vo svete elementárnych častíc nie je jedno, akým smerom plynie čas. Experiment CPLEAR

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Dňa 6. novembra 1998 bola v CERN, Ženeva, Švajčiarsko, zorganizovaná špeciálna tlačová konferencia, na ktorej predstavitelia experimentu CPLEAR oznámili tlači, že sa im ako prvým podarilo *priamo* experimentálne dokázat', že aj vo svete elementárnych častíc záleží na tom, ktorým smerom plynie čas.

Vieme vôbec, čo je to čas?

Hned' úvodom čitatel'a sklamem. My ešte stále nevieme presne, čo si pod pojmom 'čas' máme predstavit', a tak dnes je isté, že pojem času zostáva nad'alej jedným z najmysterióznejších pojmov vo fyzike. Ak pod fyzikálnou veličinou rozumieme veličinu, ktorú vieme reprodukovane zmerat', tak čas tejto definícii vyhovovat' nebude. A to hned' z dvoch dôvodov: už Herakleitos (600-550 r. pred n.l.) tvrdil, 'že nemožno dvakrát vkročit' do tej istej rieky', čo odzrkadl'uje fakt, že čas nevieme reprodukovane zmerat'. Navyše ho vieme merat' len nepriamo, sprostredkovane...
Historicky sa pohl'ad na čas zaujímavo menil. Napr. Aristoteles (384-322 r. pred. n.l.) čas prirad'oval k pohybu a k 'počtu' (napr. k číslam), t.j. podl'a neho čas sa definoval ako korelácia medzi evolúciou l'ubovol'ného materiálneho systému voči nejakému štandartu, napr. voči hodinám. Čas v takomto ponímani by zodpovedal počtu hodín. Svätý Augustín čas už priradil k vzniku Sveta, čo je kupodivu pomerne blízko našemu chápaniu času. Newton postuloval priestor a čas ako neviditel'né, pevné a absolútne pojmy. Leibniz s ním nesúperil len o prvenstvo v objave infinitezimálneho počtu, ale mal aj úplne odlišný pohl'ad na priestor a čas - podl'a neho neexistuje absolútny priestor, existujú len relatívne konfigurácie simultánne existujúcich telies. Čas je podl'a neho len postupnost' daných konfigurácií a nezávisí na telesách a ich pohybe. Teda z Leibnizovho pohl'adu, 'svet v ktorom sa nič nedeje, nemá čas'. Ďalej postúpil Einstein, ktorý priestor a čas nechápe ako nezávislé fyzikálne veličiny - zavádza pojem spojitého priestoro-času. Podl'a neho sa informácia šíri konečnou rýchlost'ou (rýchlost'ou svetla vo vákuu) a príčinnost' (časová postupnost' na seba nadväzujúcich udalostí) je určená v prípade špeciálnej teórie relativity *globálnou* a v prípade všeobecnej teórie relativity *lokálnou* metrikou priestoro-času (príčinnost' v teórii relativity je vyjadrená pomocou hodnoty štvorca vzdialenosti v metrike priestoro-času, ktorá je definovaná ako rozdiel štvorca priestorovej súradnice a štvorca času).
Zastavme sa pri kvantovej mechanike. Aj v nej čas hrá dôležitú úlohu, avšak tá je podstatne iná ako napr. vo všeobecnej teórii relativity. Pokial' čas vo všeobecnej teórii relativity hrá úlohu aktívneho 'hráča' (priamo vstupuje do dynamiky procesu), v kvantovej mechanike (a de facto aj v celej klasickej, newtonovej fyzike) čas nie je priamym 'účastníkom' akcie, no tento nedostatok si 'kompenzuje' tým, že 'hrá' o to dôležitejšiu úlohu v samotnej interpretácii teórie. Jedným z podstatných rysov, ktorý je vlastne spoločný pre všetky teórie (až na moderné teórie popisujúce gravitáciu) je i fakt, že sa mlčky predpokladá, že fyzikálny svet môžeme popísat' časovo nezávislými fyzikálnymi štruktúrami. Inými slovami: nepredpokladáme, že by sa fundamentálne veličiny, ktorými popisu-

