Štruktúra fotónu

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

Svetlo je niečo, s čím je každý z nás viac-menej zoznámený, avšak už to neplatí, pokiaľ pátrame po jeho vnútornej štruktúre. Ukazuje sa, že tá je veľmi zložitá a ani dnes, pri existencii celého radu nových, unikátnych poznatkov, nemôžeme tvrdiť, že o nej vieme všetko.
Cieľom článku, ktorého vznik je predovšetkým podmienený desiatym výročím členstva Ústavu experimentálnej fyziky SAV, Košice, v H1 experimente na HERA v DESY Hamburg (viď napr. májové číslo časopisu Quark), je oboznámiť populárno-vedeckou formou našu k prírodným vedám inklinujúcu komunitu o posledných výsledkoch pri analýze štruktúry svetla, fotónu, ako jeho "časticového" reprezentanta, ku ktorým významnou mierou prispeli aj experimenty na HERA, teda aj experiment H1.
Už I. Newton vedel, že biele svetlo je možné pomocou hranola rozložiť na farebné pruhy. Fyzika v minulom storočí neochvejne verila, že svetlo má len vlnovú podstatu, a preto neudivuje, že myšlienka A. Einsteina predstaviť si svetlo v tvare častíc - *fotónov*, mu po úspešnom objasnení fotoefektu priniesla Nobelovu cenu.
Na otázku, či má svetlo vlnovú alebo časticovú povahu, kvantová mechanika odpovedá zavedením pojmu *dualizmus*, pod ktorým rozumieme skutočnosť, že za istých okolností sa svetlo správa ako vlna, za iných ako častica. Táto vlastnosť nie je pre svetlo výnimočná, je daná všetkým elementárnym časticiam (objektom, ktorých "veľkosť" je cca 10^{-15} cm).
Vlastnosti svetla vystupujú v rôznych fyzikálnych teóriách, spomeňme len špeciálnu teóriu relativity, efekty ktorej sú priamym dôsledkom faktu, že akýkoľvek materiálny signál sa pohybuje s konečnou rýchlosťou. Pretože doposiaľ nám známym najrýchlejším fyzikálnym objektom v prírode je svetlo, svetlo hrá kľúčovú úlohu v tejto teórii - žiaden materiálny (hmotný) objekt sa nemôže pohybovať rýchlejšie ako svetlo!
Teória popisujúca elektromagnetické javy na úrovni elementárnych častíc, kvantová elektrodynamika, pracuje tiež s pojmom fotón. Na rozdiel ale od reálne pozorovaného, teda fyzikálneho objektu (fotónu), fotón v kvantovej elektrodynamike je *kalibračný*, úlohou ktorého je sprostredkovanie elektromagnetickej interakcie. [1] Čím sa líši reálny fotón od kalibračného? Odpoveď je jednoduchá - existenciou *vnútornej štruktúry*. V reálnom mikrosvete existujúce fotóny sú "obalené" mrakom nabitých častíc. V rámci princípu neurčitosti fotóny môžu fluktuovať do virtuálnych [2] párov elektricky nabitých leptónov, kvarkov, antikvarkov a elektricky neutrálnych gluónov, pričom tieto procesy sú tým pravdepodobnejšie, čím má fotón väčšiu energiu. Je zrejmé, že čím je hmotnosť páru väčšia, tým je menej pravdepodobný jeho vznik. Teda neudivuje, že pri veľkej energii fotónu môže vzniknúť svojou štruktúrou veľmi zložitý objekt, pozostávajúci z kvarkov, antikvarkov a gluónov. Pokiaľ je naša úvaha až doposiaľ správna, čo ako podivne to na prvý pohľad bude

[1] Ide o tzv. Yukawovskú interpretáciu interakcie: dva objekty vzájomne interagujú, "spoznávajú sa", pomocou výmeny tretieho objektu, ktorý je pre daný typ interakcie charakteristický. V jazyku modernej fyziky, ktorá všetky dnes nám známe interakcie popisuje pomocou techniky kalibračných polí, interakcia je sprostredkovaná *bozónmi* (časticami so spinom jedna alebo dva), teda o tomto treťom objekte hovoríme ako o kalibračnom bozóne.

