

# Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě  
Univerzity Karlovy

- posudek vedoucího  posudek oponenta  
 bakalářské práce  diplomové práce

Autor: Bc. Dominik Starý  
Název práce: **Leptogeneze v minimálních modelech velkého sjednocení**  
(Leptogenesis in minimal grand unified models)  
Studijní program a obor: Fyzika, Teoretická fyzika (FTFP)  
Rok odevzdání: 2024

Jméno a tituly vedoucího: doc. Ing. Michal Malinský, Ph.D.  
Pracoviště: Ústav částicové a jaderné fyziky, MFF UK  
Kontaktní e-mail: michal.malinsky@matfyz.cuni.cz

## Odborná úroveň práce:

- vynikající  velmi dobrá  průměrná  podprůměrná  nevyhovující

## Věcné chyby:

- téměř žádné  vzhledem k rozsahu přiměřený počet  méně podstatné četné  závažné

## Výsledky:

- originální  původní i převzaté  netriviální kompilace  citované z literatury  opsané

## Rozsah práce:

- veliký  standardní  dostatečný  nedostatečný

## Grafická, jazyková a formální úroveň:

- vynikající  velmi dobrá  průměrná  podprůměrná  nevyhovující

## Tiskové chyby:

- téměř žádné  vzhledem k rozsahu a tématu přiměřený počet  četné

## Celková úroveň práce:

- vynikající  velmi dobrá  průměrná  podprůměrná  nevyhovující

## Slovní vyjádření, komentáře a připomínky vedoucího:

Jak dnes již bezpečně víme, Standardní model částic a jejich interakcí (SM) tak, jak byl formulován v 60. a 70. letech minulého století, nelze považovat za finální teorii hmoty a jejích fundamentálních konstituentů. Jedním z nejjasnějších signálů existence fyzikální reality mimo jeho rámec jsou efekty tzv. oscilací neutrinového flavouru pozorované širokou plejádou moderních experimentů, které jasně prokazují neudržitelnost postulátu nulové klidové hmotnosti neutrin, jednoho ze základních stavebních kamenů původní GSW konstrukce SM.

V této souvislosti je nanejvýš pozoruhodné, že nenulové hmotnosti neutrin není možné ani v nejjednodušších rozšířeních SM „zařídít“ prostým přidáním chybějících „pravotočivých“ neutrinových polí (v analogii s nabitým sektorem); cena za takto přezíravý přístup – ztráta mechanismu kvantování elektrického náboje – by byla příliš velká. Mnohem přirozenější konstrukce, které tímto neduhem netrpí (a dokonce umožňují jednoduše chápat parametrickou odlišnost elektroslabé škály a absolutní škály neutrinových hmotností prostřednictvím tzv. seesaw mechanismu), se opírají o dodatečný postulát nezachování leptonového čísla ( $L$ ) v podobě existence tzv. Majoranova hmotnostního členu pro pravá chirální neutrina ve fundamentálním Lagrangiánu. Odpovídající charakteristická energie s takovým členem spojená (typicky v oboru  $10^{13}$  GeV) pak představuje novou fyzikální škálu, daleko za horizontem přímé testovatelnosti v dnešních terestrických experimentech.

Přirozeným zobecněním takových úvah jsou spekulace o existenci „sjednocené“ teorie založené na vyšší – ideálně prosté – kalibrační grupě, jež by umožňovala chápat silné, slabé a elektromagnetické interakce SM jako různé projevy jedné fundamentální síly; evoluce kalibračních vazeb ve SM pak napovídá, že její efekty (zahrnující mimo jiné nezachování baryonového čísla  $B$  v procesech typu rozpadu protonu) by se měly naplno projevit v oblasti energií zhruba  $10^{15}$  GeV, tj. na škále pozoruhodně blízké výše zmíněné škále narušení  $L$ .

Předložená práce se zaměřuje zejména na studium možných korelací mezi oběma typy těchto efektů v rámci specifické realizace tzv. velkého sjednocení v podobě minimálně potenciálně realistické renormalizovatelné  $SO(10)$  teorie. Její symetrická struktura totiž mimo jiné významným způsobem svazuje strukturu  $\Delta B = \Delta L = 1$  nabitých proudů zodpovědných za nestabilitu protonu (v principu pozorovatelnou v pozemských experimentech) s „výtěžností“  $\Delta L \neq 0$  procesů hrajících nejspíše klíčovou roli v kosmologických procesech zodpovědných za primordiální baryogenezi (prostřednictvím leptogeneze coby jejího prekurzoru).

