

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Victor F. Weisskopf

Kvantová teorie a elementární částice

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 13 (1968), No. 3, 135--150

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137624>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1968

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>

KVANTOVÁ TEORIE A ELEMENTÁRNÍ ČÁSTICE*)

VICTOR F. WEISSKOPF

„...Když uvažuji o všech těchto věcech, zdá se mi pravděpodobné, že Bůh z počátku zformoval hmotu v podobě pevných, masivních, tvrdých, neprostupných, pohyblivých částic takových rozměrů, tvarů i jiných vlastností a v takových poměrech k prostoru, aby co nejlépe vyhovovaly konečnému cíli, pro nějž byly zformovány; tyto původní částice jsou pevné, jsou nesrovnatelně tvrdší než kterákoli porézni látka, která je z nich složena; jsou dokonce tak tvrdé, že se nikdy neopotřebí nebo nerozbijí na kousky; žádná obyčejná síla není schopna rozdělit to, co sám Bůh stvořil. Protože tyto částice zůstávají celé, mohou vytvářet tělesa jedné a téže povahy a struktury po všechny věky. Kdyby se však opotřebovávaly nebo rozbíjely na části, měnila by se podstata věcí, která je na nich závislá. Voda a Země, složené ze starých, opotřebovaných částic a jejich úlomků, by teď neměly tutéž podstatu a strukturu, jakou měly Voda a Země složené při stvoření z celých částic. A protože podstata může přetrvávat, jsou změny materiálních věcí založeny pouze v rozličném rozdělení a novém slučování a pohybu těchto neměnných částic.“ (Isaac Newton, „Opticks“, vyd. B. Cohen, New York 1952, str. 400.)

V tomto velmi dobře známém a právem slavném prohlášení Newton uznává logickou nutnost elementárních částic, aby mohl vysvětlit existenci látek s velmi dobře definovanými vlastnostmi jako je „Voda a Země“, kovy a minerály, tekutiny a plyny, s charakteristickými a stále se obnovujícími vlastnostmi. Hmotu se musí skládat z nějakých entit, na nichž tyto kvality spočívají. Tyto entity se nyní nazývají atomy a molekuly. Newton však stojí před problémem: elementární složky hmoty musí mít specifické vlastnosti, které jsou neměnné v čase; neměly by se „opotřebovávat užíváním“, měly by být imunní vůči jakémukoli hrubému zacházení. Tento problém řeší předpokladem, že tyto elementární složky hmoty jsou „nesrovnatelně tvrdé“ a obyčejnými silami nerozrušitelné. Dnes však víme, že tomu tak není. Atomy mohou být rozrušeny zcela obyčejnými silami, např. při zapálení zápalky, ale nicméně si zachovávají svou vnitřní podobu. Samy se regenerují, vždycky když se dosáhne původních

*) Přednáška prosloušená na zasedání American Physical Society ve Washingtonu dne 23. dubna 1965.

podmínek. To, co Newton nazývá „prvním stvořením“, nastává všude a v kteroukoli dobu. Setkáváme se s velmi dobře definovanými tvary, i když sama jednotka není stálá.

Nyní známe to, co neznal Newton: že neustálé obnovování vlastností se zakládá na kvantové mechanice, totiž na velmi jednoduché představě o *souvislosti energie se symetrií a tvarem*. Kvantová mechanika vyžaduje, aby stavy s nejnižší energií měly nutně také jednoduché tvary, které jsou určovány příslušnou symetrií interních podmínek uvnitř soustavy. Tato symetrie je tedy činitelem, který určuje tvar. Ve světě atomů existují dvě rozhodující symetrie. Jednou z nich je *symetrie prostoru, rotační a translační*, druhá je *symetrie permutací*, projevující se např. v identitě (záměnnosti) elektronů.

Prostorová symetrie určuje charakter a tvar atomových stavů. Připouští skalární vlny s jednou složkou, spinové vlny se dvěma složkami atd. Tvar stavů vyplývá ze symetrie jaderného Coulombova pole: stavy s nejnižší energií musí být popsitelné jednoduchými sférickými funkcemi.

Permutační symetrie připouští dvě alternativy: kvantový stav může být symetrický nebo antisymetrický vzhledem k výměně částic. Druhou alternativu, která přivádí k Pauliho principu, zvolila příroda pro elektrony. Nyní víme, že nutným důsledkem toho je spinorový charakter elektronových vln. To je zdrojem rozmanitosti forem atomů, neboť elektrony jsou nuceny zaujímat vyšší a různé formy (hladiny), jestliže nižší jsou obsazeny. Pauliho princip nahrazuje v mnoha směrech klasickou představu neprostupnosti nebo tvrdosti. Dvě identické částice, které se podřizují tomuto principu, nemohou nikdy zaujímat totéž místo. Je proto rozumné zachovat termín „částice“ pro entity, které se podřizují Pauliho principu.

Spektrum energetických hladin atomů odráží tyto základní symetrie. Charakteristické skupiny hladin (multiplety), jejich násobnost, vlnový tvar a jiné vlastnosti jsou určeny symetrií. Takovým způsobem dojdeme ke klasifikačnímu schématu atomových hladin pomocí kvantových čísel spinu a úhlového momentu.

Je důležité mít na zřeteli, že tyto symetrie neurčují všechny vlastnosti kvantových stavů. Určují obecný tvar a mnoho jiných rysů, jako je např. struktura spektra hladiny a podrobnosti týkající se pravděpodobnosti přechodů. Nedávají ani rozměr ani energie kvantových stavů. Tyto vlastnosti jsou určeny velikostí a podstatou sil, jimiž jsou částice uvnitř soustavy vázány. Znalost symetrie soustavy sama nepostačuje pro úplný popis soustavy; k tomu je nutno znát skutečné dynamické podmínky.

Vraťme se k Newtonovým úvodním poznámkám. Odstraňuje kvantová mechanika atomu úplně obtíž, kterou Newton uvádí? Při rozboru této otázky dospíváme k důležitému pohledu na původ fundamentálních tvarů v přírodě: vnitřní tvar a stále se obnovující vlastnosti atomů jsou možné bez předpokladu, že atomy jsou nesrovnatelně tvrdé. Takovou odpovědí by však Newton zcela uspokojen nebyl, neboť náš závěr se opírá o existenci jiných částic, o existenci elektronů a jader, které samy mají vnitřní vlastnosti, jako je hmota, náboj, spin a magnetický moment. Otázka tedy

vyvstává znovu na nové úrovni. Jsou složky atomů nesrovnatelně tvrdé? Existuje obyčejná síla, která je může rozdělit?

