Pozorujeme fyziku mimo rámca Štandartného modelu?
Druhá časť

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

V májovom čísle Quark z minulého roku sme popisovali situáciu, ktorá nastala pri analýze údajov z $e^{\pm}p$ interakcií, ktoré boli pozorované H1 a ZEUS experimentom na HERA urýchľovači v DESY Hamburg. Pre ľahšiu orientáciu čitateľa zopakujme:

- Experimenty H1 a ZEUS analyzovali také vzorky prípadov zrážok elektrónov, resp. pozitrónov s protónmi, ktoré zodpovedali jednak veľkým hodnotám Q^2 (nad 15 000 GeV^2) [1] a jednak vzniku jedného priestorovo vydeleného vysoko-energetického prúdu častíc. V ďalšom sa vytvorili rozdelenia týchto prípadov podľa premenných $M = \sqrt{xs}$ (pre $M > 175$ GeV) a Q^2. Tu s predstavuje štvorec celkovej energie zrážky; x zodpovedá frakcii hybnosti partónu z protónu na ktorom nastala interakcia. Tieto experimentálne rozdelenia sa porovnali s rozdeleniami, ktoré predpovedá Štandartný model. *Výsledok analýzy hovoril, že tieto rozdelenia sa dajú popísať v rámci Štandartného modelu s pravdepodobnosťou menšou ako 1 %!*

Náš záver znel: vzhľadom k tomu, že ide o jav, ktorý sa pozoruje skutočne na hranách (chvostoch) štatistických rozdelení, nedá sa jednoznačne usudzovať, či ide o nový fyzikálny efekt, alebo o "hru" štatistiky, teda o štatistické fluktuácie. Navyše spomenutý efekt sa pozoroval hlavne v prípadoch, keď nalietavajúcou časticou bol pozitrón a keď šlo o tzv. proces s výmenou neutrálneho toku. [2]

Čo sa za ten rok zmenilo? V prvom rade sa zdvojnásobila štatistika, teda veľkosť vzorky prípadov, ktoré sa analyzovali, vzrástla faktorom dva. Toto svojim spôsobom neočakávané zdvojenie štatistiky umožnili rôzne zlepšenia HERA urýchľovača, a to hlavne v počiatočnom štádiu urýchľovania protónov. Analýza údajov z H1 a ZEUS detektora ukázala, že

- sa naďalej pozoruje rozdiel medzi predpoveďou Štandartného modelu, ale už sa nedá tvrdiť, že sa jedná o efekt, ktorý by mohla spôsobiť nejaká jedna (hypotetická) krátko žijúca častica;
- navyše sa pozoruje rozdiel nielen pre prípady s neutrálnym, ale aj s nabitým tokom - pre $Q^2 > 15000$ GeV^2 sa pozoruje 11 prípadov, zatiaľ čo Štandartný model predpovedá 5 (± 2) prípadov. Treba však tiež podtrhnúť, že ani predpoveď Štandartného modelu nie je bez chýb - vďaka neurčitostiam v rozdelení hustoty pravdepodobností kvarkov, neurčitosti energetickej škály kalorimetra (ako hlavného detektora) a prudko klesajúcej hodnote účinného prierezu, ktorý popisuje pravdepodobnosť vzniku procesov s nabitými tokmi, s rastúcou hodnotou Q^2, je modelová predpoveď zaťažená chybou až $50 - 70$ %!

[1] Q^2 predstavuje štvorec odovzdanej energie nalietavajúceho elektrónu, resp. pozitrónu protónu.

[2] Pokiaľ v $e^{\pm}p$ zrážkach v koncovom stave pozorujeme opäť nalietavajúci $e^{\pm}$, hovoríme, že sa jedná o procesy s výmenou neutrálneho toku, ktorý predstavuje buď fotón alebo Z^0 bozón. Ak však v koncovom stave $e^{\pm}$ nepozorujeme, potom ide o procesy s výmenou elektricky nabitého $W^{\pm}$ bozónu, teda v týchto prípadoch dochádza k interakcii $e^{\pm} + q \to W^{\pm} + \nu/\bar{\nu}$, kde q predstavuje kvark z protónu, na ktorý $e^{\pm}$ nalietava. V koncovom stave teda miesto počiatočného elektricky nabitého elektrónu, resp. pozitrónu, je elektricky neutrálne neutríno, resp. antineutríno - ich elektrický náboj "prešiel" na $W^{\pm}$ bozón.

