Posudek práce
předložené na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy

☐ posudek vedoucího ☑ posudek oponenta
☐ bakalářské práce ☑ diplomové práce

Autor/ka: Bc. Matěj Hudec
Název práce: Aspects of renormalization of spontaneously broken gauge theories
Studijní program a obor: Fyzika - teoretická fyzika
Rok odevzdání: 2016

Jméno a tituly ~~vedoucího~~/oponenta: Mgr. Petr Beneš, Ph.D.
Pracoviště: Ústav technické a experimentální fyziky
České vysoké učení technické v Praze
Horská 3a/22, 128 00 Praha 2
Kontaktní e-mail: p.benes@utef.cvut.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~~/oponenta:

Tématem předložené diplomové práce je vyvracení některých „mýtů“, resp. vyjasnění určitých často přehlížených jemností, týkajících se role skalárů v tzv. problému hierarchie. Tradiční moudrost praví, že zatímco hmoty fermionů a vektorů jsou závislé na cut-offu dané teorie (reprezentovaném např. velkými hmotami jiných přítomných částic) pouze *logaritmicky*, u skalárů je tato závislost *kvadratická*, pročež je „obtížné“ vysvětlit hmotu skalární částice, je-li tato mnohem menší než daný cut-off. Konkrétně je tento problém přítomen ve Standardním modelu, v němž je hmota Higgova bosonu, jediné to známé elementární skalární částice, řádově stejně velká jako hmoty ostatních částic, což je vnímáno jako „nepřirozené“.

Jak však nedávno ve své práci ukázal autorův školitel, zatímco pro generický skalár je výše naznačená argumentace korektní, ne tak pro Higgsův boson díky jeho specifickému charakteru spjatému se spontánním narušením symetrie a generováním hmot. Přesněji řečeno, hmota Higgsova bosonu sice zůstává kvadraticky závislá na cut-offu, ale pouze prostřednictvím vakuové střední hodnoty mateřského skalárního pole, jíž je úměrná; zbylá závislost na cut-offu je pouze logaritmická, stejně jako u fermionů a kalibračních bosonů. Jelikož jsou však hmoty fermionů a kalibračních bosonů úměrné stejné vakuové střední hodnotě, lze uzavřít, že Higgsův boson není ve skutečnosti o nic více (nebo méně) „zodpovědný“ za problém hierarchie než ostatní částice.

Autor v předložené práci tuto argumentaci podrobněji rozebírá, rozvíjí a především *potvrzuje* na příkladu několika různých modelů. Nejprve uvažuje model se dvěma interagujícím reálnými skaláry bez spontánního narušení symetrie a abelovský Higgsův model, obohacený o těžký skalární singlet, hrající úlohu vyšší škály (cut-offu). Tímto ještě reprodukuje původní práci svého školitele, dále je však již jeho práce originální. Nejdřív analyzuje předchozí případ s nahrazeným těžkým skalárním singletem dvojicí těžkých diracovských fermionů. Dále uvažuje realistické rozšíření Standardního modelu o pravotočivý těžký neutrinový singlet, vedoucí přes see-saw mechanismus k těžkému majoranovskému neutrinu. Do třetice autor uvažuje případ s těžkým vektorovým bosonem; za tím účelem konstruuje model podobný Standardnímu modelu, v němž se pomocí dodatečného kondenzujícího komplexního skalárního pole zhmotňuje (na škále mnohem menší než elektroslabá škála) foton.

Ve všech zmíněných případech autor s výhodou využívá faktu, že příslušný efektivní potenciál má vždy (zobecněnou) kustodiální symetrii, což umožňuje významné zjednodušení příslušných výpočtů. Aby ilustroval, že přítomnost kustodiální symetrie přináší pouze technické zjednodušení a nemá žádný vliv na hlavní argument o (ne)stabilitě Higgsovy hmoty, uvažuje nakonec i model bez kustodiální symetrie: neabelovský model (rozšíření Standardního modelu) obsahující jak higgsovský dublet, tak i triplet.

Kromě samotné analýzy zmíněných modelů práce obsahuje také několik pomocných pasáží technické povahy. V úvodu je nejprve relativně stručný, ale dostačující seznam základních potřebných výsledků týkajících se efektivního potenciálu, doplněný v apendixu o užitečný výpočet jednosmyčkového příspěvku majoranovských neutrin. Za velmi cennou též považuji část věnovanou zobecněné kustodiální symetrii. Zmínit je třeba i z větší části originální apendix, týkající se derivací efektivního potenciálu.