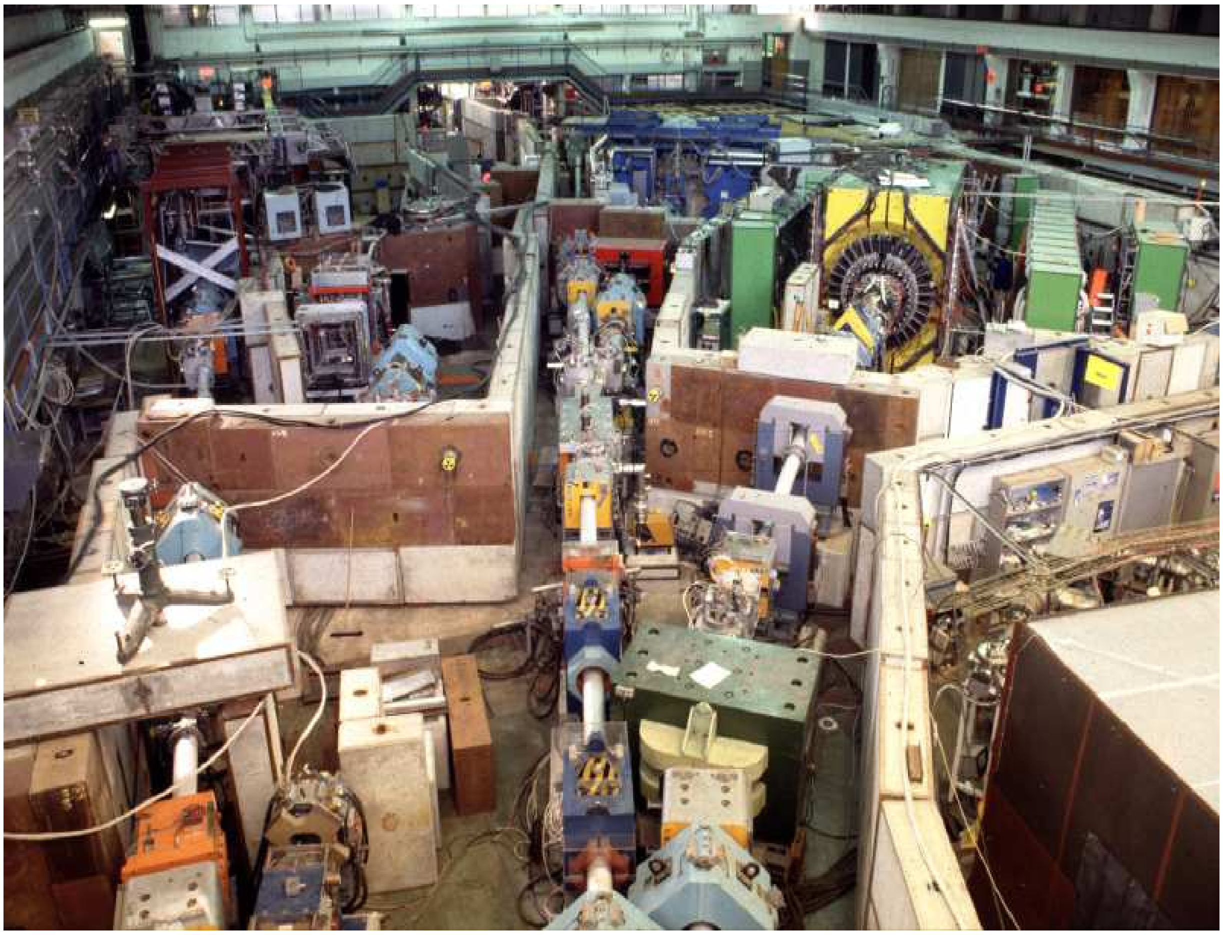
jeme svet, menili z času na čas, napr. v newtonovej mechanike vzťah medzi energiou a hybnosťou je v ľubovoľnom čase stále rovnaký. To isté platí aj pre kvantovú mechaniku.

