Anomálny prejav kvantovej chromodynamiky?

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Skôr, ako sa zastavíme pri titulku nášho článku, určite bude vhodné čitateľa oboznámiť, ako sme na tom dnes s poznaním niektorých zákonitostí mikrosveta, na akých základoch stojí teória s takým romantickým názvom ako "kvantová chromodynamika" a čo a ako kvalitne popisuje.
Nuž začnime malou exkurziou.
Vo svete elementárnych častíc len máloktorá interakcia, alebo ak čitateľ radšej používa slovo sila, odolávala tak dlho svojmu teoretickému popisu, ako interakcia *silná*. Pre úplnosť pripomeňme, že poznáme štyri *základné* sily, a to gravitačnú, elektromagnetickú (magnetická a elektrická sila je len jej špecifickým prejavom), slabú a silnú. [1] Každá z týchto interakcií, ľudove povedané, má na svedomí niektorý z podstatných rysov nás obklopujúceho sveta. Napr. gravitačná umožňuje vznik vesmírnych telies, elektromagnetická je "tvorcom" biológie (a čiastočne chémie), slabá umožňujúca rozpad neutrónu, je zodpovedná za potlačenie antihmoty (narušenie priestorovej a nábojovej symetrie malo za následok pri tzv. "veľkom tresku", t.j. niekoľko okamihov po vzniku nášho Vesmíru, potlačenie antibaryónov voči baryónom) a silná, za vznik napr. atómových jadier (a teda chémie). Z pohľadu na ich intenzitu je najslabšia gravitačná, po nej nasleduje slabá, elektromagnetická a silná. Rozdiel intenzít medzi prvou a poslednou v nami uvedenom poradí je enormný, dosahujúci číslo 10^{43}! Historicky je zaujímavé, že ako prvá bola popísaná gravitačná sila (po pravde, sa ale niet prečo čudovať, veď už staré národy prikladali pozorovaniu hviezd nesmierny význam - vieme, že hlavne vďaka dlhodobým pozorovaniam svojich predchodcov, a hlavne dánskeho astronóma a astrológa Tycho de Brache, Johannes Kepler mohol ako prvý sformulovať na dvore cisára Rudolfa II v Prahe svoje zákony, ktoré boli nosnou kostrou pre práce Isaaca Newtona.) Je zaujímavé, že aj keď gravitačná interakcia bola ako prvá popísaná zrejme neobyčajne "šťastne" jazykom modernej fyziky (mám na mysli všeobecnú teóriu relativity), ktorý jej "vzal" voľné parametre, ktoré sprevádzali Newtonov zákon, dodnes, ako jediná, odoláva svojmu kvantovo-mechanickému popisu. Tu prvenstvo získala elektromagnetická sila, a to v podobe kvantovej elektrodynamiky. Pokiaľ budeme pokračovať v takomto historickom slede, tak ako druhá v poradí bola kvantovo-mechanicky popísaná práve silná interakcia.

Pristúpme teda bližšie k teórii, o ktorej dnes veríme, že adekvátne popisuje silnú interakciu. Zastavme sa už pri jej samotnom názve - *kvantová chromodynamika*. Prvé slovo je jednoduché - hovorí že sa jedná o jednu z kvantovo-mechanických teórii (teda, že ide o teóriu, ktorá je lokálna, akceptujúca jednak princípy špeciálnej teórie relativity ale aj kvantovej mechaniky). Druhé slovo vyžaduje bližšie vysvetlenie:
Hovoríme o chromo, teda o "farebnej" dynamike. Čo sa tým má na mysli? Je samozrejme, že svet elementárnych častíc nemá nejakú "farebnú" dynamiku v zmysle farby, tak ako ju bežne vnímame. Ide o jeden z mnohých, častokrát vtipných označení vlastností elementárnych častíc. Napr. už len samotné názvy kvarkov, častíc, z ktorých sa skladá napr. protón alebo neutrón, predstavujú zaujímavú skupinu slov (názvy kvarkov píšem podľa ich narastajúcej hmotnosti): spodok (anglicky