Vo všeobecnosti treba povedať, že pozorovaný rozdiel medzi predpoveďou Štandartného modelu a experimentom so vrastajúcou štatistikou *narástol* - viď obr. 1, avšak vzhľadom na to, že sa nepotvrdila možná existencia signálu z nejakej *jednej* (hypotetickej) častice, vierohodnosť výsledku sa znížila. Tento rozporuplný fakt len odráža naše predstavy o štruktúre mikrosveta - z tohoto dôvodu sa svet, predovšetkým teoretikov, rozdelil na dva tábory, jedni považujú pozorovaný jav za štatistickú fluktuáciu a druhí - za nový fyzikálny jav (dnes na dve základné publikácie, popisujúce nami diskutovaný jav, a to na publikácie H1 a ZEUS experimentu, ktoré boli uverejnené v prestížnom svetovom časopise Zeitschrift für Physik C, existuje asi 150 odkazov, a to jednak zo strany teoretikov, ale aj od rôznych experimentálnych skupín). Na odpoveď, tak ako v minulosti, si však zas musíme počkať.

Ako to už obvykle býva, pri snahe potvrdiť, resp. vyvrátiť vyššie pozorovaný jav, objavil sa nečakane ďalší.
O čo ide? Analyzovali sa zrážky pozitrónov s protónmi, ktoré patrili k prípadom s výmenou nabitých tokov. Znamená to, že sa analyzovali tie prípady, v koncovom stave ktorých by sa *nemal* nachádzať pozitrón ale antineutríno. Pre tieto prípady je typická veľká hodnota tzv. *chýbajúcej hybnosti* - tu je na mieste krátke vysvetlenie:

Pri zrážkach elementárnych častíc obvykle detekujeme len elektricky nabité častice. Je to z dôvodu ich správania sa v danom prostredí, v ktorom sa pohybujú - naše detektory zvyčajne registrujú prejavy týchto častíc, ktoré sú späté s ich elektrickým nábojom (napr. s ionizáciou). Elektricky neutrálne častice detekujeme obvykle nepriamo, pomocou ich interakcie s prostredím, výsledkom ktorej je vznik napr. elektricky nabitých častíc (energetický fotón, ak má v "ceste" prostredie pozostávajúce z ťažkých prvkov ako olovo alebo wolfrám, konvertuje do elektrón-pozitrónového páru). Z pohľadu na možnosti detekcie elementárnych častíc je na tom rozhodne "najhoršie" neutríno, resp. antineutríno, ktoré napr. môže preletieť Zemou bez toho, že by nejako na jej existenciu "reagovalo". Z druhej strany, zo zákona zachovania hybnosti, ak vieme, aká bola hybnosť počiatočných zrážajúcich sa častíc, vieme, aká musí byť celková hybnosť v koncovom stave. Avšak v koncovom stave pozorujeme obvykle, ako sme už spomenuli, len elektricky nabité častice, a teda poznáme len ich celkovú hybnosť. Rozdiel medzi celkovou hybnosťou (ktorú obvykle vieme, pretože poznáme charakteristiky do zrážky vstupujúcich častíc - výnimku predstavujú napr. interakcie častíc z kozmického žiarenia) a v koncovom stave pozorovanej celkovej hybnosti ide teda na "vrub" elektricky neutrálnym časticiam. Túto hybnosť označujeme ako *chýbajúcu* a je to jedna z mála charakteristík, ktorú vieme o kinematike nami nepozorovaných častíc.