Časová šípka

Z každodenného života vieme, že čas sa nedá 'obrátit", vždy plynie len jedným smerom. Napriek tomuto faktu prakticky všetky rovnice, popisujúce základné zákonitostí prírody sú časovo reverzibilné, teda z ich pohľadu niet rozdielu medzi minulosťou a budúcnosťou. Výnimkou sú len špeciálne konštrukcie z oblasti teórie gravitácie, ktoré ale ani zďaleka nie sú dnes tak ďaleko, že by vedeli uspokojivo vysvetliť pojem času, alebo fakt, že plynie len jedným smerom.
Existuje mnoho hypotéz snažiacich sa vyrovnať s týmto faktom, v literatúre sa najčastejšie uvádza vysvetlenie založené na druhej vete termodynamickej. Podľa nej čas plynie v súlade s rastom entrópie (entrópia je miera usporiadanosti systému). Ide o proces, ktorý je nezvratný, teda neumožňujúci otočenie smeru ubiehania času. Problém tejto interpretácie predstavuje však systém, ktorý je v štatistickej rovnováhe (v ňom totiž entrópia už nerastie) ...
Ďalšie možné vysvetlenie ide až k začiatku 'Big Bangu' (Veľkého tresku), teda k začiatku vzniku nášho Vesmíru. Dovolím si použiť analógiu z vyššie spomenutej tlačovej konferencie: predstavme si, že máme vázu na kvety. Rozbitím vázy vznikne množstvo úlomkov, ktoré môžeme len jediným spôsobom zlepiť tak, aby sme zase dostali vázu v pôvodnom tvare (takémuto stavu budeme hovoriť, že je 'organizovaný'). Každý iný spôsob jej zlepenia nevedie k pôvodnému tvaru vázy - stavy, ktoré nevedú k pôvodnému tvaru vázy budeme označovať ako 'neorganizované'. Obráťme teraz pozornosť k našej každodennej skúsenosti s plynutím času. Predpokladajme, že pri samom začiatku Veľkého tresku bol svet v 'organizovanom' stave. S jeho expanziou sa však tento stav porušil, vzniklo množstvo 'neorganizovaných' stavov, pričom náš svet si 'vybral' jeden z nich. Veríme, že práve tu je pôvod existencie asymetrie v plynutí toku času. Je to však len jedno z ďalších možných vysvetlení, proste dnes fakt, prečo je smer plynutia času jednoznačne daný, nevieme.