[1] Ak by sme chceli byť ešte presnejšími, tak dnes vieme, že slabá a elektromagnetická interakcia pri energiách väčších ako 80 GeV je v skutočnosti interakciou len jednou, ktorej hovoríme *elektroslabá*.

down), vrch (anglicky up), podivnosť (anglicky strange), šarm (anglicky charm), krása (anglicky beauty) a vrchol (anglicky top). To ale neznamená, že napr. b kvark, teda beauty kvark je krásny, proste je to len jeho označenie, nič viac. Trošku sme však odbočili - vymenoval som šesť kvarkov, teda je ich (čomu všeobecne veríme) šesť. Ako sa však vôbec prišlo na to, že existujú kvarky? Nuž "nenarodili" sa okamžite. Ako prvé sa objavili tri najľahšie kvarky. Ich existenciu požadovala istá symetria, pomocou ktorej bolo možné kombináciou prvých troch kvarkov klasifikovať už v tom čase (60-te roky) širokú triedu elementárnych častíc. Išlo teda o ich "zoradenie" do istej schémy, ktorá mala ale aj prediktívnu silu - pomocou nej sa napr. predpovedala nová častica, Ω hyperón, ktorá skutočne bola aj experimentálne pozorovaná dokonca s celkom dobre predom určenou hmotnosťou. Nehľadiac k úspešnej predikcii vyššie zmienenej schémy, fyzici verili, že spomenuté tri kvarky nie sú reálne objekty. Dôvodom bol nasledujúci fakt: je zaujímavé, že všetky elementárne častice, pokiaľ majú nejaký elektrický náboj, tak tento náboj je v absolútnej hodnote presne rovný náboju elektrónu. Nič takého, ako zlomok elektrického náboja elektrónu, sa doteraz nepozorovalo (preto napr. atómové jadrá majú elektrický náboj, ktorý je celočíselným násobkom absolútnej hodnoty elektrického náboja elektrónu.) Príčina, prečo je to tak, je stále ešte neznáma. Napriek tomu, pokiaľ sme chceli z troch kvarkov "zložiť" napr. protón, museli sme kvarkom pripísať tretinové zlomky absolútnej hodnoty elektrického náboja elektrónu.
S pokračujúcim pokrokom v stavbe urýchľovačov elementárnych častíc rástla energia zrážok a postupne sa objavila potreba zaviesť nové a nové kvarky, až sme sa "zastavili" na čísle šesť. Dnes veríme, že ide o konečné číslo, a to práve na základe požiadaviek rôznych symetrií, ktoré v oveľa väčšej miere ako sme si mysleli (tak dnes aspoň veríme) určujú vlastnosti sveta elementárnych častíc. Samotná existencia vyššie spomenutej schémy, vyžadujúcej existenciu kvarkov, ale nič nehovorí o dynamike (a samozrejme aj o reálnej existencii) samotných kvarkov, nehovoriac o probléme s ich tretinovými elektrickými nábojmi. Na to, že napr. protón sa naozaj skladá z nejakých "zŕn", sme museli čakať až na začiatok 70-tych rokov - v Stanfordskom centre výskumu elementárnych častíc v USA pri ostreľovaní protónu elektrónom, sa pozoroval nápadný počet odrazených elektrónov na veľké uhly. To mohlo znamenať len jedno, a síce, že elektrón "v ceste cez protón" narazil na nejaké menšie, tvrdšie (lepšie označenie je energetickejšie) objekty. Zas trvalo istý čas, než sa prišlo na to, že tieto zrná (ktoré sa nazvali partónmi) nie sú nič iné ako kvarky z vyššie spomenutej schémy, teda, že kvarky sú reálne objekty! Dôvodov k tomu bolo viac, ale spomeňme ešte aspoň jeden. Ide dokonca o problém, ktorý bol ešte zložitejší ako problém so zlomkovým elektrickým nábojom kvarkov: elementárne častice sa správajú zásadne podľa dvoch navzájom nezlučiteľných pravidiel, ktorým hovoríme štatistika. Pokiaľ má častica hodnotu spinu [2] , ktorý je celočíselnym násobkom jednotky, napr. 0 alebo 1, hovoríme, že sa jedná o *bozón* a že sa daná častica riadi Bose-Einsteinovou štatistikou. Pokiaľ má častica hodnotu spinu, ktorá je poločíselná, napr. 1/2 alebo 3/2, hovoríme, že sa jedná o *fermión* a že sa daná častica riadi Fermi-Diracovou štatistikou. Rozdiel medzi tymíto dvomi štatistikami je napr. ten, že v prípade platnosti Bose-Einsteinovou štatistiky, častice môžu v nejakom objekte bez obmedzenia zaujať základný (teda energeticky najmenej "náročný" stav), čo v prípade Fermi-Diracovej štatistike nie je možné. Na tieto dve rôzne formy správania sa elementárnych častíc môžeme pozerať aj ako na dva rôzne odrazy, ktoré v princípe môžeme vidieť v zrkadle - buď je odraz predmetu v zrkadle rovnaký ako predmet pred zrkadlom, alebo je priestorove otočený o 180 stupňov. Nuž, a práve tu bol s kvarkami problém: z jednej strany sme im museli priradiť poločíselné hodnoty spinu (teda povedali sme, že musia byť fermiónmi), a to preto, aby sme nestratili nič z vyššie spomenutej prediktívnej sily schémy klasifikácie elementárnych častíc, zo strany druhej sme ale mali dve častice (jednu dokonca spomenutou schémou predpovedanú, Ω