[2] O častici hovoríme, že je virtuálna, pokiaľ rozdiel štvorca jej energie a štvorca absolútnej hodnoty hybnosti nie je rovný štvorcu jej hmotnosti.

vyzerať, reálny fotón sa v istých situáciách bude správať ako *hadrónový objekt.* [3] Pretože fotón je vektorová častica (ide o bozón so spinom jedna), k nemu najbližší hadrónový objekt bude ρ^o– mezón. Teda očakávame, že v praxi by sa v niektorých prípadoch mal fotón správať ako ρ^o– mezón. Ale je to naozaj tak?
Spomenieme len dva fakty, ktoré favorizujú túto predstavu o fotóne:

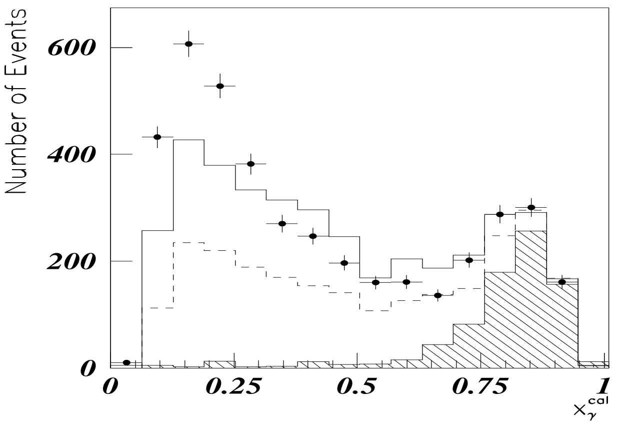
- Predpokladajme, že analyzujeme rozptyl protónu na ťažkých jadrách. Očakávali by sme, že pravdepodobnosť rozptylu protónu na jadre bude súčtom pravdepodobností rozptylu protónu na každom nukleóne (protóne alebo neutróne) jadra, teda, že táto pravdepodobnosť bude úmerná celkovému počtu nukleónov v jadre A. No experiment dáva závislosť slabšiu - A^n, kde $n < 1$. Dôvodom je tieniaci efekt, ktorý má na "svedomí" konečná veľkosť protónu. Rovnakú závislosť dostaneme, ak analyzujeme rozptyl fotónu na ťažkých jadrách. Znamená to, že podobne ako protón, aj fotón musí mať nebodovú vnútornú štruktúru, ktorá, pretože koeficient n je rovnaký, musí byť podobná protónu.

- Ďalším silným argumentom je celý rad reakcií fotónu s protónom, v ktorých sa vytvárajú ľahké vektorové mezóny - ρ^o, ω a ϕ. Kinematika týchto reakcií je podobná kinematike pružného protón-protónového rozptylu (t.j. keď sa pri zrážke protónov nevytvára ďalšia častica). Navyše modely, ktoré fotón aproximujú pomocou ľahkých vektorových mezónov sú na popis spomenutej triedy reakcií najvhodnejšie.