Experiment CPLEAR

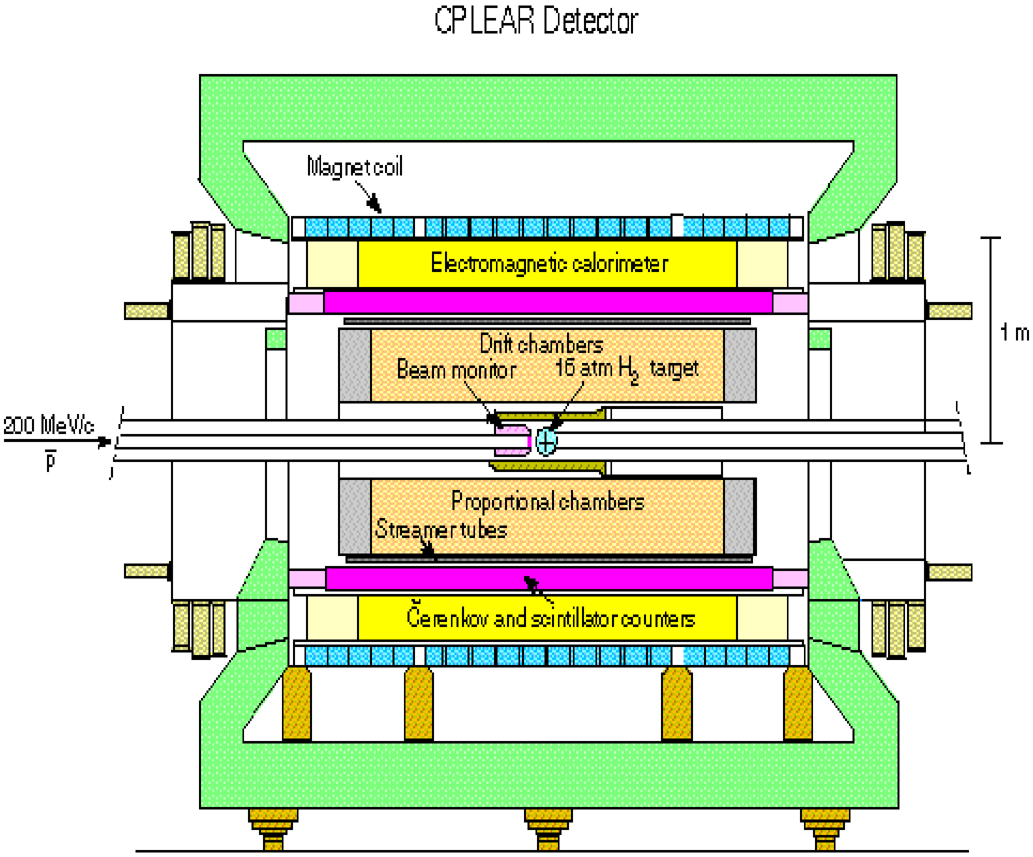
Jednou všeobecne predpokladanou vlastnosťou vo svete elementárnych je jeho invariancia (nezávislosť) na nasledujúcich troch operáciach, uskutočnených v ľubovoľnom poradí: predpokladajme, že pozorujeme správanie sa skupiny elementárnych častíc. Ak zameníme hodnoty znamienka ich elektrických nábojov na opačné (hovoríme o tzv. C operácii), ak ich otočíme voči súradnicovej sústave, z ktorej ich pozorujeme o 180 stupňov (hovoríme o tzv. P operácii) a nakoniec, ak zmeníme znamienko premennej popisujúcej čas, v ktorom ich pozorujeme (hovoríme o tzv. T operácii), potom *v princípe* nespoznáme rozdiel medzi systémom pred a po uskutočnení CPT operácie. Platnosť tejto teorémy podporuje aj jej 'previazanosť" s nateraz pozorovaným štatistickým správaním sa elementárnych častíc (tie podľa hodnoty spinu sa podriaďujú buď Fermi-Diracovej alebo Bose-Einsteinovej štatistike).
Od 1964 roku vieme, že dochádza k narušeniu tzv. CP symetrie. V praxi to napr. znamená, že jedna zo základných síl, ktoré v prírode pozorujeme, tzv. slabá sila, je citlivá na smer, dávajúca rôzne výsledky pri otočení sústavy o 180 stupňov. Na druhej strane ale veríme, že CPT teoréma vo svete elementárnych častíc platí bez výhrad. Znamená to, že už od 1964 roku vieme, že musí dochádzať aj k narušeniu T symetrie, a to v tej miere, aby kompenzovala CP narušenie. Teda o narušení T symetrie vieme nepriamo už pomerne dlho, avšak až rok 1998 bol v znamení priameho dôkazu o jej narušení. Ako sme už spomenuli, stalo sa tak skupinou, pracujúcou s detektorom CPLEAR. Priamy dôkaz o porušení T symetrie má samozrejme veľký význam aj z pohľadu na otázku o potenciálnom nezachovaní CPT teorémy. Ak by sa nepodarilo dokázať priame narušenie T symetrie, výsledok by spochybnil zachovanie CPT teorémy.
Na obr. 1 je experimentálna hala, kde je umiestnený detektor CPLEAR, pozdĺžny rez, ktorého je



Obr. 1: *Experimentálna hala v* CERN, *kde je umiestnený detektor* CPLEAR.

