

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Matthias Jakob

Struktura protonu a její skrytý půvab - po stopách fyziků vysokých energií

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 21 (1976), No. 6, 306--324

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138795>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1976

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>

Podstatná časť pracovníkov na našich pracoviskách vyhovuje náročným kritériám, ktoré treba v súčasnosti na pracovníkov základného výskumu uplatňovať, a má predpoklady ďalšieho vývoja. Máme však na pracoviskách Akadémie aj niektorých pracovníkov, ktorých vstup na pole vedy bol náhodný, ktorých celkový odborný a politický profil nezodpovedá spoločenskej dôležitosti vedeckej práce. Ich prítomnosť na pracoviskách Akadémie pôsobí retardujúco, a preto bude potrebné nájsť pre nich zaradenie na iných primeraných pracovných úsekoch.

Pracovná výkonnosť vo vedeckej práci je preukazateľne ovplyvňovaná vekom pracovníkov. Dlhoročná praktická skúsenosť svetovej vedy ukazuje, že absolútnu väčšinu najvýznamnejších výsledkov v oblasti prírodných a technických vied dosiahli vedci vo veku od 26 do 40 rokov. Priemerný vek vedeckých pracovníkov v SAV je 43 rokov, v ČSAV 45 rokov. Treba preto hľadať cesty, na zníženie vekového priemeru vedeckých pracovníkov Akadémie. Vzhľadom na pomerne nízke ročné prírastky nových pracovníkov možno touto cestou len čiastočne prispieť k riešeniu tohto problému. Je nevyhnutné vytvoriť podmienky pre prirodzenú mobilitu pracovníkov v rámci jednotlivých súčastí vedeckovýskumnej základne, ako aj medzi touto základňou a spoločenskou praxou. Úlohu možno riešiť len v súčinnosti viacerých rezortov.

Súdružky a súdruhovia!

Súčasná generácia vedeckých pracovníkov v socialistických krajinách majú veľkú a šlachetnú úlohu obohacovať svojou prácou zdroje podnetov pre vedeckotechnický pokrok spoločnosti a spolu so všetkými pracujúcimi sa usilovať o plné využitie týchto zdrojov pre rozvoj najpokrokovejšieho spoločenského zriadenia: socializmu a komunizmu. Urobíme všetko pre to, aby podiel československých vedcov na plnení tejto úlohy bol čo najdôstojnejší.

Struktura protonu a její skrytý půvab --

po stopách fyziků vysokých energií*)

M. Jacob, CERN, Ženeva

Od doby, kdy Řekové prvně vymysleli slovo „atom“, zkoumají vědci hmotu do stále větších hloubek. Snaží se vnést řád do světa zdánlivě ohromné složitosti a věří, že pod

*) M. JACOB: *The proton structure and its hidden charm*. Physics Bulletin 26 (1975), 175.

© The Institute of Physics, Bristol, Great Britain.

nekonečnou rozmanitostí tvarů, barev a kvalit našich každodenních zážitků se nakonec skrývá hluboká prostota základních stavebních kamenů světa. Pokrok, který byl dosažen zvláště během posledních asi 100 let, je úžasný. Středem výzkumu se stal proton. Abychom prozkoumali jeho strukturu a zjistili, zda je skutečně základním stavebním kamenem nebo jen klíčem k něčemu ještě fundamentálnějšímu, byl ve fyzice vysokých energií nasazen do výzkumu mohutný šik experimentálních zařízení (viz např. obr. 1).

Struktura, stavební kameny a složené systémy

Již dlouho víme, že ohromný počet látek, které mohou být chemicky izolovány, je výsledkem slučování pouze několika set atomů a jejich příslušných izotopů v odpovídající molekuly. Tak je složitost chemie na fundamentálnější úrovni převedena na relativní jednoduchost atomové fyziky.



Obr. 1. Celkový pohled (od severu) na laboratoř I v CERN směrem k laboratoři II. Vpravo dole jsou administrativní budovy a budovy teoretické divize. Ve středu obrázku je patrný prstenek protonového synchrotronu na 28 GeV o průměru 200 m. Nad ním probíhá hranice mezi Švýcarskem a Francií a je vidět prstenek zařízení se vstřícnými svazky ISR o průměru 300 m. Laboratoř II se buduje od r. 1971 a nachází se vpravo od hlavní silnice (mimo obrázek). Jejím hlavním zařízením je protonový synchrotron na 400 GeV o průměru 2,2 km, jehož malou část je vidět na pravém okraji snímku v úrovni ISR. PHOTO CERN.

Z klasického Rutherfordova experimentu, ve kterém Rutherford rozptyloval částice α na atomech, víme, že samotný atom se skládá z elektronů a z jádra a nyní dále víme, že jádro je opět souborem dvou „elementárních částic“, protonů a neutronů. Tak je celá složitost vesmíru převedena na složitost různých seskupení tří fundamentálních částic – elektronů, protonů a neutronů.

Je dobře známo, že chceme-li zkoumat objekt, musíme jej zasáhnout tím prudčeji, čím je menší, neboť drobné struktury mají silné vazbové energie. Jestliže složenému systému dodáme energii menší, než je jeho vazbová energie, odrazí se pouze jako celek (pružně), aniž by prozradil svoji vnitřní strukturu. Je-li dodaná energie stejného řádu jako vazbová, systém se vnitřně excituje a při návratu do svého stabilního stavu přes řadu přechodů odhalí mnoho ze své vnitřní struktury. Teprve překročí-li dodaná energie energii vazbovou, systém se rozpadne na své složky.

V případě molekul, kdy vazbové energie jsou velikosti několika elektronvoltů (eV)*, „ostřelujeme“ systém nízkoenergetickými fotony. Při studiu atomů užíval RUTHERFORD místa „světla“ částic α , protože mají větší energie a kratší vlnové délky. Očekával rozptyl částic α typický pro atomový rozměr (0,1 nm)*, ale místo něho našel nečekaně hojný rozptyl s velkými úhly rozptylu překrývající se s rozptylem spojeným s atomem jako celkem. To ukazovalo, že kromě rozptylu od atomu jako celku některý rozptyl pocházel od mnohem menší struktury v atomu – od jádra. Až budeme diskutovat strukturu protonu, setkáme se s velmi podobnou situací.

Zkoumat jadernou strukturu je mnohem obtížnější než atomovou. Jádro je totiž mnohem menší objekt (1 fm)* než atom, a proto příslušné vazbové síly musí být mnohem větší než síly typické pro atomovou fyziku. Abychom porušili jadernou strukturu a mohli studovat její reakce i analyzovat její vlastnosti, potřebujeme energie řádu milionů elektronvoltů (MeV)*. Při nich se uplatňují mnohem významněji silné interakce než elektromagnetické, které drží pohromadě atom. Dosah silných interakcí je však jen řádu jaderných rozměrů (1 fm). Díky YUKAWOVI dnes víme, že silné interakce jsou v podstatě způsobeny výměnou mezonů, zejména nejlehčího z nich – mezonu π .

Vůči silným interakcím se protony a neutrony chovají velmi podobně – vykazují vlastnost známou jako nábojová nezávislost jaderných sil. Ta je narušena pouze přítomností elektromagnetických interakcí, a to asi na úrovni 1%. Z těchto důvodů nebudeme dále rozlišovat proton od neutronu, a budeme uvažovat pouze jeden z nich – proton. Protony a neutrony, společně nazývané nukleony, jsou si tedy, pokud jde o jejich strukturu, ve všech směrech nesmírně podobné. Silné interakce mezi nukleony jsou proto invariantní vůči grupě unitárních transformací, jež zaměňují protony neutrony a obráceně, neboli jsou invariantní vůči grupě $SU(2)$. Takto se správně popisuje nábojová nezávislost jaderných sil.

Jaderná struktura má díky nukleonům, které ji vytvářejí, několik vlastností. Za prvé excitace jádra můžeme výhodně popsat pomocí změn pohybu nukleonů v jádře – pomocí představy, že jádro je souborem nukleonů. Tato představa je určitě správná, určujeme-li celkové vlastnosti jádra jako je jeho náboj, jaderné číslo a do značné míry i jeho hmotnost. Platí však i pro změny, kterým se jádro podrobuje. Za druhé tímto

*) $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$; $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$; $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ (pozn. překl.).

způsobem můžeme pochopit velikou podobnost, s níž se setkáváme u různých jader se stejným počtem nukleonů – to, že mohou vykazovat velmi podobné celkové vlastnosti a excitační spektra. Různým výběrem ze stejných stavebních kamenů dostaneme totiž různé, i když někdy velmi podobné struktury. Systémy nukleonových stavů můžeme takto sdružovat v multiplety grupy $SU(2)$.

