

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Josef Veselka

K otázce zachování parity

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 5, 542--559

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139970>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

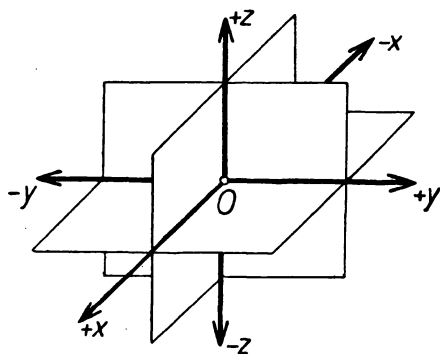
Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



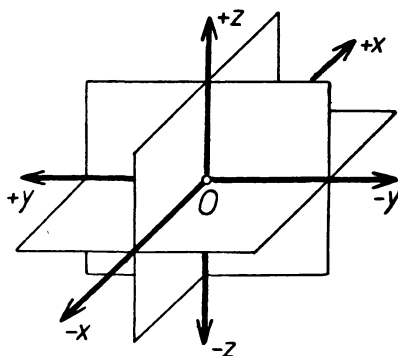
This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

K OTÁZCE ZACHOVÁNÍ PARITY

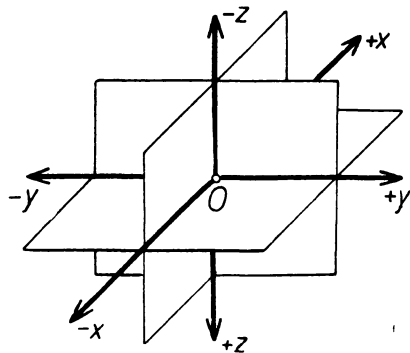
Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1957 dostali dva mladí čínští fyzikové, působící v USA, T. D. Lee a C. N. Yang¹⁾, a to za objev, že neplatí tak zvaný postulát parity. Tohoto vysokého vědeckého ocenění se jim dostalo za necelý rok po tom, co svůj objev učinili. To je událost v historii udělování Nobelových cen jedinečná. Vždyť i takový genius vědy, jakým byl tvůrce teorie relativity,



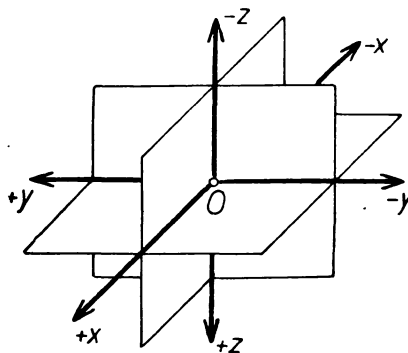
Obr. 1. Soustava $(+x, +y, +z)$.



Obr. 2. Soustava $(-x, -y, +z)$.



Obr. 3. Soustava $(-x, +y, -z)$.



Obr. 4. Soustava $(+x, -y, -z)$.

Albert Einstein, byl Nobelovou cenou vyznamenán až v roce 1921, 16 let po uveřejnění svých fundamentálních prací (z teorie relativity a teorie fotoefektu). Nebo Max Planck, zakladatel kvantové fyziky, byl Nobelovou cenou vyznamenán až v roce 1918, 18 let po tom, co podal v Berlínské fyzikální společnosti svůj geniální výklad zákona záření²⁾.

Že se u obou jmenovaných čínských vědců učinila výjimka, vyplývá především z toho, že jde o objev fundamentální povahy, který znamená radikální změny v našich dosavadních představách o fyzikálním světě, a za druhé z toho,

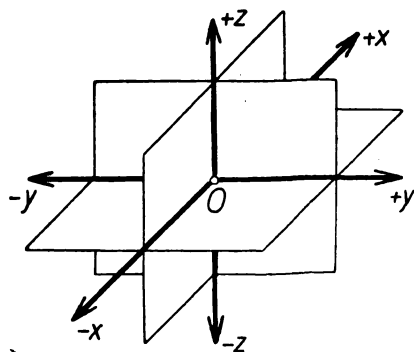
¹⁾ Krátké sdělení o tom viz v tomto časopise, roč. III/1958, č. 3.

²⁾ Viz na příklad článek Dr F. Herneck, *Max Planck*, v tomto časopise, roč. III (1958), č. 2.

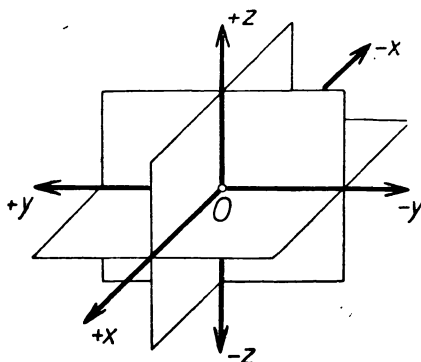
že myšlenka obou laureátů Nobelovy ceny za fyziku pro rok 1957, která byla experimentálně skvěle ověřena, dala vzniknout takovému množství teoretických prací základního významu na celém světě (také v ČSR), že během krátké doby necelého roku byl problém parity v podstatě vyjasněn.

Pokusíme se vyložit, oč jde.

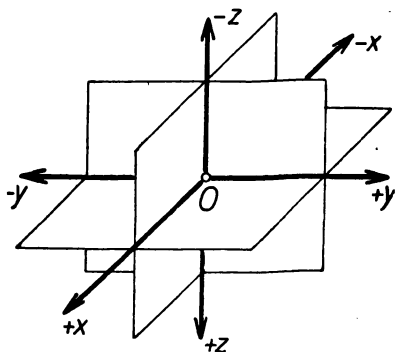
Především, co je to



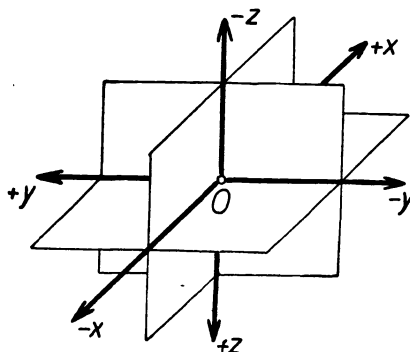
Obr. 5. Soustava $(-x, +y, +z)$.



Obr. 6. Soustava $(+x, -y, +z)$.



Obr. 7. Soustava $(+x, +y, -z)$.



Obr. 8. Soustava $(-x, -y, -z)$.

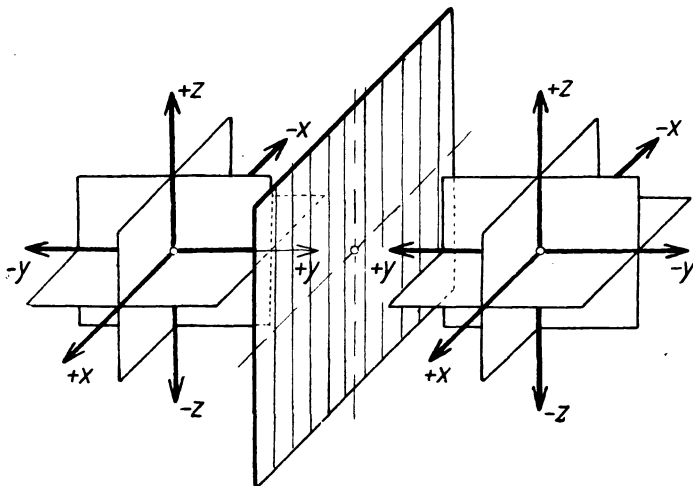
postulát parity?

Odevždy se zcela přirozeně na prostor — „prázdný prostor“, to jest prostor bez jakýchkoli těles, jež by vytvářela nějaká silová pole — nahlíželo jako na symetrický vzhledem k pojímům „vpravo“ a „vlevo“. Prostoru v abstraktním geometrickém pojetí se nikdy nepřisuzovaly nějaké vlastnosti, které by nějak privilegovaly jeden z pojmů „vpravo“ a „vlevo“ vůči druhému.

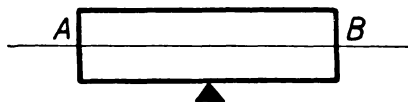
Z této představy plyne logicky, že formulace přírodních zákonů není závislá (nebo alespoň nemá být závislá) na tom, jak „orientovanou“ zvolíme souřadnicovou soustavu³⁾.

