Pomerón a jeho štruktúra

Fyzika pomerónu - fyzika 21. storočia?

RNDr. Dušan Bruncko, CSc.

Ústav experimentálnej fyziky SAV
Watsonova 47
Košice

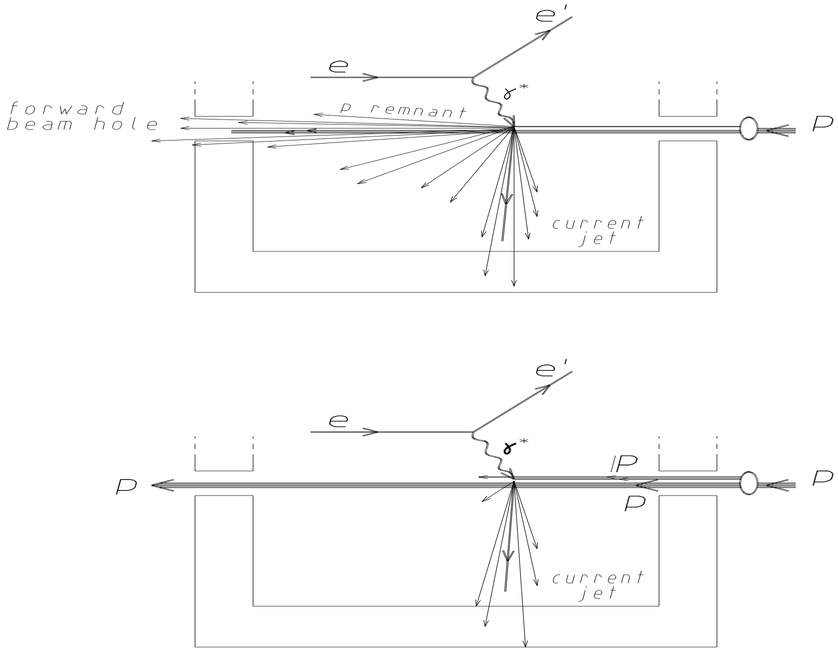
Blíži sa koniec storočia, a preto iste bude čitateľa, sledujúceho aspoň z diaľky dianie vo fyzike elementárnych častíc, zaujímať otázka, kam smeruje jej vývoj, aká fyzika bude v budúcnosti dominantná a pod. Jedna z odpovedí na túto otázku je ukrytá vo "*fyzike pomerónu*".
Cieľom článku je pokúsiť sa prístupnou formou čitateľovi ozrejmiť pojem *pomerónu* a ukázať, prečo práve fyzika pomerónu je jedným z horúcich kandidátov fyziky budúcnosti.

Pojem *pomerón* je známy z konca päťdesiatych rokov, snáď najväčšiu popularitu (ak pripustíme takéto slovné spojenie) získal v sedemdesiatych rokoch, teda ešte pred spustením urýchľovačov s takou energiou, ktorá umožnila bezprostredné aplikácie kvantovej chromodynamiky (máme na mysli predovšetkým produkciu priestorovo usmernených tokov častíc). Po tomto období nastal stav, kde síce pomerón celkom z úvah fyzikov nevymizol, ale rozhodne prestal hrať pri popise získaných údajov dominantnú úlohu. Zlom nastal začiatkom deväťdesiatych rokov, a to vďaka pozorovanej fyzike na urýchľovačoch HERA (Hamburg) a TEVATRON (USA).

