

## Posudek disertační práce Mgr. Iny Carli s názvem “Angular analysis of the $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ decay with the ATLAS detector”

Ve své disertační práci autorka Ina Carli přehledně popisuje zejména vlastní konkrétní příspěvky do analýzy, které se týkají měření úhlových charakteristik rozpadových produktů v procesu rozpadu neutrálního  $B$ -mezonu na pár mionů a mezon  $K^*$ .

Téma práce je živou experimentální a teoretickou oblastí, která vykazuje zajímavé odlišnosti na úrovni několika standardních odchylek od Standardního modelu, a byla a je zkoumána několika minulými i současnými experimenty. Jde tedy o velmi aktuální, atraktivní a žádané téma.

Práce je napsána velmi dobrou angličtinou s minimem drobných formulačních záležitostí, ale jinak prakticky bez chyb. Taktéž grafická podoba práce a její sazba je na velmi dobré úrovni. Jediná typografická drobnost je opakovaná sazba “\\_” ve jménech triggerů.

V úvodní části popisuje zajímavě a originálně Standardní model zejména elektroslabých interakcí, relevantních pro rozpady, kterými se následně zabývá ve fyzikální části své práce. Jako drobnou poznámku by šlo uvést, že v elektroslabých interakcích tvoří neutrino standardně horní komponenty dubletů, oproti tomu, jak je uvedeno v tabulce 1.1, popř. drobnost, že foton není přímo kalibračním bosonem grupy  $SU(1)$ , ale “míchá” se s neutrálním bosonem grupy  $SU(2)$ . V matici současných číselných hodnot CKM matice není uvedena komplexní fáze, která následně vystupuje v rovnosti ve Wolfensteinově parametrizaci, jde ale o drobnosti. Přejaté obrázky jsou dobře odkazovány na původní zdroje, stejně jako u dalších rovnic, výsledků apod.

Měření rozpadu, kterým se disertce zabývá, je dobře motivováno snahou omezit či zahlédnout efekty možné fyziky za Standardním modelem ve vzácných rozpadech, kde neutrální slabé proudy mění vůni kvarků, a které jsou zakázány na stromové úrovni, zatímco ve virtuálních korekcích se mohou projevit možné efekty nových částic či interakcí. Práce obsahuje pro experimentální fyziky názorné Feynmanovy diagramy, přičemž by možná stálo za uvození termínu tzv. “penguin” diagramů jako jisté hantýrky oboru. Jakkoli, správně je zdůrazněno, že úhlová rozdělení mají šanci rozhodnout o souladu teorie s daty na detailnější úrovni, než “pouhé” měření parciální rozpadové šířky v tomto kanále, jakkoli je sám velmi vzácný. Je naznačen jazyk efektivní teorie pole, kde by možná stálo za to explicitně zmínit, že  $O_i$  jsou efektivní operátory a  $C_i$  Wilsonovy koeficienty. Na konci sekce by šlo podrobněji definovat pojem form faktoru. Dobře a přehledně je však rozebrána současná experimentální situace pro daný proces.

Následuje kapitola o urychlovači LHC a experimentu ATLAS, kde jsou dobře shrnuty hlavní parametry obou komplexních systémů, a to jak technických, tak experimentálně relevantních (jako např. rozlišení), včetně popisu sběru dat a triggeru, ale i shrnutí projektů ATLAS Phase I a II upgrade vč. zmínek o AFP, HGTD a samozřejmě ITk, kterému se později věnuje podrobněji.

V samotné analýze jsou měřeny parametry úhlových rozdělení, které jsou sice zprůměrovány přes stavy s opačnou hodnotou CP, nicméně takové, které mají citlivost na diagramy za Standardní model. Následně jsou extrahovány parametry, které jsou nezávislé na form faktorech, které mají velké neurčitosti teoretické. Všechny parametry jsou měřeny jako funkce invariantní hmoty mionového páru v rozsahu od 0.2 GeV do cca 2.5 GeV, tj. pod práh produkce mezonu  $J/\psi$ . Velice detailně je probrána složitá fenomenologie parametrizace úhlových rozdělení, redukce jejich závislosti na form faktorech a tzv. folding, využití symetrie goniometrických funkcí za účelem redukce počtu experimentálních binů a tedy snížení statistické chyby.

V kapitole věnované samotné analýze je nejprve velmi podrobně rozebrána selekce a kombinace triggerů. Podrobně je zmíněna oprava o konečnou akceptanci, popis pozadí a také systematické chyby spjaté např. i s “biasem” fitu a kvalitou “pull” rozdělení či s přítomností neočekávaných pozadí, jakožto pozadí fyzikálních i kombinatorických.