³⁾ Máme na mysli kartézskou souřadnicovou soustavu.

Mysleme si dānu takovou (kartézskou) souřadnicovou soustavu (obr. 1, nāhled zprava) s osami x, y, z (a počātkem O). Označme ji symbolicky $(+x, +y, +z)$. Zmēníme-li nyní orientaci os x a y , to jest zmēníme-li $+x$ v $-x$ a $+y$ v $-y$, dostaneme soustavu, kterou můžeme symbolicky označit $(-x, -y, +z)$ (obr. 2, nāhled zprava). Je zřejmé, že soustavu $(-x, -y, +z)$ dostaneme ze soustavu $(+x, +y, +z)$ otočením o 180° kolem osy z . Zmēníme-li v soustavě $(+x, +y, +z)$ orientaci os x a z , to jest zmēníme-li $+x$ v $-x$



Obr. 9. Soustava $(+x, +y, +z)$ a její zrcadlový obraz $(+x, -y, +z)$.



Obr. 10.

a $+z$ v $-z$, dostaneme soustavu $(-x, +y, -z)$ (obr. 3, nāhled zprava). Zřejmē můžeme zase dostat soustavu $(-x, +y, -z)$ otočením soustavu $(+x, +y, +z)$ o 180° kolem osy y . Konečně zmēníme-li orientaci os y a z , to jest zmēníme-li $+y$ v $-y$ a $+z$ v $-z$, dostaneme soustavu $(+x, -y, -z)$ (obr. 4, nāhled zprava), kterou zase můžeme dostat ze soustavu $(+x, +y, +z)$ otočením o 180° kolem osy x . Tím jsou všechny možnosti vyčerpány, vyjdeme-li ze soustavu $(+x, +y, +z)$ jako ze základní (vzhledem k otočení o 180° kolem některé ze souřadnicových os). Snadno se totiž přesvědčíme, že ať vyjdeme z kterékoli z uvedených čtyř souřadnicových soustav a otočíme o 180° kolem kterékoli ze souřadnicových os, dostaneme zase soustavu z této čtveřice, a obrácenē, z kterékoli z těchto čtyř soustav se můžeme dostat do kterékoli jiné otočením o 180° kolem některé ze souřadnicových os.

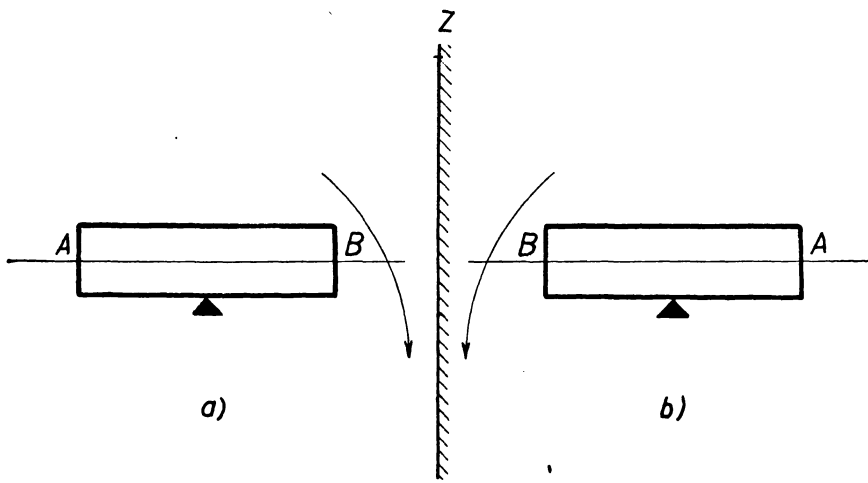
Úplně stejnē můžeme ukázat, že vezmeme-li soustavu $(-x, +y, +z)$ za vāchozí, dostaneme otāčením kolem os z resp. y resp. x soustavu $(+x, -y, +z)$ resp. $(+x, +y, -z)$ resp. $(-x, -y, -z)$, které spolu s vāchozí soustavou

$(-x, +y, +z)$ tvoří stejně uzavřenou čtveřici souřadnicových soustav s týmiž vlastnostmi, jako předcházející čtveřice⁴⁾ (obr. 5–8).

Naproti tomu žádným otočením nemůžeme přejít od některé ze soustav $(+x, +y, +z)$, $(-x, -y, +z)$, $(-x, +y, -z)$, $(+x, -y, -z)$ k některé ze soustav $(-x, +y, +z)$, $(+x, -y, +z)$, $(+x, +y, -z)$, $(-x, -y, -z)$.

Soustavy z prvé z uvedených čtveřic nazveme „pravotočivé“ (pravidlo pravé ruky!), soustavy z druhé čtveřice pak „levotočivé“.

Mezi oběma skupinami uvedených soustav je nyní tento vztah: Dvě libovolné soustavy souřadnic, z nichž jedna je pravotočivá a druhá levotočivá, jsou souměrné podle některé ze souřadnicových rovin, nebo je lze vhodným otočením jedné z nich o 180° kolem některé souřadnicové osy do takové polohy uvést. Tak na příklad soustava $(+x, +y, +z)$ je symetrická k soustavě $(-x,$



Obr. 11. a) Tyč. b) Obraz tyče v zrcadle z.

$+y, +z)$ podle souřadnicové roviny, obsahující osy y a z , soustava $(-x, -y, +z)$ je souměrná k soustavě $(-x, -y, -z)$ podle roviny obsahující souřadnicové osy x a y , soustavy $(+x, +y, +z)$ a $(-x, -y, -z)$ lze do takové polohy vzhledem k rovině os x a y uvést otočením o 180° kolem osy z , nebo vzhledem k rovi-

⁴⁾ Matematicky lze popsat tyto vlastnosti uvažovaných souřadnicových soustav takto:

Určíme-li poloosy $\pm x$ resp. $\pm y$ resp. $\pm z$ jednotkovými vektory $\pm i$ resp. $\pm j$ resp. $\pm k$ o souřadnicích $\pm 1, 0, 0$ resp. $0, \pm 1, 0$ resp. $0, 0, \pm 1$, jsou determinanty, utvořené ze souřadnic těchto jednotkových vektorů, odpovídajících první čtveřici souřadnicových soustav, o nichž se mluví v textu, rovny

$$\begin{vmatrix} 1, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1, & 0, & 0 \\ 0, & -1, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 0 \\ 0, & 0, & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1, & 0, & 0 \\ 0, & -1, & 0 \\ 0, & 0, & -1 \end{vmatrix} = 1,$$

a determinanty odpovídající druhé čtveřici souřadnicových soustav rovny

$$\begin{vmatrix} -1, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1, & 0, & 0 \\ 0, & -1, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 0 \\ 0, & 0, & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1, & 0, & 0 \\ 0, & -1, & 0 \\ 0, & 0, & -1 \end{vmatrix} = -1.$$

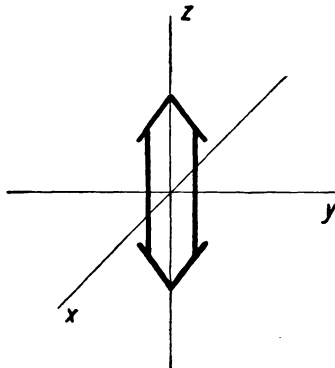
ně os x a z otočením o 180° kolem osy y atd. Čtenář se o tom může přesvědčit vyzkoušením všech možných dvojic, sestávajících z pravotočivé a levotočivé soustavy.

Z toho vyplývají tyto závěry:

1. Všechny pravotočivé souřadnicové soustavy jsou vzájemně ekvivalentní; všechny levotočivé souřadnicové soustavy jsou vzájemně ekvivalentní;

2. dvě souřadnicové soustavy, z nichž jedna je pravotočivá a druhá levotočivá, jsou (ve výše popsaném smyslu) podstatně rozdílné;

3. při popisu dějů v prostoru pomocí souřadnic stačí zvolit jednu (kteroukoli) pravotočivou nebo jednu (kteroukoli) levotočivou souřadnicovou soustavu. Zvolíme-li přitom obě soustavy tak, aby jedna byla symetrická k druhé



Obr. 12.

vzhledem k některé souřadnicové rovině (na příklad soustavy $(+x, +y, +z)$ $(+x, -y, +z)$), budou tyto dvě souřadnicové soustavy representovat symetrii prostoru vzhledem k pojmu „vpravo“ a „vlevo“. Je-li prostor takto symetrický, znamená to, že oba typy souřadnicových soustav, pravotočivé a levotočivé, jsou pro popis přírodních zákonů zcela ekvivalentní, to jest jedna nemá proti druhé žádných privilegií; formulace přírodních zákonů nesmí tedy být závislá na „točivosti“ zvolené souřadnicové soustavy.