Začneme pri týchto dnes najväčších urýchľovačov elementárnych častíc, ktoré sú schopné urýchľovať svojou štruktúrou komplikované objekty - protóny alebo antiprotóny na energiu stovky GeV. [1]

Zastavme sa pri zrážkach, ktoré produkuje urýchľovač HERA. Jedná sa o $e^{\pm}p$ zrážky cieľom ktorých je štúdium vnútornej štruktúry protónu. Procesy, pri ktorých urýchľovaný elektrón, resp. pozitrón "vnikne" do protónu, označujeme ako "*hlboko-nepružné*". Analýzou práve takýchto hlboko-nepružných $e^{\pm}p$ procesov v H1 a v ZEUS experimente na HERA urýchľovači v DESY, v Hamburgu, sa našli prípady, ktoré zodpovedajú ilustrácii *b* na obr. 1. Ako vidieť, oproti "obyčajnému" hlboko-nepružnému $e^{\pm}p$ rozptylu (ilustrácia *a* na obr. 1), sa tieto zrážky vyznačujú tým, že sa v smere letu protónu nepozoruje produkcia žiadnych častíc - tieto prípady označujeme ako "GAP" prípady (z anglického "gap" [medzera]). GAP prípady spočiatku vyvolali značné prekvapenie, avšak ich ďalšia analýza ukázala, že sa vlastne jedná o procesy, ktoré fyzika už pomerne dlho poznala - išlo o *difrakčné procesy*.
Čo sa pod difrakčnými procesmi rozumie? Tento typ procesov sa po prvý raz pozoroval pri analýze nízko-energetických zrážok nukleónov, $\pi^{\pm}$–mezónov a ľahkých jadier s nukleónmi, $\pi^{\pm}$–mezónmi a ľahkými jadrami (tu pod pojmom nízko-energetické zrážky máme na mysli zrážky, energia ktorých neprevyšuje 30-40 GeV). Tieto procesy majú svoje špecifické charakteristiky, snáď k najdôležitejším patrí fakt, že sa jedná o periferálne procesy, t.j. o procesy, pre ktoré je typický rozptyl na malé uhly. Zjednodušene to znamená, že nalietavajúca častica "neprenikne" do vnútra terčíka, a teda ako rozptýlená nenesie o ňom prakticky žiadnu informáciu, a práve toto bolo s objavom GAP prípadov v $e^{\pm}p$ zrážkach v H1 a ZEUS experimentoch prekvapujúce - ťažko si je predstaviť, že môže k takýmto procesom dôjsť, veď nalietavajúci elektrón, resp. pozitrón odovzdáva protónu tak veľkú energiu, že by mal "vidieť" v protóne objekty tisíckrát menšie, ako je samotný protón!
Navyše analýza GAP procesov ukázala, že sa nejedná o nejaký výnimočný jav - z celkovej vzorky

[1] Podrobnejšia informácia o urýchľovači HERA v Hamburgu je napr. v májovom alebo v júlovom čísle časopisu Quark. Podobne, podrobnejšia informácia o urýchľovači TEVATRON vo FERMILAB-e v USA je v článku dr. J. Antoša v aprílovom čísle časopisu Quark.



Obr. 1: *Ilustrácia $e^{\pm}p$ zrážok v* H1 *a v* ZEUS *experimentoch: a) "obyčajný" hlboko-nepružný $e^{\pm}p$ prípad, b) GAP prípad.*

hlboko-nepružných zrážok, GAP procesy predstavujú 15 %!

Aby sme pochopili ďalší logický sled, považujeme za nutné čitateľa "zaťažiť" možno na prvý pohľad nezáživnou témou, a to historickým prehľadom vzniku tzv. "bielej" teórie silnej interakcie, *reggistiky*. Preto ponechajme nateraz GAP procesy bokom a vráťme sa k úvahám, ktoré vo fyzike elementárnych častíc dominovali začiatkom šesťdesiatych rokov. Pre správne pochopenie podstaty problému, ktorý máme na mysli, pripomeňme, že akýkoľvek proces na úrovni cca 10^{-15} cm je v kvantovej mechanike popísaný pomocou komplexnej funkcie, štvorec ktorej udáva pravdepodobnosť, že daný proces nastane. Ďalej si predstavme, že analyzujeme zrážku dvoch častíc A a B, produktom ktorej sú častice C a D. Schématicky:

$$A + B \to C + D \ . \tag{1}$$

Nech je nám známa vyššie spomenutá funkcia $f(A+B \to C+D)$, štvorec ktorej popisuje pravdepodobnosť daného procesu. Jedna z dominujúcich úloh fyziky šesťdesiatych rokov spočívala v snahe pri známej $f(A+B \to C+D)$ určiť funkciu $h(A+\bar{C} \to \bar{B}+D)$, štvorec ktorej by popisoval pravdepodobnosť procesu:

$$A + \bar{C} \to \bar{B} + D \ . \tag{2}$$

Proces (2) potrebuje ešte jedno vysvetlenie: ukazuje sa, že vo svete elementárnych častíc, každá má svoju *antičasticu*, ktorá sa od nej líši napr. znamienkom elektrického náboja, no jej hmotnosť je rovnaká - znakom $\bar{B}$, resp. $\bar{C}$ sme označili antičastice k časticiam B a C.

Proces (1), resp. (2) je plne popísaný dvomi nezávislými premennými, v prípade procesu (1) označme tieto premenné napr. s a t, kde s nech predstavuje hodnotu celkovej energie zrážky a t hodnotu energie, ktorú častica A "odovzdá" častici C. Potom $f(A+B \to C+D)$ je funkciou s a t - $f(A+B \to C+D) = f(s,t)$. Podobne môžeme postupovať aj v prípade procesu (2), avšak premenné s a t si oproti procesu (1) "úlohy vymenia". Znamená to, že aj $h(A+\bar{C} \to \bar{B}+D)$

je funkciou s a t, ale $h(A+\bar{C} \to \bar{B}+D) = h(t,s)$. Preto vyššie formulovaná úloha sa viaže k problému ako docieliť, aby pri známom tvare $f(s,t)$ sa získala $h(t,s)$. Nešlo o nejakú jednoduchú úlohu, pretože v ceste k riešeniu stál problém, ako definovať $f(s,t)$ v oblasti, kde hodnoty s, resp. t nemajú svoj pôvodný fyzikálny zmysel.
Táto úloha bola riešená v rámci funkcionálnej analýzy komplexnej premennej, kde podstatnú úlohu zohrala možnosť analytického predĺženia komplexnej funkcie $f(s,t)$ do oblasti, kde táto funkcia nebola definovaná. Pri riešení tejto úlohy sa našla taká formulácia $f(s,t)$, tzv. Sommerfeld-Watsonovu transformácia, kde sa analytické predĺženie realizovalo pomocou zovšeobecneného (do komplexnej roviny) orbitálneho momentu hybnosti l, ako ďalšej alternatívnej premennej vhodnej pre popis (1). V tomto prípade sa $f(s,t)$ vyjadrila v tvare súčtu cez l funkcií $f_l(s,t)$, kde $f_l(s,t)$ označuje hodnotu $f(s,t)$ pre dané l. Táto cesta sa však ukázala oveľa úspešnejšia ako sa očakávalo, a to vďaka neočakávanej prediktívnej sile v oblasti pri prechode do limitnej oblasti, kde napr. energia zrážky rastie nad všetky medze. V tejto oblasti tento prístup funkciu $f(s,t)$ *faktorizoval* do troch blokov - prvý blok ($f_1(A,B)$) popisoval dynamiku a kinematiku "správania sa" do interakcie vstupujúcich častíc, druhý ($f_2(C,D)$) v interakcii vzniklých častíc a tretí ($f_p(s,t,l)$) popisoval "výmenu informácie" medzi prvými dvomi blokmi. Jadrom úspechu tejto interpretácie bol fakt, že pri tejto ceste v tvare $f_l(s,t)$ sa objavili singularity v premennej l (t.j. tvar $f_l(s,t)$ bol taký, že pre isté hodnoty l divergoval), ktoré sa dali "pripočítať na vrub" časticiam, ktoré si počiatočné častice A a B s časticami C a D v procese (1) "vymenili". Teda, v konečnom dôsledku funkcia $f(s,t)$ sa dala v spomenutej limitnej oblasti rozložiť do tvaru: $f(s,t) = \sum_l f_l(s,t) = \sum_l f_1(A,B) f_p(s,t,l) f_2(C,D)$. Hovoríme vlastne o *reggistike*, resp. o teórii Regge, teórii, ktorú v takto ucelenej forme sformuloval T. Regge a neskôr predovšetkým rozvinul nedávno zosnulý V.N. Gribov.