Za třetí můžeme jádro skutečně rozbít na nukleony a obráceně zase můžeme větší jádra složit z menších nebo přímo z nukleonů. To definitivně dokazuje existenci nukleonové struktury, na niž jsme již narazili při dvou zmíněných vlastnostech. Avšak to je dnes všechno dobře známo. Mluvili jsme o tom pouze proto, že jsme měli na mysli obdobu situace, která nastane, když půjdeme o krok dále a zeptáme se, zda proton, který byl až dosud základní elementární částí jádra, nemá také strukturu vytvořenou ještě fundamentálnějšími a elementárnějšími veličinami.

Můžeme říci, že právě na tuto otázku se do značné míry pokouší odpovědět fyzika vysokých energií. Odpověď může být prostá. Fundamentálnější částice vytvářející proton patrně existují. Mají dokonce již jméno, které si GELL-MANN vypůjčil od JAMES JOYCE – kvarky. Odpověď může být ale také jiná, totiž, že se poprvé v historii fyziky setkáváme se strukturou, ve které stavební kameny a složené systémy jsou na stejné úrovni, že se setkáváme s projektem silně obhajovaným G. CHEWEM a všeobecně známým pod názvem „reciproční bootstrap“ („vzájemné šňěrování“).

Otázkou struktury protonu klademe se vším důrazem, průkazností a náklady, jaké vyžaduje fyzika vysokých energií, protože proton se v mnoha situacích nechová jako bodová částice, ale spíše jako složený systém. Co však potom váže proton dohromady? To zatím nevíme, ale příslušné síly musí být obrovské.

Velký počet hadronů

I když strukturu protonu plně nerozumíme, můžeme se alespoň zmínit o mnoha jeho vlastnostech, které strukturu naznačují. Ještě před 15 lety jsme měli celý svět vybudován ze tří základních stavebních kamenů. Pak však nastala populační exploze nově objevených částic, které se v mnoha směrech chovají jako proton. Stejně jako protony interagují totiž všechny tyto částice silně a jejich interakce jsou v podstatě způsobeny výměnou mezonů. Nyní však musíme na stejné úrovni jako mezony π uvažovat mnoho dalších mezonů.

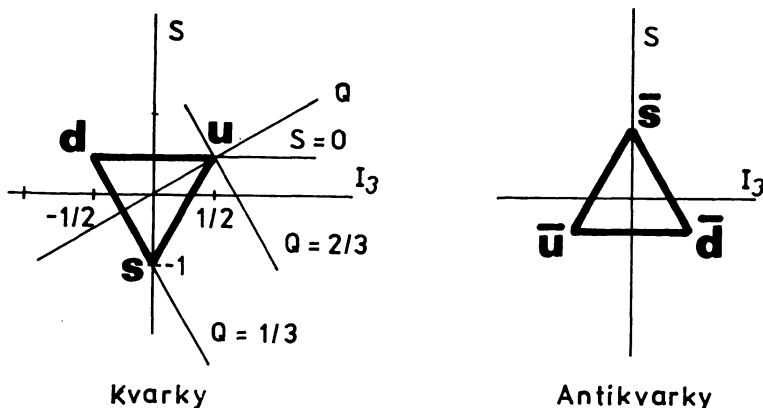
Všechny tyto částice spolu s novými mezony se souhrnně nazývají hadrony. Potom, co jsme zavedli proton jako fundamentální částici, se to může zdát divné. Avšak zvláštní a na dlouhý čas výsadní postavení protonu je dáno jeho stabilitou v běžném časovém měřítku. Na druhé straně všim, co požadují silné interakce, aby mohly zapůsobit, jsou časové intervaly tak krátké jako 10^{-23} s (tj. čas, za který světlo prolétne protonem). Z hlediska silných interakcí jsou proto částice jako Λ , Σ nebo Ξ , které všechny mají dobu života řádu 10^{-10} s, právě tak stabilní jako proton, i když se nám jeví, že žijí velmi krátce.

Současně jsme nyní také přesvědčeni, že silné interakce nemůžeme pochopit jen z dynamiky samotných nukleonů a mezonů π , ale že musíme vzít v úvahu všechny hadrony dohromady. Hadrony, jichž je nyní několik stovek, vznikají ve srážkách vyvo-

laných pomocí velkých urychlovačů. Rychle se rozpadají – mnohé z nich se střední dobou života tak krátkou, jako je typické měřítko pro hadronové jevy, totiž za 10^{-23} s. Nicméně vzhledem k silným interakcím se tyto hadrony jeví stejně důležité jako samotný proton. Proton není tedy zdaleka sám. Počet částic, které jsou uvedeny v ROSENFELDOVÝCH tabulkách, je srovnatelný s počtem jader nacházejících se v jaderných tabulkách.

Podobně jako některá jádra vypadají stejná, jeví se podobné i některé částice, analyzujeme-li jejich interakce. Proton a neutron patří dnes do rodiny osmi částic. Zbývajících 6 částic, o nichž jsme již hovořili, totiž částice Λ^0 , Σ^+ , Σ^0 , Σ^- , Ξ^0 a Ξ^- , je velmi nestabilních. Dojde-li však k silným interakcím, jejich rozpad jako by prakticky neexistovaly. Jsou způsobeny slabými interakcemi, jejichž známějším projevem je β -rozpad jader.

Jak naznačuje jejich název, jsou tyto interakce mnohem slabší než silné a dokonce než elektromagnetické, a mohou být proto při studiu hadronových jevů zanedbány. Uděláme-li to, pak proton, neutron Λ , Σ a Ξ vypadají stejně. Jestliže máme hodně částic, potom částice mezi sebou vykazují mnoho symetrie a jeví se jako rodiny sesterských částic podobně, jako to činí některá jádra nebo jaderné stavy. Tak mezony π patří do rodiny také s osmi částicemi, ve které tři mezony π^+ , π^0 a π^- hrají roli částic Σ v rodině nukleonové. Za další příklad vezměme částici známou jako Δ , která se rozpadá na proton a mezon π (pion) se střední dobou života 10^{-23} s a která byla objevena před delší dobou. Později jsme se domnívali, že Δ je členem rodiny s deseti částicemi, z nichž čtyři jsou částice Δ : Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^- . Objev posledního desátého člena rodiny, částice Ω^- , zcela utvrdil naši důvěru v příslušnou symetrii: v tzv. GELL-MANNOVU-NÉEMANOVU „eight-fold way“ („osmerocestí“).

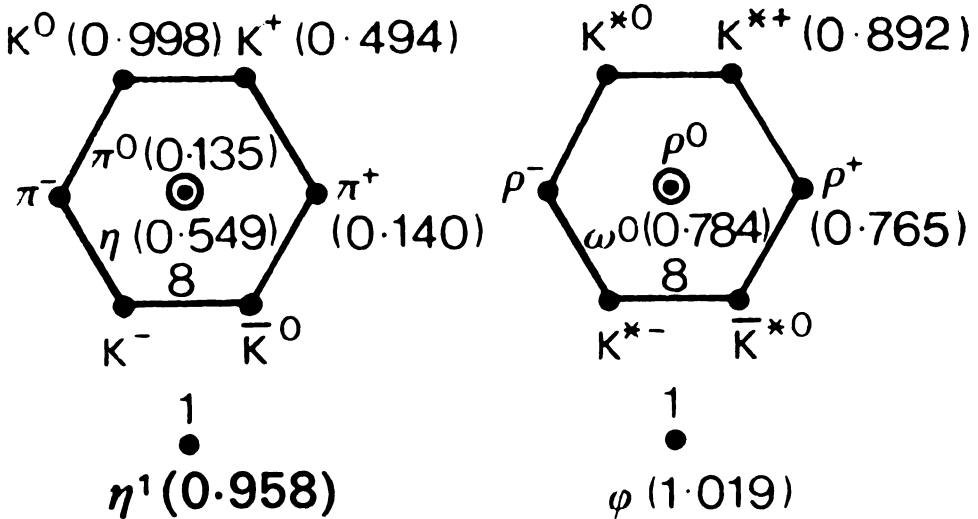


Obr. 2. Vlastnosti kvarků. Tři kvarky tvoří v diagramu, kde vynášíme na osách podivnost S a třetí složku izospinu I_3 , trojúhelník. V něm je izospinový dublet s podivností rovnou nule a se třetí složkou izospinu rovnou $+1/2$ a $-1/2$ a izospinový singlet s podivností rovnou -1 . V takovém diagramu částice mající stejný elektrický náboj Q leží na přímkách. Jeden kvark má náboj $Q = +2/3$. Ostatní dva mají náboj $-1/3$ (na obrázku omylem vyznačeno $1/3$). Vlastnosti antikvarků, ukázané ve druhé části obrázku, jsou právě opačné. Baryonové číslo kvarku je $1/3$. Elektrický náboj Q , baryonové číslo B , podivnost S a třetí složka izospinu I_3 jsou vztahu, který udává Gell-Mannova-Nishijimova formule:

$$Q = \frac{B + S}{2} + I_3.$$

Záměnou protonu a neutronu podle symetrie $SU(2)$ můžeme vysvětlit podobnosti mezi různými jádry. Klasifikační grupa, která je vhodná pro hadrony, je však větší než $SU(2)$. Je to grupa $SU(3)$ s regulární reprezentací o osmi prvcích. V jaderné fyzice můžeme od základních částic dojít k symetrii; nukleony přitom pokládáme za bázi fundamentální reprezentace grupy symetrie. Na rozdíl od toho ve fyzice elementárních částic dnes známe grupu symetrie – grupu $SU(3)$, ale s její fundamentální reprezentací nemůžeme spojovat žádné známé částice. Můžeme však přesto postulovat existenci takových „částic“ a ukázat, že jsou celkem tři. Jsou to tři fundamentální kvarky.