[2] V kvantovej mechanike niektoré vlastnosti častíc nemajú "klasický" analóg. K nim patrí aj spin. Napriek tomu, aby som predsa len trošku čitateľovi priblížil pojem spinu, dovolím si nasledujúcu, v učebniciach fyziky dosť často uvádzanú, ale absolútne nepresnú analógiu s našim bežným životom - ide o vlastnosť, ktorá súvisi s vnútornou rotáciou častice.

hyperón), ktoré priam vyžadovali, aby kvarky boli bozónmi. Riešenie tejto rozporuplnej situácie spočívalo v zavedení novej vlastnosti kvarkov, vo *farbe.* [3] Požiadavka, aby sa systém kvarkov napr. v protóne správal ako systém fermiónov, si vynútila existenciu (ako minimálny možný variant) troch rovnakých kvarkov ale s rôznou hodnotou "farby". Teda, už môžeme byť presnejší: každý zo šiestych kvarkov má v skutočnosti tri varianty, ktoré sa líšia hodnotou "farby". Samozrejme, že to neznamená, že napr. u (up) kvark je červený, zelený, či modrý (aj keď hlavne americkí fyzici sa radi tak vyjadrujú), znamená to len to, že u kvark má nejakú novú vlastnosť, ktorú fyzici označili vtipne slovom "farba". A už sme pri "farebnej", teda chromodynamike. Takto skonštruovaná teória, teda teória predpokladajúca, že napr. protón sa skladá z kvarkov s rôznou hodnotou farby a elektrickým nábojom, potrebovala zodpovedať, ak mala ašpirovať na popis silnej interakcie, ešte na niektoré otázky. Prvou a najhlavnejšou bola otázka, prečo napr. v protóne nijako nepozorujeme existenciu "farby"? Veď, ak sa skladá z "farebných" objektov, sám by mal túto vlastnosť, teda "farbu", mať. Odpoveď bola jednoduchá len na prvý pohľad - protón je preto "biely", teda nemajúci "farbu", pretože kvarky, z ktorých sa skladá, sú *vždy* usporiadané tak, že celková hodnota farby je nula! Stačilo by teda v prírode nájsť čo len jednu časticu, o ktorej by to neplatilo, a bolo by po teórii. To sa však nestalo, čo ale vzápätí evokovalo otázku prečo. Teda prečo sú všetky elementárne častice "bezfarebné"?