To lze říci ještě jinak.

Vezměme pravotočivou soustavu $(+x, +y, +z)$ a zaměňme orientaci všech tří souřadnicových os. Dostaneme soustavu $(-x, -y, -z)$, která je ekvivalentní se soustavou $(+x, -y, +z)$. Soustavy $(+x, +y, +z)$ a $(+x, -y, +z)$

jsou různě orientované a lze je uvést do polohy souměrné podle roviny kolmé k ose y (obr. 9, šrafovaná rovina je rovinou souměrnosti). Transformaci, která mění zároveň orientaci všech tří souřadnicových os, nazveme „inverzí“. Je patrné, že každou levotočivou soustavu lze získat inverzí z některé soustavy pravotočivé a obráceně. Závěr o nezávislosti formulace přírodních zákonů na volbě „točivosti“ souřadnicové soustavy můžeme nyní formulovat takto:

Jsou-li pravotočivé a levotočivé souřadnicové soustavy stejně přípustné (je-li prostor symetrický vzhledem k pojmu „vpravo“ a „vlevo“), musí být přírodní zákony invariantní vůči inverzi, nebo — jak lze také říci — vůči „zrcadlení“.

To znamená, že každý děj, ke kterému dochází v přírodě, může probíhat také tak, jak by byl vidět v zrcadle. Zrcadlové zobrazení libovolného objektu je také možný přírodní objekt. Pohyb libovolného objektu, pozorovaný v zrcadle, je pohyb, který také podléhá přírodním zákonům. Každý pokus, provedený v laboratoři, může být proveden také tak, jak by se jevil v zrcadle, a každý efekt, který z takového pokusu vzejde, musí být zrcadlovým zobrazením skutečného efektu. To je zhruba obsah tak zvaného postulátu parity.

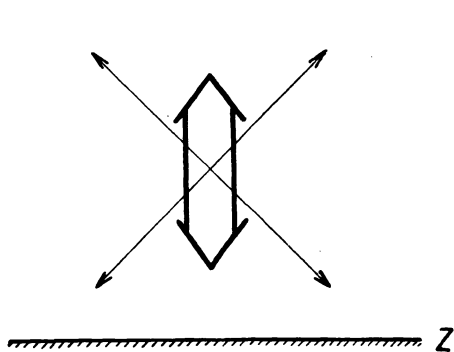
Uvedme příklad.

Vezměme přesně vypracovanou tyč ze stejnorodého materiálu a podepřeme ji přesně uprostřed. Tyč, jak známo, zůstane v rovnováze v horizontální poloze (obr. 10). Dokážeme tento fakt užitím postulátu parity.

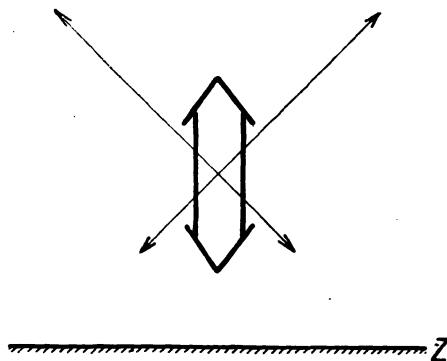
Jsou tři možnosti:

1. Tyč se překlopí kolem opory ve směru oběhu hodinových ručiček;
2. tyč se překlopí ve směru opačném;
3. tyč zůstává v horizontální poloze.

Vytvoříme nyní zrcadlový obraz tyče s oporou, jak je vyznačeno v obraze 11. Obraz je s reálnou tyčí identický (i s oporou); je-li na příklad případ 1) jedině možný, vznikne v zrcadle případ 2), od případu 1) odlišný. Analogická bude



Obr. 13.



Obr. 14.

situace, kdyby byl případ 2) jedině možný. Postulát parity však vyžaduje vzhledem k identitě tyče a jejího obrazu v zrcadle také identitu v překlápění, což nastává jen v případě 3) (to jest při rovnováze). Je tedy rovnovážná horizontální poloha tyče jedině možná.

Kdyby se tyč otáčela kolem podélné osy AB (k tření na opoře nepříhlížíme), bude otáčení zrcadlového obrazu totožné se skutečným otáčením. Takové otáčení tedy nezpůsobí překlopení tyče kolem opory.

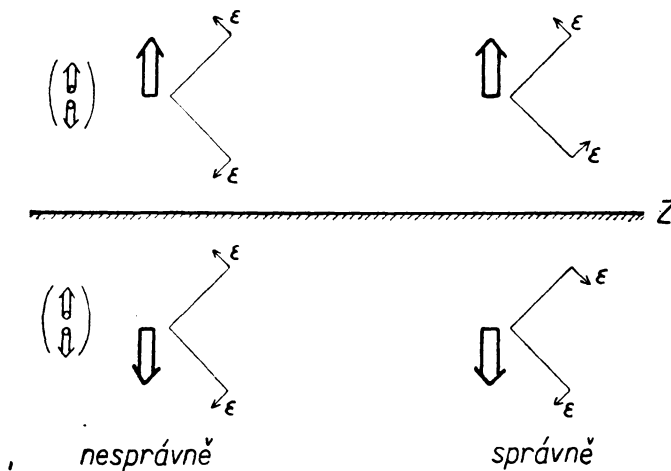
Jako další příklad uvedeme elektromagnetické záření, což je ovšem složitější. Postulát parity vyložíme na vyzařování elektrického dipólu.

Elektrický dipól si můžeme představit na příklad jako náboj, který kmitá podél osy z (obr. 12). Především vidíme, že záření dipólu musí být symetrické vzhledem k ose z , neboť elektrický dipól je válcově souměrný vzhledem k této ose.

Ukážeme nyní pomocí zrcadlení na rovině souřadnicových os x a y , že intenzita záření dipólu je stejná po obou stranách této roviny. V obraze 13 je uvedeno zrcadlení, při němž obraz dipólu je totožný s objektem až na fázový posuv o půl periody. Když se objekt pohybuje vzhůru, zrcadlový obraz se pohybuje dolů. Intenzita záření nezávisí však na čase, fázové posunutí nemá tedy na ni vlivu. Je tedy zrcadlový obraz dipólu, jak je naznačeno v obraze 13, přesnou kopií zrcadleného objektu, jak to také má být.

V obraze 14 je vyznačena nesprávná situace. U objektu je záření směrem „vzhůru“ silnější, naproti tomu v zrcadlovém obraze jde silnější záření směrem „dolů“. To ovšem nemůže být správné.

Všimneme si nyní elektromagnetického pole spojeného s tímto zářením. Vyšetřujeme zde polohu pohybující se částice v daném okamžiku a odpoví-



Obr. 15.