Našu "exkurziu" do fyziky šesťdesiatych rokov ukončíme ešte jednou poznámkou. Snáď najtalentovanejší žiak L.D. Landaua, I. Y. Pomerančuk, v tom čase dokázal, že pokiaľ poznáme funkciu $f(A+B \to A+B)$ procesu

$$A+B \to A+B \quad , \tag{3}$$

poznáme aj funkciu $f(A+\bar{B} \to A+\bar{B})$ pre proces

$$A+\bar{B} \to A+\bar{B} \quad , \tag{4}$$

pričom pravdepodobnosti obidvoch procesov sú s istou presnosťou rovnaké (známa Pomerančukova teoréma). Toto tvrdenie je možné sformulovať aj pomocou teórie Regge, kde jej prvý člen $f_p(s,t,l=0)$ zaručoval splnenie Pomerančukovej teorémy (funkcia $f_p(s,t,l=0)$ nemá singularitu, preto pri prechode z (3) do (4) sa jej tvar nezmenil). Pretože ale funkcie $f_p(s,t,l)$ pre $l>0$ majú singularity, a ako sme povedali, tieto je možné "priradiť" k fyzikálne existujúcim časticiam (napr. k $\rho-$mezónu), aj pre prípad s $l=0$ sa zaviedla analogická, teda časticová terminológia, a preto člen $f_p(s,t,l=0)$ dostal názov *pomerón* s tým, že sa mu *formálne* pripísali vlastnosti, ktoré sú charakteristické pre elementárne častice, napr. elektrický náboj, parita a pod.

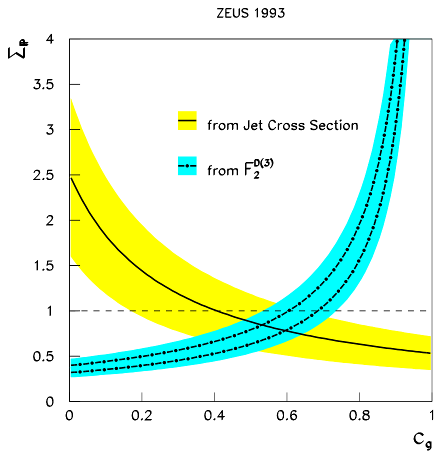
Domnievame sa, že naša exkurzia do fyziky šesťdesiatych rokov bola nevyhnutná k tomu, aby čitateľ pochopil zavedenie pojmu pomerón. Treba ešte raz podtrhnúť fakt, že pomerón *nie je reálnou časticou*, ale vo vyššie zmienenom formalizme je výhodné o tomto objekte hovoriť, ako keby šlo o reálnu časticu. [2]
Reggistika bola veľmi úspešná pri pokuse popísať predovšetkým zrážky hadrónov, teda častíc, ktoré navzájom interagovali pomocou silnej interakcie (v čase vzniku reggistiky kvantová chromodynamika, dnes považovaná za jedinú adekvátnu teóriu silnej interakcie, neexistovala).

[2] Takýto prístup nie je výnimočný, spomeňme napr. pojem "fonónu", zavedenie ktorého značne uľahčilo pochopenie fyziky kryštálovej mriežky.