Jejich vlastnosti jsou uvedeny na obr. 2. Máme dva kvarky, a to u a d , které nemají podivnost a tvoří dublet vzhledem k $SU(2)$, a jeden kvark s , který má podivnost a je vůči $SU(2)$ singletem. Spojováním tří kvarků a užitím různých výběrových pravidel pro u , d a s můžeme snadno zreprodukovat podobnosti a rozdílnosti uvnitř celého oktetu nebo deketpletu částic. Např. kombinace uuu se hodí na Δ^{+++} , zatímco sss souhlasí s Ω^- . Spojováním kvarku a antikvarku můžeme podobně konstruovat oktety a singlety mezonů. Každý z osmi pseudoskalárních mezonů, mezi nimiž jsou mezony π , můžeme ztotožnit s jistou kombinací kvarků. To je provedeno na obr. 3. Každá vybraná operace symetrie $SU(3)$, která transformuje jeden mezon na druhý (řekněme π^- na K^-), může být považována za transformaci na úrovni kvarků. Je to transformace, která v našem příkladě jednoduše zamění kvark d kvarkem s .



Obr. 3. Oktet a singlet pseudoskalárních mezonů a oktet a singlet pseudovektorových mezonů (hmotnosti mezonů jsou udány v GeV). Mezon π^+ můžeme spojovat s $u\bar{d}$ -systémem, zatímco např. K^+ odpovídá systém $u\bar{s}$. Mezonům ρ^+ a K^{*+} přísluší stejné kvarkové přiřazení jako mezonům π^+ a K^+ , avšak oba kvarky jsou místo v singletním spinovém stavu (jak tomu je u pseudoskalárních mezonů) nyní v tripletovém spinovém stavu. Napodobující molekulovou fyziku, můžeme také mluvit o para a orto „kvarkoniu“. Jak je řečeno v textu, situace ve skutečnosti není tak jednoduchá, jak zachycuje obrázek 3. Izoskalární člen oktetu se totiž kombinuje s izoskalárním singletem na skutečné mezony. Tzv. ($\omega - \phi$)-směšování je rozsáhlým tématem fyziky elementárních částic diskutovaným v textu. (U K^0 má být hodnota 0,498 — pozn. překl.)

Nutno říci, že symetrie zjištěná mezi stavy částic nutně nevede na kvarkovou strukturu. Avšak jednoduchá kvarková struktura se třemi různými druhy kvarků s prakticky stejnou interakcí na pozorovanou symetrii vede. Dokáže se i vypořádat se stále rostoucím počtem hadronů, a to pomocí pouze tří fundamentálních částic.

Kvarkový model

Syntetická schopnost kvarkové představy podnítila fyziky vybudovat kvarkový model částic jako jistou obdobu modelu vypracovaného pro jádro. Kvarkový model částic má ale ztíženou situaci tím, že jsme ještě nepozorovali nic, co by bylo podobné jeho postulovaným stavebním kamenům. První a stěžejní úspěch tohoto modelu spočívá v hadronové spektroskopii – trpělivém studiu vlastností mnoha různých krátce žijících částic, vznikajících při vysokoenergetických srážkách.

Takové částice obvykle přecházejí jedna v druhou vyzářením mezonu podobně jako excitované atomy přecházejí do svých základních stavů vyzářením fotonu. Je to nová spektroskopie, ve které typický energetický rozdíl je půl GeV.*) Jestliže má původ v existenci složeného systému, pak vyžaduje velké vazbové energie, dokonce mnohem větší než i ty, které byly nalezeny v případě jaderných hladin.

Překvapivým závěrem je, že všechny dosud nalezené částice můžeme spojit buď se systémem tří kvarků, jde-li o baryon (částici, která se rozpadá na proton), nebo se systémem kvark-antikvark, jde-li o mezon. Z toho plyne, že baryony se musí seskupovat do deketetů, oktetů a singletů, ale ne do něčeho pestřejšího a že mezony jsou zase omezeny na oktety a singlety.

Existuje samozřejmě mnoho multipletů určitého druhu, které vyhovují všem dosud známým částicím. Např. existuje oktet pseudoskalárních mezonů, oktet vektorových mezonů a oktet mezonů se spinem 2 a pravděpodobně další oktety částic s vyšším spinem. Podstatné však je, že nebyl nalezen žádný větší multiplet mezonů (např. skládání dvou kvarků a dvou antikvarků by dovolilo existenci systému 27 blíže příbuzných částic).

V současné době je to tedy spíše kvarkový model než $SU(3)$ -symetrie jako celek, který vyděluje, řekněme, oktety a singlety mezonů z větších multipletů, kterými by snadno posloužila $SU(3)$ -symetrie. Kvarkový model dále připouští, že různé multiplety jsou excitovanými stavy druhých multipletů. Např. existuje oktet baryonů se spinem a paritou $5/2^+$, který můžeme pokládat za odvozený z oktetu se spinem a paritou $1/2^+$, do něhož patří proton, pomocí rotační excitace kvarkového systému jako celku. Je to velmi podobné rotačním excitacím jádra až na to, že první rotační hladina má nyní excitační energii skoro 1 GeV. Zdá se tedy, že mezi velmi mnoha hadrony zavládne na dlouhou dobu řád a jednoduchost.

Hadronová spektroskopie dává tušit, že nejjednodušší kvarkový systém musí být složen ze tří kvarků se zlomkovým nábojem**) ($2/3$ pro u a $-1/3$ pro d a s). Naznačuje

*) $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$ (pozn. překl.)

**) v jednotkách e (pozn. překl.)

dále, že nejnižší baryonové stavy (např. nukleony) mají kvarkové konfigurace, které jsou plně symetrické vzhledem k $SU(3)$ a ke spinu v soulase se symetrií $SU(6)$ popsanou níže. Na základě obvyklé statistiky bychom však dávali přednost zcela antisymetrické konfiguraci kvarků pro fermiony (částice s neceločíselným spinem, např. proton se spinem $1/2$), konfiguraci, která by však nadto měla být ještě plně symetrická vzhledem k vnitřním dynamickým proměnným. Výskyt zlomkových nábojů a špatná statistika se mohou považovat za základní potíže kvarkového modelu. Tyto potíže mohou být odstraněny v jemnějších modelech, jako jsou např. ty, ve kterých přidáváme ke kvarkovým vlastnostem „barvu“. V tomto přehledu se však omezíme na nejjednodušší model se základními kvarky uvedenými na obr. 2. Skutečnost však může být jiná.

Další úspěch kvarkového modelu spočívá ve zmíněné aproximativní symetrii $SU(6)$, ve které mezi kvarky předpokládáme síly závislé na spinu. Tím jsou multiplety grupy $SU(3)$ vnořeny do ještě větších multipletů částic s velmi blízkými vlastnostmi, ale s různými spiny. Tak nukleon $1/2^+$ je nyní uvažován dohromady s $\Delta^{++} 3/2^+$ v jednom větším multipletu.*) Podobně oktet pseudoskalárních mezonů je spojen s oktetem a singletem vektorových mezonů. Faktem zůstává, že s $SU(6)$ symetrií s orbitálními excitacemi vystačíme na celou dosud známou hadronovou spektroskopii. Všechny hadrony se tak ocitnou na prakticky stejné úrovni a jsou pouze různými systémy, které můžeme vytvořit ze tří kvarků nebo z kvarku a antikvarku.