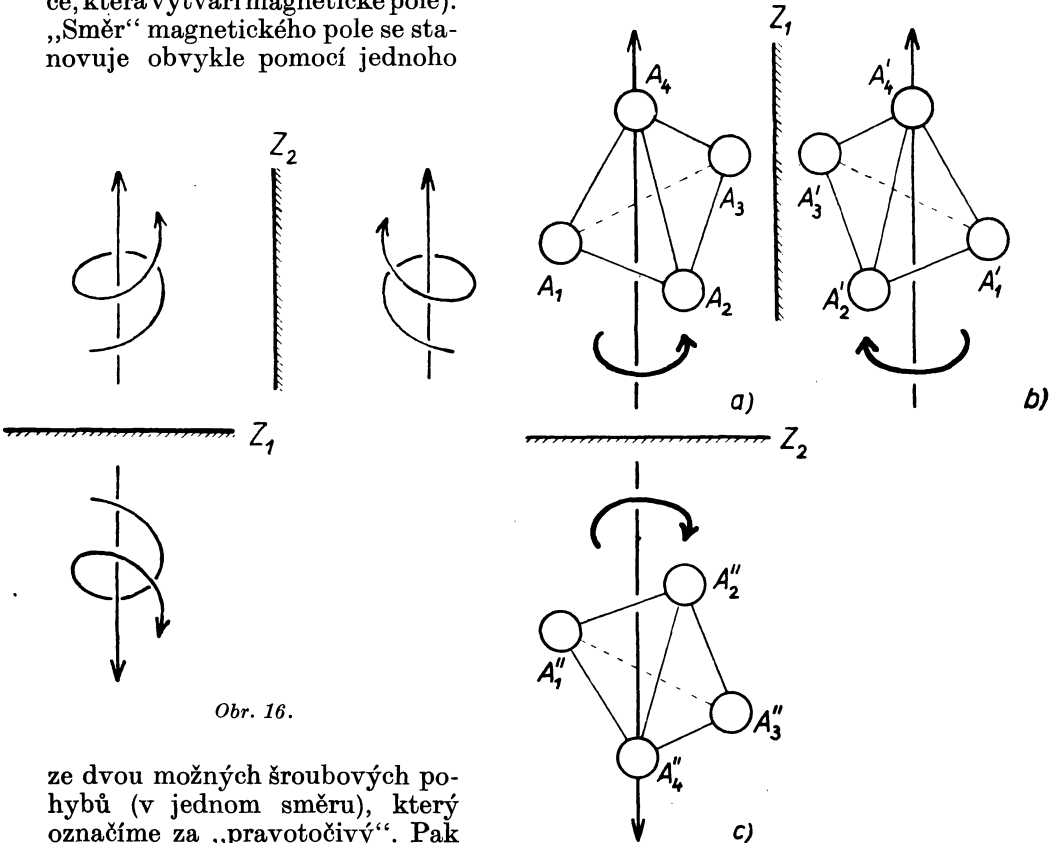
dající polohu elektrického pole, neboť víme, že po každé půlperiodě změni své znamení směr dipólu a tedy také směr pole.

Předpokládejme, že se náboj pohybuje směrem vzhůru. Víme, že elektrické pole musí být kolmé ke směru šíření záření a budeme se zajímat jen o relativní polohu elektrického pole ve dvou svazcích, z nichž jeden směřuje nahoru a druhý dolů. Chceme volit mezi dvěma možnostmi, označenými v obraze 15 jako „správně“ a „nesprávně“. Zrcadlení nám ukáže, že situaci, označenou v obraze 15 jako „nesprávně“, musíme zamítnout jako neuskutečnitelnou, neboť zde se dipól po zrcadlení obrátil, zatím co elektrické pole zůstalo nezměněno. Obráceně, po jedné půlperiodě bude zase zrcadlový obraz dipólu zaměřen vzhůru, třebaže elektrické pole změnilo svůj směr. Situace, označená v obraze 15 jako „správně“, je jedině možná, jak je ze zrcadlení ihned patrné.

Kvadrupól sestává ze dvou dipólů vzájemně proti sobě položených. Obraz kvadrupólu je s objektem identický, máme tu tedy situaci opačnou té, kterou jsme právě popsali. Vzhledem k tomu totiž, že kvadrupól je totožný se svým zrcadlovým obrazem, musí být elektrické pole kvadrupólu vůči zrcadlení

invariantní. Z toho pak ihned vyplývá, že jedinou možnou situací pro kvadrupól je ta, která je v obraze 15 označena pro dipól jako „nesprávně“. Říkáme, že záření dipólu má „lichou paritu“, neboť elektrické pole dipólu mění směr, záření kvadrupólu pak má „sudou paritu“, neboť zobrazením v zrcadle zůstává nezměněno.

Elektrické pole určuje v prostoru směr, totiž směr síly působící na kladný náboj. Magnetické pole naproti tomu určuje v prostoru jen smysl rotace (na příklad smysl rotace nabité částice, která vytváří magnetické pole). „Směr“ magnetického pole se stanovuje obvykle pomocí jednoho



Obr. 16.

Obr. 17.

ze dvou možných šroubových pohybů (v jednom směru), který označíme za „pravotočivý“. Pak je možno magnetické pole popsat vektorem, podobně jako elektrické pole. Mluvíme pak o tak zvaném axiálním vektoru (u magnetického pole) a o tak zvaném polárním vektoru (u elektrického pole).

Kombinaci směru se smyslem otáčení — jak bylo právě popsáno — označíme jako „točivost“ (pravotočivost, levotočivost).

Podle postulátu parity musí nyní k objektu, který má točivost, existovat také objekt totožný se zrcadlovým obrazem daného objektu (obr. 16). Tento obraz má v každém případě točivost obrácenou. Poloha zrcadla může být přitom dvojí (viz obraz 16). Při jedné z těchto poloh se v obraze změnil směr a smysl

rotace zůstává nezměněn, při druhé poloze zrcadla se mění smysl rotace a nemění se směr. V obou případech se však změní točivost.

Objekt spjatý s točivostí má zřejmě (vzhledem k této točivosti lichou paritu), na příklad molekula, sestávající ze čtyř atomů, které tvoří vrcholy čtyřstěnu. Označme tyto vrcholy A_1, A_2, A_3, A_4 (obr. 17). Oběhnutím obvodu trojúhelníka $A_1A_2A_3$ v tomto pořadí jeho vrcholů určíme smysl otáčení (kladný). Spojíme-li nyní tento smysl otáčení se směrem, jak je vyznačeno v obraze 17a), dostaneme točivost (pravotočivost, viz pravidlo pravé ruky!). Zrcadlením se buď zachová směr a změní smysl otáčení (obr. 17b)), nebo se zachová smysl otáčení a změní směr (obr. 17c)). V obou případech se změní točivost (pravotočivost v levotočivosti). Snadno se přesvědčíme, že molekulu a) nelze žádným otočením převést v molekulu b) nebo c) (viz úvodní úvahy článku). Molekuly b) a c) jsou tedy v tomto ohledu od molekuly a) podstatně odlišné. Taková molekula má tedy lichou paritu a podle postulátu parity mají oba typy této molekuly (pravotočivá a levotočivá) v přírodě existovat. Skutečně také v přírodě existují, na příklad u cukru, který se jak známo vyskytuje ve dvou různých krystalických formách — pravotočivá glukosa (cukr hroznový) a levotočivá fruktosa (cukr ovocný, levulosa). V živé látce se setkáváme jen s glukosou. Z fyzikálního hlediska v tom však nelze hledat nějakou privilegii pro glukosu. Příčiny, proč se v živé přírodě setkáváme jen s glukosou, budeme hledat spíše v náhodných podmínkách, za nichž vznikl život. Z hlediska fyzikálního je docela dobře myslitelný vznik a vývoj života s fruktosou.

Výklad postulátu parity zakončíme touto obecnou charakteristikou, týkající se mikrokosmu:

V kvantové mechanice se stav soustavy částic popisuje, jak známo, vlnovou funkcí ψ , která závisí na souřadnicích jednotlivých částic soustavy. Je-li tedy soustava tvořena n částicemi o souřadnicích $x_i, y_i, z_i, i = 1, 2, \dots, n$, je

$$\psi = \psi(x_i, y_i, z_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Z požadavku invariantnosti vůči inverzi (viz str. 546) plynou jisté vlastnosti symetrie vzhledem k změně znamének u x_i, y_i, z_i .

Ukazuje se, že platí vždy jeden z těchto dvou vztahů:

a) Funkce ψ je vzhledem k proměnným x_i, y_i, z_i sudá, to jest

$$\psi(-x_i, -y_i, -z_i) = \psi(x_i, y_i, z_i), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

b) funkce ψ je vzhledem k proměnným x_i, y_i, z_i lichá, to jest

$$\psi(-x_i, -y_i, -z_i) = -\psi(x_i, y_i, z_i), \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

V případě a) říkáme, že stav soustavy má „sudou paritu“, nebo také, že jeho parita je $+1$. V případě b) mluvíme o „liché paritě“ nebo také o paritě -1 .

Postulát parity pak říká, že parita izolované soustavy se nemůže s časem změnit, nebo-li, že soustava nemůže sama od sebe přejít ze stavu o paritě $+1$ do stavu o paritě -1 nebo obráceně.

