

Vyjádření školitele k doktorandskému studiu Mgr. Jiřího Procházky

Mgr. Jiří Procházka se už během studií na MFF UK, kdy byl mým diplomantem, věnoval problematice pružného rozptylu protonů na protonech při vysokých energiích. Je překvapující, že pro tento, zdánlivě nejjednodušší srážkový proces, který je převážně realizován při malých kvadrátech přenosu čtyřimpulsu t pomocí coulombických a hadronových interakcí, doposud neexistuje spolehlivá teorie, která by popsala jeho dynamické charakteristiky. Proto se k jeho popisu konstruuji fenomenologické modely, splňující při asymptotických energiích požadavky asymptotických teorémů o nichž se předpokládá, že platí v kvantové teorii. Kromě toho ovšem tyto modely vycházejí z určitých předpokladů, z nichž některé se často pokládají téměř za samozřejmé a které de facto určují fyzikální vlastnosti a také predikce těchto modelů.

Zanedlouho po přijetí do doktorandského studia na MFF UK a po krátkém pracovním pobytu ve FZÚ AV ČR, byl Mgr. Jiří Procházka přijat do kolaborace experimentu TOTEM na srážce LHC v CERN, jehož hlavním cílem je studium elastického a difrakčního rozptylu protonů na protonech při LHC energiích. Úkolem doktoranda bylo studium různých fenomenologických modelů a jejich předpovědi používaných k analýze experimentálních dat pružného pp rozptylu při vysokých energiích; byl to hlavně eikonálový model, který byl formulován pracovníky z FZÚ. Ten umožňoval matematicky i fyzikálně konzistentním způsobem započítat vliv coulombického rozptylu v celém intervalu měřených dat diferenciálního účinného průřezu v pružném rozptylu pp pro jakoukoliv modelovou hadronovou amplitudu. Doktorand se podílel jako spoluautor na práci publikované v Nucl Phys.B popisující předpovědi 6 nejčastěji diskutovaných modelů elastického hadronového rozptylu při energii 14 TeV.

Eikonálový model elastického rozptylu hadronů při vysokých energiích bylo nutno aktualizovat. Původně byl navržen obecně pro popis obecného kolizního procesu bodových částic. Vliv struktury nabitých hadronů byl původně popsán pouze pomocí elektrických formfaktorů v dipólové aproximaci pro malé hodnoty t . Současné experimenty pružného elektron-protonového rozptylu umožňují určit závislost elektrického i magnetického formfaktoru zároveň a to ve formě tzv. efektivního formfaktoru a to v daleko větším intervalu hodnot t . Proto bylo nutno používaný eikonálový model v tomto směru rozšířit.

A to bylo také jedním z hlavních cílů práce doktoranda. Místo běžně používaných parametrizací Arringtona, Kellyho a Pucketta použil v tomto případě Borkowského parametrizaci, která umožnila zahrnout i vliv kinematických t -závislých veličin efektivního formfaktoru. Takto zobecněný eikonálový model pro popis celkového elastického pp rozptylu pak byl doktorandem použit nejprve k analýze dat pp rozptylu při ISR energii 53 GeV a to v dosud největším intervalu $|t|$, tj. (0.00126, 9.75) GeV², kde byl detailně otestován.

Z měřených dat diferenciálního účinného průřezu elastického rozptylu hadronů lze určit pouze modul hadronové amplitudy, nikoliv fázi (pokud nemáme data z interferenční oblasti). Podle Betheho je výsledná kompletní amplituda dána nekoherentním součtem coulombické a hadronové amplitudy, která je vynásobena faktorem obsahujícím reálnou relativní fázi mezi coulombickou a hadronovou amplitudou. Pro ni West a Yennie odvodili integrální vztah, který má v integrandu hadronovou amplitudu. Pro praktické výpočty je tento vztah nevhodný: relativní fázi lze přímo určit, pokud je modul hadronové amplitudy čistě exponenciálně závislý na t a fáze hadronové amplitudy nezávislá na t , a to v celém kinematicky přípustném intervalu hodnot t . Oba tyto předpoklady daná data nesplňují. Navíc, pokud je fáze hadronové amplitudy závislá na t , pak výsledná relativní fáze se stává komplexní veličinou, což je nepřipustné. Proto je tato, doposud používaná zjednodušená West-Yennie kompletní amplituda k analýze experimentálních dat, už déle nepoužitelná. Místo ní lze použít eikonálový model, který míso výpočtu relativní fáze, jak se to provádí v Betheho metodě, počítá přímo výslednou kompletní amplitudu.