Opuštili jsme velikou rozmanitost a složitost hadronů a dospěli do jednoduchého světa tří kvarků. To je ohromné. A přece je to dnes už 10 let, co se snažíme rozbít proton na kvarky a marně! Proč?

Dříve než se podíváme na tento problém, ukažme si snad ještě na jeho důležitý rozdíl od atomového i od jaderného případu. V obou těchto případech jsou vazbové energie ve srovnání s klidovou energií (mc^2) zúčastněných částic velmi malé. Na druhé straně u protonu se setkáváme s typickou excitační energií asi 1 GeV, a proto vazbové energie mohou být značně vyšší. Vazbové energie jsou tedy ve fyzice elementárních částic větší nebo stejné než typické klidové energie hadronů a v každém případě značně větší než klidová energie pionu. Když dodáme takové množství energie částici ve velmi vysokoenergetické srážce, může ji užít ke své excitaci nad mez „soudržnosti“. Může ji však také užít k vytvoření nových částic nebo párů částice-antičástice. A právě poslední způsob užití energie převládá. Nerozbijeme tedy proton, ale jen vytvoříme nové částice a občas dokonce i proton-antiprotonové páry.

Ve velmi vysokoenergetických srážkách se tedy proton nerozštěpuje, ale znásobuje! Přesto však bychom očekávali, že i když je rozbití protonu nepravděpodobné, že se alespoň někdy vyskytne. Potíž s tím, že k rozbití protonu nedochází, můžeme opět obejít tvrzením, že kvarky jsou příliš těžké, než aby mohly být produkovány běžně dostupnými energiemi. Se vstřícnými svazky v CERN (ISR) (obr. 1) můžeme však studovat srážky, ve kterých energie vyskytující se v protonových reakcích je více než $60 \times$ větší než klidová energie protonu. Jestliže ani v těchto srážkách kvarky nevzniknou, museli bychom je považovat za objekty mnohem těžší než objekt, který tvoří proton.

*) $1/2^+$ znamená, že nukleon má izospin roven $1/2$ a paritu $+1$ (pozn. překl.).

Rozdělení na částice a složené systémy tak jasné v atomech a jádrech by ztratilo smysl. Tak vyhneme-li se potíži nenalezení kvarku čistě energetickými argumentem, staneme okamžitě před ještě obtížnějším problémem, jak totiž popsat proton jako tříkvarkový systém, když vazbové energie mezi kvarky jsou vzhledem ke klidové energii protonu tak ohromné.

Partonová představa

Existence několika částic v mnoha ohledech podobných protonu naznačuje existenci jisté vnitřní struktury. Ještě zřejmější se zdá být tato struktura z prostorového rozložení protonu objeveného před časem v rozptylu energetických elektronů na protonech.

Rozptyl elektronu na protonu je citlivý na náboj protonu a také na jeho prostorové rozložení. Zjistilo se, že když zkoumáme proton pomocí elektronů dostatečně vysoké energie, takže mohou předat hybnosti řádu podstatné části GeV, proton se chová jako prostorový objekt o poloměru asi 1 fm. Ještě důležitější vlastnost protonu nalezneme při ještě větší energii. Proton nejdříve přechází do jednoho ze svých mnoha excitovaných stavů s podobným prostorovým rozdělením. Když jsou energie a hybnost, které mohou být předány protonu dosti veliké (obvykle větší než 1 GeV/c v těžištvém systému souřadnic) a když v souhlase s tím je při srážce produkováno mnoho částic, zjistíme, že se proton chová jako soubor bodových částic. Všechno vypadá tak, jako kdyby dodanou energii a hybnost od elektronu přebíraly konstituanty protonu, a to jednotlivě a se zachováním příslušného vztahu mezi energií a hybností a pak vytvářely pozorované koncové částice.

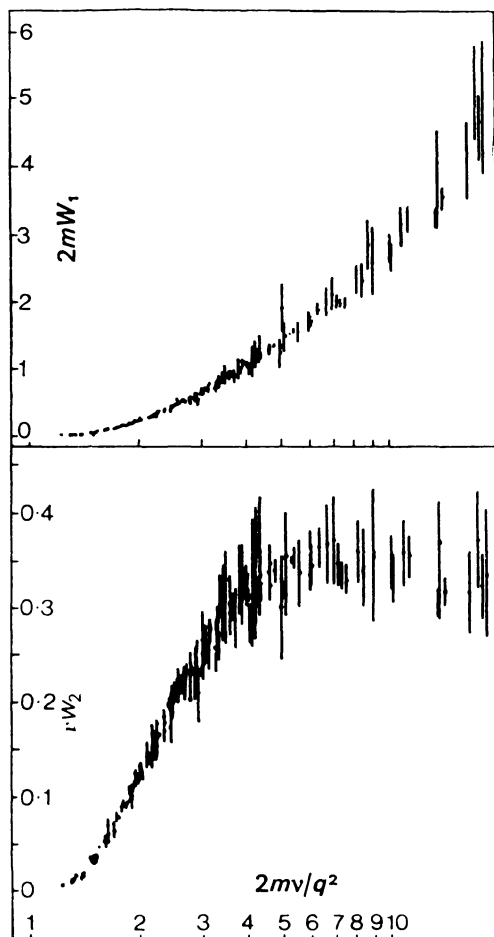
To vede ke „škálovací“ vlastnosti tzv. hluboce neelastického rozptylu elektronů. Nyní totiž nezáleží na dodané energii v krát hmotnosti protonu m , vm a čtverci přenosu hybnosti q^2 , které jsou oba vhodné relativistické invarianty, nýbrž na jejich bezrozměrném poměru mv/q^2 . Skutečně, experimentální body pro široké rozmezí hodnot mv a q^2 leží na univerzální křivce, jestliže příslušné „strukturní“ funkce, které určují vlastnosti rozptylu až na triviální kinematické členy, vyjádříme jako funkce proměnné mv/q^2 . To je znázorněno na obr. 4. Když zkoumáme proton tak vysokoenergetickými elektrony, jaké jsou k dispozici v Centru stanfordského lineárního urychlovače v Kalifornii, nechová se již jako prostorově rozložený objekt, ale jako jednoduchý objekt. Chová se jako soubor bodových částic, kterým se všeobecně říká partony.

Musíme však zdůraznit, že pomocí teorie pole můžeme dostat takové chování, aniž bychom požadovali bodové struktury protonu. Přesto zmíněné mimořádné experimentální výsledky se mohou pokládat za další silný náznak o jisté struktuře protonu.

Co bylo zjištěno před několika roky pomocí rozptylu elektronů, bylo nedávno potvrzeno též pomocí rozptylu neutrin. Neutrina se mohou rozptylovat pouze slabými interakcemi. Tak např. neutrino mající energii 1 MeV může proletět Sluncem bez nějaké větší pravděpodobnosti interakce. Studium neutrinových interakcí vyžaduje proto neutrinové svazky velké intenzity. Ty můžeme získat pomocí rozpadu pionu na miony a neutrina ve velmi vysoce intenzivních pionových svazcích z vysokoenergetických

urychlovačů. Studium neutrinových interakcí dále vyžaduje obrovské detektory, aby případná četnost výskytu nebyla pro detektor příliš malá. V CERN ve vysoce intenzivním svazku neutronů se jako detektor používá ohromná bublinová komora s těžkou kapalinou Gargamelle, která umožnila CERN získat stěžejní výsledky při studiu neutrinových interakcí. Vlastnosti škálování, se kterými jsme se setkali v případě rozptylu elektronů na protonech, zjišťujeme též při rozptylu neutronů.

Jedním z mnoha důsledků těchto vlastností je, že celkové účinné průřezy pro rozptyl neutrina (a antineutrina) na protonech mohou růst lineárně s počáteční energií. To skutečně nastává, jak ukazuje obr. 5. Možný rozsah přenosu čtverce hybnosti q^2 roste

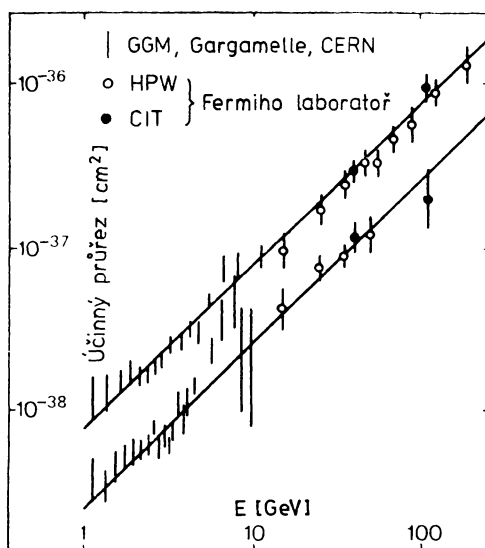


Obr. 4. Škálovací vlastnost hluboce neelastického rozptylu elektronů na protonech. Účinné průřezy jsou pro tento rozptyl většinou vyjádřeny pomocí strukturálních funkcí W_1 a W_2 , které ponechávají stranou čistě kinematické členy. Když jsou jak $2mv$, tak q^2 mnohem větší než m^2 , mohly by strukturální funkce stále záviset odděleně na mv a q^2 . Ve skutečnosti však závisí pouze na bezrozměrné veličině mv/q^2 . To je to, co očekáváme pro rozptyly na jednotlivých bodových konstituentách.