Pokud jde o jádra, je odpověď známa. Jádra mohou být rozdělena obyčejnou silou; bylo zjištěno, že jádra jsou složena z protonů a neutronů. Vnitřní tvary a formy jader jsou opět určovány *týmiž symetriemi* jako tvary atomů. Proto je jaderná fyzika po mnoha stránkách podobná atomové fyzice, např. ve slupkové struktuře, multipletní struktuře spekter atd. Jaderné kvantové stavy jsou však ovládány *dodatečnou symetrií*, kterou je nezávislost jaderných sil na povaze nukleonu, ať je to proton nebo neutron. Tato dichotomie je analogická dichotomii dvou směrů spinu, a proto tato dodatečná symetrie má invariantní formu vzhledem k rotaci symbolického spinu, tzv. *izotopického spinu*.

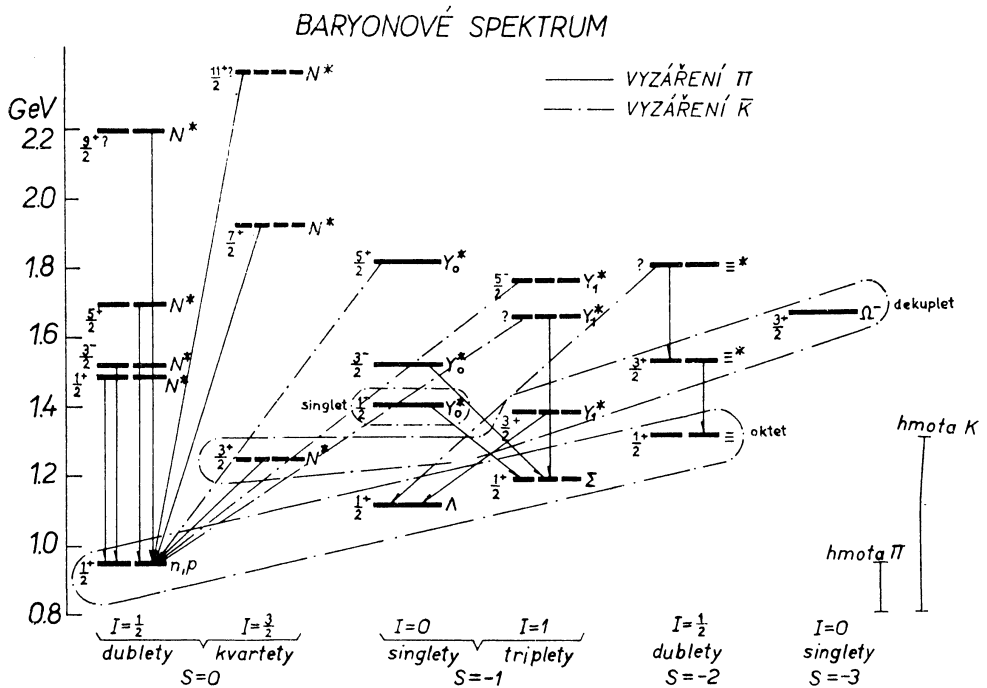
Jaderné kvantové stavy mají tedy navíc jedno charakteristické kvantové číslo, které dovoluje seskupování jaderných hladin do supermultipletů, které odrážejí tuto novou symetrii.

Izotopická symetrie sem vnáší nový rys: multiplety obsahují stavy různých nábojů, to znamená že izobarická jádra různých nábojů patří k témuž spektru a mohou být uvažována jako stavy téže soustavy. Bylo by možno uvést zde ještě jinou okolnost: v atomech jsou přechody mezi hladinami spektra provázeny alespoň v izolovaných systémech vyzářením nebo absorpcí světelného kvanta. V atomovém jádře se setkáváme s novým způsobem přechodu od vzbuzeného stavu ke stavu s nižší energií, a to vyzářením leptonového páru, tj. dvojice složené z elektronu a neutrina. Takové přechody se samozřejmě objevují mezi stavy s různým nábojem. Nehledě na to a na dostatečnou symetrii, je jaderná struktura a dynamika velmi podobná struktuře a dynamice atomů.

Zde znovu musíme mít na zřeteli, že symetrie určují pouze tvar kvantových stavů a jejich seskupování do multipletů. Skutečná velikost stavů a charakteristické energie jsou určovány příslušnými silami. Proto je nanejvýše zajímavé srovnávat navzájem rozměry a energie v atomech a jádrech. Atom je udržován pohromadě elektrostatickými silami, jejichž potenciál je dán vztahem e^2/r a $e^2/hc = 1/137$. Z toho plyne, že atomové rozměry jsou řádu Bohrova poloměru $a = h^2/me^2$ a atomové energie jsou řádu Rydbergovy konstanty $R \approx me^4/h^3$, kde m je hmota elektronu. Jádro je udržováno pohromadě jadernými silami, jejichž potenciál je poněkud složitější, ale jeho podstatná složka má Yukawův tvar $(g^2/r) \cdot [\exp r/r_0]$, kde $g^2/hc = 0,08$ a r_0 je dosah jaderných sil. Jestliže budeme na okamžik předpokládat, že exponenciální faktor se rovná jedné, dostaneme tentýž druh potenciálu jako v atomech a mohli bychom očekávat, že rozměr jádra bude řádu „jaderného Bohrova poloměru“ $a_N = h^2/Mg^2 = 2,5 \cdot 10^{-13}$ cm, kde M je hmota nukleonu a energie jádra bude řádu „jaderné Rydbergovy konstanty“ $R \approx Mg^4/h^3 = 6$ MeV. Tyto hodnoty dávají opravdu dobrou orientaci co do rozměrů a energií atomového jádra. Skutečnost, že a_N je téhož řádu jako dosah jaderných sil, ospravedlňuje vynechání exponenciálního faktoru v Yukawově síle.

Byl by v tomto případě Newton uspokojen? Ne zcela, neboť počet elementárních

částic je omezen v podstatě na tři: proton, neutron, elektron (mezi částice nepočítáme kvantum světla, protože je to kvantum elektromagnetického pole a podřizuje se statistice Boseho; neutrino neuvádíme proto, že nikde nevystupuje jako složka hmoty). Ale existence těchto částic nicméně zůstává předpokladem: mají vlastnosti „dané Bohem“ a mohly by být „nesrovnatelně tvrdé“, a proto by používáním neměnily své vlastnosti.



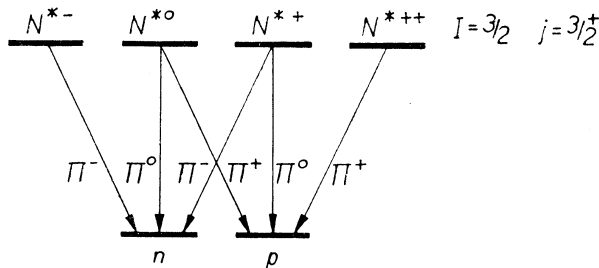
Obr. 1. Spektrum energetických stavů baryonu. Izotopický spin I a podivnost S jsou uvedeny dole, obyčejný spin a parita jsou uvedeny zleva od hladiny, symbol je vpravo. Izotopická multiplicita; jsou udány také přechody s vyzářením mezonu a některé multiplety SU(3).