Je zřejmé, že t -závislost elastické hadronové fáze musí být známa i při analýze dat. Navíc se ukazuje, že tato t -závislost určuje také i chování hadronového rozptylu v prostoru srážkového parametru b , které získáme použitím Fourier-Besselovy transformace původní hadronové amplitudy. A pak pomocí podmínky unitarity v prostoru srážkového parametru můžeme určit průběhy všech profilů. Z fyzikálního hlediska jsou důležité takové t -závislosti elastické hadronové amplitudy, které vedou na centrální, resp. periferální chování elastických profilových funkcí v

prostoru srážkového parametru. Centrální chování je charakterizováno tím, že elastický profil má maximum při srážkovém parametru $b_{\max} = 0$, přičemž s rostoucím b hodnota profilu klesá. Naopak pod pojmem periferální profil rozumíme případ, kdy maximum elastického profilu je pro $b_{\max} > 0$, zatímco pro b mimo tuto hodnotu klesá se vzdalujícím se b od b_{\max} . Fity dat provedl doktorand pro periferální fáze, které odpovídaly středním hodnotám kvadrátu srážkového parametru zhruba 1.6, 1.75 a 1.9 fm. Naopak centrální chování pp rozptylu při této energii bylo získáno pomocí eikonálového modelu s hadronovou fází Bailyho typu.

Výsledky analýz těchto případů byly provedeny jak pro samotný modifikovaný elektrický formfaktor, tak i pro efektivní elektromagnetický formfaktor. Byly určeny hodnoty všech standardních dynamických charakteristik, včetně těch, určujících chování elastického hadronového rozptylu v b . Započtením vlivu magnetického formfaktoru byly získány hodnoty, které se nepatrně liší od odpovídajících hodnot pouze pro elektrický formfaktor. Toto vše bylo provedeno v případě elastického rozptylu protonu na protonech při energii 53 GeV a detailně popsáno v práci zaslané k publikaci do Eur.Phys. J. C, kde je doktorand hlavní autor. Na tuto práci se odkazuje také hlavní publikace TOTEMu pro elastický rozptyl pp při energii 8 TeV publikované v Eur. Phys. J. C.

Numerické výpočty (fity experimentálních dat) byly provedeny pomocí minimalizačních programů typu MINUIT minimalizací statistické funkce χ^2 , která je funkcí parametrů, specifikujících elastickou hadronovou amplitudu. Tato parametrizace musí být dostatečně obecná (a značně flexibilní). Ale je zřejmé, že dané parametry nejsou zcela volné, ale jsou vzájemně vázány okrajovými podmínkami.

Matematicky se jedná o problém tzv. vázaného extrému. K nalezení minima statistické funkce χ^2 se používá tzv. metoda pokutových funkcí. A ta vyžaduje dosti složitý postup fitování. Jedná se o nelineární problém, tj. o hledání minima multimodální χ^2 funkce mnoha parametrů, tj. hyperplochu s mnohanásobnými lokálními minimy a s nepřímým dosažením globálního minima. To znamená, že fit vyžaduje volbu počátečních hodnot parametrů, které nejsou také známy a mohou vést na lokální minimum bez fyzikálního významu anebo k mnohanásobným řešením. Navíc výsledná funkce χ^2 (tj. včetně pokutových funkcí), která se minimalizuje, je velmi složitá (obsahuje i integrály, které je nutno počítat numericky). Celý optimalizační problém se musí řešit iterativně, tj., vhodně měnit váhové parametry pokutových funkcí na základě předchozího fitu. Výsledná kovarianční matice v daném minimu musí být pozitivně definitní. Celá optimalizační procedura je tak velmi náročná na čas (nejen výpočetní). To vyžadovalo značné zkušenosti i trpělivost od Mgr. Jiřího Procházky, obzvláště v případech, kdy optimalizovaná funkce měla více dimenzí a bylo třeba splnit řadu podmínek kladených na řešení.

Náročnost na CPU roste s požadovanou přesností. Jeden krok fitu vyžaduje 1 až 3 desítky hodin CPU. Fity prováděly nezávisle až 3 skupiny pracovníků na TOTEMu v CERN a jedna v FZÚ.

Hodnoty parametrů specifikujících periferální fázi pro pp při 8 TeV získané tímto postupem byly použity ve zmíněné publikaci TOTEMu týkající se interference coulombické a hadronové interakce protonů při této energii, která byla přijata k publikaci v Eur. Phys. J. C. Doktorand je také prezentoval v CERN v posteru pod názvem J. Procházka: Elastic pp scattering at 8 TeV in the Coulomb-nuclear interference region measured by TOTEM; March 2016 (LHCC students poster session, CERN <https://indico.cern.ch/event/491582/>).

Vlastní dizertace se skládá ze 7 kapitol. První dvě jsou úvodní a stručně pojednávají o srážce LHC v CERN a o principu měření pp srážek v experimentu TOTEM. Ta také popisuje principy měření elastických srážek protonů měřených TOTEMem při energii 7 a 8 TeV a stanovení integrovaných účinných průřezů, tj. totálního, elastického a inelastického účinného průřezu. Výsledky těchto měření byly prezentovány celkem v 10 publikovaných pracích TOTEMu, na kterých se dizertant podílel jako spoluautor.