úměrně s počáteční energií E . Difúzní struktura by způsobila omezení pro velké q^2 a dala by tedy účinný průřez, který by nerostl tak rychle s energií, což by muselo být ověřeno pomocí experimentu s Gargamelle a nedávných experimentů ve Fermiho laboratoři. Stěžejním výsledkem tedy je, že ve vysokoenergetických neutrinových experimentech se proton rovněž chová jako soubor bodových částic. Rozptyl elektronů nebo neutrin na protonech s velkým q^2 je v Rutherfordově experimentu ekvivalentní rozptylu na velké úhly.

Srovnáním výsledků rozptylu elektronů s rozptyly neutrin a antineutrin můžeme dále usoudit na nutné vlastnosti bodových protonových složek – zdají se být srovnatelné s vlastnostmi kvarků. Avšak proton není jen souborem tří kvarků. Část jeho hybnosti nenesou samotné kvarky, ale spíše něco necitlivého k hluboce neelastickému rozptylu elektronů a neutrin, něco, co běžně označujeme jako „lepídlo“ (glue). Vedle tří kvarků, které v pozorovaných rozptylových procesech jasně dominují, existuje také efekt spojený s páry kvark-antikvark, efekt, který je tím větší, čím je větší předaná energie. Vedle svých uud kvarkových členů obsahuje proton do jisté míry též skrytou podivnost skrze páry $s\bar{s}$, které se v něm vyskytují spolu se stejným množstvím párů $u\bar{u}$ a $d\bar{d}$ (globální $SU(3)$ -singletové sčítání).

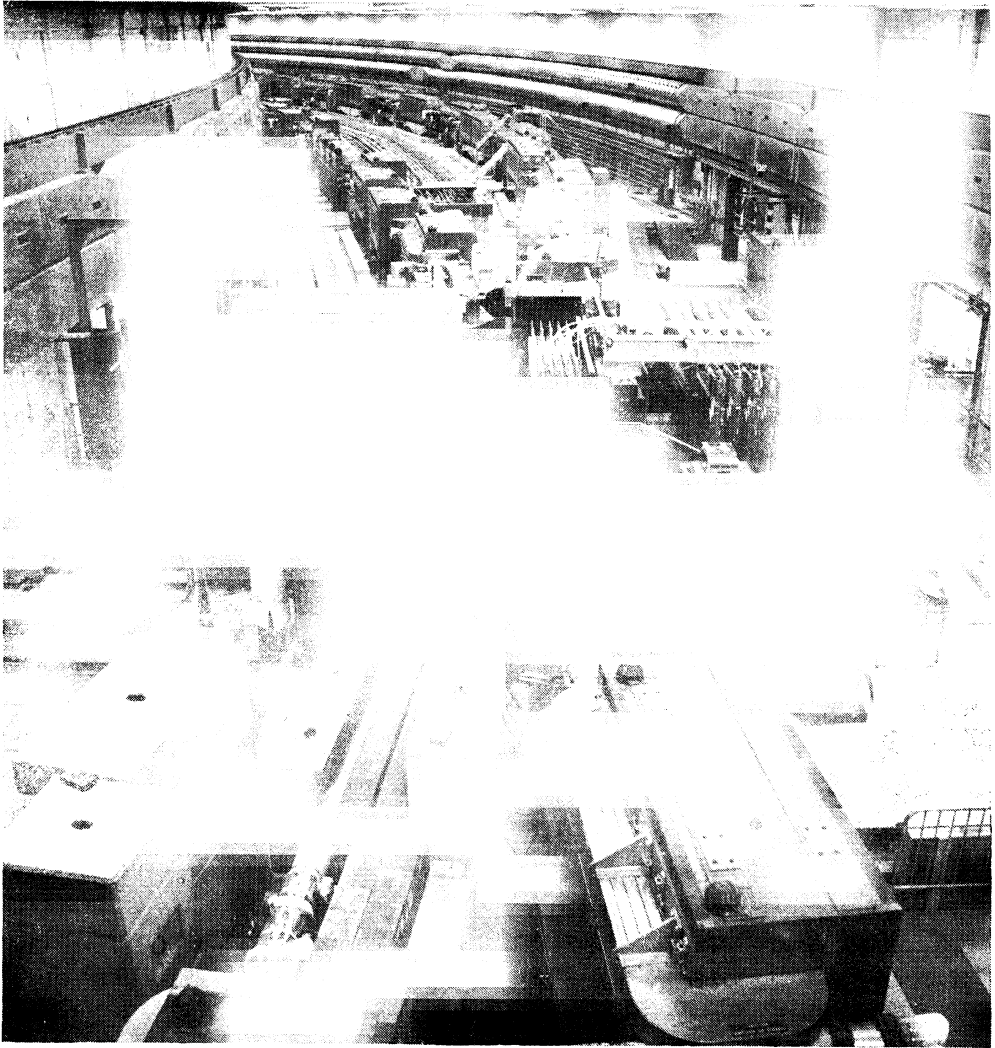
Opět můžeme poznamenat, že kvarkový model není jediný, který vysvětluje příbuznost mezi hluboce neelastickým rozptylem elektronů a neutrin. Teorie pole nabízí více vtipných možností. Nicméně všechny nedávné výsledky z rozptylu elektronů a neutrin velmi silně podporují kvarkovou představu – představu, ve které za všechno, co pozorujeme, odpovídají bodové objekty se spinem $1/2$ a zlomkovým nábojem.



Obr. 5. Celkový účinný průřez pro rozptyl neutrin (a antineutrin) v závislosti na počáteční energii neutrin E . Lineární růst je typický pro bodové efekty. Poměr účinných průřezů pro neutrina a pro antineutrina očekáváme rovný 3, pokud vlastní rozptylová centra spojujeme s kvarky uvnitř jaderného terče.

Velmi obdobně jako Rutherfordovy částice α prozkoumávaly spíše jádro uvnitř atomu než atom jako celek, prozkoumává hluboce neelastický rozptyl elektronů a neutrin spíše každý kvark protonu než proton jako celek.

Existuje ještě zcela jiný druh jevů, v nichž se opět velmi osvědčuje stejná partonová představa se třemi kvarky hrajícími hlavní roli. Jsou to jevy s velkou transverzální hybností, které byly objeveny v roce 1973 na ISR v CERN. Mnoho částic (asi 15 a hlavně mezonů π), které obvykle vznikají při velmi vysokoenergetické srážce, jsou produkovány



Obr. 6. Průnik prstenců ISR (střed obrázku) tzv. oblast I – I, místo, kde ve spolupráci CERN – Columbie – Rockefelleru a Saclay byl měřen výskyt vysokoenergetických částic (pionů) příčně emitovaných a kde ve spolupráci Bologni – CERN – Saclay a Říma se hledaly magnetické monopóly. PHOTO CERN.

s nízkou složkou hybnosti p_T kolmou k původnímu směru letu částic v těžiškovém systému souřadnic. Jejich rozdělení v p_T^2 je v prvním přiblížení exponenciální, a to se střední hodnotou p_T okolo $0,35 \text{ GeV}/c$, která je nejpřirozeněji spojována s koherentní produkcí přes celý proton mající průměr $1,5 \text{ fm}$.

Tento velmi rychlý pokles s růstem p_T však neplatí, jakmile jdeme hodně nad $1 \text{ GeV}/c$. Rozdělení prověřené asi do $6 \text{ GeV}/c$ (vyžadující 100 GeV -ový dopadající svazek částic) ukazuje, že se průběh mění, a to na průběh se zápornou mocninou p_T , který se nejčastěji spojuje s bodovým jevem. Výskyty velkých příčných hybností jsou malé. Jsou však o hodně větší, než by předpovídala naivní extrapolace chování při nízkých p_T . Nejdříve byly pozorovány na ISR v CERN a později také ve Fermiho laboratoři. Obr. 6 ukazuje experimentální uspořádání na ISR, se kterým byl jev studován během r. 1974.