zobrazený na obr. 2. Experiment CPLEAR sa realizuje v CERN, Švajčiarsko a je dielom asi 100 odborníkov zo 17 ústavov z deviatych krajín. Jeho hlavným cieľom je analýza rozdielov medzi hmotou a antihmotou. [1] Čitateľa iste neprekvapí tvrdenie, že hmoty okolo nás je podstatne viacej ako antihmoty. Nami pozorovaný, teda viditeľný, nepomer medzi množstvom hmoty a antihmoty je cca 1 ku 10^9. Neudivuje preto, že na pochopenie tohto fenoménu sa vynakladá značné úsilie, pretože sa jedná o jednu zo základných otázok, ktorú pred nás Príroda postavila.
Experiment CPLEAR ale umožňuje aj analyzovať zachovanie T symetrie. Na obr. 3 je znázornená metodika CPLEAR experimentu na meranie narušenia T symetrie, ktorá je založená na fakte, že v prípade platnosti T symetrie musí byť pravdepodobnosť prechodu (v čase napr. t=0) neutrálneho K^0 mezónu do neutrálneho $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezónu (označme ju $P(K^0 \to \bar{K}^0)_{t=0}$) rovnaká, ako je pravdepodobnosť prechodu $\bar{\mathrm{K}}^0 \to \mathrm{K}^0$, teda, musí platiť rovnosť: $P(K^0 \to \bar{K}^0)_{t=0} = P(\bar{K}^0 \to K^0)_{t=0}$. Ľubovoľný rozdiel medzi tymíto pravdepodobnosťami bude znamenať narušenie T symetrie.
Vráťme sa k CPLEAR experimentu. Zväzok o intenzite 1 000 000 antiprotónov za jednu sekundu o hybnosti 200 MeV/c je vyvedený do vodného terča, následkom čoho reakciami $\bar{p} + p \to K^0 + K^- + \pi^+$ a $\bar{p} + p \to \bar{K}^0 + K^+ + \pi^-$ vznikajú neutrálne K^0 a $\bar{K}^0$ mezóny, ktoré sú registrované pomocou Čerenkovových a scintilačných detektorov. Prítomnosť π^+, resp. π^- mezónu znamená aj prítomnosť K^0, resp. $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezónu. V praxi to znamená, že registrácia $\pi^\pm$ mezónov slúži ako 'značkovač' neutrálnych K^0 a $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezónov. Čo znamená T otočenie, resp. 'T zrkadlo', demonštruje

