

Oponentský posudek disertační práce Mgr. Karla Kováře

Investigation of the factorization scheme dependence of finite order perturbative QCD calculations

QCD je lagrangeovská kvantová teorie pole. Z matematického hlediska však již samotný výraz pro hustotu lagrangiánu není dobře definován. K tomu, aby takováto teorie mohla poskytovat algoritmus vedoucí k předpovědi hodnot měřitelných veličin (tj. aby byla vyvratitelná) je nutno ji "regularizovat" a "renormalizovat". V tomto směru se neliší od QED. V případě QCD však existují další problémy, související s tím, že kvarky a gluony (tj. "elementární kvanta" polí vystupujících v lagrangiánu) nelze realizovat jako separované volné částice. Ve svých důsledcích to mj. znamená, že v rámci poruchové teorie řadu předpovědí měřitelných veličin možno získat jen díky tomu, že je lze zapsat ve tvaru konvoluce dvou faktorů, z nichž jeden je nezávislý na konkrétním procesu, kterého se ta která měřitelná veličina týká. Takovouto faktorizaci lze provést "libovolným" způsobem. Každá konkrétní faktorizace (podobně jako renormalizace) je určena zadáním "faktorizačního schématu" a "faktorizační škály".

Přesná předpověď by neměla záviset ani na zvoleném faktorizačním schématu, ani na hodnotě příslušné škály. V praxi se však předpovědi poruchové teorie (téměř) vždy opírají pouze o součet nějaké podmnžiny příspěvků. Takto získané (přibližné) předpovědi poruchové QCD však již na volbě faktorizačního schématu a faktorizační škály záviset mohou. Tato skutečnost implikuje mj. další zdroj problémů při oceňování teoretické neurčitosti výsledků příslušných výpočtů. To přirozeně vede ke snaze hledat v nějakém smyslu optimální faktorizační schéma a/nebo škálu (obdobně tomu je v případě renormalizace). Zcela legitimní je ovšem i každá snaha využít volnost ve volbě faktorizačního schématu k zjednodušení (případně k dosažení aplikovatelnosti) nějakého algoritmu výpočtu.

Právě tímto směrem je zaměřena posuzovaná disertace. K tomu připomeňme, že

- 1) V LO přiblížení jsou jak distribuční funkce partonů (PDF), tak "štěpící funkce" (splitting functions) $P_{pp'}$ nezáporné a nezávislé na faktorizačním schématu. Jako takové umožňují plausibilní pravděpodobnostní interpretaci využitelnou mj. v Monte-Carlovské simulaci partonových spršek v počátečním stavu.
- 2) Ve vyšších přiblíženích již obě zmíněné veličiny na faktorizačním schématu závisejí. Nemusejí přitom vyhovovat výše zmíněné nezápornosti - a tedy nemusejí být interpretovatelné jako pravděpodobnosti. To samo o sobě vůbec neznamená, že jsou "špatné", či "nepřijatelné", ale rozhodně to znamená, že jimi nelze nahradit příslušné LO-veličiny ve výše zmíněných M-C simulacích.
- 3) Převážná většina analýz experimentálních dat je prováděna v tzv. \overline{MS} faktorizačním schématu a přitom v NLO aproximaci pro malé hodnoty (Bjorkenovy proměnné) x nabývají funkce P_{GG} a P_{GQ} záporné hodnoty, a jako takové

nejdou bezprostředně použitelné pro výše zmíněné M-C simulace v NLO aproximaci.

4) Existuje tzv. ZERO faktorizační schéma, ve kterém NLO příspěvky ke všem Ppp' jsou (definitoricky) rovny nule, a tedy v tomto faktorizačním schématu automaticky vymizí všechny výše zmíněné problémy s M-C simulacemi v NLO aproximaci.

K tomu, aby zjistil, zda transformace od \overline{MS} k ZERO faktorizačnímu schématu je prakticky aplikovatelná, vyšetřuje K. Kolář nejprve vztahy mezi potřebnými veličinami vyjádřenými v libovolných dvou faktorizačních schématech. Přitom s výhodou využívá skutečnosti, že Mellinova transformace převádí výše zmíněnou konvoluci na součin. Podrobnou analýzou v případě NLO aproximace dochází k závěru, že faktorizační schéma ZERO není prakticky aplikovatelná v oblasti $x \lesssim 0.1$ mj. pro přílišnou citlivost měřitelných veličin na hodnotu faktorizační škály (viz. Fig. 4.3) a gluonové distribuční funkce zde nabývají záporných hodnot. Zjišťuje také, že tato skutečnost souvisí s póly transformace Mellinových obrazů. Na druhé straně zjišťuje, že nesigletní distribuční funkce, stejně jako odpovídající příspěvek k strukturální funkci F_2 ve schématu ZERO jsou prakticky shodné s těmito veličinami ve schématu \overline{MS} .