Jevy s velkou příčnou hybností vyhovují z mnoha hledisek rovněž partonovému popisu, ve kterém odpovídají rozptylu partonů (kvarků) ze svazku, případně z terčové částice pod velkým úhlem. Jakmile jsou kvarky jednou rozptýleny, objeví se nakonec jako hadrony s velkou příčnou hybností, jejichž směry v podstatě odpovídají směrům rozptýlených kvarků. Tím získáváme další silný náznak bodové struktury protonu.

V současné době fyzika vysokých energií vede k provokující situaci. Všechny prověrky podporují bodovou strukturu, jež odpovídá postulovaným kvarkům, které by měly být v protonu. Ve velmi rozličných experimentech jsme zjistili, že se proton chová jako soubor navzájem nezávisle působících kvarků. Nicméně každá snaha rozbít proton na kvarkové složky až dosud neuspěla. Setkali jsme se tedy s první a druhou vlastností zmíněnou při popisu jaderné struktury. Proč jsme se však nesetkali s třetí vlastností – s možností rozbít strukturu na konstituanty?

Jednota všech interakcí

Ještě více provokující se zdá být to, že cesta z našeho rozporu by rovněž mohla poskytnout zcela nový pohled na současné rozdělení základních interakcí mezi částicemi na silné, elektromagnetické a slabé. Brilantní syntéza provedená v Maxwellových rovnicích spojila elektrické a magnetické jevy jako projevy interakce jednoho typu s jednotnou fundamentální strukturou tvaru proud \times proud. Velikost této interakce je charakterizována konstantou jemné struktury $\alpha = e^2/hc = 1/137$.

Možná, že jsme na prahu dalšího sjednocení, ve kterém by se elektromagnetické a slabé interakce ukázaly být pouze dvěma projevy ještě základnější interakce jediného typu. Jestliže tento sjednocovací přístup bude úspěšný, mohl by být dokonce rozšířen na silné interakce a dát vysvětlení, proč nepozorujeme kvarky jako skutečné částice. V současné době se toto všechno zkouší a je velmi spekulativní. Nicméně první důsledek, totiž požadavek neutrálních slabých proudů, byl potvrzen jejich objevem r. 1973 v CERN. Potvrzení dalšího, i když méně provokujícího důsledku, totiž existence nového kvantového čísla všeobecně zvaného půvab, snad bude ohlášeno co nejdříve.

První úspěšný teoretický pokus popsat slabé interakce uskutečnil FERMI pomocí interakce tvaru proud \times proud. Fermiho teorie vycházela z dobře známé teorie elektromagnetické interakce a byla úspěšná 40 let. Na úrovni této teorie existují však stále

důležité rozdíly mezi slabými a elektromagnetickými interakcemi nevyjímajíc narušení parity ve slabých interakcích. Elektromagnetické interakce jsou zprostředkovány nehmotnými fotony a mají proto nekonečný dosah. Dosah známý pro slabé interakce je srovnatelný s nulovou vzdáleností, a proto slabé interakce jsou v praxi převedeny na vazbu mezi dvěma proudy v jednom bodě. Vazbová konstanta slabých interakcí je malá a v naivním přístupu tak neexistuje potřeba uvažovat efekty vyššího řádu.

To však vede k potížím, neboť když chceme tyto efekty spočítat, zjistíme, že jsou nekonečně velké. Stejný typ nekonečnosti vzniká v kvantové elektrodynamice, kde však může být eliminován pomocí teorie renormalizace. Tento lstivý teoretický postup však s bodovými vazbami slabých interakcí nevychází. Slabé a elektromagnetické interakce se můžeme snažit sblížit tím, že předpokládáme, že bodovost slabé vazby je pouze aproximativní a že slabé interakce, podobně jako elektromagnetické interakce pomocí fotonu, jsou také zprostředkovány výměnou částice se spinem 1 nazývané mezonem W . Jestliže tato částice má dostatečnou hmotnost, interakce je prakticky bodová.

Existují dva mezony W a to W^+ a W^- , které odpovídají výměně jednotkového elektrického náboje, což bylo typické pro všechny slabé jevy známé před rokem 1973. Např. v obvyklé vysokoenergetické srážce antineutrino s protonem antineutrino se „změní“ na pozitron (nebo kladný mion v závislosti na tom, o který druh antineutrino jde), zatímco proton přejde na neutrální hadronový stav, který může být (zřídka, ale někdy) neutronem. To je odlišné od rozptylu elektronu na protonech, při kterém elektron i hadronový systém si zachovávají své odpovídající elektrické náboje.

Obecnou vlastností kvantové teorie pole je, že v každém procesu můžeme (alespoň formálně) zaměnit počáteční (koncové) částice za odpovídající koncové (počáteční) antičástice. Reakce, při níž antineutrino s protonem přejde na pozitron a neutron, je proto „jiným pohledem“ na β -rozpad neutronu, kdy neutron přechází na proton, antineutrino a elektron. Slabé interakce s nabitým a hmotným mezonem W jsou mnohem blíže elektromagnetickým interakcím, než byly v období s bodovou vazbou. Avšak tím, že zahrneme efekty vyšších řádů, nestačíme ještě eliminovat všechny potíže. Nepřekonatelnou překážkou je hmotnost W . Nehmotný foton je spojován s kalibrační invariancí elektrodynamiky, která nám dovoluje zbavit se nekonečen uvažováním procesů vyšších řádů.

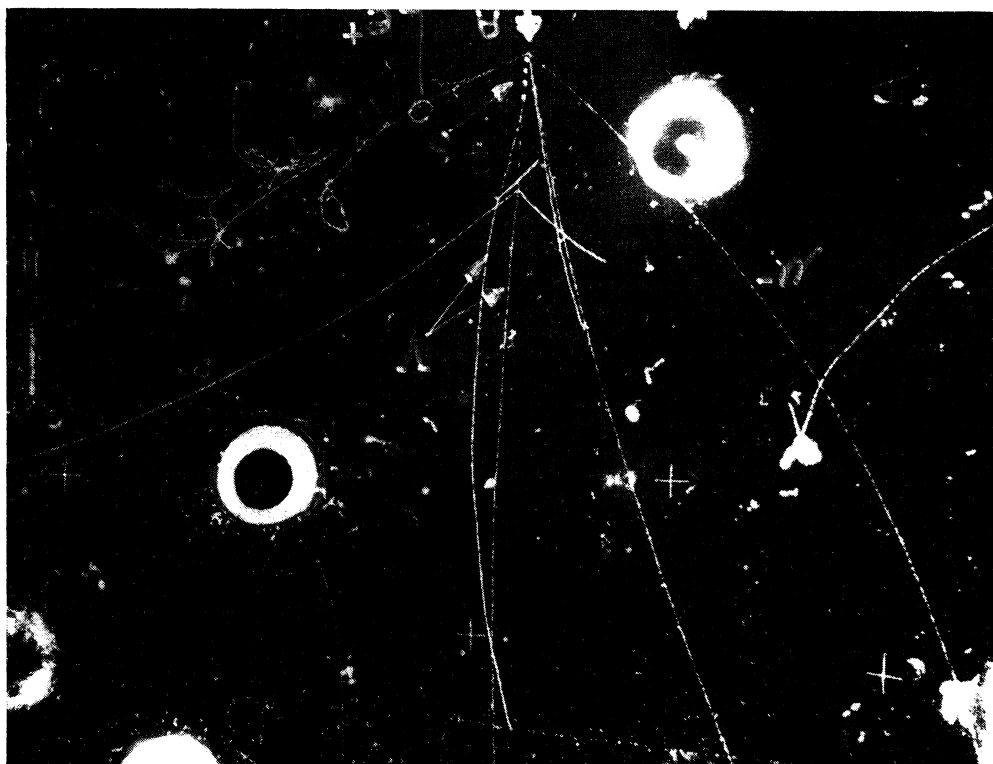
Jedním z hlavních směrů vývoje teorie během posledních několika let byly přístupy, ve kterých se studovaly teorie s kalibračními vlastnostmi, které též vyhovují hmotným vektorovým mezonům (se spinem 1). Bylo možné ukázat, že v jejich rámci eliminace obtížných nekonečen je přinejmenším zvládnutelná. Potřebné efekty vyššího řádu nejsou však vypočteny na úrovni obvyklé v elektrodynamice, kde např. gyromagnetický poměr mionu perfektně souhlasí s nejpřesnějšími experimenty ve fyzice. Pro praktické účely ve slabých interakcích vystačíme s výpočty nejnižšího řádu. Ačkoliv nová teorie nemůže být prověřena měřeními předpověděných přesnějších hodnot, je skutečnou teorií na rozdíl od předchozí čistě fenomenologické vazby, která měla smysl pouze v jisté aproximaci.