Prečo pre vydelenie prípadov s výmenou nabitých tokov požadujeme veľkú hodnotu chýbajúcej hybnosti? Ako sme už spomínali, pre tieto procesy je charakteristická reakcia, pri ktorej nalietavajúci pozitrón vytvorí antineutríno a W^+ bozón - $e^+ \to W^+ + \bar{\nu}$ (teda v koncovom stave nebude už nalietavajúci pozitrón). pretože pozitrón je cca 160 000-krát ľahší ako W^+ bozón, a pretože hmotnosť antineutrína je 0 alebo blízka k 0, na vyššie spomenutú reakciu sa môžeme s pomerne dobrým priblížením pozerať ako na pružný rozptyl pozitrónu v poli "nekonečne" ťažkého W^+ bozónu. Pružný rozptyl je však charakteristický tým, že rozptýlená častica sa len málo odkloní od svojho pôvodného smeru - rozptyl na väčší uhol je potlačený faktorom $\sim \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$, kde θ je uhol rozptylu. Teda vracajúc sa k nášmu prípadu: pri "pružnom" rozptyle pozitrónu v poli "nekonečne" ťažkého W^+ bozónu sa antineutríno prevažnej miere rozptýli na malé uhly, pričom si prakticky ponechá hybnosť počiatočného pozitrónu (a tá bola cca 27 GeV). [3]

Takže, keď už vieme, ako vydeliť procesy s nabitým tokom, pozrime sa, čo pozorujeme. Na

[3]Ako iste čitateľ vidí, aj pri pružnom rozptyle môže dôjsť k rozptylu na veľmi veľké uhly, ale ako sme už spomenuli, jedná sa o málo pravdepodobný jav. Toto bude dôležité, lebo tento fakt nám pomôže v ďalších riadkoch pochopiť,

veľký údiv sa v takto vydelenej vzorke prípadov sa našli také zrážky, ktoré mali v koncovom stave

- jeden priestorovo vydelený tok nabitých častíc a
- pozitrón, alebo elektricky kladne či záporne nabitý μ mezón, energia ktorých je väčšia ako 23 GeV.

Na obr. 2 je ukážka takejto zrážky, pozorovaná H1 detektorom, v koncovom stave ktorej je μ^+ mezón. Prečo nás to prekvapilo? Vnímavý čitateľ to iste postrehol: požiadavka selekcie prípadov s veľkou hodnotou chýbajúcej hybnosti totiž prakticky jednoznačne vylučuje možnosť pozorovať v koncovom stave izolovaný elektricky nabitý leptón (pozitrón, elektrón alebo $\mu^\pm$ mezón)! Nie nadarmo sme sa snažili v horných riadkoch vysvetliť, že práve požiadavka selekcie prípadov s veľkou hodnotou chýbajúcej hybnosti vyberá zrážky s tzv. nabitými tokmi.
Pozrime sa teda na tieto podivuhodné prípady bližšie: H1 experiment pozoruje šesť takýchto prípadov, a to jeden v koncovom stave ktorého je pozitrón, dva v koncovom stave ktorých je elektricky kladne a dva, v ktorých je elektricky záporne nabitý μ mezón. Pri jednom prípade s μ mezónom nebolo možné určiť hodnotu jeho elektrického náboja.
ZEUS experiment pozoroval dva prípady v koncovom stave ktorých je pozitrón, no kupodivu nepozoruje ani jeden prípad s nabitým μ mezónom, zato ale pozoruje jeden prípad s dvomi vysokoenergetickými μ mezónmi).
Už len porovnanie týchto dvoch výsledkov zaráža - obidva experimenty by mali štatisticky ukazovať zhruba rovnaké výsledky. [4] Samozrejme tento nesúlad sa analyzuje, ale zdá sa, že nateraz nie sme ho schopní vysvetliť. Je celkom možné, že ide o nejakú "hru" štatistiky - ale ak by to tak naozaj bolo, bolo by to už samo o sebe prekvapujúce.
Pokročme však ďalej: samotnú existenciu vyššie popísaných prípadov vieme vysvetliť v rámci Štandartného modelu. Prakticky jediným kandidátom ašpirujúcim na popis týchto zrážok v rámci Štandartného modelu je produkcia $W^\pm$ bozónu a jeho následný rozpad na antineutríno/neutríno a elektricky nabitý leptón. Ak je to ale tak, potom skutočným problémom sú hodnoty kinematických charakteristík týchto zrážok. Inými slovami hovoríme o polohe, kde sa tieto prípady vo fázovom priestore (teda v priestore, ktorý je určený kinematickými charakteristikami danej zrážky) nachádzajú. Sú proste tam, kde by nemali byť! Na obr. 3 je znázornené rozdelenie tzv. priečnej hmotnosti sústavy μ mezón-neutríno na priečnej chýbajúcej hybnosti [5]. Toto rozdelenie bolo získané počítačovou simuláciou a zodpovedá 500-násobku počtu prípadov, s ktorými na HERA urýchľovači pracujeme a z ktorých sme vyššie zmienenou selekciou získali naše podivuhodné zrážky. Inými slovami: vedome sme zväčšili štatistiku preto, aby sme jej fluktuačné vlastnosti potlačili. Na obr. 3 sú krúžkami vydelené v H1 detektore pozorované prípady v koncovom stave ktorých je $\mu^\pm$ mezón. Vidieť, že napr. prípad označený "μ1" sa nijako neočakáva! Analýza H1 výsledkov hovorí, že v rámci Štandartného modelu by sme mali "štatisticky" vidieť v prípade, keď $M_T^{\mu\nu} < \infty$, 0,55 prípadu, ale mi ich pozorujeme päť!
Na okamih prepokladajme, že sa nejedná o "hru" štatistiky. Potom ako alternatívnym sa javí vysvetlenie mimo rámca Štandartného modelu - existuje tzv. SUSY teória (z anglického "Super