Probereme nyní některé reálné pokusy, jež měly za následek

nové pojetí postulátu parity

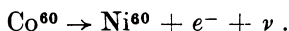
Všimneme si nejprve rozpadu beta.

Rozpad beta je nukleární reakce, v níž se nestabilní atomové jádro přeměňuje v jádro stabilní, přičemž se emituje částice beta (elektron, positron), popřípadě dvě částice beta (tak zvaný dvojný rozpad beta). Požadavek energetické rovno-

váhy při tomto rozpadu vedl k hypotese, že současně s částicí beta je z jádra při rozpadu emitována další elementární částice, zvaná neutrino⁵⁾.

Neutrino zůstává sice z hlediska přímého důkazu existence částicí dosud hypotetickou, nepřímé důkazy jeho existence a nesmírná plodnost hypotesey neutrina jsou však tak přesvědčivé, že je možno takřka s jistotou předpokládat, že neutrino reálně existuje.

Nestabilním prvkem je na příklad isotop kobaltu Co^{60} , jehož jádro se rozpadá v jádro Ni^{60} , přičemž se emituje elektron (e^-) a neutrino (ν). Zápis této nukleární reakce má tvar



Jádra kobaltových atomů mají spin, to jest v normálním stavu rotují⁶⁾ s určitým momentem hybnosti.

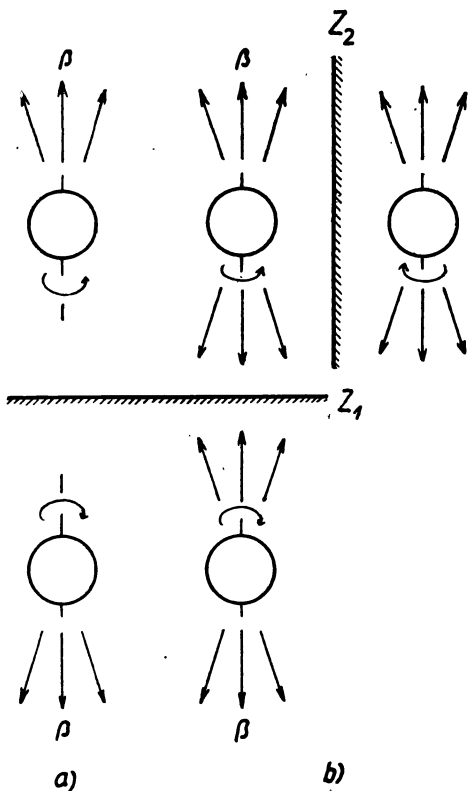
Ptejme se nyní, v jakém směru budou při rozpadu emitovány elektrony.

Za normálních podmínek budou elektrony emitovány všemi směry, neboť atomová jádra jsou v kusu kobaltu orientována v důsledku tepelného pohybu ve všech směrech. Je však možné je uspořádat tak, aby osy jejich rotace byly vesměs rovnoběžné s určitým směrem a aby všechna jádra rotovala v témž smyslu. Jediný způsob ovšem, jak toho dosáhnout, je využít magnetický moment způsobený spinem. Jádra se dají jednotně uspořádat vnějším magnetickým polem, podaří-li se je napřed ochladit na teplotu nižší než $0,1^\circ\text{K}$. To je experimentálně jistě obtížný úkol.

Mysleme si tedy, že všechna jádra kobaltu 60 jsou skutečně „uspořádána“, to jest že všechna rotují v témž smyslu kolem vzájemně rovnoběžných os.

Co vychází nyní teoreticky z postulátu parity?

V obraze 18a) je případ, že z jádra vyletuje v jednom směru (nahoru) více elektronů. V zrcadle (z_1) se však smysl rotace nemění, přitom více elektronů vyletuje ve směru opačném (dolů). To odporuje postulátu parity, musíme proto tento případ vyloučit jako nereálný. Zůstává tedy jen možnost, že v obou směrech se emituje stejný počet elektronů, což je v soulase s postulátem parity, jak ukazuje obraz 18b) (při zrcadlení podle zrcadla z_1 i z_2).



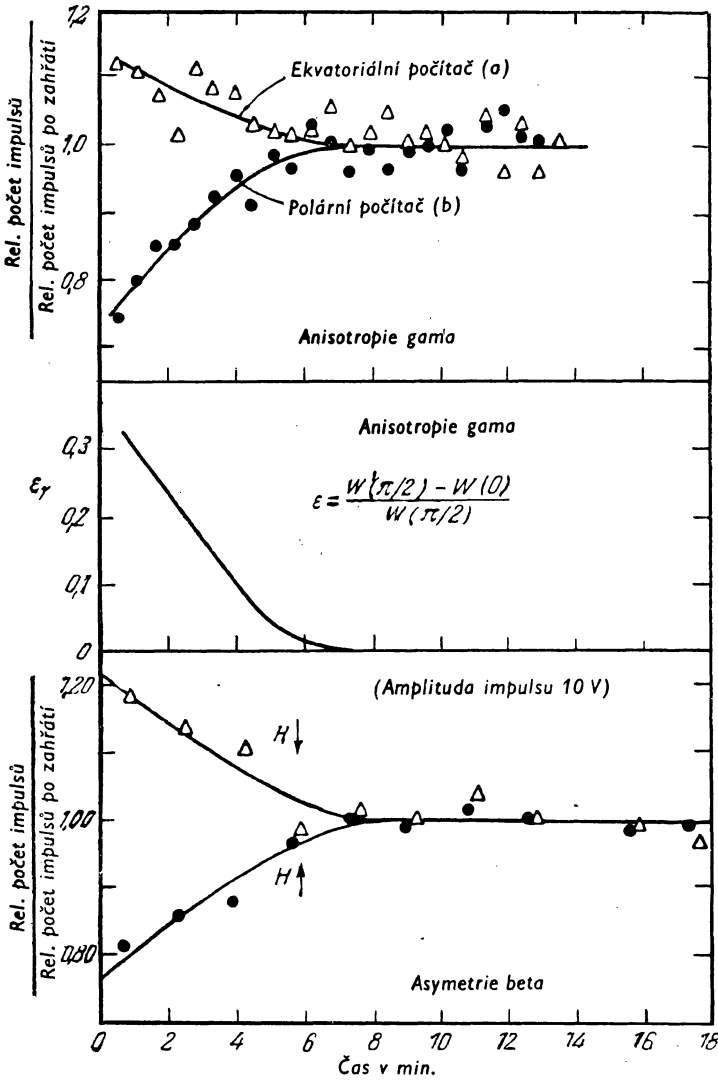
Obr. 18.

⁵⁾ Viz na příklad článek *Neutrino*, v tomto časopise, III (1958), č. 4.

⁶⁾ Nejde tu ovšem o rotaci v mechanickém makroskopickém smyslu, jak je tomu na příklad u „vlčka“; schematicky však taková představa je možná. Ve skutečnosti jde o jev mnohem složitější.

A co říká pokus?

Pokus byl proveden v *International Bureau of Standards (IBS)* ve Washingtoně, kde je potřebné kryogenní zařízení. Šlo o srovnávání intenzity emitovaných elektronů stejně orientovaných („uspořádaných“) jader kobaltu 60 ve



Obr. 19.

dvou protilehlých směrech osy rotace jader. Pokud provedli C. S. Wu z Kolumbijské university v New Yorku a E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes a R. P. Hudson z IBS. Pokus pak opakovala řada vědců v jiných zemích; v SSSR Alichanov, Vajsenberg, Nikitin a jejich spolupracovníci. Iniciá-

tory pokusu (a řady jiných) byli právě dnešní nositelé Nobelovy ceny za fyziku pro rok 1957, Lee a Yang.

Tento pokus, jehož výsledek byl teoreticky podle postulátu parity naprosto „zřejmý“, měl ve skutečnosti výsledek, který postulát parity „vyvracel“, a to v míře v historii fyziky nevidané: intenzita elektronů se v jednom směru ukázala o 40% větší než ve směru opačném. Postulát parity se v tomto pokusu ukázal neplatným.

Jde o výsledek takového dosahu, že je namístež popsat výsledek pokusu podrobněji.