Podívejme se nejprve na situaci kolem protonu a neutronu. Zatím ještě nikdo nerozdělil nukleon. Toto stadium nemá ještě svého Rutherforda. Zdá se však být pravděpodobné, že nukleon vůbec není „nesrovnatelně tvrdý“. Náznaky vnitřní struktury jsou jasně patrné; existuje *spektrum excitovaných stavů nukleonu*. V literatuře se obvykle neoznačuje tímto názvem, ale pozorované jevy mohou být stěží jinak vysvětleny. Co pozorujeme? Je-li nukleon vystaven účinku jakéhokoli svazku částic vysokých energií, přemění se na stavy s krátkou dobou života a vysokou energií, jež jsou známy pod různými názvy jako *hyperony* nebo *rezonance*. V dalším budeme užívat názvu *baryon* pro entitu, která se objevuje ve formě protonu nebo neutronu nebo jejich vzbuzených stavů. Ve spektru baryonových stavů (obr. 1) figurují proton a neutron jako základní stavy — tvoří dvojici základního stavu. Přesně řečeno,

neutron je též vzbuzeným stavem protonu. Všechny ostatní stavy mohou být získány tak, že nukleonu, který je v základním stavu, dodáme nezbytnou excitační energii v té či oné formě. Některé vzbuzené stavy mají různé náboje v porovnání se základním stavem; některé mají různou *podivnost* nebo *hypernáboj*, – novou kvalitu, objevující se poprvé v souvislosti s těmito jevy. Vzbuzené stavy přecházejí do základního stavu jedním nebo několika kroky tím, že emitují mezony π , mezony K , světelná kvanta nebo dvojice elektron-neutrino (dvojice *leptonů*).

Nabitě mezony a leptonové páry jsou nositeli nábojů, a proto jsou emitovány, když existuje nábojový rozdíl mezi vzbuzeným a základním stavem; mezony K jsou kromě toho také nositeli podivnosti a jsou emitovány, mění-li se podivnost. Mezony K nesou kladnou jednotku podivnosti, mezony \bar{K} pak nesou její zápornou jednotku.

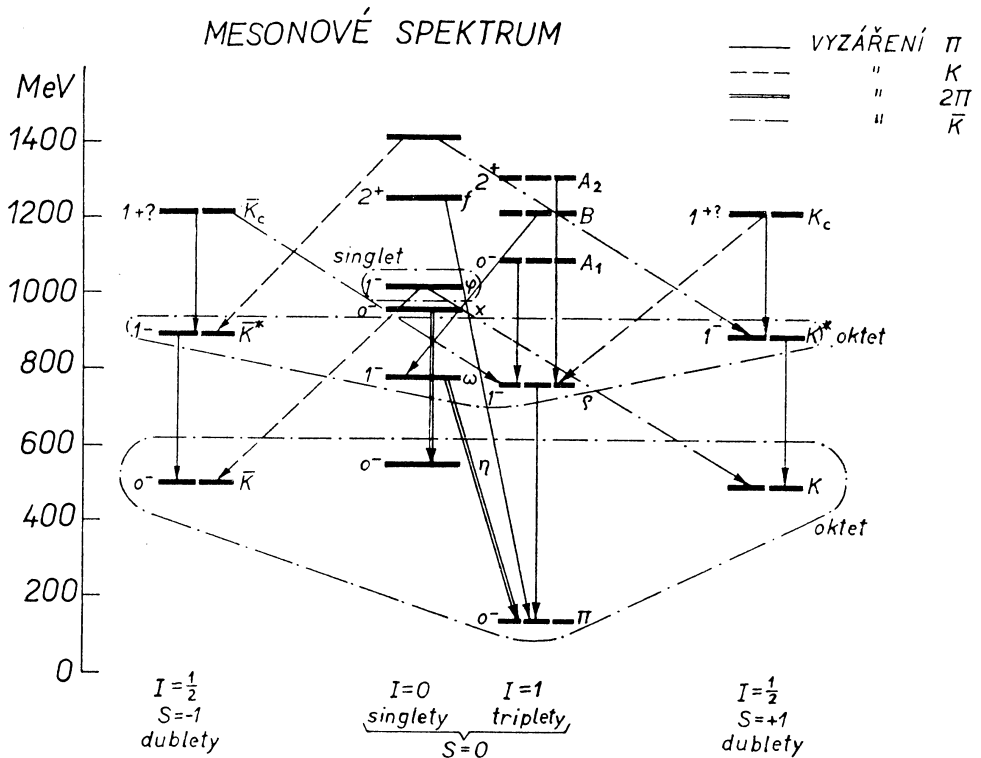
Přechody mezi kvantovými stavy v atomech se uskutečňují převážně vyzářením nebo absorpcí světla, tj. vazbou s elektromagnetickým polem. V atomových jádrech pozorujeme kromě vyzařování světla také vyzařování leptonových párů (dvojice elektron a neutrino), které vznikají vazbou s leptonovým polem ve slabých interakcích. Ve spektru baryonů nacházíme kromě těchto dvou druhů emise také přechody, při nichž jsou emitovány mezony. Tato emise se uskutečňuje silnou interakcí nukleonů s mezonovým polem. Měli bychom si uvědomit, že všechny tři vazby vystupují aktivně v kterémkoli z těchto tří případů. Avšak energetické rozdíly mezi atomovými stavy jsou příliš malé, než aby dovolily vyzářením leptonových párů, pro něž je zapotřebí energie nejméně 0,51 MeV, poněvadž jedním z leptonů musí být elektron. Rozdíly mezi jadernými stavy jsou dosti velké pro vyzářením leptonových párů (beta-radioaktivita), ale jsou příliš malé pro vyzářením mezonů, neboť nejmenší hmota mezonu je přibližně 140 MeV. Avšak při přechodech ve spektru baryonů mohou vznikat kromě světelných kvant a leptonových párů též mezony.



Obr. 2. Přechody mezi stavy $(3)2, 3(2)$ a základním stavem baryonu.

Uvedme několik příkladů přechodů mezi stavy nukleonu: nejjednodušším příkladem je vyzářením mezonu π při přechodu prvního vzbuzeného stavu baryonu, což je multiplet s izotopickým a normálním spinem rovným $3/2$. Tento stav má tutéž podivnost jako stav základní; přechod je proto doprovázen emisí mezonu π . Náboj emitovaného mezonu π je závislý na nábojovém rozdílu stavů, mezi kterými se přechod uskutečňuje (obr. 2). Jiným příkladem může být přechod z vysoce vzbuzené-

ho stavu s podivností, která je odlišná od podivnosti základního stavu: měl by být vyzářen mezon K , aby byl vyrovnán rozdíl v podivnosti. Zvláštní situace nastává v případě nižších stavů o různé podivnosti, označovaných symboly Σ , Λ a Ξ . Do základního stavu nemohou přejít vyzářením mezonom K , protože hmota mezonom K je větší než rozdíl energií. Tyto stavy by proto mohly být stabilní, kdyby zachování podivnosti bylo přesným zákonem (jako zachování obyčejného náboje). Ve skutečnosti se však podivnost zachovává ve všech interakcích s výjimkou interakcí slabých.