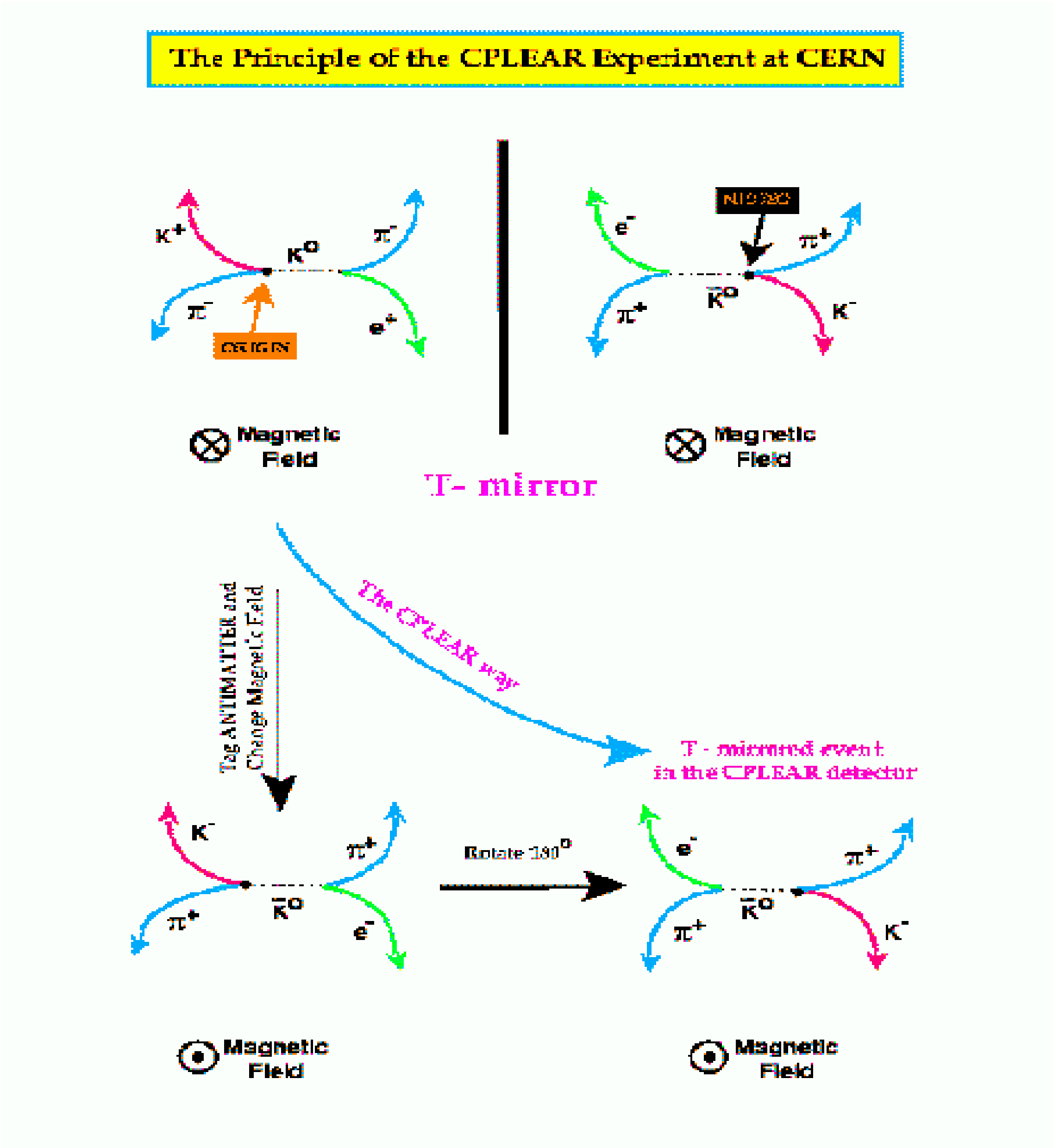
[1] Pod hmotou rozumieme matériu, ktorá sa skladá predovšetkým z protónov, neutrónov a elektrónov. Antihmota zas pozostáva predovšetkým z antiprotónov, antineutrónov a pozitrónov. Pri priamom kontakte hmoty a antihmoty dochádza k tzv. celkovej anihilácii, keď všetky častice tvoriace hmotu a antihmotu prejdú do fotónov.



Obr. 2: *Detektor* CPLEAR.

