

Posudek dizertační práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze

Posudek vedoucího práce

Autor: **Mgr. Matěj Hudec**

Název práce: **Aspects of baryon and lepton number non-conservation in the Standard Model of particle interactions and beyond**

Vypracoval: **doc. Ing. Michal Malinský, Ph.D.**

Pracoviště: **Ústav částicové a jaderné fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, Praha 8**

Kontaktní e-mail: **malinsky@ipnp.mff.cuni.cz**

Kontext

Problématica případného poruchového nezachování baryonového (B) a leptonového (L) čísla ve scénářích za Standardním modelem částicových interakcí patří mezi zásadní témata moderní fyziky vysokých energií s jasným přesahem do příbuzných oborů jako je astročásticová fyzika či kosmologie. Mezi základní hypotetické projevy takovéto „nové dynamiky“ s charakteristickou energií vysoko nad škálou narušení elektroslabé symetrie pak patří zejména fundamentální nestabilita baryonové hmoty v podobě konečné doby života protonů, Majoranovská povaha neutrinových hmotností a s tím spojené procesy leptogeneze v raném vesmíru či tzv. bezneutrinový dvojitý beta-rozpad.

Nízkoenergetická fenomenologie jednoduchých kalibračních rozšíření Standardního modelu (SM), které efekty narušení B a L přirozeně zahrnují např. ve formě existence nových kvantových polí zprostředkujících přímé interakce mezi kvarky a leptony (tzv. leptokvarky), se však typicky neomezuje jen na výše zmíněné efekty. V poslední době se často studují i jejich další možné projevy, a to zejména v souvislosti s pozorováním celé řady anomálií v procesech zahrnujících B-mesony na aparaturách LHCb a Belle.

Z hlediska teorie se toto studium v zásadě odehrává na dvou frontách. Obvykle jsou uvažovány ad-hoc alternativy Standardního modelu spočívající v jeho chápání jako efektivní teorie pole (tzv. SMEFT), v nichž je typicky postulována existence několika málo dodatečných stupňů volnosti (bez ohledu na UV-strukturu takového rozšíření) s cílem výše zmiňované anomálie co nejlépe popsat. Méně obvyklé - o to však zajímavější - jsou podobné pokusy v rámci UV-kompletních scénářů, jejichž základním rysem je širší spektrum nových dynamických polí a s tím i bohatší fenomenologie; ta však velmi často kromě „žádoucích“ efektů (např. právě pro B-fyziku) zahrnuje i modifikace předpovědi SM v kanálech, které žádné experimentální anomálie nevykazují. V tomto přístupu bývá tudíž typicky mnohem obtížnější identifikovat specifické scénáře, které by byly schopny popsat pozorované signály (pokud jsou reálné) bez nekompatibility s pozorováním v případech, kdy jsou tyto dobře popisovány v rámci Standardního modelu.

Vlastní obsah práce

Hlavním směrem kandidátovy vědecké práce na tomto poli bylo zejména studium nejjednodušších „kompletních“ scénářů s leptokvarkovými stupni volnosti, a to hlavně v rámci tzv. „beyond-SM“ teorií s rozšířenou kalibrační symetrií. Nejjednodušší takovou

strukturou jsou pak tzv. $SU(4) \times SU(2) \times U(1)$ modely, jež kromě leptokvarků vektorového typu odpovídajících dodatečným generátorům kalibrační symetrie obvykle obsahují i celou řadu nových skalárních stupňů volnosti spojených s potřebou implementace nějaké varianty Higgsova mechanismu. Jedním z hlavních předmětů studia Mgr. Hudce byly dvě specifické populární realizace tohoto scénáře, a to 1) tzv. Minimální model s kvark-leptonovou symetrií (MQLS) a 2) tzv. Fileviez-Perez-Wise (FPW) model, jenž se od předchozího liší zejména strukturou sektoru neutrálních leptonů (tj. počtem odpovídajících stupňů volnosti) a s tím spojenou přítomností dodatečné množiny Yukawovských vazeb. V jejich rámci pak šlo zejména o identifikaci oblastí v relevantních parametrických prostorech, které by umožňovaly popis alespoň některých B-anomálií při zachování kompatibility v ostatních měřitelných kanálech (kapitoly 2-4 předkládané práce).

Tyto aktivity na kandidáta kladly vysoké nároky z hlediska zvládnutí mnoha pokročilých technik moderní částicové fyziky, zevrubnou mnohakanálovou teoretickou analýzou počínaje a vysoce netriviálními detailními numerickými simulacemi konče. Klíčem k jejich rychlému osvojení pak byly zejména úzké kontakty s výzkumnou skupinou Prof. Wernera Poroda z Fakulty fyziky a astronomie University ve Wuerzburgu, s níž Mgr. Hudec dlouhodobě spolupracoval. Míra kandidátovy kompetence v této problematice se pak jasně ukázala v závěrečné fázi jeho studia, kdy již pouze s pomocí dalšího studenta samostatně provedl (a v předkládané dizertaci prezentoval, viz. kapitola 5) globální analýzu celé třídy modelů s tzv. $SU(4)$ vektorovým leptokvarkem se zaměřením na identifikaci nejslibnějších fenomenologických kanálů z hlediska jeho hledání v experimentech blízké budoucnosti.