Obr. 3. Spektrum energetických stavů mezonom. Izotopický spin I a podivnost S jsou uvedeny dole, obyčejný spin a parita zleva od hladiny, symbol je zprava. Izotopická multiplicita; jsou udány také přechody s vyzářením mezonom a některé multiplety SU(3).

Proto existují velmi pomalé přechody z těchto stavů do základního stavu s vyzářením mezonom π nebo leptonových párů, zprostředkované slabými interakcemi. Z toho plyne, že nejnižší stavy s podivností odlišnou od nuly, jsou metastabilní a pomalu se rozpadají na jediný stabilní stav, jímž je proton.

Vzbuzení těchto metastabilních stavů probíhá většinou v dvoustupňových procesech: nejdříve je při srážce nebo absorpci mezonom π nabuzen nukleon do jednoho z vyšších stavů beze změny podivnosti a potom nastává přechod ke stavu s rozdílným hypernábojem, přičemž je vyzářen mezon K . To se nazývá asociovaná produkce,

neboť konečný produkt je složen ze dvou entit s opačnou podivností vzbuzeného baryonu a mezonu.

Experimenty s pomocí umělých urychlovačů částic vysokých energií vedly nejen k odkrytí spektra vzbuzených stavů nukleonu, ale bylo objeveno nové spektrum, spektrum mezonů neboli bozonové spektrum (obr. 3). Pečlivá analýza mezonů vznikajících ve srážkách částic vysokých energií odhalila, že mezon π a mezon K nejsou jediné formy, v nichž se mezony vyskytují. Existuje celá řada vzbuzených stavů označovaných různými písmeny; jsou to mezon ρ , mezon ω , mezon η atd., mezi nimiž mezony π a K jsou nejnižší stavy. Ve skutečnosti ani mezon π ani mezon K samy nejsou skutečně stabilní. Rozpadají se slabými interakcemi na leptony. Z toho plyne, že by měly být považovány za opravdové základní stavy mezonového spektra jenom v případě, jestliže se zanedbají slabé interakce.

Při přechodech ze vzbuzeného stavu k nižšímu je rozdíl energie vyzářen také nejčastěji ve formě mezonů. Například tzv. mezon ρ se rozpadá na dva mezony π . Můžeme to interpretovat jako přechod od ρ -mezonového stavu k nižšímu π -mezonovému stavu s vyzářením jiného mezonu π . Na obr. 3 jsou zobrazeny nejdůležitější mezonové kvantové stavy, které jsou až dosud známy a současně jsou uvedena jejich kvantová čísla. Zde podobně jako v baryonovém spektru nacházíme tatáž kvantová čísla jako v jaderných spektrech – obyčejný i izotopický spin a paritu a také nové kvantové číslo – podivnost.

Existence takových vzbuzených stavů mezonu patrně není tak neočekávaná, jak by se mohlo zdát. Uvažujme o této situaci z hlediska analogie mezi kvanty světla a mezony. Obě entity jsou kvanta pole; prvá z nich, kvanta elektromagnetického pole, jsou spolu se svým zdrojem (nábojem) popsána malou konstantou jemné struktury $a^2/hc = \frac{1}{137}$; je to slabá vazba. Vazba mezi jaderným polem a jeho zdrojem (nukleony) je mnohem silnější. Odpovídající veličina G^2/hc je přibližně 15. Je mnohem větší než veličina $g^2/hc \sim 0,08$, které se užilo při vyšetřování velikosti jaderných sil mezi jádry. Za zvláštní vlastnost jaderných sil se považuje, že jsou poměrně slabé mezi nukleony, jejichž relativní impuls je nerelativistický, jak je tomu, jde-li o pohyb uvnitř jader. Pro tuto zvláštní situaci je tato vazba zmenšena faktorem $g^2/G^2 = m_\pi/2M$, kde m_π je hmota mezonu π a M je hmota nukleonu. Tento faktor má však poměrně velkou hodnotu při obecných podmínkách, jako např. pro pole působící mezi částicemi s velkým relativním impulsem nebo mezi částicemi a antičásticemi. Právě vzhledem k této okolnosti může existovat teorie jaderné struktury, založená na poměrně slabě interagujících systémech protonu a neutronu bez ohledu na vyšší baryonové stavy. Kdyby důležité konstanty interakce v jaderné struktuře byly tak velké jako G , byla by jaderná excitace řádu baryonové excitace; jaderná fyzika a fyzika elementárních částic by byla v tak těsném vztahu jako mezonová a baryonová fyzika.

Velmi silná vazba mezi polem a jeho zdrojem může vést k důsledkům, z nichž některé mohou být pochopeny pomocí extrapolace z elektrodynamiky. Je známo, že např. dvě kvanta světla spolu interagují slabě. Kdyby však vazebná konstanta byla větší než jedna, interakce by se mohla stát silnější a byla by srovnatelná s energií

kvanta. Nepřekvapilo by pak, jestliže by se zjistily stavy, v nichž by bylo navzájem vázáno několik kvant pole. Takové svazky*) jsou patrně vhodným popisem podstaty vzbuzených mezonových stavů. Zůstává otázka, proč podle analogie se světelným kvantem neexistuje žádný mezon s klidovou hmotou rovnou nule. Je to též důsledek silné interakce nebo je podstatný rozdíl mezi elektromagnetickým a mezonovým polem? To je nejzajímavější problém, který až dosud nebyl vůbec vyřešen.

Výše uvedená interakce světelných kvant vyplývá ze skutečnosti, že dvě kvanta mohou vytvořit virtuální elektronpozitronové páry. Protože vazebná konstanta mezi nukleony a mezony je velká, stavy virtuálních párů by měly mnohem důležitější úlohu v mezonových stavech. Opravdu by nebylo vhodné považovat mezonové stavy za stavy systému baryon-antibaryon. Nemůže být podstatného rozdílu mezi svazkem kvant pole a stavem soustavy baryon-antibaryon, poněvadž prvé z nich mohou produkovat druhé a naopak. Protože existují silné interakce, každý takový svazek bude obsahovat značný podíl párů baryon-antibaryon se stejným spinem a symetrií.