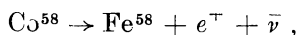
V obraze 19 jsou tři grafy. Vodorovná osa je označena jako osa časová, ve skutečnosti však je to teplotní stupnice. Kobalt 60 se totiž ochladí až na teplotu, při které jsou jeho atomová jádra schopna „uspořádání“, načež se zvolna zahřívá.

Křivka označená jako „anisotropie gama“ udává ve skutečnosti, jaká část všech jader je stejně orientovaných („uspořádaných“). Při velké anisotropii je většina jader uspořádána. S postupujícím zahříváním se orientace jader stává stále chaotičtější a anisotropie se zmenšuje.

Křivka označená jako „asymetrie beta“ udává relativní množství elektronů emitovaných ve směru magnetického pole a ve směru opačném. Vidíme, že v jednom směru je intenzita elektronové emise větší než ve směru druhém, to jest že elektrony jdou směrem vzhůru pro jeden spin a směrem dolů pro spin opačný.

Charakter spinu je však dán výlučně smyslem rotace. Uvedený výsledek tedy znamená, že smyslem rotace je ve fyzikálním světě určen privilegiovaný směr (směr intenzivnější elektronové emise), alespoň pokud jde o rozpad beta kobaltu 60. Postulát parity tedy obecně neplatí. Zrcadlový obraz rozpadajícího se jádra Co^{60} má opačnou „točivost“ a zřejmě nemůže tedy v přírodě existovat.

Stejný pokus byl proveden s kobaltem 58, který rozpadem beta přechází v železo 58 s emisí positronu a antineutrinu⁷⁾. Rozpad popisuje rovnice

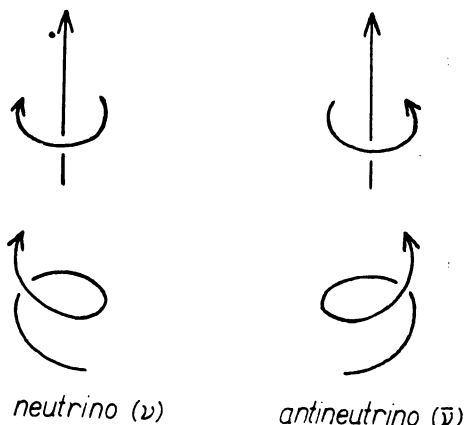


kde e^+ je positron a $\bar{\nu}$ antineutrino. Přitom jsou pozoruhodné dvě věci:

a) emituje-li se při rozpadu beta elektron, vylétí z jádra zároveň neutrino (jako je tomu na příklad v rozpadu beta kobaltu 60), emituje-li se positron, dojde zároveň k emisi antineutrina (na příklad v rozpadu beta kobaltu 58);

b) při emisi positronu se ukazuje točivost opačná točivosti, jíž pozorujeme při emisi elektronu.

⁷⁾ Viz pozn. 5).

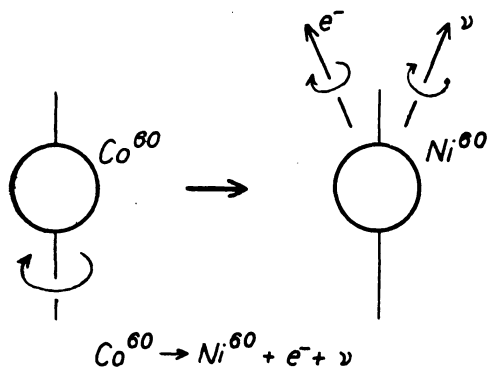


Obr. 20.

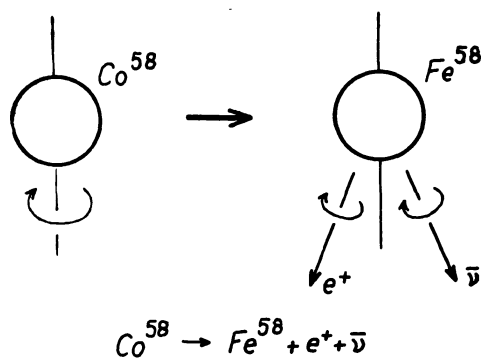
Máme tedy takovou situaci, že v některých případech při témž smyslu rotace jádra emitují se v jednom směru elektrony, v opačném směru pozitrony, tedy jeden směr je privilegovaný pro elektrony, směr opačný pro pozitrony.

T. D. Lee, C. N. Yang, a nezávisle na nich L. D. Landau v Moskvě a A. Salam v Anglii vyložili tento jev takto:

Předpokládá se, že „točivost“ je spjata s přítomností neutrina, neboť všechny jiné jevy v nukleární fyzice, v nichž neutrino nevystupuje, vykazují skutečnou zrcadlovou symetrii. Odpovědnost se tak svedla na neutrino, na částici tak jako tak dosti zvláštní, a jev se tím do jisté míry od ostatní fyziky isoloval.



Obr. 21. Rozpad beta Co^{60} .



Obr. 22. Rozpad beta Co^{58} .

Všichni čtyři jmenovaní vědci jsou zajedno v tom, že neutrino je (schematicky vzato) jakási šroubovice (obr. 20), v níž stoupání je souhlasné se směrem pohybu neutrina a rotace (spin) taková, že šroubovice je, řekněme, levotočivá. Předpokládá se dále, že antineutrino má opačné charakteristiky, že tedy představuje pravotočivou šroubovici.

Je zajímavé, že částice s takovými vlastnostmi se musí vždy pohybovat rychlostí světla, a že tedy musí mít klidovou hmotu nulovou. Kdyby se totiž pohybovaly rychlostí menší, než je rychlost světla, pak by pro pozorovatele, který by letěl rychleji, představovaly šroubovice opačné ve srovnání s tím, jak by se jevíly pozorovateli letícímu rychlostí menší než částice samy. Točivost těchto částic byla by pak vlastností relativní, a nemohla by být jejich vnitřní charakteristikou.

Pomocí představy neutrina a antineutrina jako šroubovic je pak možno vysvětlit výše popsané pokusy s kobaltem. Při rozpadu jádra musí totiž částice z jádra emitovaná unášet s sebou část spinu jádra. Je-li touto částicí neutrino, musí z jádra vyletět v takovém směru, aby jeho rotace (spin) složená se směrem vyzáření dala levotočivou šroubovici. Tím je dán privilegovaný směr, v němž je elektronová emise z jádra intenzivnější. Pokus (s rozpadem Co^{60} , obr. 21) to také potvrzuje.

Podle této představy musí být situace při rozpadu beta Co^{58} opačná: pozitrony musí vyletovat intenzivněji ve směru opačném směru, v němž vyletují elektrony při rozpadu beta Co^{60} , což pokus také plně potvrzuje (obr. 22).

Poznámka. Ve fyzikální literatuře se názvem neutrino označuje většinou částice, kterou my zde nazýváme antineutrino, a obráceně. Tedy na příklad při rozpadu beta Co^{60} vyletuje antineutrino $\bar{\nu}$, při rozpadu beta Co^{58} neutrino ν . Zvolili jsme obrácené označení, poněvadž jsme pokládali za vhodnější zavést neutrino dříve než antineutrino.

Popsali jsme jeden z pokusů — rozpad beta kobaltu — jenž vedl k revisi postulátu parity, a který patří do skupiny jevů, zvaných vzájemná působení (interakce) se slabou vazbou. Vyložím stručně, co tento pojem znamená.

Z fyziky je známo, že dvě elementární částice (a konec konců také každé dva makroskopické objekty) vzájemně na sebe působí. Toto vzájemné působení může mít rozmanitý charakter. Tak na příklad každé dvě hmoty m_1 a m_2 , vzájemně na sebe působí účinkem gravitace. Výrazem pro toto vzájemné působení je známý Newtonův obecný gravitační zákon, který říká, že dvě hmoty m_1 a m_2 se přitahují silou F , která je přímo úměrná součinu hmot m_1 a m_2 a nepřímo úměrná čtverci jejich vzdálenosti r :

$$F = \kappa \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

kde κ je konstanta, zvaná gravitační konstanta. Nebo dva bodové elektrické náboje q_1 a q_2 působí vzájemně na sebe silou F , pro kterou platí zákon zcela analogický zákonu gravitačnímu:

$$F = k \cdot \frac{q \cdot q_2}{r^2}, \quad k = \text{konst.}$$

Vzájemné působení je v předcházejícím příkladě zprostředkováno gravitačním polem, v druhém příkladě elektrickým polem. Pro gravitační vzájemné působení je charakteristická konstanta κ , v druhém případě — elektromagnetické vzájemné působení — je charakteristikou konstanta k .