Tradične diskusia týkajúca sa hadrónovej štruktúry fotónu je doménou $\gamma\gamma$ roztylu, ktorý je možné experimentálne zrealizovať pomocou e^+e^- zrážok napr. na urýchľovači LEP v európskom centre pre výskum elementárnych častíc v CERN vo Švajčiarsku. Avšak aj $e^\pm p$ zrážky na urýchľovači HERA v DESY Hamburgu umožňujú analýzu štruktúry fotónu, a to navyše v doposiaľ kinematicky nedostupnej oblasti (v tomto prípade sa "vnútro" fotónu analyzuje pomocou γp zrážok). Tvrdenie, že $\gamma\gamma$, resp. γp rozptyl je možné experimentálne zrealizovať pomocou e^+e^-, resp. $e^\pm p$ zrážok možno zaraziť, pretože ani v jednom prípade ako zväzková častica nevystupuje fotón. Odpoveď na tento zdanlivý paradox je ukrytý vo vlastnostiach elektricky nabitých častíc - pokiaľ tieto majú nenulové zrýchlenie, a pri urýchľovaní na kruhovom urýchľovači, akým LEP a HERA sú, majú vždy nenulové zrýchlenie, počas ich pobytu v urýchľovacej trubici dochádza k vyžiarovaniu fotónov. Táto vlastnosť je tým výraznejšia, čím sú urýchľované častice ľahšie, teda pre elektróny a pozitróny je tento efekt najsilnejší. Pokiaľ mienime získať γp zrážky, tak z e^-p zrážok vyberáme len tie prípady, v koncovom stave ktorých je protón, elektrón a fotón, ktorého existenciu registrujeme ešte pred samotnou e^-p zrážkou. Pri takomto výbere máme dve možnosti, a to, či sa elektrón od svojho pôvodného smeru odchýlil značne, alebo nie. Predpokladajme, že došlo len k malej odchýlke. To ale znamená, že počiatočný elektrón do zrážky nevstúpil a v danom prípade "hrá" úlohu diváka - s protónom interaguje fotón, ktorý elektrón vyžiaril. Ide teda o γp interakciu. V prípade, keď došlo k veľkej odchýlke, elektrón už "nehrá" úlohu diváka, napriek tomu, ak predpokladáme, že interakcia medzi elektrónom a protónom je sprostredkovaná fotónom (teraz ide o virtuálny fotón), z rozptylových charakteristík elektrónu vieme určiť aj charakteristiky virtuálneho fotónu, a teda vieme z e^-p rozptylu vydeliť γ^*p rozptyl, kde symbolom γ^* sme označili virtuálny fotón.
Vydelenie γp zrážok predstavuje pre ďalšiu analýzu kľúčový moment, pretože od tohto okamihu, naše ďalšie úvahy budú väčšinou kopírovať tie, ktoré nás v článku o štruktúre protónu (viď júnové číslo Quark) doviedli k pojmu štruktúrnej funkcie.
γp zrážky pri energii HERA majú rôzne koncové stavy. Pre určenie vnútornej štruktúry fotónu

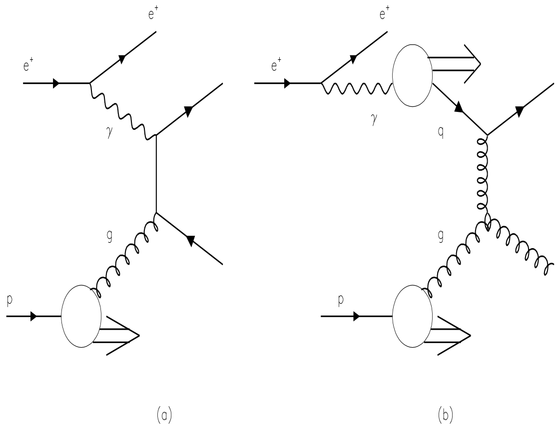
[3]Svet elementárnych častíc je veľmi rôznorodý. Ak je kritériom jeho delenia existencia vnútornej štruktúry, potom častice, u ktorých ju nepozorujeme označujeme *leptónmi*, napr. elektrón, neutríno, a tie, ktoré vnútornú štruktúru majú označujeme *hadrónmi*, napr. protón, neutrón. Samozrejme rozdielov medzi leptónmi a hadrónmi je podstatne viac, avšak v našom prípade plne postačuje vyššie uvedené kritérium.

najideálnejšie sú tie, v koncovom stave ktorých sú dva priestorovo vydelené prúdy elektricky nabitých častíc (takýmto stavom budeme hovoriť "dvojjetové" - z anglického "jet", [tok, prúd] nakoľko v slovenčine nateraz chýba jednoznačná terminológia). V tomto prípade, ak E_γ je energia nalietavajúceho fotónu na protón, potom frakcia hybnosti, ktorú unášajú jeho jednotlivé objekty, z ktorých sa skladá, x_γ, je rovná podielu váženého súčtu energií jednotlivých tokov častíc z γp zrážky k E_γ, pričom sa váži voči smeru letu jednotlivých tokov. Rozdelenie x_γ pre dvojjetové



Obr. 1: *Energetické rozdelenie partónov vo fotóne.*

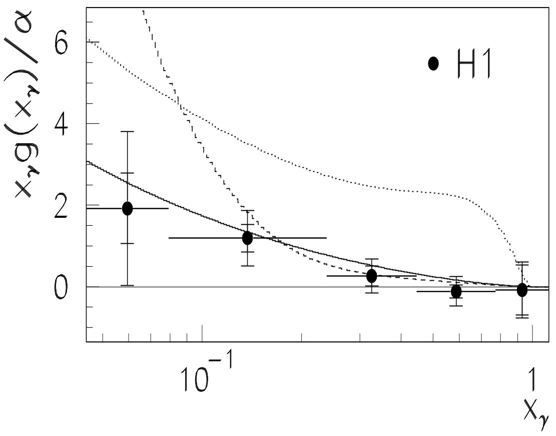
prípady je znázornené na obr. 1.
Teraz sa trošku pozastavme nad dynamikou dvojjetových γp zrážok. Na obr. 2 sú znázornené dva rôzne mechanizmy priebehu dvojjetovej γp interakcie.