Můžeme zde dodat, že baryon lze také uvažovat, jako by byl obklopen virtuálními páry baryon-antibaryon. Silné mezonové pole v okolí baryonu musí konec konců vyvolat vznik virtuálních párů. Fyzikální baryon a fyzikální mezon jsou ve skutečnosti nejsložitější soustavy, které mohou být popsány jako směs mnoha různých stavů: obsahují jakýkoli počet baryonových párů a mezonových svazků ve shodě s kvantovými čísly. Základní rozdíl mezi baryonovými stavy záleží v úhrnném počtu B přítomných baryonů. Spektrum baryonů obsahuje všechny stavy hmoty, v nichž se toto číslo rovná jedné (antibaryony jsou počítány záporně), spektrum bozonů obsahuje stavy s $B = 0$. Spektrum stavů s $B > 1$ by obsahovalo spektra jader s počtem nukleonů $A = B$ a také spektra izobarických hyperjader. Takové spektrum by mělo hrubou i jemnou strukturu. Jemné struktury vyplývající ze skutečnosti, že jeden nebo více nukleonů jsou ve vzbuzeném stavu, jsou obyčejná spektra jader a hyperjader vybudovaná nad hrubou strukturou.

Zde poznáváme, proč v mezonovém spektru jsou dokonce i nejnižší stavy nestabilní a rozpadají se přes slabou interakci na páry leptonů, kdežto základní stav baryonového spektra, proton, je skutečně stabilní stejně tak jako základní stavy celého spektra s $B > 1$. Baryonové číslo B je veličina, která se zachovává ve všech interakcích; z toho plyne, že pouze mezony mohou mizet rozpadem na leptony; baryony musí existovat věčně jako záruka stability našeho světa.

Pohlížíme-li takto na baryony a mezony, neváháme říci, že mezon není nic jiného než daný stav soustavy baryon-antibaryon, tj., že jakýkoli daný stav baryonu není nic jiného než kombinace jiného baryonového stavu a několika mezonů. Jinými slovy: kterýkoli z těchto stavů lze považovat za kombinaci jiných stavů. Ctížádostivý pokus o dosažení vnitřně nerozporného popisu skupiny částic tímto způsobem je známý pouze pod názvem „metody šněrovadla“ („Bootstrap method“); požaduje se, aby

*) Tímto termínem nejsou míněny „svazky“ elementárních částic vycházející z urychlovačů částic, ale soustavy navzájem interagujících kvant pole (pozn. překl.).

hmoty a interakční konstanty byly takové, aby vedly k získání vnitřně nerozporných výsledků při kterékoli z možných kombinací.

Složitě podstaty fyzikálního baryonu nebo mezonu se dnes užívá pro vysvětlení interakčních procesů výběrem zvláštních rysů smíšeného okolí částic, které mohou být podstatné pro určité interakce. Např. srážka, v níž jedna jednotka náboje nebo podivnosti se přenáší od jedné částice na druhou, je pak vysvětlena jako výměna jednoho mezonu, který tyto vlastnosti přenáší. Takové polokvantitativní metody jsou čas od času úspěšné při výkladu několika charakteristických faktů experimentální povahy. Snažíme se vybrat typický Feynmanův diagram, který představuje jeden z mnoha možných mechanismů interakce a připisujeme mu větší důležitost než všem jiným, které jsou možné. Tento výklad se uvádí pod jménem *periferálního procesu*.

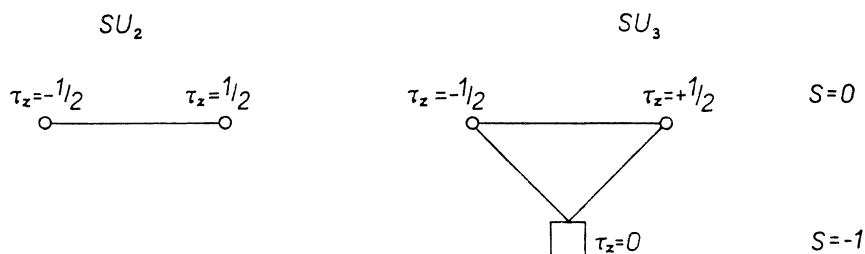
Obě nová spektra, spektrum baryonů a spektrum mezonů, nejsou stále ještě náležitě objasněna. Zdá se, že ukazují na nějakou vnitřní strukturu těchto entit a ve stejném smyslu jako atomové i jaderné spektrum jsou odrazem vnitřní dynamiky atomu i jádra. Jde-li o jádro, známe však dynamiku; víme, že atomové spektrum představuje kvantové stavy pohybu elektronu v Coulombově poli; je nám známo, že jaderná spektra představují kvantové stavy jaderného pohybu při vzájemném přitahování nukleonů. Tato představa umožňuje stanovit pravidla symetrie, která určují příslušná kvantová čísla a jim odpovídající multiplety; umožňuje také (alespoň v principu) vypočítat energie, velikosti a jiné vlastnosti kvantových stavů.

Jiná je situace vzhledem ke spektrům baryonů a bozonů. Nemáme dosud žádnou konečnou představu o jejich dynamickém základu. Nemůžeme proto předpovědět pravidla symetrie, která by mohla být převládající. Empirické zkoumání spektra odhaluje však s určitostí multipletní struktury, které ukazují platnost nebo přibližnou platnost jistých symetrií v dosud neznámé dynamice. Jaké jsou tyto symetrie? Především můžeme každému stavu připsat úplný moment hybnosti J , který přivádí k obyčejné $(2J + 1)$ – násobné degeneraci. To je zřejmě odraz rotační symetrie v této situaci a důsledek platnosti našich základních kvantově mechanických představ. Rozpadová schémata nestabilních konfigurací vykazují tytéž geometrické tvary vyjádřené jednoduchými sférickými funkcemi, které jsou typickými tvarovými prvky této symetrie. Ve skutečnosti zde máme více příležitosti k přímému určení momentu hybnosti přímo z geometrického tvaru než při studiu atomových nebo jaderných spekter. Je to tím, že v procesech při vysokých energiích jsou částice produkovány častěji v polarizovaném stavu než při nízkých energiích.

Je nesnadné zjistit také multiplety izotopického spinu, charakteristické skupiny hladin s téměř stejnou energií, které se odlišují pouze elektrickým nábojem. Dublet základního stavu (neutron-proton) je toho příkladem; tři mezony π , tj. π^+ , π^- , π^0 , jsou dalším příkladem. Zdá se, že nábojová nezávislost objevená v jaderné struktuře se přenáší do baryonových a bozonových struktur (nebo spíše pozorovaná nábojová nezávislost v baryonových a mezonových strukturách je základním faktem, z něhož by mohlo vyplývat, že interakce mezi nukleony, a tedy také jaderná struktura jsou též nábojově nezávislé). Nejzajímavější je však zjištění přítomnosti dodatečné sy-

metrie: ta má co činit s hypernábojem nebo podivností. Jak bylo již dříve uvedeno, každému kvantovému stavu nukleonu a bozonu může být připsáno kvantové číslo podivnosti. Je zřejmé, že kvantové číslo podivnost má důležitou úlohu při uspořádání těchto stavů. Je zde něco, kde by se odrážela tato nová symetrie?