V atomové fyzice jsou ještě jiná vzájemná působení (na příklad v atomovém jádře). Každé z těchto vzájemných působení je — podobně jako u gravitace nebo u elektromagnetického pole — charakterisováno jistou, tak zvanou vazebnou konstantou. Vzájemná působení je nyní možno rozdělit do čtyř skupin podle velikosti vazebných konstant:

1. Silná vzájemná působení, neboli silné interakce (interakce se silnou vazbou), kde vazebná konstanta je řádově jednička;⁸⁾
2. elektromagnetické interakce, kde vazebná konstanta je řádově 10^{-2} ;
3. slabé interakce (interakce se slabou vazbou) s vazebnou konstantou řádově rovnou 10^{-13} ;
4. gravitační interakce, charakterisované vazebnou konstantou řádově rovnou 10^{-39} .

Do silných interakcí se zahrnují vznik a srážky mesonů π , nukleonů, hyperonů a částic K^0 . Do slabých interakcí patří rozpady neutronů, mesonů a hyperonů. Slabé interakce se dále dělí někdy na interakce, v nichž vystupuje neutrino a na interakce bez účasti neutrina.

Slabé a silné interakce se liší také velmi podstatně trváním procesů, jež vyvolávají. U interakcí se silnou vazbou trvají řádově 10^{-23} vteřiny nebo méně,

⁸⁾ měřeno ve zvláštních jednotkách.

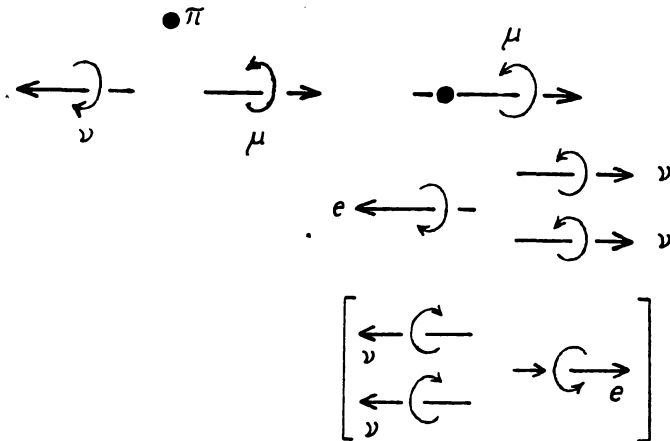
⁹⁾ Viz na příklad článek P. Zielinski, *Gell-Mannův a Paisův pokus o systematisaci elementárních částic*, v tomto časopise II (1957), str. 179.

u interakcí se slabou vazbou řádově 10^{-8} až 10^{-10} vteřiny. Na příklad „doba života“ nabitých mesonů π je $2 \cdot 10^{-8}$ sec.

Postulát parity se potvrzuje ve všech pokusech se silnými interakcemi a s interakcemi elektromagnetickými. Byly to právě slabé interakce, které dávaly vznikat jevům, jež nejen nebylo možno v rámci postulátu parity vysvětlit, ale které také vedly k revisi tohoto postulátu. Pokus s jednou takovou slabou interakcí — s rozpadem beta — jsme popsali. Popíšeme ještě stručně

pokusy s mesony,

kteřé rovněž ukázaly, že postulát parity obecně neplatí.



Obr. 23.

Mesony jsou elementární částice, které mají v nukleární fyzice velmi důležitou úlohu. Existují různé druhy mesonů, mesony π , mesony μ , mesony K a jiné. Nejdůležitějšími z nich jsou mesony π , které jsou nositeli nukleárních vazebných sil. Hmotnost mesonu π je rovna asi 270 elektronovým hmotám, může být kladně nebo záporně elektricky nabitý nebo elektricky neutrální (znaky π^+ , π^- , π^0). Meson π nemá spin. Životní doba volného nabitého mesonu π je — jak jsme již uvedli — řádově 10^{-8} vteřiny. Po této době se rozpadá na tak zvaný meson μ a na neutrino. Meson μ se velmi podobá elektronu až na hmotu, kterou má 206krát větší než elektron. Meson μ může být kladně nebo záporně nabitý, má spin $\frac{1}{2}$. Je jako meson π nestabilní a po asi 10^{-6} vteřiny se rozpadá na elektron a na dvě neutrina.

Meson π se tedy rozpadá na dvakrát podle schématu

$$\pi \rightarrow \mu + \nu \rightarrow e^- + 2\nu + \nu.$$

Pečlivými pokusy (R. L. Garwin, L. M. Lederman, M. Weinrich z Kolumbijské university v New Yorku, J. I. Friedman a V. L. Telegdi v Chicagu) bylo nyní zjištěno, že konečné produkty rozpadu, elektrony, jsou emitovány nejčastěji ve směru přibližně opačném, než ve kterém vyletují mesony μ (stopy neutrin se v pokusných zařízeních nezachycují), jakoby tu existoval privilego-

vaný směr pro emisi elektronů. To je další jev, který probíhá proti postulátu parity. Také tento jev lze vysvětlit pomocí hypotézy šroubovitého charakteru neutrína (hypothésa dvoukomponentního neutrína). Schéma výkladu je uvedeno v obraze 23. Meson π se rozpadne v meson μ a neutrino ν . Spin neutrína spolu se směrem jeho pohybu odpovídá, jak již bylo řečeno, levotočivé šroubovici. Z toho přímo plyne, že vzniknuvší meson μ musí rovněž pokud jde o spin a směr pohybu odpovídat levotočivé šroubovici, poněvadž spin a pohyb mesonu π byly před rozpadem nulové; spin a pohyb obou produktů rozpadu musí být proto opačně orientovány.

V obecném případě není spin mesonu μ pevně určen vzhledem ke směru jeho pohybu; to platí podle hypotézy dvoukomponentního neutrína jen pro tuto částici. Avšak při rozpadu mesonů π v meson μ a neutrino ν jsou osy spinů rovnoběžné se směrem pohybu částic μ a ν , odpovídají proto i meson μ i neutrino ν levotočivé šroubovici.

V druhé fázi rozpadu $\pi \rightarrow \mu + \nu \rightarrow e^- + 2\nu + \nu$ vyžaduje zachování impulsu, aby v případě, kdy elektron nabývá velké energie, byla obě neutrína emitována ve směru opačném směru, v němž vyletuje elektron. Obě neutrína ovšem musí vyletět ve směru pohybu mesonu μ , neboť smysl jejich rotace musí souhlasit se smyslem rotace mesonu μ (zákon zachování spinu) a obě tyto částice musí představovat, pokud jde o rotaci a směr pohybu, levotočivou šroubovici. Elektrony musí tedy vyletovat hlavně ve směru opačném (dozadu), což se pokusem také potvrzuje. V obraze 23 je v lomených závorkách znázorněn schematicky případ zrcadlově symetrický. Podle postulátu parity jde o případ, který je v přírodě také možný; pokus však ukazuje, že tomu tak není¹⁰⁾.

Poznámka. V nejposlednější době provedli C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes a R. P. Hudson pokusy s rozpadem beta Co^{58} (positronový rozpad) a Allen se spolupracovníky pokusy s positronovým rozpadem A^{35} a Cl^{35} , jejichž výsledky nejsou v plném souhlase s výsledky dříve získanými. Zůstává proto otázka, do jaké míry potvrzují pokusy hypotézu dvoukomponentního neutrína, ještě otevřená.

Nezachování parity vede k některým zajímavým závěrům a představám.