Hlavní výsledky

Hlavními výsledky práce shrnutými v dvojici příložených publikací (Physics Letters B 787 (2018) 159 a Physical Review D 101 (2020) 095024) jsou zejména nové poznatky o možnostech MQLS a FPW modelů vysvětlit pozorované B-anomálie, aniž by se tak stalo na úkor jejich souhlasu s jinými typy experimentálních dat. Jejich detailní numerická analýza nejenom odhalila určité potíže s popisem hodnot obou hlavních typů relevantních pozorovatelných, tzv. $R_{K^{(*)}}$ a $R_{D^{(*)}}$ parametrů (s jasnou indikací toho, že se v případě druhého z nich může jednat o falešný signál), ale zároveň umožnila identifikovat specifickou dvojici rozpadů tau-leptonů jako primární kanály, v nichž za daných okolností má největší smysl hledat efekty narušení leptonového flavoru. Konkrétní příspěvky kandidáta k těmto studiím jsou detailně popsány v první části kapitoly 4.

Kromě výsledků prezentovaných v hlavní části dizertace se Mgr. Hudcovi v průběhu doktorského studia podařilo publikovat ještě další, více teoreticky zaměřenou odbornou práci (Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 47 (2020) 015004) týkající se tzv. problému hierarchie v kvantové teorii pole (reference [77]).

Hodnocení dizertační práce

Odborná úroveň

Jak už napovídá výše uvedený seznam autorových peer-reviewed publikací v prestižních oborových periodikách (jakož i jejich nezanedbatelný citační ohlas), odborná úroveň předkládané práce, jež na těchto studiích staví, je vysoká. Kromě uvedeného typu výsledků práce navíc obsahuje velmi zajímavý (a do značné míry originální) pohled na problematiku

definice zachovávajících se aditivních kvantových čísel a jim odpovídajících symetrií v BSM fyzice.

Rozsah práce, jazyková, grafická a formální úroveň

Co do rozsahu je předkládaná dizertační práce standární, její jazyková úroveň je výborná. Seznam referencí je velmi pečlivě zpracován, vítaným prvkem je zejména možnost využití široké sítě hypertextových odkazů v elektronické verzi. Některé části práce mohou být prakticky v nezměněné podobě použity i jako studijní text pro mladé doktorandy, případně pokročilé studenty magisterských oborů.

Věcné chyby a nedostatky

Žádné jsem nenašel; text byl velmi pečlivě zpracován se zjevnou snahou o co největší přesnost a obsahovou konzistenci.

Celková úroveň práce

Ve světle výše uvedeného považuji předkládanou práci za velmi zdařilou.

Otázky k obhajobě a náměty do diskuze

Nemám.

Hodnocení kandidáta

Mám-li stručně zhodnotit osobnost kandidáta a zejména pak jeho přístup ke studiu a přípravě dizertační práce, mohu pouze s konstatovat, že se v tomto případě jedná o velmi příjemnou povinnost – Matěj Hudec patřil jednoznačně mezi vynikající studenty, s nimiž byla radost pracovat. Velmi si cením samostatnosti, s níž se od začátku snažil přistupovat ke studovaným problémům, a zejména vytrvalosti v situacích, kdy způsob jejich řešení nebyl ani zdaleka zřejmý. Diskuse s ním, občas mnohahodinové a výrazně netriviální, se vždy odehrávaly ve velmi přátelské a neformální atmosféře, v níž se často smývaly obvyklé kontury vztahu student-školitel. Taktéž kvituji jeho přístup k mladším studentům, zejména jeho společnou práci s Mgr. Hedvikou Gedeonovou, která by v dohledné době mohla vyústit v další kvalitní publikaci.

Resumé

Problematiku studovanou v posuzované dizertační práci považuji za navýsost zajímavou a potenciálně přínosnou. Mgr. Matěj Hudec jasně prokázal schopnost samostatné tvůrčí práce v oboru teoretické částicové fyziky a jeho profesní profil vykazuje všechny znaky integrované vědecké osobnosti.

Předloženou práci proto mohu s klidným svědomím doporučit k uznání jako doktorskou a jednoznačně podporuji návrh na udělení titulu Ph.D. jejímu autorovi.

V Praze 30. srpna 2021

doc. Ing. Michal Malinský, Ph.D.