Poněvadž Weinbergova-Salamova kalibrační teorie vychází jak z neutrálních, tak i ze slabých vazeb, může sjednotit slabé a elektromagnetické interakce. Narušením původní symetrie se nabitá vazba oddělí od neutrální, která spolu s další neutrální

vazbou se rozdělí na standardní elektromagnetickou vazbu a slabou neutrální vazbu zprostředkovanou těžkým mezonem všeobecně zvaným Z^0 . Při měření slabých efektů v jejich bodové aproximaci je zatím jedinou přístupnou veličinou čtverec vazbové konstanty dělený čtvercem hmotnosti mezonu W . Za této situace slabé interakce by mohly být tak silné jako elektromagnetické. To, že se jeví jako slabé, je způsobeno velikou hmotností mezonu W (nebo Z).

Možnost sjednotit slabé a elektromagnetické interakce v jednu kalibrační teorii je velice vzrušující. Zřejmou předpovědí takové teorie byla existence neutrálních slabých proudů a ty byly nyní pozorovány. Obr. 7 ukazuje jeden případ pozorovaný v bublinové komoře Gargamelle v CERN, který může být interpretován jako rozptyl mionového neutrina na elektronu; tento proces ukazuje v pozorované četnosti výskytu na slabou neutrální vazbu.

Nejčastější projevy neutrálních slabých efektů jsou pozorovány ve srážkách neutrin s protony, kde se neutrino odrazí, místo aby se „změnilo“ na elektron nebo mion v závislosti na použitém druhu neutrina (elektronové neutrina získáme z rozpadu $K \rightarrow \pi e \nu_e$ a mionové neutrina z rozpadu $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$). Neutrální proudy, které byly prvně objeveny



Obr. 7. Interakce neutrina (A) s nukleonem v kapalině vyplňující bublinovou komoru Gargamelle CERN. Při interakci vzniká neobvyklá kombinace částic — dva leptony (mion μ^- a positron e^+) a nenabitá podivná částice S (na obrázku její dráha vytečkovaná). Podivná částice se rozpadá na dvě nabitě částice, jejichž dráhy tvoří charakteristickou V-formaci. Tato interakce neutrina může být vysvětlena přítomností částice s podivností. PHOTO CERN.

v experimentech s Gargamelle v CERN, byly též zjištěny ve dvou různých experimentech ve Fermiho laboratoři a v experimentu v Argonne.

Ačkoliv neutrální slabé jevy jsou nyní experimentálně dobře známy, jsou naproti tomu jevy, jichž se účastní hadrony, stálým zdrojem obtížných teoretických otázek. Dlouhotrvajícím argumentem proti neutrálním slabým efektům je např. malost pravděpodobnosti rozpadu $K \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Jestliže neutrální proudy skutečně existují tak, jak požadují kalibrační teorie, je otázka, proč se neprojevují v tomto už dříve dobře prostudovaném případě? To je jistě velmi závažná otázka, ale než se jí budeme věnovat, musíme ještě pro úplnost říci několik slov o možnosti, jak zahrnout do sjednocovacího schématu silné interakce.

Silné interakce lze uvažovat již v rámci speciální kalibrační teorie, která je „asymptoticky volná“. Tím se míní, že při dostatečně velké hybnosti a energii by efektivní vazbová konstanta v teorii dospěla k nule. Pak můžeme použít představu volné elementární částice (kvarku), i když se nic takového neobjevilo v jevech s malým přenosem hybnosti, na které se odvolává většina hadronové fyziky. Kvarky by byly přiměřené pro hluboce neelastické jevy obsahující velké energie a velké přenosy hybnosti, ale jevily by se zcela jinak, jestliže bychom uvažovali částice jako celek. Otázka silných interakcí by tedy nebyla vyřešena. Přesto bychom mohli uvažovat o hranici, od níž silné interakce začnou být slabými a nebudou než dalším projevem toho, co dnes známe jako interakce elektromagnetické a slabé.

Tyto myšlenky jsou velice hypotetické a nesmírně spekulativní. Jsou však provokující a hodně přispívají k nynějšímu vzrušení ve fyzice vysokých energií.

Půvab ve fyzice částic

Jak již bylo dříve řečeno, grupou symetrie hadronů je grupa $SU(3)$ zahrnující grupu $SU(2)$, s níž jsme se již setkali v jaderné fyzice, jako svoji podgrupu. Zdá se proto velmi opodstatněný další krok, a to využít důsledky ještě větší grupy symetrie – grupy $SU(4)$. $SU(3)$ -symetrie není perfektní symetrií hadronů. Rozdíly hmotností uvnitř každého multipletu grupy $SU(3)$ dosahují často 10%. $SU(3)$ není tedy tak dobrá jako symetrie $SU(2)$, která se zdá, že platí až na elektromagnetické efekty, jež jsou nevyhnutelné, ale pouze velikosti 1%. Grupa $SU(3)$ je přesto velice užitečnou symetrií. Horší, avšak větší symetrie by mohly být také velmi užitečné. Jestliže užijeme kvarkový model jako vůdčí, požaduje $SU(4)$ -symetrie vedle kvarků u , d a s ještě další druh kvarku navíc. Nový druh kvarku, kvark c , by měl stejnou (nulovou) podivnost jako kvark u , ale jednotkový půvab, zatímco kvarky u , d a s by neměly půvab žádný. $SU(3)$ -oktet mezonů je nyní částí 15pletu, který seskupuje dohromady jeden oktet a jeden singlet mezonů bez půvabu a dva triplety mezonů s půvabem 1 a -1 . Vedle protonu se musí také uvažovat půvabné baryony. Symetrie však bude špatná, a tak vzniknou důležité rozdíly hmotností v multipletu, což by mohlo vysvětlit, proč jsme ještě půvabné částice neviděli: jejich hmotnosti by byly řádu nejméně 2 GeV.

Velmi obdobně jako se podivné částice nejnižších hmotností rozpadají pouze slabě na ostatní hadrony nebo hadrony a leptonové páry (páry částic, které se vyskytují pouze

ve slabých a elektromagnetických interakcích, např. miony), mohly by se i nejnižší půvabné částice rozpadat jen slabě, a to podobným způsobem. Pak bychom museli nalézt novou třídu částic s větší hmotností chovající se podobně jako podivné částice objevené se poprvé před dvaceti lety. Proton má půvab roven nule. Avšak velmi podobně jako ho $s\bar{s}$ páry opatřují jistou podivností, opatřovaly by ho $c\bar{c}$ páry, které musí být podle $SU(4)$ -symetrie na stejné úrovni, jistým skrytým půvabem.

Příčina, proč symetrii tak spekulativní a navíc ještě zdaleka ne perfektní věnujeme v současnosti tolik pozornosti, spočívá v objevu neutrálních proudů. Jak již bylo dříve zdůrazněno, neutrální proudy jsou pozorovány v případech, kde podivnost se nemění a kde elementární proces by mohl být vazbou u nebo d kvarku k Z^0 . Neukazují se v procesech se změnou podivnosti, kde stěžejním krokem by měla být transformace kvarku s na kvark d (žádáná změna v náboji, ale změna v podivnosti). Jakmile jsme jednou zavedli mezony W , tento proces si můžeme představovat tak, že kvark s , který emituje mezon W^- , se stane kvarkem u , který reabsorbuje mezon W^- a změní se na kvark d . Ačkoliv by tento proces měl nastat, může být potlačen destruktivní interferencí s podobným procesem, ve kterém by byl dovolen v mezikroku nový druh kvarku se stejným nábojem a s příslušnou vazbou, takže by se oba efekty vzájemně vrušily.

Aniž bychom zašli do podrobností, můžeme říci, že zavedením $SU(4)$ -symetrie můžeme jednoduše a účinně vysvětlit přítomnost neutrálních slabých proudů v procesech neměnicích podivnost a jejich nepřítomnost v procesech měnicích podivnost. Není to však jediné vysvětlení. Zda nový druh až doposud neznámé částice existuje, je vzrušující otázka. Tyto částice se nyní usilovně hledají.