Tak tu je odpoveď zložitá. My jednoducho veríme, že vo svete elementárnych častíc existuje striktná (teda nemajúca nijakú výnimku) symetria, ktorá zabezpečuje, že *všetky* nami pozorované častice *musia* byť "biele". Znamená to tiež, že kvarky v prírode (aspoň v oblasti našich energií, teda energie nie väčšej ako 1 TeV) pozorovať nemôžeme. Sú "večne" uväznené v obvyklých, nám známych, časticiach. Toto tvrdenie, pokiaľ je pravdivé, ale hovorí, že konštanta popisujúca silu väzby silnej interakcie musí mať zaujímavú, dovtedy nepozorovanú, vlastnosť - jej hodnota musí s rastom energie klesať. Teda pri "nekonečne" veľkej energii jej hodnota by mala byť nulová. Hovoríme o asymptotickej slobode, ktorá sa našťastie nielen pozoruje, ale sa dá aj priamo z kvantovej chromodynamiky odvodiť (to bol jeden zo silných argumentov v prospech kvantovej chromodynamiky, nech už sa nám táto teória javí akokoľvek bizardne). Zatiaľ hovoríme o jednom "konci" energetickej škály (o veľmi veľkých energiách). A ako to s hodnotou väzby silnej interakcie vyzerá pri malých energiách? Tu sme na tom horšie. Veríme, že pokiaľ kvarky od seba vzďalujeme, tak ich väzba medzi nimi bude narastať aspoň úmerne ich vzdialenosti. Táto vlastnosť je dôsledkom existencie "farebnej" interakcie medzi kvarkami, ktorá "bráni" tomu, aby sa objekt "ukázal" vonkajšiemu pozorovateľovi voľným, teda, aby mu "ukázal" svoju "farbu". Nositeľom tejto "farebnej" interakcie sú "farebné" kvarky, sprostredkovateľom tejto interakcie sú nové častice, ktorým hovoríme gluóny (z anglického glue, lepidlo) - tých je osem. To, že existuje vlastnosť asymptotickej slobody je dôsledkom faktu, že na rozdiel od fotónu (ktorý je sprostredkovateľom elektromagnetickej interakcie), gluóny dokážu medzi sebou bezprostredne interagovať (aj fotóny vedia medzi sebou interagovať, ale len nepriamo, a to tak, že najskôr musia vytvoriť elektrón-pozitrónový pár a až ten danú výmenu informácie medzi nimi sprostredkuje), a to prostredníctvom výmeny "farebného" náboja. Vráťme sa však k vzájomnému sa vzďalovaniu kvarkov. Explicitne tento proces spočítať dnes nevieme, pretože nanešťastie doposiaľ existujúci matematický aparát to neumožňuje. Niečo ale predsa vieme. Čo sa teda bude diať, keď kvarky (či antikvarky) začneme od seba vzájomne vzďalovať? Naše skúsenosti pri prechode od veľmi vysokých energií, kde pro-

[3] Dnes sa to možno bude zdať prinajmenšom za pochybné, ale fyzici v tých časoch, aby "vyriešili" problém štatistiky kvarkov, zaviedli tzv. paraštatistiku, ktorá bola kombináciou vlastností jednej a aj druhej triedy. Teda zaviedli oveľa horší požiadavok, pretože fakt, že svet elementárnych častíc sa chová len podľa dvoch spomenutých štatistík je ekvivalentný tvrdeniu o platnosti tzv. CPT teorémy, ktorá hovorí, že pokiaľ (bez ohľadu na poradie) postupne časticu, resp. systém tvorený z častíc v priestore pootočíme o 180 stupňov, potom jej zmeníme znamienko elektrického náboja a nakoniec "obrátime" časovú postupnosť s ktorou časticu, resp. systém tvorený z častíc, sledujeme, tak neexistuje v princípe nič, čo by nám napovedalo, že sme tieto kroky reálne previedli. Teda, častica, resp. systém tvorený z častíc sa danými transformáciami nijako nezmení.