Primárním úkolem diplomanta pak byl zejména vývoj počítačového kódu umožňujícího v prostoru Yukawovských vazeb daného modelu hledat jeho přípustné realizace, tj. takové hodnoty fundamentálních Yukawovských vazeb, které v oboru nízkých energií správně popisují spektrum fermionů SM. Každou z těchto konfigurací bylo následně třeba prozkoumat z hlediska její kompatibility s pozorovanou hodnotou baryonové asymetrie vesmíru, a to opět prostřednictvím dedikované počítačové simulace zahrnující kromě výpočtu relevantní CP asymetrie též detailní řešení odpovídajících Boltzmannových rovnic.

Hlavními výsledky práce prezentovanými v kapitole 5 jsou zejména:

1. Zevrubná analýza parametrického prostoru daného modelu v situaci, kdy do základních sumačních vzorců pro efektivní Yukawovské vazby vstupují dvě fundamentální komplexní symetrické Yukawovské matice dimenze 3. Zde se mimo jiné podařilo identifikovat poměrně zásadní chybu v jedné z předchozích analýz konkurenční výzkumné skupiny z KTH Stockholm a tím dokonce zlepšit nejmenší dosaženou hodnotu  $\chi^2$  v daném kontextu. To je samo o sobě velmi pozoruhodné, poněvadž relevantní systém algebraických rovnic pro nízkenergetické pozorovatelné je silně přeurčený; jakékoli „dobré“ fity tohoto systému lze tudíž interpretovat jako silný argument

ve prospěch fyzikální plausibility dané sjednocené teorie!

2. Detailní numerická analýza kompatibility konfigurací identifikovaných v bodě 1. s pozorovanou hodnotu baryonové asymetrie, a to zejména s ohledem na možné omezení značné míry volnosti tzv. seesaw škály v minimálním  $SO(10)$  modelu. Tu, jak se ukázalo relativně nedávno, je takřka nemožné přesněji určit z tradičního požadavku konvergence kalibračních vazeb, a to kvůli výrazně neporuchovému charakteru skalárního spektra této teorie (které ovšem pro takový přístup představuje klíčovou ingredienci).
3. Základní analýza parametrického prostoru v tzv. tří-Yukawovském případě. Zde se vzhledem k silné podurčenosti relevantního algebraického systému pro nízkoenergetické pozorovatelné jedná spíše o první kroky v daném směru, zatím bez možnosti činit konkrétní závěry.

V tomto smyslu lze naprosto jednoznačně říci, že uvedené výsledky jsou jednak výrazně originální, a zároveň představují jasný základ pro budoucí recenzovanou publikaci v zahraničním odborném periodiku.

Co se týká technické kvality předkládané práce, jedná se dle mého názoru o dílo relativně zdařilé, byť ne zcela excelentní – text nese jasné stopy časové tísně, v níž byl sepisován, jeho struktura mohla být lépe promyšlená a dále doplněná o některé detaily tak, aby výsledná prezentace byla přístupnější širšímu spektru čtenářů, a to hlavně z řad dalších studentů. To však vzhledem k výše řečenému nepovažuji za příliš podstatné z hlediska celkového hodnocení; Dominikův svědomitý přístup v celém období řešení diplomové práce ve spojení s tím, že se jedná o jeho první anglicky psaný text obdobného rozsahu, je jasným signálem čistě epizodního charakteru uvedených nedostatků.

#### **Resumé:**

Předkládanou práci rozhodně doporučuji uznat jako diplomovou a ohodnotit ji stupněm „výborně“.

#### **Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:**

- Na obrázku 4.2 se „běžící“ kalibrační vazby SM nepotkávají (z důvodů uvedených v textu) v okolí škály  $10^{15}$  GeV v jednom bodě, ačkoli by tomu tak (alespoň v principu) být mělo, pokud se má skutečně jednat o studii v rámci teorií velkého sjednocení. V jakém směru by bylo třeba předkládanou analýzu změnit/zobecnit tak, aby byl tento „neduh“ odstraněn?

#### **Práci:**

- doporučuji  
 nedoporučuji

uznat jako diplomovou.

#### **Navrhuji hodnocení stupněm:**

- výborně    velmi dobře    dobře    neprospěl

Místo, datum a podpis vedoucího:

Praha, 19. srpna 2024