Vnímavý čitateľ si vzápätí môže položiť otázku: prečo sa dnes moderná fyzika, disponujúca s oveľa bohatšími poznatkami musí vracať k teórii starej cca 30-35 rokov? Odpoveď je skrytá vlastne už v predchádzajúcich riadkoch: z obr. 1 vidíme, ze 15 % procesov z tých, ktoré by mali niesť informáciu o vnútre protónu, a teda patriť k tzv. hlboko-nepružnému rozptylu, sa chová anomálne, zo strany druhej sme reggistiku nazvali "bielou" teóriou silnej interakcie. Ako teda obidva tieto fakty súvisia?
Začnime experimentom a rozborom obr. 1. Zrážky, ktoré predstavuje ilustrácia a, sú dané vlastnosťami silnej interakcie, ktorá je sprostredkovaná výmenou "farebného" náboja. "Farba" je jednou zo základných charakteristík silne interagujúcich častíc (v tomto prípade nemáme na mysli hadróny, tie sú z pohľadu na nositeľov farby už neelementárne objekty, ale kvarky, antikvarky a gluóny - všetky tieto objekty sa označujú pojmom partóny). Farebná interakcia medzi napr. dvomi kvarkami vytvára tenkú "farebnú" strunu, ktorá, pokiaľ sa kvarky od seba vzdialia na viac ako 1 fm (1 fm=10^{-15} cm) sa začne trhať, pričom sa vytvárajú vždy "biele" objekty (objekty, v ktorých je "farba" plne "vykompenzovaná", takže sa navonok nepozoruje - ide teda o "viditeľné" častice, ktoré priamo detekujeme, napr. $\pi-$mezón a pod.). [3] Takýmto spôsobom sa fázový priestor (t.j. priestor, ktorý je vymedzený zákonom zachovania energie a hybnosti) produktov $e^{\pm}p$ interakcie po každom roztrhnutí struny zúži, (ukazuje sa, že ide o exponenciálnu závislosť), a preto ďalšie vznikajúce častice majú stále menšiu energiu, až napokon je energia medzi kvarkami natoľko malá, že nedokáže už strunu roztrhnúť a proces tvorby nových častíc sa zastaví. Týmto spôsobom sa fázový priestor rovnomerne zaplní, čo skutočne ilustrácia a potvrdzuje.
Ako však vysvetliť GAP zrážky? Pretože v tomto prípade fázový prietor nie je rovnomerne zaplnený, znamená to, že došlo k inému mechanizmu interakcie ako v prípade, ktorý znázorňuje ilustrácia a na obr. 1. Tento mechanizmus zrejme "necíti" vlastnosti "farebnej" struny, teda neexistuje dôvod, ktorý by interagujúce objekty "nútil" interakciu "prerušiť a "vytvoriť" tak nové, v súlade so zákonom zachovania energie menej energetickejšie častice. Musí teda ísť o "bezfarebnú", teda "bielu" interakciu, ale práve tú úspešne popisuje reggistika.
Skúsme teda použiť teóriu Regge na popis GAP zrážok. Predstavme si, že nalietavajúci elektrón neinteraguje s "farebnými" partónmi, ale s nejakým "bielym" objektom. Ukazuje sa, že pre popis GAP zrážok je najvhodnejšia predstava *pomerónu*, tak, ako ho zaviedla fyzika šesťdesiatych rokov. Skúsme ísť ďalej: kedže nalietavajúci elektrón vlastne teraz interaguje s pomerónom z protónu, pomerón je presne v rovnakej polohe ako je protón v prípade obyčajných hlboko-nepružných procesov, teda pomocou nalietavajúceho elektrónu by sme mali vedieť, analogicky ako v prípade protónu, určiť aj *vnútornú štruktúru pomerónu*! Zdanlivý paradox spätý s tým, že pomerón nie je reálnou časticou má jednoduché riešenie - ak budeme vedieť pomocou formalizmu, ktorý pre popis istých fyzikálnych procesov zaviedol nefyzikálny objekt, určiť štruktúru tohto objektu, budeme vedieť aj oveľa bližšie určiť, aké útvary, resp. aké javy sa pod daným objektom skrývajú.