cesy spočítať vieme, k menším, hovoria, že v istej vzdialenosti, energia potrebná na to, aby sme kvarky vzdialili na istú vzdialenosť, bude tak veľká, že umožní vznik kvark-antikvarkového páru. Celý proces si môžeme s dobrým priblížením predstaviť tak, že medzi od seba vzďalujúcimi sa kvarkami sa "natiahne" tenká "farebná" struna. Pri istej vzdialenosti energia medzi kvarkami bude tak veľká, že umožní vznik kvark-antikvarkového páru (obvykle ide o vzdialenosť jedného fermi, čo je 10^{-15}cm), ktorý strunu medzi pôvodnými kvarkami roztrhne takým spôsobom, že novovzniknutý kvark-antikvarkový pár sa priradí k pôvodným kvarkom takým spôsobom, že sa vytvoria dve nové struny, pričom vždy striktne bude celkový "farebný" náboj plne kompenzovaný, v dôsledku čoho obidve nové struny (aj so svojimi nositeľmi kvarkami, či antikvarkami, teda ako celok) budú "biele". Kvarky (či antikvarky - rozdiel z pohľadu silnej interakcie nie je podstatný) zostávajú vždy v "bielom" objekte uväznené - tento jav sa označuje anglickým slovom confinement (uväznenie). Veríme, že práve to je príčinou, prečo nepozorujeme voľné kvarky.
K tomu, aby sme sa "definitívne" presvedčili o platnosti kvantovej chromodynamiky ako teórie adekvátne popisujúcu silnú interakciu, potrebujeme ešte dôkaz o existencii gluónov, sprostredkujúcich "farebnú" interakciu. Tie poskytol e^+e^- urýchľovač PETRA v DESY Hamburg, keď v niektorých e^+e^- zrážkach sa v koncovom stave pozorovali nie dva, ako sa čakalo, ale tri priestorovo vydelené toky elektricky nabitých častíc, pričom prvé dva mal "na svedomí" v zrážke vzniklý kvark-antikvarkový pár, a tretí gluón, ktorý niektorý, v zrážke vzniklý, kvark, resp. antikvark, vyžiaril.

Takže, už trošku vieme, čo je kvantová chromodynamika, vieme, aspoň v hrubých rysoch, čo je v nej založené a ako funguje. Čitateľ, ktorý mal prvý raz možnosť získať o nej vyššie uvedené informácie, nebude asi tak ľahko veriť, že dnes sme schopní pomocou kvantovej chromodynamiky preveriť skutočne enormné množstvo rôznych experimentálnych údajov. Ale je to kupodivu pravda. To, že funguje na prvý pohľad tak (dovolím si použiť termín "divoká") teória, hovorí len o tom, že svet elementárnych častíc je skutočne podivuhodný. Pokiaľ som doteraz čitateľa nesklamal, dovolím si podotknúť, že aj samotná kvantová mechanika je z pohľadu na našu každodennú skúsenosť, "zvrátená", jednoducho "ľudsky" neakceptovateľná, a napriek tomu dnes však poskytuje absolútne najpresnejšie predpovede, aké sme schopní v praxi preveriť.

Vráťme sa k titulku článku. Hovoríme v ňom, že sa nám zdá, ako keby kvantová chromodynamika po prvý raz (nech čitateľ verí, že doposiaľ sa tak nestalo), nevedela popísať pozorovaný experimentálny fakt. Aj keď už vieme, čo je kvantová chromodynamika, vieme, že popisuje silnú interakciu, nezostáva, pre pochopenie ďalšieho textu, autorovi nič iné, ako opäť siahnuť k ďalšiemu vysvetľovaniu.
Pri zrážke častíc (nakoľko ide o štatistický proces) sa pýtame na pravdepodobnosť, že po zrážke v nejakom uhle a v nejakom čase pozorujeme nejakú časticu, resp. skupinu častíc nami predom určenými vlastnosťami, napr. s danou energiou a pod. V jadrovej, resp. subjadrovej fyzike o takejto úlohe hovoríme, že sa pýtame na veľkosť účinného prierezu zrážky. V prípade zrážok, v ktorých určujúcu úlohu bude hrať silná interakcia, by nám teória, ktorá túto interakciu popisuje, teda kvantová chromodynamika, mala hodnotu účinného prierezu poskytnúť. To sa naozaj pre široké spektrum zrážok aj deje.
Vráťme sa k HERA urýchľovaču. Ten urýchľuje elektróny a protóny na dnes zatiaľ najväčšiu energiu zrážky. Proces zrážky elektrónu s protónom ilustruje obr. 1. - nalietavajúci elektrón interaguje s niektorým partónom vo vnútri protónu. Po zrážke v koncovom stave opäť môžeme pozorovať do interakcie vstupujúci elektrón a častice, ktoré sa takouto zrážkou vytvorili. Ukazuje sa, že situácia ilustrovaná obr. 1 je len priblížením, aj keď, pretože sa jedná o zrážku s veľkou energiou, vďaka vlastnosti asymptotickej slobody, je priblížením dobrým. Vlastnosť asymptotickej slobody "dovoľuje", aby väzba (ktorá je sprostredkovaná silnou interakciou) medzi jednotlivými partónmi bola zanedbateľná - partóny sa preto "javia" nalietavajúcemu elektrónu ako voľné, na sebe nezávislé. Nezabúdajme však, že asymptotická sloboda nastáva až, pri striktne vzato, nekonečnej energie