Obr. 2: *Popis rôznych mechanizov interakcie fotónu s protónom: a) prípad, keď nastáva priama interakcia fotónu; b) prípad, keď fotón pred samotnou interakciou už "prešiel" istým vývojom.*

Predpokladajme, že pri interakcii fotónu s protónom nastáva prípad *a* obr. 2. V tom prípade tok častíc, ktorý vznikne interakciou fotónu s protónom je energetickejší v porovnaní s prípadom *b* (v prípade *b* časť energie fotónu skôr ako dôjde k jeho interakcie s protónom, prejde do produkcie častíc). To dokumentuje aj obr. 1, kde je príspevok tohto mechanizmu vyšrafovaný (čím je x_γ väčšia, tým je väčšia hybnosť objektu, ku ktorému sa x_γ vzťahuje). Na mieste je otázka, prečo by nás existencia dvoch mechanizmov v prípade dvojjetových zrážok mala z pohľadu na štruktúru fotónu zaujímať. Dôvod je ukrytý v rozdieli medzi štruktúrou protónu (obecne hadrónu) a fotónu.

Mechanizmus a v obr. 2 v prípade protónu (hadónu) neexistuje! A práve jeho vkladom sa vnútorná štruktúra fotónu líši od vnútornej štruktúry protónu. Ináč povedané, mechanizmus a zodpovedá prípadu, keď pri zrážke fotónu s protónom sa nerozvinie kaskáda (teda s protónom interaguje len a len fotón). To ale znamená, že mechanizmus a viac "vidí" na "holý", virtuálnymi pármi neobalený fotón.
Skúsme sa teraz pozastaviť nad otázkou, z čoho sa teda skladá reálny fotón. Vieme už, že štruktúra fotónu je istou svojou časťou podobná štruktúre protónu. Znamená to, že pokiaľ sa v jeho štruktúre vytvorí kvark-antikvarkový pár, potom nie je dôvod, aby súbežne s jeho vznikom nenastala chromodynamická evolúcia, t.j. čím väčšiu energiu fotón získa, tým je pravdepodobnejšie, že spomínaný kvark-antikvarkový pár vytvorí nielen ďalšie analogické páry, ale aj páry, ktoré popri kvarkoch a antikvarkoch, budú obsahovať aj gluóny.
Vieme však experimentálne získať rozdelenie gluónov vo fotóne? Odpoveď je kladná: ak sa ohraničíme pre jednoduchosť opäť len na dvojjetové γp prípady, potom v prvom kroku výberom x_γ eliminujeme mechanizmus a z obr. 2. Vďaka tomu nám zostane len tá vzorka γp prípadov, v ktorej sa fotón správa ako protón (hadrón). Potom vďaka tomu, že z analýzy štruktúry protónu vieme rozdelenie kvarkov a antikvarkov, jednoduchým ich odčítaním z celkového x_γ rozdelenia (po aplikácii prvého kroku), dostaneme želané rozdelenie gluónov vo fotóne, ktoré demonštruje obr. 3. Vidíme, podobne



Obr. 3: H1 *experiment: hustota pravdepodobnosti rozdelenia gluónov vo fotóne.*

ako v prípade protónu, že čím je hybnosť partónov vo fotóne menšia, tým je pravdepodobnejšie, že pôjde o gluón.
Pokiaľ čitateľ nás "vydržal" sledovať až po tieto riadky, vie už, že štruktúra fotónu vôbec nie je jednoduchá. Pritom sme nespomenuli ďalšie závažné problémy, ktoré priamo vplývajú na štruktúru fotónu, napr. zatiaľ sme sa nedotkli problému interferencie medzi, zjednodušene povedané, mechanizmom a a b v obr. 2. Ten potrebuje ďalšiu analýzu, ďalšie experimentálne údaje, preto sa analýza štruktúry fotónu nekončí, ale pokračuje a bude pokračovať.