

Posudek dizertační práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze

Posudek vedoucího práce

Autor: **Mgr. Kateřina Jarkovská**

Název práce: **Quantum aspects of particle physics models with extended gauge symmetries**

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 možného poruchového nezachování baryonového a leptonového čísla ve scénářích za Standardním modelem částicových interakcí (SM) patří mezi zásadní témata moderní fyziky vysokých energií s jasným přesahem do příbuzných oborů jako je astročásticová fyzika či kosmologie. Mezi základní projevy odpovídající „nové dynamiky“ 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.

Nejjednodušší modely těchto procesů jsou tradičně konstruovány na půdorysu tzv. teorií velkého sjednocení (grand unified theories, GUTs), tj. kalibračních teorií pole s prostou grupou lokální symetrie zahrnujících SM jako svoji nízkoenergetickou limitu, jejichž klíčovou vlastností je mimo jiné relativně striktní omezení na charakteristickou energii uvedených procesů vysoko nad škálou narušení elektroslabé symetrie. To pak alespoň v principu umožňuje relativně dobře předpovídat amplitudy výše zmíněných základních procesů.

Ani po skoro padesáti letech od formulace nejjednodušších sjednocených teorií však není jasné, jak robustní případné predikce tohoto typu mohou být, ať už z důvodu blízkosti GUT a Planckovy škály (jež obecně neumožňuje ignorovat možné efekty kvantové gravitace), komplikací spojených s nedostatečně přesným určením relevantních hadronových maticových elementů či nemožnosti úplné rekonstrukce flavorové struktury odpovídajících nabitých proudů. Jako nečekaný problém se ukazuje dokonce i prostá identifikace „minimálních“ potenciálně realistických modelů, a dokonce ani sám pojem minimality nemá jednoznačnou interpretaci. Historicky jsme tudíž svědky konstrukce celé série co možná nejjednodušších potenciálně realistických modelů (v jistém smyslu poplatných době svého vzniku) založených zejména na SU(5) a SO(10) kalibračních grupách (a to v kombinaci se supersymetrií i bez ní) -- zatímco první typ byl populární hlavně koncem minulého století, druhý se dočkal zvýšené pozornosti po objevu nenulových hmot neutrin na jeho přelomu.

Vlastní obsah práce, hlavní výsledky

Hlavním směrem doktorandčiny vědecké práce na tomto poli bylo zejména detailní studium kvantové struktury a s tím spojených fenomenologických aspektů tzv. minimální

potenciálně realistické renormalizovatelné $SO(10)$ teorie, poslední ze čtveřice „klasických minimálních GUTs“ formulovaných před více než čtyřiceti lety. Tento scénář je pozoruhodný tím, že unikátním způsobem řeší výše zmíněný problém neurčitostí spojených s gravitačními efekty, jeho detailní analýza je ovšem extrémně technicky komplikovaná kvůli výskytu několika typů tachyonických spektrálních nestabilit na úrovni klasického přiblížení, které vyvolávají nutnost zahrnutí efektů vyššího řádu. Hlavním důvodem je zde zejména vysoký počet stupňů volnosti propagujících se ve smyčkových Feynmanových grafech a s tím spojené potíže se stabilitou poruchového rozvoje i při použití moderních metod založených např. na aparátu efektivního potenciálu.

Konkrétním zadáním, na němž doktorandka pracovala v rámci první části studia, pak byl zejména *výpočet odpovídajících jednosmyčkových korekcí ke hmotám fyzikálních skalárních polí v uvedeném modelu, hledání netachyonických domén v jeho parametrickém prostoru a studium mezi použitelnosti takto získaných formulí z hlediska poruchové stability*. Výsledky této práce, shrnuté v její první publikaci (**Phys. Rev. D 105 (2022) 9, 095003, arXiv:2109.06784 [hep-ph]**), ukazují, že tato kritéria velmi silně omezují velikosti přípustných oblastí pro většinu parametrů dané teorie, a tím výrazně zvyšují její případnou prediktivitu. Poznamenejme, že tato studie je v mnoha ohledech unikátní, jelikož jde prakticky o první pokus o kvantitativní analýzu poruchových aspektů specifické teorie velkého sjednocení ve vyšších řádech poruchového rozvoje.