Výsledky jsou extrahovány moderní a přesnou metodou nebinovaného věrohodnostního fitu. Přestože jsou výsledky v rozumném souladu se Standardním modelem, je zajímavostí, že v nejvyšším měřeném binu inv. hmotnosti mionů je pozorován nesouhlas se SM na úrovni několika sigma, a výsledky potvrzují nesoulad v parametrech pozorovaný i experimentem LHCb.

Ve druhé části disertace se autorka věnuje detailnímu popisu svých příspěvků do projektu upgradu dráhového detektoru experimentu ATLAS zvaného ITk, konkrétně testování stripového křemíkového modulu, a nakonec také vyhodnocení pozadí událostí ve fyzikálních analýzách, které nepochází ze srážek protonů. V obou těchto tématech prokazuje dostatečně hlubokou znalost problematiky a samostatnou experimentální práci.

Závěrem lze říci, že práce je zajímavá a čtivá, nelze jí vytknout žádnou vážnou námitku, přináší důležité výsledky v oblasti fyziky  $B$  mezonů s dosahem na možná omezení fyziky za Standardním modelem. Na celkové práci autorky lze také jistě ocenit záběr jejích aktivit a to od provozu SCT detektoru a testování HW pro ITk upgrade přes studium a validaci “non-collision” pozadí po samotnou fyzikální analýzu a příspěvek k mnoha jejím krokům včetně fitování hlavních výsledků. Nakonec, již samotná skutečnost, že výsledky práce byly publikovány v odborném časopise za experiment ATLAS jistě svědčí o její kvalitě a schopnostech autorky samostatně vědecky pracovat.

K práci mám několik dotazů, po jejichž uspokojivém zodpovězení práci plně doporučuji k přijetí jako disertační práci.

1. Sekce 1.3: šlo by podrobněji vysvětlit, proč jsou zajímavé právě koncové rozpady s vektorovým mezonem?
2. proč je příspěvek smyčky s propagátorem top kvarku dominantní, viz. Obr.1.3 – je efekt jeho velké hmoty ve jmenovateli převážen hodnotou CMK elementu?
3. Str. 12: proč musejí být v měření odstraněny rezonanční příspěvky od vázaných stavů  $c\bar{c}$ , včetně jejich “tails”? Nejde spíše o definici kinematické oblasti s minimálním příspěvkem od rezonancí?
4. Šlo by podrobněji interpretovat, který efektivní operátor vede k nesouladu současných dat s měřeným parametrem  $P_5'$ ?
5. Sekce 3.6: Z popisu generátoru PythiaB se zdá, že jedna událost nagenеровaná na partonové úrovni je následně využita opakovaně v různých hadronizačních a tedy i rozpadových módech, ovlivňuje toto nějak statistickou chybu nasimulovaných vzorků?
6. Str. 50: výčet exkluzivních nasimulovaných procesů zahrnuje i např.  $B^0 \rightarrow J/\psi K^*$ , jakým způsobem je řešena interference mezi ostatními a zejm. nerezončními diagramy, příp. slouží tyto vzorky jako signální v kinematických oblastech, kde se čeká jejich hlavní příspěvek? Byla uvažována případná systematická chyba s tímto spojená?
7. Str. 51: mionové komory tedy nebyly vůbec využity k určení hybnosti mionů?
8. Diskuze k akceptanci v sekci 4.4.2 v podstatě zahrnuje i unfolding měřených úhlů, tj. jejich opravu o detektorové rozlišení (a nejen konečnou efektivitu a akceptanci). Z definice jde o bin-by-bin unfolding jako funkce  $q^2$ . Bylo v  $B$  fyzikálních analýzách uvažováno o jiné formě unfoldingu, resp. je to vůbec technicky možné, neb jde vlastně o korekci měřených veličin na úrovni hustot pravděpodobnosti ve věrohodnostní funkci? Obsahuje systematická chyba na akceptanci také výběr alternativního generátoru, hadronizačního modelu či MC vzorku?
9. Byl fit proveden vlastním kódem anebo s použitím balíku RooFit?
10. Nakonec bych se rád zeptal, nakolik autorka sama přispěla či byla “ušetřena” práce na přípravě článku za experiment ATLAS a vnitřního schvalovacího procesu; stálo by také možná za to uvést vnitřní zprávy, na kterých se aktivně podílela.

V Olomouci dne 26.11.2018  
Mgr. Jiří Kvita, Ph.D.