Zjistit skrytý půvab protonu s naprostou jistotou je patrně obtížné, protože v protonu převládají tři obyčejné kvarky. Mezony, obzvláště vektorové, mohou jej však odhalit snadněji. Jestliže by $SU(3)$ -symetrie byla dokonalá, museli bychom jasně rozlišit neutrální oktetový člen, jehož kvarková vlnová funkce má tvar $6^{-1/2}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$, od singletního s vlnovou funkcí $3^{-1/2}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$, i když oba jsou neutrální, nepodivné a samozřejmě bez půvabu. První člen souvisí pomocí $SU(3)$ -transformace se sedmi dalšími, z nichž některé jsou nabitě a některé podivné, zatímco druhý člen je invariantní vůči $SU(3)$ -transformacím. Avšak $SU(3)$ není perfektní symetrií a tak tyto dva stavy jsou smíšené na skutečné mezonové stavy. Toto míchání je uskutečněno maximálním způsobem, ve kterém jeden mezon obsahuje pouze nepodivné kvarky, zatímco druhý má pouze podivné kvarky, ačkoliv oba mezony jsou celkově nepodivné. Skutečné kvarkové vlnové funkce jsou $2^{-1/2}(u\bar{u} + d\bar{d})$ a $s\bar{s}$. První odpovídá mezonu ω , druhá mezonu φ .

Mnoho dobře známých vlastností těchto sesterských mezonů, které se nicméně liší v mnoha nápadných směrech, může být snadno vydedukováno z jejich různého kvarkového obsahu. Mezon φ jen stěží ukrývá svoji skrytou podivnost. S podivnými částicemi se váže mnohem silněji než s nepodivnými. Podobné závěry můžeme odvodit z $SU(4)$ -symetrie. Existovaly by pak tři nenabitě, nepodivné vektorové mezony bez půvabu namísto dvou, jeden by patřil do singletu a dva do 15pletu ($SU(3)$ -oket a singlet).

Hra, která byla zcela úspěšná s ω a φ , svádí předpokládat, že neutrální stavy míchající se v rámci přibližné $SU(4)$ -symetrie by se rozdělily na stav pouze z půvabných kvarků s kvarkovou vlnovou funkcí $c\bar{c}$ a na stavy ω a φ , které nemají žádné půvabné kvarky.

Třetí neutrální mezon by byl tedy celkově bez půvabu, ale se stěží utajeným půvabem. Vázal by se silně se skutečnými půvabnými částicemi a jeho rozpad by mohl být značně potlačen, jestliže skutečné půvabné částice jsou příliš těžké, aby se na ně volně rozpadal. Není tímto mezonem nově nalezená částice ψ (také zvaná J), která byla prvně pozorována díky svému rozpadu na elektron-pozitronový pár v Brookhavenu a pomocí svého vzniku v elektron-pozitronové anihilaci ve Stanfordu?

Existence tak těžkého objektu (hmotnost J/ψ je $3,1 \text{ GeV}/c^2$) relativně dlouho žijícího je pravděpodobně nejvíce vzrušující a nejzapeklitější objev posledních deseti let. Doba života J/ψ je tisíckrát delší než by měla být pro normální hadron. Co drží tuto částici pohromadě tak dlouho? Něco nám stále chybí.*)

Další čtení

Tento článek byl napsán na elementární úrovni tak, aby čtenář – nespécialista se mohl podílet na vzrušení způsobeném nejčerstvějším vývojem fyziky vysokých energií. Technické otázky byly systematicky opomenuty. Čtenář zájímavější se o podrobnosti a techničtější výklad věcí zmíněných v tomto článku může konzultovat tyto přehledné články:

Hadronová spektroskopie:	J. L. ROSNER: <i>Phys. Rep.</i> 11 (1974), 189. N. P. SAMIOS, M. GOLDBERG, B. T. MEADOWS: <i>Rev. Mod. Phys.</i> 46 (1974), 49.
Kvarkový model:	H. LIPKIN: <i>Phys. Rep.</i> 8 (1973), 173.
Partonový model:	J. KOGUT, D. SUSSKIND: <i>Phys. Rep.</i> 8 (1973), 75.
Hluboce neelastický rozptyl:	F. GILMAN: <i>Phys. Rep.</i> 4 (1972), 95.
Neutrinová fyzika:	C. L. SMITH: <i>Phys. Rep.</i> 3 (1972), 261.
Kalibrační teorie:	S. WEINBERG: <i>Scientific American</i> 231 (1974), 50. E. S. ABERS, B. W. LEE: <i>Phys. Rep.</i> 9 (1973), 1. S. WEINBERG: <i>Rev. Mod. Phys.</i> 46 (1974), 255.
Asymptotická volnost:	D. POLITZER: <i>Phys. Rep.</i> 14 (1974), 129.
Neutrální proudy:	D. B. CLINE, A. K. MANN, C. RUBBIA: <i>Scientific American</i> 231 (1974), 108.

A konečně brilantní popis úspěchu kvarkového modelu v hluboce neelastickém rozptylu, potřebu půvabu a reference k dalším originálním pracím viz:

A. DE RUJULA, H. GEORGI, S. L. GLASHOW, H. R. QUINN;
Rev. Mod. Phys. 46 (1974), 391.

*) Poznámenejme, že mezon J/ψ skutečně interpretujeme jako vázaný stav $c\bar{c}$ čili jako mezon se skrytou půvabností. Za jeho objev byla udělena dr. RICHTEROVI a dr. TINGOVI, vedoucím výzkumných skupin ve Stanfordu a Brookhavenu, Nobelova cena za fyziku v roce 1976. Dnes známe kromě mezonu J/ψ další tři mezony se skrytou půvabností. Konečně v roce 1976 byly objeveny první mezony a baryony se zjevnou půvabností — částice, které jsou vázanými stavy kvarků, z nichž pouze jeden má nenulovou půvabnost (pozn. překl.).

O evidenci nové častice se referuje ve studiích:

J. J. AUBERT et al.: Phys. Rev. Lett. 33 (1974), 1404.

J. E. AUGUSTIN et al.: Phys. Rev. Lett. 33 (1974), 1406.

C. BACCI et al.: Phys. Rev. Lett. 33 (1974), 1408.

Přeložil Jiří Niederle

Ergodické prelúdium

Beloslav Riečan, Bratislava

Ergodická teória, ostatne podobne ako mnohé iné matematické teórie, je zaujímavá z dvoch stanovísk: na jednej strane pracuje ergodická teória s rozsiahlym a elegantne používaným matematickým aparátom (teórie miery, funkcionálnej analýzy a pod.); na druhej strane poskytuje bohaté možnosti aplikácií, štatistickou fyzikou počnúc a trebárs teóriou čísel končiac.

V tomto článku sa budeme zaoberať jedným zo závažných problémov ergodickej teórie, ktorý bol riešený v posledných rokoch, problémom izomorfizmu Bernoulliho dynamických systémov a s tým súvisiacim pojmom entropie. Článok by mohol mať názov „O entropii a izomorfizme Bernoulliho dynamických systémov“. Ale to by bol titul vonkoncom nepríťažlivý.

Najprv trochu terminológie. Budeme pracovať s *pravdepodobnostným priestorom*, t.j. trojicou (X, S, P) , kde X je neprázdna množina, S je σ -algebra podmnožín množiny X a P je *pravdepodobnostná miera* na S . Pripomeňme, že σ -algebra je systém podmnožín množiny X s týmito vlastnosťami: 1. $\emptyset, X \in S$. 2. Ak $A \in S$, tak aj $X - A \in S$. 3. Ak $A_n \in S$ ($n = 1, 2, \dots$), tak aj $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in S$. Pravdepodobnostná miera je funkcia $P: S \rightarrow \mathbb{R}$ vyhovujúca týmto podmienkam: 1. $P(\emptyset) = 0$, $P(X) = 1$. 2. $0 \leq P(E) \leq 1$ pre všetky $E \in S$. 3. Ak $A_n \in S$ ($n = 1, 2, \dots$) a $A_n \cap A_m = \emptyset$ ($n \neq m$), tak $P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)$.

Zobrazenie $T: X \rightarrow X$ sa nazýva mieru zachovávajúce, ak pre všetky $E \in S$ je aj $T^{-1}(E) \in S$ a $P(T^{-1}(E)) = P(E)$.

Štvorica (X, S, P, T) , kde (X, S, P) je pravdepodobnostný priestor a T je mieru zachovávajúce zobrazenie sa nazýva tiež *dynamický systém*.

Uvedme jednoduchý príklad. Nech X je jednotková kružnica, S najmenšia σ -algebra obsahujúca všetky oblúky na X a P taká miera na S , že pre ľubovoľný oblúk E platí $P(E) = l/2\pi$, kde l je dĺžka oblúka E . (To preto, aby $P(X) = 1$.) Transformácia T nech je otočenie o nejaký uhol α . V komplexnom zápise $T(z) = cz$, kde $\alpha = \arg c$.