Doktorandčíným úkolem ve druhé části studia pak bylo zejména *využití dříve získaných výsledků pro účely fenomenologické studie, jež měla rozhodnout o tom, je-li minimální renormalizovatelná $SO(10)$ teorie (zobecněná tak, aby byla alespoň v principu schopna reprodukovat flavorovou strukturu Standardního modelu) skutečně potenciálně realistická*, tj. jestli v rámci výše identifikovaných domén poruchovosti umožňuje beze zbytku zahrnout veškeré efekty elektroslabé škály při zachování kompatibility s existujícími omezeními na dobu života protonu atd. Hlavním výsledkem této studie (publikované jako **arXiv:2304.14227 [hep-ph]** a dnes již **přijaté do Phys. Rev. D**) je pozorování, že požadavky kvantová stability a poruchovosti tohoto scénáře ve skutečnosti nejsou kompatibilní s realistickými spektry fermionů Standardního modelu coby jeho nízkoenergetické limity.

Kromě vysoké časové náročnosti dané hlavně technickou složitostí relevantních výpočtů vyžadujících zvládnutí mnoha pokročilých technik teorie pole atd. kladly tyto aktivity na doktorandku vysoké nároky též z hlediska organizace práce, vytrvalosti a efektivity v rámci spolupráce v několikačlenném týmu, jehož byla důležitou součástí. Její celkový přínos (detailně popsáný v práci v příloze G) lze v tomto smyslu hodnotit jako klíčový.

Hodnocení dizertační práce

Odborná úroveň

Předkládaná doktorská práce je rozšířeným kompilátem dvou výše zmíněných odborných článků, které v jistém smyslu představují vyvrcholení mnohaleté snahy o identifikaci a definitivní rozhodnutí o relevanci úzké třídy minimálních potenciálně realistických teorií velkého sjednocení, tj. programu, který byl implicitně spuštěn v okamžiku formulace prvního dynamického modelu teorie pole s prostou kalibrační grupou zahrnující dnešní Standardní model (tj. v roce 1974). Tohoto cíle by nebylo možné dosáhnout bez zvládnutí pokročilých technik kvantové teorie pole, teorie Lieových grup a jejich reprezentací,

pokročilých partií lineární algebry, numerické matematiky atd. V širším kontextu lze výsledky těchto studií dokonce chápat jako indikaci neexistence robustního GUT modelu, který by -- při dnešním stavu chápání polních teorií v silně vázaném režimu -- možná předpověděl dobu života protonu s jakoukoli rozumnou přesností v rozsahu hodnot potenciálně zajímavých pro současné experimenty.

Rozsah práce, jazyková, grafická a formální úroveň

Co do rozsahu je předkládaná dizertace nadstandární, její jazyková úroveň je dobrá. Vzhledem k charakteru popisované problematiky (do značné míry dominované detaily implementace potřebných numerických a symbolických metod a výsledky jejich aplikace na dva specifické modely teorie pole) a obsáhlosti přípravného materiálu může být práce obtížněji čitelná pro čtenáře bez předchozí orientace v oboru, což ovšem nijak neubírá na její vědecké relevanci a kvalitě. Dominující grafická forma prezentace základních výsledků je v tomto smyslu více než na místě. Členění textu do kapitol je logické, podíl kandidátky na zpracování dílčích částí projektu je jasně identifikován.

Věcné chyby a nedostatky

Text byl zpracován velmi podrobně a pečlivě bez zjevných věcných chyb a nedostatků.

Celková úroveň práce

Ve světle výše uvedeného považuji předkládanou práci za vynikající.

Otázky k obhajobě a náměty do diskuze

Nemám.

Hodnocení kandidáta

Kateřina Jarkovská je příkladem studenta, s nímž je radost pracovat, ať už pro absolutní spolehlivost z hlediska kvality vykonané práce a trpělivost při komunikaci jejích výsledků (zejména starším členům týmu), tak pro neuvěřitelnou houževnatost v situacích, v nichž by zkušenost velela napřít úsilí jiným, jednodušším směrem. Bez těchto vlastností, klíčových pro práci v oboru, v němž se většina investic nikdy nezúročí, by ani ona, ani zbytek týmu, jehož byla hnací silou, nikdy nedosáhl výsledků popsaných v předkládané dizertaci.

Resumé

Problematiku studovanou v předložené dizertační práci považuji za nanejvýš zajímavou a fundamentální ve smyslu impaktu obdržených výsledků v daném oboru. Mgr. Kateřina Jarkovská jasně prokázala schopnost samostatné tvůrčí práce v teoretické částicové fyzice a její profesní profil vykazuje jasné znaky vyspělé vědecké osobnosti. Předloženou práci proto mohu s klidným svědomím doporučit k uznání jako doktorskou a jednoznačně podporuji návrh na udělení titulu Ph.D. její autorce.

V Praze 21. srpna 2023

doc. Ing. Michal Malinský, Ph.D.