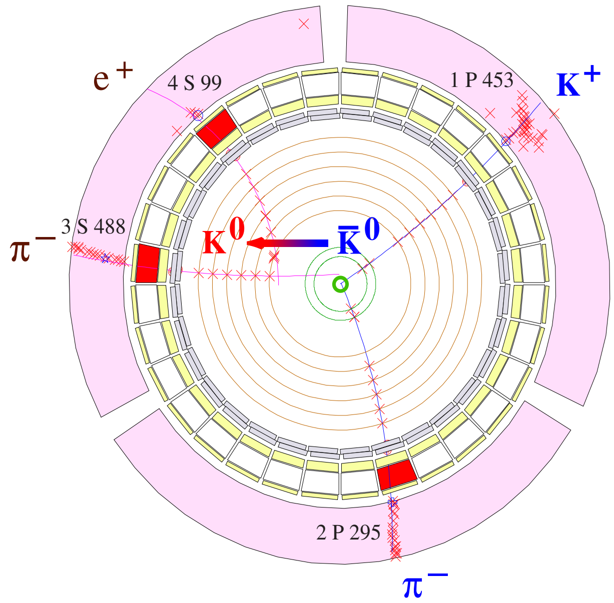
horná časť obr. 3. Na jeho ľavej časti, v magnetickom poli, smer ktorého ide od čitateľa, je znázornený produkt reakcie $\bar{p} + p \rightarrow \bar{K}^0 + K^+ + \pi^-$ s následným rozpadom K^0 mezónu na π^- a pozitrón. Obraz v 'T zrkadle' tejto reakcie je znázornený na pravej hornej časti obr. 3. Vidíme, že v 'T zrkadle' K^0 prechádza do $\bar{\mathrm{K}}^0$, $\pi^- \rightarrow \pi^+$, pozitrón do elektrónu a K$^+ \rightarrow$ K$^-$, pričom navyše dochádza k zmene smeru letu π^+, e$^-$ a K$^-$. Spôsob, ako 'zopakovat" v praxi akciu 'T zrkadla' demonštruje dolná časť obr. 3. Prepólovaním magnetu horná ľavá strana prechádza do dolnej ľavej strany s tým rozdielom, že charakteristiky K^0 mezónu sa samozrejme nemenia. V ďalšom kroku budeme vyberať len reakcie s produkciou $\bar{\mathrm{K}}^0$ mezónu (a to na základe, ako sme už spomenuli, prítomnosti π^- mezónu). Otočením tejto reakcie dôjdeme k reakcii, ktorá zodpovedá konečnému produktu akcie 'T zrkadla'. Na obr. 4 je znázornený prechod od $\bar{\mathrm{K}}^0$ do K^0 tak, ako to detektor CPLEAR skutočne 'vidí' v radiálnom reze. Hodnota, ktorá reálne podchycuje rozdiel pred a po aplikácii 'T zrkadla' je jednoduchým pomerom $A_T^{exp} = \frac{R(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - R(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{R(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + R(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}$, kde $R(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)$, resp. $R(\bar{K}^0 \rightarrow K^0)$ predstavuje frekvenciu pozorovaných prechodov $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$, resp. $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$. Je zrejmé, že ak nedochádza k narušeniu T symetrie, hodnota $A_T^{exp} = 0$. Na obr. 5 je znázornené rozdelenie A_T^{exp} v závislosti na dobe rozpadu neutrálnych K mezónov. Stredná hodnota $A_T^{exp} = (6,6 \pm 1,3(\text{štat.}) \pm 1,0(sys.)).10^{-3}$ hovorí, že k narušeniu T symetrie skutočne dochádza.

Čitateľ mi iste odpustí, keď sa nezastavím nad teoretickým zdôvodnením existencie narušenia CP a T symetrie v prípade rozpadu neutrálnych K mezónov. Presahovalo by to rámec článku. V každom prípade dnes vieme veľa o možných príčinách týchto efektov, zďaleka však nevieme všetko. Aj preto dnes sa neustále vynakladá množstvo finančných prostriedkov na získanie čo na-

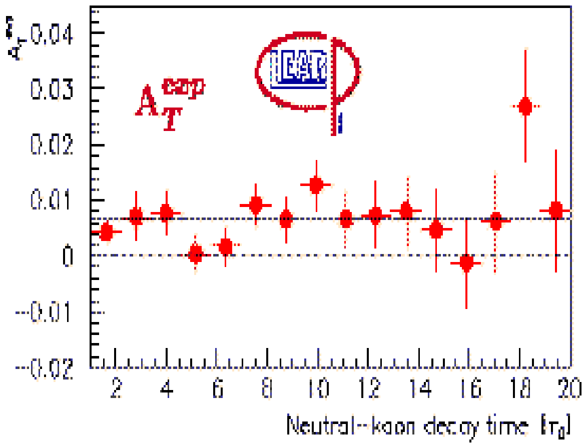


Obr. 3: *Metodika na meranie narušenia T symetrie v experimente* CPLEAR.

jpresnejších údajov, napr. dnes začína svoje prvé výsledky poskytovať experiment KTeV vo FERMILAB, USA. Nuž počkajme...



Obr. 4: *'T zrkadlo' pre rozpad* K^0 *a* $\bar{K}^0$ *mezónu.*



Obr. 5: *'Časová' asymetria meraná experimentom* CPLEAR.