Popíšeme nejprve dva myšlené pokusy s kobaltem 60. Vraťme se k výkladu postulátu parity, spojeného s obrazem 11 (str. 547). Mysleme si (podle E. M. Purcella), že tyč v obraze 11 je z kobaltu 60 a že rotuje kolem podélné osy AB . Touto rotací se spiny kobaltových jader „uspořádávají“ a tyč se stává v nepatrné míře magnetickou (tak zvaný Barnettův efekt). Tím se, jak jsme ukázali, privilejuje směr elektronové emise, k níž dochází rozpadem atomových jader Co^{60} . Elektrony budou tyčí pohlcovány, a proto bude jeden konec tyče mít vzhledem k jednostranné emisi elektronů větší energii než druhý. (V normálních podmínkách je tento efekt ovšem tak nepatrný, že jej nelze experimentálně nijak postihnout). Podle teorie relativity odpovídá větší energii větší hmota, bude tedy jeden konec tyče těžší než druhý, a tyč se — alespoň teoreticky — nakloní na jednu stranu vzhledem k opoře. Mikrokosmický děj (rozpad beta), který porušuje postulát zachování parity, mohl by se tak stát makroskopicky pozorovatelný.

Jiný pokus navrhl Zacharias. Představme si nevelký hliníkový kotouč, který je z jedné strany pokryt jemnou vrstvou kobaltu 60. Kotouč zavěsíme

¹⁰⁾ Celá úvaha je podána za zjednodušujícího předpokladu, že obě neutrína, emitovaná v reakci $\mu \rightarrow e^- + 2\nu$, jsou totožná. Ve skutečnosti je však pravděpodobnější, že jde o neutrino a anti-neutrino. Závěr zůstává však i zde v platnosti, dojde se k němu ovšem mnohem složitější cestou.

tenkou nití v těžišti tak, aby byl v horizontální poloze. Takový kotouč začne rotovat, a to pokaždé v téměř smyslu. Vysvětlení máme v předcházejících úvahách. Elektrony, které vznikají rozpadem beta kobaltových jader a vyletují do hliníkového kotouče (dolů), budou jím pohlceny. Elektrony, které vyletují opačným směrem, unikají. Neutrína unikají v obou případech. Elektrony, které zůstanou v kotouči, budou stejně orientovány pokud jde o jejich spin, předají proto kotouči svou rotaci a kotouč začne rotovat. Kdyby se kotouč pokryl kobaltem 60 z druhé strany, začne rotovat v opačném smyslu.

Nejzajímavější představa, ke které lze dojít z výše popsaných úvah o neplatnosti postulátu parity ve spojení s jinými asymetriemi našeho fyzikálního prostoru, je představa

antimaterie

Až do objevu positronu (1930), to jest částice shodné s elektronem až na elektrický náboj, který je u positronu kladný, se fyzikální svět jevil „nábojově asymetrickým“; to znamená toto: těžké atomové jádro nese vždy kladný elektrický náboj, lehké elektrony ve slupce náboj záporný. Pak byl objeven positron — „nábojově symetrický“ k elektronu. V poslední době, když bylo možno laboratorně dosáhnout mohutných urychlení elementárních částic, byly objeveny antiproton a antineutron. Antiproton je záporně nabitý proton, antineutron je jako neutron elektricky neutrální, má stejnou hmotu, ale ve všech ostatních charakteristikách je k neutronu „symetrický“. Dále byla, sice ještě nepřímo, avšak velmi přesvědčivě prokázána existence antineutrína¹¹⁾, které představuje „zrcadlovou kopii“ neutrína. Dnes jsou důvody k domněnce, že ke každé elementární částici existuje příslušná „antičástice“.

Je proto zcela myslitelné, že by bylo možno vytvořit látku, v níž by na rozdíl od našich dosavadních zkušeností atomová jádra byla záporně nabitá a částice ve slupce kladně nabité, která by tedy sestávala z antinukleonů a positronů. Že je tomu v naší galaxii jinak, může být náhodné. Je myslitelné, že v nějaké jiné galaxii je látka druhého, „symetrického typu“.

Vrátíme-li se ještě na okamžik k pokusům s kobaltem 60 a kobaltem 58, které jsme popsali v předcházejících odstavcích, dojdeme k tomu, že je velmi pravděpodobné, že „antikobalt 60“ bude svoje positrony emitovat ve směru opačném směru, v němž kobalt 60 emituje při rozpadu svého jádra elektrony.

To ukazuje otázku parity ve zcela jiném světle. Původní postulát parity tvrdil, že k jakémukoli fyzikálnímu ději může objektivně existovat děj zrcadlově symetrický. Symetrie se tu bere čistě geometricky. Některé interakce se slabými vazbami však ukázaly, že tomu tak není. Z toho je pochopitelně třeba vyvodit nevyhnutelný závěr, že postulát parity obecně neplatí, že tedy abstraktní geometrický prostor je vzhledem k pojmům „vpravo“ a „vlevo“ nesymetrický. Taková představa je však těžko pochopitelná.

Koncepci parity je tu však jednostranná; postulát parity vychází z požadavku invariantnosti vzhledem k obyčejné inverzi, která mluví jen o geometrii prostoru. Spojíme-li tento geometrický pojem symetrie s fyzikální „symetrií“, v níž částice přecházejí důsledně v antičástice, s tak zvanou „nábojovou konjugací“, dostáváme se ke zcela myslitelnému závěru, že postulát parity platí obecně, ovšem jiný postulát parity, založený ne pouze na geometrické inverzi, nýbrž na tak zvané „kombinované inverzi“, v níž se inverse neoddělitelně spojuje s nábojovou konjugací. V této koncepci (T. D. Lee, C. N.

¹¹⁾ Viz poznámku 5).

Yang, L. D. Landau) se asymetrie, jež se projevila v některých interakcích se slabou vazbou, redukuje na asymetrii částic, tedy na asymetrii fyzikální. Děj geometricky symetrický rozpadu beta kobaltu 60, to jest děj k tomuto inverzní, v přírodě neexistuje. To dokazuje pokus, zkušenost, která je rozhodující instancí v každé vědecké arbitráži. Spojíme-li však inverzi rozpadu beta Co^{60} (změnu orientace spinů) s nábojovou konjugací, to jest se záměnou kobaltu 60 za antikobalt 60 (děj kombinovaně inverzní k rozpadu beta Co^{60}), dostaneme děj, který — alespoň teoreticky — v případě možný je.

Hlavní pramen, podle něhož jsme sestavili pro čtenáře našeho časopisu tuto informaci o jednom z nejnovějších fundamentálních úspěchů fyzikální vědy, nese název *Fall of Parity* — „Pád parity“. Nezdá se nám, že by to byl název nejpřiléhavější; volili bychom spíše název „Vítězství parity“. Parita totiž nepadla — ani v dnešní koncepci; pro interakce se silnou vazbou a pro interakce elektromagnetické se zatím bez výjimky pokusně potvrzuje. Parita však nepadla ani pro interakce se slabou vazbou, díváme-li se na ni v novém světle, spíše lze říci, že se dostává na vyšší, obecnější úroveň, na úroveň, která „prohlubuje lidské poznání přírodních objektů“.

„... ze souboru relativních pravd v jejich vývoji se skládá absolutní pravda, ... relativní pravdy představují věrné odrazy na lidstvu nezávislého objektu, ... tyto odrazy se stávají stále přesnějšími, ... v každé vědecké pravdě, nehledíc na její relativnost je prvek absolutní pravdy ...“ (V. I. Lenin, *Materialismus a empirokriticismus*, Praha 1952, str. 249, 295).

Zpracováno podle těchto pramenů

- [1] В. Вейскопф и Л. Родберг, *Něsochránění četnosti. Novyje otkrytija, kasajuščiesja simmetrii zakonov prirody*, Uspechi fiz. nauk, LXIV (1958), č. 3; ruský překlad článku L. S. Rodberg and V. F. Weisskopf, *Fall of Parity*, Science, sv. 125, 627 (1957).
- [2] *Novyje svojstva simmetrii elementarnych častic*. Sbornik statěj, Izd. in. lit., Moskva 1957; překlad z angličtiny.
- [3] M. Friml, *Úhlová asymetrie při rozpadu mesonů μ* . Diplomová práce vypracovaná ve Fys. ústavu ČSAV, Praha 1957–1958.
- [4] Kand. fiz.-mat. nauk K. A. Тер-Мартirosян, *Něsochránění četnosti. K prisužděniju nobelevskoj premii Li-Czun-Dao i Jan-Čzeň-Ninu*, Priroda, 1958, č. 4.

Dr Josef Veselka