zrážky, a tou zrážka na HERA rozhodne nie je. Preto aj účinný prierez, predstavujúci pravdepodobnosť realizácie interakcie znázornenej na obr. 1, bude nepresným, pokiaľ budeme predpokladať, že partóny v protóne sú voľné.

V jednom z článkov popisujúcich štruktúru protónu (viď Quark 7/97), sme vysvetlili, že pre popis zrážky ilustrovanej obr. 1 nám, pokiaľ registrujeme len elektrón po zrážke, stačia dve premenné, napr. uhol odrazu a energia odchýleného elektrónu. Tieto dve veličiny je však, aj z dôvodu lepšej názornosti, účelnejšie pretransformovať do inej dvojice, a to (x, Q^2), kde x predstavuje frakciu hybnosti partónu v protóne voči celkovej hybnosti protónu. Q^2 predstavuje štvorec energie, ktorú elektrón pri zrážke odovzdá partónu. Na veličinu Q^2 sa teda môžeme pozerať ako na "lupu", pomocou ktorej elektrón "vidí" partón v protóne. Čím je hodnota Q^2 väčšia, "lupa" má väčšie zväčšenie, a tým sa elektrónu partón javí nezávislejším od svojho okolia. Teda, čím je Q^2 väčšie, tým viac by mal byť teoretický výpočet, nezahrňujúci korelácie medzi partónmi, presnejší, alebo ináč povedané, tým je korekcia na korelácie medzi partónmi menšia. Na obr. 2 je znázornená závislosť účinného prierezu popisujúceho situáciu z obr. 1, na x a Q^2. Znázornené sú tri krivky: čiarkovaná krivka predstavuje situáciu, pri ktorej sú partóny v protóne voľné, plná krivka zodpovedá našim dnešným predstavám o tom, ako by malo započítanie efektu korelácie zmeniť tvar čiarkovanej krivky a bodkovaná krivka ukazuje, aký má tvar korekcia na započítanie efektu korelácie medzi partónmi. Všimnime si bližšie spomínané závislosti: vidíme, že skutočne, čím je Q^2 väčšie, tým je korelácia menšia. Problem je však niekde inde, a síce v nesúhlase výpočtu s experimentálnymi údajmi (získanými H1 experimentom) pre malé hodnoty Q^2. Nuž, a tento nesúlad viedol autora k vzniku daného článku.
Ako ďalej? Treba si v prvom rade uvedomiť, že sa jedná o neobyčajne zložité výpočty, ktoré pracujú častokrát s nie vždy presnými aproximáciami presných rovníc. Znamená to, že tu by mohla byť cesta vo vysvetlení náznaku nesúhlasu medzi teoretickou predpoveďou a experimentom. Z druhej strany prezentovaný experimentálny výsledok je unikátny - ešte sa doposiaľ žiadnej experimentálnej skupine nepodarilo určiť veľkosť korekcie medzi partónmi (samozrejme v závislosti na Q^2 a x). Aj tu treba počkať prinajmenšom na ZEUS experiment (ktorý, podobne ako H1 experiment, má za cieľ štúdium $e^{\pm}p$ zrážok pri HERA energii). Nami natienený problém ukazuje, že ešte stále nemáme vo všetkom jasno, a to v oblasti experimentu, ako aj v oblasti teórie.