Tato nová symetrie byla nedávno objevena a je známá pod názvem $SU(3)$ symetrie. Grupa $SU(3)$, na níž tato nová symetrie spočívá, je zobecněním grupy $SU(2)$. Grupa $SU(2)$ je speciální unitární grupou se dvěma základními stavy a je dobře známa jako grupa, na které spočívají formalismy obyčejného a izotopického spinu. Je založena na dichotomii dvou základních stavů, tj. páru proton-neutron, a analyzuje vlastnosti jaderných soustav, odvozené z invariance vzhledem k výměně mezi touto základní dvojicí. Je dobře známo, že tento formalismus přivádí k multiplení struktuře spektra. Máme ovšem základní dublet proton-neutron (s izotopickým spinem $1/2$); dále máme soustavu dvou nukleonů, kde vznikají singlety a triplety s izotopickým spinem 0 a 1 , a konečně soustavu tří nukleonů, kde vznikají dublety a kvartety s izotopickým spinem $1/2$ a $3/2$ atd.



Obr. 4. Zleva: dva základní stavy $SU(2)$, které mají třetí složku izotopického spinu $\tau_z = \frac{1}{2}$ a $-\frac{1}{2}$. Zprava: tři základní stavy $SU(3)$, základní pár $SU(2)$ a třetí stav se $S = -1$ a $\tau_z = 0$.

Grupa $SU(3)$ vychází z „trichotomie“ tří stavů, z nichž dva představují základní izotopický dublet s nulovou podivností a třetí stav je entita, jejíž izotopický spin je roven nule, ale která nese jednotku podivnosti, obvykle považovanou za zápornou (viz obr. 4). Je zřejmé, že při prvních pokusech v tomto směru jsme jako základní stavy tohoto fundamentálního tripletu identifikovali proton, neutron a hyperon. Brzy bylo zřejmé, že situace je ve skutečnosti rafinovanější a zajímavější.

Podívejme se na spektrum baryonů. Zde zjišťujeme izotopické spiny $I = 1/2$ a $3/2$ spolu s podivností $S = 0$; zjišťujeme $I = 0$ a 1 s $S = -1$; $I = 1/2$ s $S = -2$ a dále $I = 0$ a $S = -3$. Co to znamená? Svědčí to o skutečnosti, že baryony se chovají tak, jako by byly kombinací tří entit, které jsou členy základní trichotomie. Tyto entity dostaly ošklivý název „kvarky“. (Nenechme se zmást skutečností, že čísla „tři“ se užívá dvěma různými způsoby. Za prvé – „kvark“ existuje ve třech základních stavech, za druhé – předpokládá se, že baryon je kombinací tří kvarků.) Podívejme se, jak se to projevuje. Jsou tři druhy kvarků: pár s izotopickým spinem $I = 1/2$ a podivností $S = 0$ a třetí kvark s izotopickým spinem $I = 0$, ale s podivností

$S = -1$. Jaké druhy baryonů můžeme sestavit, jestliže každý baryon musí být kombinací tří kvarků? Jestliže všechny tři kvarky jsou typu $I = 1/2$ a $S = 0$, dostaneme soustavy s $I = 1/2$ nebo $3/2$, ale s podivností $S = 0$; jestliže dva kvarky jsou typu $I = 1/2$ a $S = 0$ a jeden je typu $I = 0$, $S = 1$, dostaneme soustavy s $I = 0$ nebo 1 a $S = -1$; jestliže dva kvarky jsou typu $I = 0$, $S = -1$, dostaneme zřejmě soustavy s $I = 1/2$ a $S = -2$; jestliže všechny tři kvarky jsou typu $I = 0$, $S = -1$, dostaneme $I = 0$ a $S = -3$. To je přesně to, co pozorujeme ve spektru baryonů.

Podívejme se nyní na spektrum bozonů. Zde pozorujeme následující charakteristické vlastnosti: a) symetrii vzhledem ke kladné a záporné podivnosti: kterákoli částice v jedné skupině má svou antičástici v druhé skupině; b) skutečnost, že bozony s podivností $S = 0$ jsou svými vlastními antičásticemi; c) zjišťujeme pouze hodnotu $I = 1/2$ pro $S = 1$. Ukazuje to na skutečnost, že bozony se chovají tak, jako by byly kombinací jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Jestliže oba kvarky jsou typu $I = 1/2$ a $S = 0$, dala by taková kombinace vznik entitám s $I = 0$ nebo 1 a $S = 0$, které by byly svými vlastními antičásticemi. Jestliže jeden z kvarků je typu $I = 0$ a $S = 1$, dostaneme mezon s izotopickým spinem $I = 1/2$ a podivností $S = +1$ nebo -1 , a to v závislosti na tom, zda kvark nebo antikvark je druhého typu. Kombinace $S = +1$ a $S = -1$ jsou pak navzájem jedna k druhé antičásticemi.

Kvantitativnější využití těchto představ vyústilo ve stále překvapivějším souhlasu s pozorovanými fakty. Jestliže např. předpokládáme, že dynamické podmínky, které udržují tyto hypotetické kvarky pohromadě, jsou invariantní vzhledem k záměně jednoho ze tří typů kvarků jiným, můžeme odvodit supermultipletní strukturu pro hladiny soustav tří kvarků a soustavy kvark-antikvark. Formalismus ukazuje, že první soustava umožňuje vznik singletů, oktetů a deкупletů a druhá soustava vznik singletů a oktetů. Baryonový oktet by např. byl složen z protonu, neutronu a tří hyperonů Σ , jednoho Λ a dvou Ξ . Dekuplet by se skládal z deseti pozorovaných baryonových stavů s celkovým momentem hybnosti $3/2$. Jeden z bozonových oktetů by obsahoval tři mezony π , dva mezony K , dva mezony \bar{K} a mezon η (viz obr. 1 a 2).

Předpoklad úplné ekvivalence těchto tří typů kvarků by vedl k výsledku, že členové multipletů mají všichni tutéž hmotu. Ve skutečnosti tomu tak není; liší se v energii mnohem více než členové multipletů izotopického spinu, které jsou ve skutečnosti podgrupami multipletů $SU(3)$. Rozštěpení energie mezi těmito multiplety však sleduje jistou pravidelnost, která je právě pravidelností předpověděnou formalismem $SU(3)$ pro případ existence slabých sil, jež narušují tuto symetrii.

Toto rozštěpení může být reprodukováno — zhruba vzato — jednoduchým předpokladem o narušení symetrie v tom smyslu, že kvark, který přenáší podivnost, je těžší nežli druhé dva. To by mohlo vysvětlit obecnou tendenci vzrůstu hmoty s růstem absolutní hodnoty podivnosti. Podrobnější úvahy dovolují také zreprodukovat rozštěpení hmot mezi členy multipletu se stejnou podivností. Přesnost, s níž se tyto předpovědi splňují, je nanejvýš překvapující a vedla k předpovědění a objevu baryonového stavu s podivností $S = -3$, slavné Ω -částice. Předpovědi aproximativní symetrie $SU(3)$ se neomezují pouze na štěpení energetických hladin; tato symetrie

jako dráhový moment hybnosti. Analogie izospinu a obyčejného spinu, která je založena na dichotomii základních stavů, se hroutí v relativistických podmínkách.