K. Kolář proto obrací pozornost k možné existenci "effectively ZERO" faktorizačního schématu, tj. takového schématu, které by

- i) bylo ekvivalentní se ZERO schématem z hlediska nesingletní PDF,
- ii) vedlo k malým NLO korekcím u singletní a gluonové PDF
- iii) netrpělo výše zmíněnými problémy schématu ZERO.

Vybrané výsledky analýz odpovídajících jednomu ze schémat (\equiv EPO) vyhovujících prvním dvěma z výše uvedených požadavků jsou prezentovány na obrázcích Fig. 5.6 - 5.11. Prakticky žádný z uvedených grafů nemluví ve prospěch EPO (ve srovnání s \overline{MS}). Speciálně z Fig. 5.6 je evidentní, že problém s nekladnými hodnotami Ppp' není v případě EPO rozhodně menší než v \overline{MS} (V NLO nabývají Ppp' (EPO) záporných hodnot i pro $x > 0.1$!).

Poslední věta předposlední kapitoly v podstatě konstatuje, že provedené analýzy svědčí v neprospěch splnitelnosti všech 3 výše uvedených podmínek jakýmkoliv faktorizačním schématem.

V předposlední větě závěrečné kapitoly je vysloven názor, že faktorizační schéma ZERO může být využito v NLO M-C generátoru pro produkci těžkých objektů.

Disertační práce je napsána velice dobrou angličtinou stručně, přehledně a výstižně.

Pokud bych k její formální stránce měl mít nějaké připomínky, tedy

- i) na str. 1. T_{ij}^a nejsou matice, ale maticové elementy;
- ii) není mi z textu jasné v čem se liší "naivní partonový model" od "partonového modelu";
- iii) bylo by vhodné připomenout fyzikální význam kinematických proměnných x, y, Q^2, S , vystupujících ve formulí (1.4);
- iv) uvádění (bez bližšího vysvětlení) takových formulí, jakými jsou (2.36), (2.47), (2.58) je matoucí;
- v) nepochopil jsem, proč v grafech pravého sloupce Fig. 4.5 probíhá x pouze

interval $\langle 10^{-4}, 10^{-2} \rangle$, když v obdobných grafech ve Fig. 4.2 jsou odpovídající veličiny uváděny v interval $\langle 10^{-4}, 10^{-1} \rangle$;

vi) v grafech zobrazujících průběhy strukturální funkce F_2 by bylo vhodné uvést (alespoň několik) experimentálních hodnot (s příslušnými "error bars");

vi) vzhledem k tomu, že "problémy" faktorizačního schématu ZERO se soustředí do oblastí malých x , očekával bych, že budou výrazněji demonstrovány průběhem F_L , než průběhem F_2 - z tohoto hlediska nerozumím, proč longitudinální strukturální funkci není v disertaci věnován ani jeden graf.

Domnívám se, že skutečnost, že faktorizační schéma ZERO se ukázalo být prakticky nepoužitelné v oblasti malých x (tj. pro $x \leq 10^{-1}$) může být sice nečekaná (jak říká autor v posledním odstavci na str. 36), ale nepředstavuje žádné velké neštěstí. Pokud by v této oblasti nenarazilo na (v jistém smyslu náhodné) problémy mohlo by se stát při své aplikaci v oblasti malých x (zejména v oblasti $x \ll 10^{-1}$) zdrojem velkých systematických chyb. Celá filozofie využití ZERO faktorizace je totiž motivována snahou o konzistentní M-C simulace na úrovni NLO. Z globálních analýz (viz např. MSTW 2008 - jakkoliv je provedena v \overline{MS} schématu) vyplývá, že v této oblasti jsou NNLO korekce (alespoň pro některé **měřitelné** veličiny - např. F_L) srovnatelné s NLO korekcemi (důvodně se dá očekávat nezbytnost započíst i příspěvky NNNLO). Právě tak bude evidentně třeba ocenit příspěvky vyšších twistů. Krom toho otevřenou otázkou zůstává zda v této oblasti je evoluce adekvátně popsána DGLAP rovnicemi (tj. otázka zda zde je možný signál ve prospěch např. BFKL).

Všechny výše uvedené poznámky však nic nemění na tom, že téma disertační práce je aktuální (zejména z hlediska simulací a/nebo analýzy dat v kinematické oblasti, která se stala dostupnou díky LHC) Metoda a postupy v disertaci využitě se opírá zejména o poruchovou QCD a DGLAP evoluční rovnice; z technického hlediska pak využívá zejména Mellinovy transformace (včetně transformací inverzních) a rozsáhlé numerické výpočty. Ke kvalitě formálního zpracování disertace jsem se kladně vyjádřil již v úvodu posudku. Za nejdůležitější původní výsledek práce považuji analýzu ZERO faktorizace a vymezení oblasti její praktické využitelnosti. Za cennou považuji i analýzu svědčící v neprospěch existence výše vymezených "effectively ZERO" schémat.

Podle mého názoru posuzovaná práce prokazuje předpoklady Mgr. Karla Koláře k samostatné tvořivé práci.

V Praze 24. 2. 2012

Prof. Ing. Jiří Formánek, DrSc.