Problematika teoretického popisu elastických srážek nabitých hadronů je popsána v kapitole 3, kde jsou podrobně diskutovány dva známé přístupy: West-Yennieho a eikonálový model.

Kapitola 4 obsahuje podrobný popis aplikace eikonálového modelu na data elastického rozptylu protonu na protonech při energii 53 GeV na ISR v CERN a také při energii 8 TeV na LHC v CERN. Ukazuje, že tzv. standardní až doposud užívaný model elastického rozptylu hadronů s dominantní imaginární částí v difrakčním minimu představuje matematicky zjednodušený popis. Experiment ukazuje, že difrakční minimum je způsobeno minimem

součtu kvadrátů obou částí hadronové amplitudy a ne pouze samým minimem její imaginární části. Detailně popsaná metoda analýzy dat měřeného diferenciálního účinného průřezu pomocí eikonálního modelu představuje až doposud nejdokonalejší metodu, která umožňuje určení dynamických charakteristik elastického rozptylu nabitých hadronů jednotným způsobem v celém měřeném intervalu veličiny t .

Další 5. kapitola dizertace shrnuje důvody a historický vývoj popisu elastických srážek v prostoru srážkového parametru b . Jsou tam také uvedeny důvody proč pružný rozptyl nabitých hadronů by měl být periferální. V této kapitole se diskutují a srovnávají některé výsledky z kapitoly 4 s historickými výpočty Miettinen. Ten se jako jeden z prvních pokoušel určit některé charakteristiky pp rozptylu v závislosti na impaktním parametru a značně ovlivnil řadu pozdějších popisů elastického rozptylu proč pružný rozptyl nabitých hadronů by měl být v prostoru srážkového parametru b periferální. Jsou v ní uvedeny druhé odmocniny středních hodnot kvadrátů totálního, elastického a inelastického srážkového parametru b v případě elastických hadronových kolizí protonů při obou zkoumaných energiích. Ty byly určeny přímo z nafitovaných parametrů elastických hadronových amplitud v t -reprezentaci pomocí vztahů publikovaných před lety pracovníky FZÚ. Ukazují, že sumární inelastický proces je centrální, zatímco elastický hadronový proces může být interpretován dobře jako periferální.

6. kapitola je svým způsobem zcela originální. Poprvé popisuje a shrnuje otevřené problémy popisu elastických srážek protonů při vysokých energiích. Ukazuje v sedmi dílčích bodech na až doposud malou pozornost, která byla věnována roli srážkového parametru b v hadronových kolizích.

Poslední 7. kapitola obsahuje návrh nového pravděpodobnostního modelu elastických hadronových srážek. Základní představa spočívá v tom, že každý kolidující hadron (složený z dalších menších objektů) má vnitřní strukturu, která se s časem mění. A výsledek srážky dvou takovýchto hadronů závisí na stavu obou hadronů v okamžiku jejich vzájemné kolize. Je formulován pravděpodobnostní popis za celkem jednoduchých pravidel a jsou zkusmo navrženy funkční závislosti jednotlivých pravděpodobností na srážkovém parametru a také distribuce úhlů, do kterých dochází k elastickým rozptylům při daných hodnotách srážkového parametru. Je ukázáno postupným fitováním dat rozdělení diferenciálního účinného průřezu elastického pp rozptylu při 53 GeV, jak by měly dané funkce záviset na t a b . I když celkový počet volných fitovaných parametrů je poněkud větší, tak to není na škodu věci. Tato metoda je v základní fázi poznání, kdy se určují poprvé její charakteristiky. Stávající popis ukazuje, že tato metoda analýzy je nosná a že je možno ji detailněji rozpracovat.

Výsledky popsané v kapitolách 6 a 7 byly publikované v Eur. Phys. J. Plus 131 (2016) 147.

Závěr hodnocení

Doktorand Mgr. Jiří Procházka prezentoval několikrát výsledky, na kterých se podílel na pravidelných kolaboračních poradách experimentu TOTEM. Dosažené výsledky, také prezentoval na mezinárodních konferencích. Jeho dizertace obsahuje originální výsledky a je rozhodně přínosem v oblasti elastického rozptylu protonů na protonech při vysokých energiích (jmenovitě kapitoly 4 – 7). Prokázal, že je schopen samostatné vědecké práce. Proto doporučuji, aby byla tato práce přijata jako doktorská dizertace a aby doktorandu, Mgr. Jiřímu Procházkovi, byl po její úspěšné obhajobě, udělen titul PhD.

Praha, 24.11.2016

RNDr. Vojtěch Kunderát, DrSc.