Úspěchy nových symetrií aplikovaných na popis stavů elementárních částic jsou zcela přesvědčivé. Skutečně se zdá, že stavy baryonu a mezonu jsou uspořádány podle přesného řádu, který nám nyní začíná být jasný. Jsou seskupeny do multipletů, které jsou charakteristické pro tříčásticové soustavy nebo pro soustavy částice-antičástice, vytvořené z jistých jednoduchých hypotetických jednotek. To však v zádném případě neznamená, že baryon a mezon jsou skutečně vytvořeny z kvarků stejným způsobem, jako jsou atomy utvořeny z jader a elektronů. Triplet kvarků slouží ke konstruování složitějších multipletů pozorovaných ve spektru. Následující analogie může pomoci k pochopení situace: kvantum světla nese jednotkový spin; nejjednodušší spin je však $1/2$ a jednotkový spin můžeme chápat, jako kdyby vznikl kombinací dvou entit se spinem $1/2$. Z toho nutně nevyplývá, že kvantum světla musí být soustava dvou částic se spinem $1/2$.

Z existence multipletů $SU(3)$ nebo $SU(6)$ lze odvodit jisté závěry. Vnitřní dynamika mezonů a baryonů je ještě neprozkoumaná, ale zdá se být zřejmé, že zákony, které tuto dynamiku řídí, musí být přibližně invariantní vzhledem k těm transformacím, které odpovídají záměně jednoho typu kvarku druhým. To je logický obsah pozorované invariance $SU(3)$ nebo $SU(6)$. Přibližná povaha této invariance je důležitá: pozorované pravidelnosti ve štěpení multipletů jsou typické pro narušení invariance, ale jen pro její malé narušení. Ačkoli skutečné energetické rozdíly jsou značné — činí několik desetin GeV — jsou poměry rozštěpení takové, jaké bychom mohli zjistit, kdyby byly aspoň způsobeny slabou interakcí. To naznačuje, že mezi těmito entitami působí dvě „síly“: jedna „síla“, která je invariantní vzhledem k $SU(6)$, je mimořádně silná a jí odpovídající energie jsou značně vyšší než 1 GeV; druhá „síla“, která není invariantní vzhledem k $SU(6)$, ale je podstatně slabší a způsobuje štěpení multipletů.

Objevení těchto nových invariancí v žádném případě neřeší tedy problém struktury nukleonů a mezonů. Naopak ukazuje, že problém je mnohem obtížnější, než se zdálo. Zdá se, že dynamika vztahující se k vnitřní struktuře má co činit s energiemi mnohem vyššími, než s jakými až dosud pracujeme. Je pravda, že spektrum, jak ho známe dnes, začíná mít smysl; ukazuje se však, že to není nic jiného než jemná struktura základního stavu skutečné věci. Většina až dosud objevených vzbuzených stavů spolu těsně souvisí; přísluší témuž multipletu, což znamená, že jsou v podstatě týmž stavem viděným z různých směrů nějakého abstraktního prostoru. Mezi vlastnostmi, které u nich pozorujeme, zjišťujeme proto jednoduché vztahy.

Nukleon odhalil nyní známé spektrum, a proto jsme mohli doufat, že máme před sebou důležité součásti pro pochopení jeho struktury; podobně Balmerův vzorec spektra vodíku dal klíč k jeho dynamice. Nyní se zdá, že to, co víme dnes, odhaluje jenom účinky slabší a patrně méně důležité části dynamiky. Účinky hlavní části by mohly být skryty v oblasti mnohem vyšších energií. Uviděli jsme vrchol a domnívali jsme se, že je to nejvyšší bod pohoří; když jsme na něj vystoupili, stanuli jsme před skutečným vrcholem, zahaleným závojem tmavých mraků.

Newtonova otázka tedy ještě není zodpověděna. Základ pro neměnné vlastnosti nukleonů zůstává stále ještě neznámý. Ale byly nalezeny symetrie dávající přesnější tvary a možná, že jsme na cestě k hlubšímu chápání důvodů existence nukleonů. Newtonovi však ještě dlužíme odpověď týkající se elektronu. Vlastnosti této částice se zdají být v mnoha směrech jednodušší, protože tato částice se nezúčastňuje přímo souhry nově objeveného světa baryonů a mezonů. Elektron interaguje se zbytkem světa pouze prostřednictvím elektrického pole a slabých interakcí. Ale k uspokojení Newtonovy a naší vlastní zvědavosti může být řečeno jenom velmi málo o důvodech, proč má elektron ty vlastnosti, které pozorujeme. Je pravda, že dnes chápeme lépe než dříve vztah mezi elektronem a elektromagnetickým polem. Kvantová elektrodynamika nám dovoluje vypočítat všechny jevy tohoto typu se zdánlivě libovolnou přesností. Ale této dokonalosti se dosáhlo tím, že jsme se zřekli jakýchkoli nároků na porozumění náboji a hmotě elektronu. Ty jsou „renormalizovány“ k jejich experimentálním hodnotám. Neznalost nás ještě nutí předpokládat, že tyto podstatné rysy jsou nám dány *ab initio*, aniž bychom pro ně měli nějaké vysvětlení. K zhoršení situace nám příroda poskytla druhý druh elektronu, muon, který se liší od obvyčejného jenom hmotou, jak se nám dnes zdá. Důvody pro tuto duplicitu jsou ještě zcela skryté.

Ještě záhadnější jsou úlohy, které mají tyto dva elektrony ve slabé interakci. Předpokládáme, že všechny známé částice navzájem mezi sebou interagují pomocí univerzální slabé interakce. Jejím nejvýraznějším rysem je skutečnost, že jakýkoli proces interakce je spojen s výměnou náboje. Interaguje-li elektron s nukleonem, přenáší svůj náboj na nukleon a přechází do nenabitého stavu: stává se neutrinem. Nejobvyklejší formou tohoto procesu je beta-rozpad, v němž např. proton se stane neutronem a je vyzářen pár pozitron-neutrino. Zde je vyzáření pozitronu ekvivalentní absorpci elektronu; tento proces tedy odpovídá srážce „nalétávajícího“ elektronu s protonem, během níž se jejich náboje vymění. Těžký elektron se chová přesně tak, jako jeho lehčí protějšek i se zřetelem na slabé interakce. Náleží mu nenabitá forma, neutreto nebo muonové neutrino, o němž bylo nyní definitivně zjištěno, že se liší od neutrina provádějícího elektron.