---

prečo napriek požiadavke veľkej chýbajúcej hybnosti, v koncovom stave predsa len môžeme pozorovať nalietavajúci leptón.

[4] Tu je podstata odpovede, prečo napriek značnej cene, *vždy* na meranie rovnakých charateristík požadujeme aspoň dve nezávislé experimentálne zariadenia, výsledky ktorých analyzujú *nezávislé* skupiny experimentátorov.

[5] Nech θ_1 je uhol letu μ mezónu voči nejakej predom určenej osi, θ_2 je uhol letu neutrína voči tej istej osi. Nech E_1 je energia a $|\vec{p_1}|$ je modul hybnosti μ mezónu, podobne, nech E_2 je energia a $|\vec{p_2}|$ je modul hybnosti neutrína. Potom priečna hmotnosť sústavy μ mezón-neutríno je definovaná vzťahom: $M_T^{\mu\nu} = \sqrt{(E_1 cos(\theta_1) + E_2 cos(\theta_2))^2 - (|\vec{p_1}|cos(\theta_1) + |\vec{p_2}|cos(\theta_2))^2}$. Ak $|\vec{P}|^X$ je modul chýbajúcej hybnosti, potom priečne chýbajúca hybnosť je definovaná vzťahom $P_T^X = |\vec{P}|^X cos(\theta_3)$, kde θ_3 je uhol letu "neviditeľných" neutrálnych častíc voči vyššie zmienenej predom určenej osi.

Unified SYmetric Theory"), ktorá sa snaží všetky nám známe interakcie popísať vo forme len *jednej* interakcie. Jednou z cien tohto prístupu je nutnosť zavedenia nových nateraz nepozorovaných častíc s častokrát doteraz našej skúsenosti nečakanými vlastnosťami (k nim patria napr. aj v článku z mája 1997 spomenuté leptokvarky). Ukazuje sa, že práve v rámci SUSY sme schopní rozumne popísať naše zvláštne prípady.

Nuž, ako ďalej? Zas sa jedná, tak ako v prvom prípade, o efekt, ktorý je skutočne na "hrane" našich experimentálnych možností. Záver preto bude musieť byť rovnaký ako v prípade prvého "efektu": až väčšia štatistika môže jednoznačne určiť, či ide o novú fyziku alebo o štatistickú fluktuáciu.

Popis obrázkov

Obr. č.1: Rozdelenie účinného prierezu pre zrážky s neutrálnymi tokmi podľa Q^2. Plnou čiarou je znázornená predpoveď Štandartného modelu, bodmi je znázornené súčasné meranie.
Obr. č.2: Prípad zrážky s $\mu+$ mezónom a jedným priestorovo vydeleným tokom elektricky nabitých častíc z H1 detektora.
Obr. č.3: Rozdelenie priečnej hmotnosti sústavy μ mezón-neutríno v závislosti na priečnej chýbajúcej hybnosti.