

**Posudek disertační práce Radka Zlebčíka**  
**Studium produkce dijetů v difrakčních interakcích na HERA**

Práce je věnována měření a fyzikální analýze produkce dijetů v difrakčních procesech na urychlovači HERA se speciálním důrazem na otázku faktorizace v těchto procesech. Touto tématikou se skupina na MFF UK zabývá systematicky již řadu let a vydobyla si v ní v rámci kolaborace H1 významnou pozici.

Tvrde difrakční procesy ve srážkách elektronu či pozitronu s protonem představují zvláštní třídu tvrdých procesů, k jejichž zkoumání přispěly zásadním způsobem experimenty H1 a ZEUS na urychlovači HERA. Jejich teoretický popis je ve srovnání s analýzou tvrdých srážek v plně inkluzivních procesech značně náročný, neboť vyžaduje kombinaci metod poruchové chromodynamiky a Reggeho fenomenologie, obsahuje řadu předpokladů a opírá se o nepříliš dobře určené veličiny. V případě fotoprodukce je popis dále komplikován skutečností, že v těchto procesech je třeba uvažovat i efekty partonové struktury fotonu a s tím spojené nejednoznačnosti. Základní představa, jak tyto procesy probíhají, se opírá o pojem pomeronu, s nímž se pracuje velmi podobně jako s protonem, tj. tvrdé difrakční procesy jsou popisovány jako srážka elektronu s pomeronem, jehož struktura je popisována podobně jako v případě protonu pomocí distribučních funkcí partonů splňujících standardní evoluční rovnice poruchové chromodynamiky. Tyto distribuční funkce by mely být univerzální, podobně jako distribuční funkce partonů v protonu, tj. použitelné ve všech tvrdých difrakčních procesech. Experiment H1 je prvotně určil z měření difrakčního hlubokého nepružného rozptylu elektronu na protonu poprvé již v letech 1995-1997. Následně byly v roce 2000 použity kolaborací CDF při popisu difrakční produkce dijetů procesech ve srážkách antiprotonů s protony na urychlovači TEVATRON ve Fermilab a bylo zjištěno, že teoretické předpovědi jsou zhruba o řád nad daty. Tento jen, nazývaný narušení faktorizace, byl vysvětlen jako důsledek měkkých procesů, které doprovázejí primární tvrdou srážku a které nejsou přítomny v difrakčním hlubokém nepružném rozptylu elektronů na protonech a samozřejmě ani v produkci dijetů v tomto rozptylu. V případě fotoprodukce dijetů se však foton podle dnešních představ chová z části jako hadron a v tomto případě proto očekáváme, že k potlačení difrakční produkce dijetů dojde také. To také kolaborace H1 v pracích z roku 2007 a 2010 pozorovala.

Měření a teoretická analýza difrakční fotoprodukce dijetů je hlavním cílem disertace. Její přínos oproti předchozím analýzám experimentu H1 spočívá především v tom, že při definici difrakčních procesů využívá kriterium založené na detekci a měření protonu rozptýleného na velmi malý úhel a nikoliv kriterium existence tzv. mezery v rapiditě.

Disertace má 8 částí, jež přehledným způsobem popisují základní teoretický rámec pro popis difrakčních procesů na HERA, experimentální uspořádání detektoru H1, shrnutí existujících měření difrakčních procesů, způsob sběru dat a rekonstrukce dijetů, extrakci dat z naměřených údajů a konečně fyzikální výsledky.

Práce přesvědčivě ukazuje, že doktorand zvládl všechny kroky analýzy a to jak její experimentální, tak i teoretické části, což vzhledem ke skutečnostem uvedeným na začátku tohoto posudku nebylo jednoduché. Hlavní výsledek práce, jímž je prokázání, že difrakční fotoprodukce dijetů je potlačena oproti naivnímu očekávání faktorem zhruba 0,5 i pokud jsou difrakční procesy definovány pomocí detekce dopředního protonu, je velmi důležitý z důvodu, k němuž se ještě vrátím.

Disertace je psána v angličtině na slušné úrovni, rušivé je pouze systematické chybné používání slovesa „accomplish“ místo správného „complemented“ či „accompanied“ ve smyslu „doplnit, doprovázet“, viz například věta na straně 58

*.. The data cross sections  $\sigma_{Data}$  are accomplished by the total uncertainty representing the quadratic sum of the statistical and systematic errors. “*

Na několika dalších místech je použito nesprávné slovo, které může čtenáře zmást, například na straně 34 ve větě

*In the typical inclusive DIS event, the rapidity interval between the proton remnant and the struck quark is filled by hadronic activity, which is a consequence of the color connection **within** these objects.*

má být místo „within these objects“ správně „between these objects“, podobně na straně 16 má být místo „which qualifies“ správně „which quantifies“, na straně 65 má být v první větě části 5.2. „relies“ a nikoliv „relays“, na straně 82 ve spojení „calculations are feasible“ má být zjevně „calculations are reliable“ a na straně 102 má být místo „auxilliary phase spaces“ správně „adjacent phase spaces“. Ale to jsou drobnosti.

K jednotlivým částem mám několik konkrétních připomínek a dotazů

### **K části teorie:**

Tvrzení na straně 17

The fact that the strength between "color charges" grows with distance causes that only color neutral objects (hadrons) can be stable making the direct observation of quarks (with fractional electric charge) or gluons impossible. This phenomenon is known as confinement [30].

není správné, neboť růst barevného náboje na velkých vzdálenostech neimplikuje uvěznění barevných objektů v hadronech, mimo jiné i proto, že chování barevného náboje na velkých vzdálenostech není jednoznačné a závisí na tzv. renormalizačním schématu. Uvěznění je netriviální neporuchový jev.