Až dosud nebyl objeven ani nejmenší příznak vnitřní struktury leptonů. Elektromagnetické interakce oboj druhů elektronu dosud neodhalily žádnou odchylku od bodového náboje a neexistuje nic takového jako je spektrum leptonových stavů, s výjimkou dvou forem – nabitě a nenabitě.

Dalším závažným rysem slabé interakce je nezachování parity. Levotočivé a pravotočivé procesy nejsou ekvivalentní. Oba druhy neutrin se skutečně vždy objevují se spinem opačně orientovaným vzhledem k jejich pohybu (levotočivé šrouby). Až do nedávna byla tato asymetrie zmírňována skutečností, že antičástice vykazují přesně opačné vlastnosti ve svých interakcích; např. antineutrino se chová jako pravotočivé šrouby. Z toho plyne, že procesy slabých interakcí zachovávají invarianci, jestliže pravo-levá inverze je spojena s transformací částice – antičástice (tzv. CP-invariance). Později se však i o této invarianci začalo pochybovat, a to na základě experimentů s rozpadem mezonů K .

Baryony jsou podrobeny slabým interakcím ve všech kvantových stavech. Podivnost nebo izotopický spin se v těchto interakcích nezachovávají. Bylo velmi zajímavé pozorovat, že slabé interakce baryonů ve vyšších kvantových stavech těsně souvisejí se slabými interakcemi protonu a neutronu. Tyto vztahy znovu vyzvedávají ekvivalenci různých baryonových stavů na základě symetrie SU(6).

Slabé interakce nám předkládají jiný fundamentální problém: naše současné chápání procesů interakce vyžaduje nějaké pole pro přenos interakce, jako je elektromagnetické nebo mezonové pole. Existuje takové pole pro slabé interakce? Nedávné hledání takového odpovídajícího kvanta tohoto pole přineslo negativní výsledek. Znamená to, že hmota tohoto kvanta je vyšší než hranice, které by bylo možno dosáhnout pomocí dnešních urychlovačů (zhruba dvě protonové hmoty), anebo že naše koncepce obyčejných polí nelze aplikovat na slabé interakce?

Pokusme se shrnout to, co můžeme dnes dát jako odpověď na Newtonovu otázku o důvodech pro neměnné vlastnosti přírody. Charakteristické a dobře definované struktury atomů a jader jsou založeny na symetrii kvantových stavů těchto složených jednotek. Jenže stabilita jejich složek je dosud nedostatečně osvětlena. Jsou dva typy entit, s nimiž se zde setkáváme: jsou známy pod názvem *leptony* a *hadrony**). Leptony zahrnují dva typy elektronů v jejich nabitě a nenabitě podobě, kdežto hadrony zahrnují všechny baryony a mezony. V souhlase s našimi znalostmi jsou tyto entity podrobeny vzájemným interakcím čtyř různých typů, které seřadíme podle jejich síly: gravitace, slabé interakce, elektromagnetismus a silné interakce. Gravitační vynecháváme z našich úvah, protože její úloha ve světě elementárních částic je zcela neznámá.

Slabé interakce existují mezi všemi těmito entitami včetně leptonů a hadronů; elektromagnetické interakce nacházíme mezi všemi částicemi, které nesou elektrický náboj nebo magnetický moment; silné interakce se vyskytují jenom mezi hadrony. Dnes nemáme představu, zda existuje nějaká vnitřní struktura hadronů, proto není jasné, zda silné interakce by se měly uvažovat jako interakce působící mezi hadrony nebo mezi jejich složkami.

Symetrie interakcí určuje mnohé z vlastností těchto jednotek, a proto jsou podstatnými činiteli udávajícími tvar. Je velice zajímavé pozorovat, že počet symetrií vzrůstá se silou interakce. Všechny z interakcí jsou podřízeny translační i rotační symetrii prostoru, do něhož jsou vnořeny. To je symetrie, která se nám zdá zcela přirozená. Zákony zachování energie, hybnosti a momentu hybnosti jsou přímým důsledkem těchto symetrií. Všechny interakce se podřizují také dvěma dalším zákonům zachování, kterým zatím dobře nerozumíme: zachování elektrického náboje a zachování počtu baryonů a leptonů. Avšak parita a podivnost se nezachovávají ve slabých interakcích; zachovávají se pouze v těch interakcích, které jsou silnější nežli slabé interakce; zachování izotopického spinu platí jenom pro silné interakce; symetrie SU(6) platí pouze pro silné interakce, ale existuje relativně slabší část těchto interakcí, která symetrii SU(6) narušuje (Tab. I.).

*) Termínu hadron poprvé použil L. B. Okun na konferenci v CERNu 1962; je odvozen z řeckého $\alpha\delta\rho\sigma$ — silný (pozn. překl.).

Tabulka I.

Čtyři typy interakcí a jejich symetrie

	Translace Rotace	náboje baryonu Zachování	Zachování parity	Zachování podivnosti	Zachování izospinu	SU_6
Slabé interakce	X	X				
Elektromagnetické interakce	X	X	X	X		
Silné interakce	X	X	X	X	X	
Velmi silné interakce	X	X	X	X	X	X

Čím silnější je interakce, tím více symetrií existuje. Je tento pozoruhodný fakt důležitý pro konečné vysvětlení existence elementárních částic? Může se stát např., že jistý počet principů symetrie vyžaduje zvláštní dynamiku, která pak určí vlastnosti fundamentálních jednotek. Může se také stát, že hadrony a leptony vůbec nejsou konečné struktury; hadrony mohou být složité struktury složené z takových částic jako dříve uvedené kvarky. Kdyby tomu tak bylo, pak by proton i neutron byly cosi jako „molekuly“ složené z fundamentálních částic; jaderné síly mezi nukleony by byly cosi jako Van der Waalsovy síly, jakýmsi nepřímým výsledkem mnohem silnějších interakcí uvnitř „molekuly“. Pak by se základní problém elementárních částic znovu objevil na vyšší úrovni při otázce: proč existují kvarky? Je velmi pravděpodobné, že skutečné rozřešení tohoto problému bude mít novou a zcela neočekávanou formu.

Je vhodné uzavřít tyto poznámky jiným prorockým tvrzením J. Newtona, jehož aktuálnost je v dnešní situaci téměř zlověstná:

„Nejmenší částice hmoty se mohou spojovat pomocí nejsilnější přitažlivosti a sestavovat větší částice se slabším silovým působením; mnohé z těchto větších částic se mohou dále spojovat a sestavovat ještě větší částice s ještě slabším silovým působením a tak dále v různých posloupnostech, až se celá řada zakončí největšími částicemi, na nichž závisí procesy v chemii i barvy přírodních těles; spojováním takových částic se vytvářejí tělesa značných rozměrů. V přírodě tedy existují činitele schopní stlačovat částice těles dohromady, a to velmi silným přitahováním. Záležitostí experimentální filosofie je objevit tyto činitele“ (Newton, Opticks, vyd. B. Cohen, New York 1952, str. 394).

Přeložil Jaroslav Sedlák