Autor ve své práci evidentně samostatně propočítal nejen své vlastní originální výsledky, ale přepočítal i výsledky převzaté, což se týká zejména starších výsledků jeho školitele – v těchto případech autor vždy pečlivě uvádí příslušnou citaci. Práci lze vytknout někdy přílišnou stručnost. Např. u potenciálu v rovnici (3.128) autor nijak explicitně nekomentuje, že tento nemá kustodiální symetrii (což je *raison d'être* dané sekce) – přitom přinejmenším u členů úměrných λ_3 a λ_5 to díky maticovému charakteru tripletního pole Δ není úplně na první pohled zřejmé. Uvítal bych, kdyby to autor v diskusi stručně okomentoval. Dále se domnívám, že by práci bývala prospěla promyšlenější struktura. Zejména rozsáhlá kapitola 3, která obsahuje hlavní autorovy výsledky, mohla být pro větší přehlednost rozdělena na více kapitol. Také je škoda, že autor nedoplnil hlavní výsledek apendixu B, týkajícího se příspěvku majoranovských neutrin k efektivnímu potenciálu, k ostatním souvisejícím výsledkům v části 2.2.

Práce je psána kultivovanou angličtinou a obsahuje relativně málo pravopisných chyb a překlepů; o to nešťastněji působí, že jeden překlep se nachází hned na prvním řádku práce (v úvodu). Po typografické stránce se práce bohužel nevyhnula některým častým prohřeškům, jako např. špatným úvozovkám, nepoužívání nezalomitelných mezer či nekonzistenci v (ne)používání interpunkčních znamének za rovnicemi.

Navzdory uvedeným výtkám, které jsou spíše formálního charakteru, považuji práci za velmi zdařilou a více než dostatečně prokazující jak autorův vhled do dané tématiky, tak i jeho technické schopnosti výpočetního charakteru. Z těchto důvodů navrhuji uznat předloženou práci jako diplomovou a ohodnotit ji stupněm *výborně*.

Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

- Komentář ke kustodiální symetrii potenciálu (3.128), viz výše.
- Z pochopitelných technických důvodů jsou všechny výpočty prováděny v Landauově kalibraci. Nicméně pro případ obecné R_ξ kalibrace: Je hlavní výsledek práce (tj. úměrnost hmoty Higgse vakuové střední hodnotě a pouze logaritmická závislost na cut-offu) nezávislý na ξ (a tedy v tomto smyslu fyzikální)? U kterých ostatních souvisejících výsledků (či mezivýsledků) lze dále očekávat nezávislost na kalibraci?
- Na základě rovnice (3.33) autor dokládá, že fyzikální Higgsova hmota je úměrná vakuové střední hodnotě v a závislá na cut-offu M pouze logaritmicky. Nicméně v rovnici zůstává explicitní závislost na holé Higgsově hmotě (resp. hmotovém parametru) m. Podařilo-li by se pomocí podmínky stacionarity (3.35) vyjádřit m v termínech v a M, nemohla by se explicitní polynomiální závislost na M v principu objevit?
- V úvodu autor podává obecný argument, založený na Appelquistově–Carazzoneho teorému, proč by hmota Higgsova bosonu měla být řádově stejná jako hmoty ostatních částic, plynoucí ze spontánního narušení symetrie. Nejsem si ovšem jist, zdali této argumentaci správně rozumím. Chápu to dobře tak, že pokud by byl Higgsův boson (dejme tomu ve Standardním modelu) mnohem těžší než elektroslabá škála a vyintegroval se (formálně posláním jeho hmoty do nekonečna), tak by výsledná efektivní teorie (tj. Standardní model v narušené fázi, s hmotnými kalibračními bosony a fermiony, ale bez Higgse) byla nerenormalizovatelná, což je ve sporu s Appelquistovým–Carazzoneho teorémem?

Práci
☑ doporučuji
☐ nedoporučuji
uznat jako diplomovou/~~bakalářskou~~.

Navrhuji hodnocení stupněm:
☑ výborně ☐ velmi dobře ☐ dobře ☐ neprospěl/a

Místo, datum a podpis ~~vedoucího~~/oponenta:

Beneš

V Praze, 29. srpna 2016 Petr Beneš