Pred prečítaním ďalších riadkov by som čitateľovi doporučil, aby sa zoznámil s článkom "Štruktúra protónu", ktorý uverejnil časopis Quark vo svojom júlovom čísle. Je to z toho dôvodu, že poznatky o štruktúre pomerónu sa získali rovnakým spôsobom, ako o štruktúre protónu, len s tým rozdielom, že v prípade pomerónu pracujeme so vzorkou GAP prípadov, kdežto v prípade protónu sme pracovali s celou vzorkou hlboko-nepružných prípadov. Preto sa zastavíme sa len nad ich interpretáciou. Vieme, že pomerón je "biely" objekt, teda ak je "zložený" z farebných partónov, tieto musia mať takú konfiguráciu, aby ich "farba" bola "vykompenzovaná". Prirodzeným kandidátom sa javia gluóny, a to prinajmenej v počte dva tak, aby sme vyhoveli horeuvedenej požiadavke. Iste, môže ísť aj o kvark-antikvarkové páry, ale pretože na ich vznik je potrebná väčšia energia, budú nepravdepodobnejšie. Na obr. 2 je znázornená štúdia ZEUS experimentu (čitateľ nám iste od-

[3] "Farebné" objekty sa zatiaľ experimentálne nepozorovali. Naopak, dnes veríme, že ich pozorovať ani nemôžeme, fakt, ktorý by mal mať "na svedomí" tzv. *confinement* - anglické slovo označujúce "uväznenie".



Obr. 2: *Štúdia* ZEUS *experimentu: graf závislosti obsahu gluónov v pomeróne z pohľadu na zachovanie momentu hybnosti jeho zložiek.*

pustí podrobnejší popis obr. 2, pretože inak by sme sa dostali zbytočne za rámec nášho cieľa - pokiaľ je to len trochu možné prístupnou formou vysvetliť pojem pomerónu a s ním spätú fyziku), ktorá problém vnútornej štruktúry pomerónu na základe experimentálnych poznakov rieši nasledovne: *pomerón sa zhruba z 80 % skladá z gluónov a zo zvyšných 20 % z kvark-antikvarkových párov, pre ktoré je ale typická menšia energia* - na obr. 2 dolná os predstavuje pravdepodobnosť výskytu gluónov v pomeróne, zvislá os sa týka otvorenej problematiky zachovania momentu hybnosti všetkých zložiek v pomeróne, pretože vzhľadom k tomu, že pomerón nie je reálnou časticou, je diskutovateľná jeho platnosť pre jeho komponenty. Podobný výsledok získala aj H1 kolaborácia.

Záverom by sme radi ešte dodali, že GAP prípady sa pozorujú nielen na HERA urýchľovači, ale aj na TEVATRON-e v USA, kde výsledky CDF a D0 kolaborácii sú konzistentné s HERA údajmi. Samozrejme zostáva mnoho nedopovedaného, napr. vôbec nevieme s akou pravdepodobnosťou by GAP prípady mali vznikať, a pod.. Odpovede na podobné otvorené otázky môže dať len pokračujúca analýza takýchto prípadov.

Zastavme sa ešte nad podtitulkom nášho článku, v ktorom sme fyziku pomerónu označili ako horúceho kandidáta fyziky 21. storočia. Naše tvrdenie vychádza zo samej podstaty GAP prípadov - ide totiž o fyziku na samotnej "hranici" použiteľnosti poruchových prístupov (možnosť aplikácie faktorizácie je posledným pojivom medzi poruchovým a neporuchovým prístupom), ďalej fyzika pri popise javov, kde už nebude možná napr. ani faktorizácia, bude musieť siahnuť k novým metódam, ktoré ale ešte nemá. To bude jedna z jej úloh v najbližšom storočí.