Ačkoliv analýza je provedena na úrovni NLO výpočtů poruchové QCD, jsou evoluční rovnice pro partonové distribuční funkce v protonu (2.23) a (2.24) jen na úrovni LO a evoluční rovnice pro partonové distribuční funkce fotonu, jež obsahuje nehomogenní člen, nejsou uvedeny vůbec. Ve vyšších rádech QCD jsou na pravých stranách (2.23) a (2.24) a podobně pro partonové distribuční funkce fotonu rozvoje v mocninách  $\alpha_s(\mu_f)$  a větvící funkce stojící u druhého a dalších rádů v  $\alpha_s(\mu_f)$  nejsou univerzální, ale závisí na výběru faktorizačního schématu, jež ovšem není v práci specifikováno.

Na straně 30 se tvrdí

*On the other hand, if the photon virtuality  $Q$  is small, instead of photon, long living partonic fluctuations  $\gamma \rightarrow q \bar{q}$  can interact with partons in proton (resolved processes). These hadronic fluctuations exhibit non-perturbative nature.*

zatímco na straně 32 je (správně) řečeno

*photon parton densities can be divided into the hadron-like and the point-like contribution. The later is arising from the inhomogeneous term (corresponding to splitting  $\gamma \rightarrow q \bar{q}$ ) in the QCD evolution equations for the photon [14] and exhibits perturbative nature.*

Tvrzení na straně 32

*The hadron-like part occurs only at lowest values of photon four-momentum fractions  $x < 0.1$  which are experimentally hardly accessible at HERA and can thus be neglected.*

není opodstatněné, neboť relativní důležitost point-like a hadron-like komponent distribučních funkcí partonů ve fotonu závisí na konkrétní parametrisaci. Například v SaS2D parametrisaci je hadronová komponenta důležitá v závislosti na škále až do  $x=0,5-0,8$ . Ale i u SaS1D nelze

hadronovou komponentu nad  $x=0,1$  zanedbat. Navíc, autor toto zanedbání ve skutečnosti nepotřebuje a ani to nevyužívá.

Na straně 37 je uvedeno

*The NLO calculations are performed with the number of flavors fixed to 5.*

ale z textu není jasné jakou konkrétní parametrisaci PDF v protonu pro DDIS vzal doktorand při výpočtu a hlavně proč vzal 5 nehmotných kvarků, když příčné hybnosti jetů začínají v jeho analýze u cca 5 GeV, což je zhruba právě hmotnost kvarku b. Aby bylo možné hmotnosti kvarků zanedbat, jak to dělají použité programy, je třeba aby příčná hybnost jetů byla mnohem větší hmotnost nejtěžšího kvarku. Z tohoto hlediska byla volba  $N=4$  nehmotné kvarky správnější.

### **K části Experimental set up.**

Nerozumím tvrzení na straně 43 že

*The peak luminosity of the HERA operation was  $50 \mu b^{-1}/s$  which corresponds to about one interaction per hour for 100 pb process,*

neboť uvedené hodnoty luminozity a účinného průřezu odpovídají 18 interakcím za hodinu.

### **K části Overview of Diffractive Measurements**

Proč nebyla použita parametrisace H1 2007 PDF Pomeronu, jež byla na rozdíl od parametrisace H1 2006 extrahována z dat zahrnujících produkci dijetů?

Tato část obsahuje velmi podrobnou diskuzi dosavadních analýz H1 a ZEUS týkajících se difrakční produkce dijetů s důrazem na měření narušení faktorizace ve fotoprodukci. Zdá se mi, že rozdíl mezi výsledky H1 a ZEUS není zase až tak velký, viz, tabulka 4.4. Jednak vzhledem k velké chybě faktoru potlačení a dále i proto, že analýza ZEUS zahrnuje jety s vyššími příčnými hybnostmi než H1 (7,5 GeV vs 5,5 GeV). Navíc srovnání záleží na zvolené parametrisaci PDF Pomeronu.

### **K části Data Selection and Reconstruction**

Na straně 76 je uvedeno

*The cuts are comparable to the previous analysis, only the cut on the leading jet is made to be a little bit higher (5.5 instead of 5GeV) to ensure a good performance of the NLO QCD calculations.*

Jak může taková malá změna tvrdé škály zajistit "dobré chování NLO QCD výpočtů"? Jak by se změnil počet případů ve fotoprodukci, kdyby se dolní mez na příčnou energii jetů zvýšil na hodnotu 7,5 GeV jakou uvažoval ZEUS?

### **K části Results**

Výsledky disertace potvrdily, ve fotoprodukci i DIS, předchozí analýzy experimentu H1 difrakční produkce dijetů, v níž byly difrakční procesy izolovány metodou mezery v rapiditě, zatímco v disertaci je použita metoda založená na detekci dopředního protonu. Toto je důležitý výsledek především pro oblast fotoprodukce, kde předchozí i tato analýza H1 pozorují potlačení produkce dijetů, zatímco ZEUS nikoliv. Zároveň však přináší otázku, co je v případě takto identifikovaných difrakčních procesů mechanisme, který způsobuje narušení faktorizace. V případě mezery v rapiditě to jsou měkké procesy, které tvrdou difrakci doprovází a způsobují, že se mezera v rapiditě částečně zaplní. Není mi ovšem jasné, jak by tyto měkké procesy mohly ovlivnit identifikaci dopředního protonu.

Celkově je práce na vysoké odborné úrovni a splňuje všechny podmínky kladené na disertaci a proto doporučuji udělit Radku Zlebčíkovi po úspěšné obhajobě titul PhD.

