

Oponentský posudok dizertačnej práce Mgr. Petra Beneša:

Dynamical symmetry breaking in models with strong Yukawa interactions

Téma dizertačnej práce a jej aktuálnosť

Dnešné chápanie interakcií subjadrových častíc je založené na *štandardnom modeli* (ŠM), ktorý pozostáva z kalibračnej teórie silných interakcií (kvantovej chromodynamiky) a z teórie elektroslabých interakcií. Lokálna kalibračná symetria elektroslabého sektora, $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$, je pri nižších energiách narušená na $U(1)_{em}$ -symetriu. Takéto narušenie symetrie v ŠM zabezpečuje interakcia kalibračných, kvarkových a leptónových polí s kvantami skalárneho poľa vďaka tzv. Higgsovmu mechanizmu.

Napriek tomu, že ŠM úspešne opisuje (takmer) všetky dostupné experimentálne údaje o interakciách častíc, z teoretického a estetického hľadiska ho nemožno považovať za plne uspokojivý. Po prvé, existencia skalárnych Higgsových bozónov nebola doteraz experimentálne potvrdená (i keď nedávno výsledky z komplexu LHC v CERNe poskytli nádejné náznaky); po druhé, existujú teoretické problémy formulácie kvantovej teórie skalárnych polí (napr. problém tzv. “fine tuningu”) a konečne, po tretie, vysvetlenie hierarchie hmotností leptónov a kvarkov si vyžaduje veľký počet voľných parametrov, yukawovských väzbových konštánt, ktorých veľkosti sa líšia o niekoľko rádov, čo nie je esteticky príťažlivé a považuje sa v teórii za neprirodzené.

Nemalé úsilie teoretikov je preto venované hľadaniu alternatívy k Higgsovmu mechanizmu v ŠM. Obyčajne sa snažia Higgsovo pole zo ŠM úplne eliminovať a nahradiť jeho pôsobenie efektami nejakých kompozitných polí, ktorých interakcie sa riadia zákonmi fyziky poza ŠM (napr. varianty tzv. technifarebných modelov). V práci Mgr. Beneša je zvolená iná cesta: skalárne polia sú síce ingredienciami teórie, majú však veľké hmotnosti a k narušeniu symetrie nedochádza v dôsledku ich samointerakcie, ale kvôli silnému yukawovskému pôsobeniu medzi skalárnymi a fermiónovými poliami.

Z uvedeného by malo byť zrejmé, že dizertačná práca sa zaoberá nanajvyš aktuálnym problémom subjadrovej fyziky a kladie si ambiciózne ciele.

Spracovanie dizertačnej práce

Práca Mgr. Beneša je neobyčajne rozsiahla (vyše 280 strán) a kladie na čitateľa vysoké nároky. Napísaná je hutne a veľmi kultivovane v anglickom jazyku. Obsahuje vyše 1200 vzťahov a rovníc, takže pre oponenta by bolo nadľudskou úlohou skúmať ich úplnú konzistentnosť a hľadať eventuálne chyby a/alebo preklepy. Môj dojem však je, že takýchto chýb je v práci iba minimum.

Práca je podľa môjho názoru veľmi dobre štruktúrovaná. Pozostáva z 12 kapitol a 5 dodatkov. Okrem prvej kapitoly, ktorá prácu uvádza, a poslednej, 12. kapitoly, ktorá zhrňa jej závery, je zvyšných 10 kapitol rozdelených do 4 väčších celkov. (Ich obsah zhrniem v nasledujúcej časti.) Aj keď viaceré kapitoly hlavného textu sú venované technickým problémom (predovšetkým 3. a potom 8. kapitola), ďalšie technikality sa nachádzajú v dodatkoch, ktoré tvoria asi pätinu práce. Je dobrou praxou pozbierať v dodatkoch dizertačnej práce rad definícií a pomocné výpočty dizertanta, môže tak v budúcnosti slúžiť ako užitočný referenčný materiál pre neho samého, pre iných doktorandov alebo kolegov, ktorí budú rozpracované témy ďalej rozvíjať. Domnievam sa však, že čitateľnosti práce by bolo prospelo, ak by aj niektoré ďalšie technickejšie časti z hlavného textu bol autor presunul do dodatkov.

Výsledky dizertačnej práce

K narušeniu $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ symetrie elektroslabých interakcií v štandardnom modeli dochádza v dôsledku vhodnej voľby interakčného potenciálu dubletu komplexných skalárnych polí. V unitárnej

kalibrácii má jedna komponenta Higgsovoho poľa nenulovú a reálnu vákuovú strednú hodnotu (nenulovú reálnu hodnotu *jednobodovej Greenovej funkcie*) a ostatné tri komponenty (ktoré by v prípade globálnej symetrie boli Nambuovými–Goldstonovými bozónmi) sú absorbované do polí vektorových bozónov (W^\pm a Z^0), čím tieto získavajú nenulovú hmotnosť. Kvarky a leptóny vďaka yukawovskej interakcii so skalárnym poľom majú hmotnosť úmernú vákuovej strednej hodnote Higgsovoho poľa.

Nosnou fyzikálnou myšlienkou dizertačnej práce je iná možnosť narušenia elektroslabej symetrie, a síce v dôsledku nesymetrických riešení rovníc pre propagátory skalárnych polí, t.j. narušenie symetrie na úrovni *dvojbodových Greenových funkcií*. V hre ostávajú síce skalárne polia, tie však majú štandardný hmotnostný člen (ich hmotnosti by mali byť rádu TeV) a nepredpokladá sa medzi nimi žiadna netriviálna samointerakcia. Symetriu narušujúce dvojbodové funkcie sa majú objaviť vďaka *silnej yukawovskej interakcii medzi skalárnymi a fermiónovými poliami*. Táto myšlienka bola navrhnutá pôvodne v prácach Braunera a Hoška v r. 2004–2005, až v spolupráci s Benešom však boli podrobne rozpracované jej dôsledky.

Plauzibilitnosť takéhoto dynamického narušenia symetrie je v I. časti práce najprv načrtnutá a potom do detailov rozpracovaná v abelovskom prípade. Za istých zjednodušujúcich predpokladov, ktoré tu nebudem reprodukovat', sú tu odvodené Schwingerove–Dysonove rovnice pre skalárne a fermiónové propagátory. Výhodou modelu je, že závisí iba od dvoch parametrov – yukawovských väzbových konštánt, takže bolo možné numericky analyzovať oblasti parametrov, pre ktoré existujú riešenia SD rovníc, ktoré narušujú axiálnu symetriu modelu. Dôležité závery sú, že také riešenia existujú iba pre dostatočne veľké parametre (silnú yukawovskú interakciu) a že aj relatívne nevel'kými zmenami parametrov možno výrazne amplifikovať pomer hmotností fermiónov modelu.

Navrhnutý prístup sa v II. časti aplikuje v teórii elektroslabých interakcií, pričom sa vo všeobecnosti predpokladá n generácií ľavotočivých fermiónov, ale aj možnosť m pravotočivých neutrín s majoranovskými hmotnosťami (pričom sa pripúšťa $m \neq n$). V tomto kontexte mi pripadá, že menej by bolo viac; pre čitateľa by bolo lepšie, keby v hlavnom texte bol riešený jednoduchší prípad (ktorý je v závere analyzovaný aj numericky) a všeobecné vzťahy boli presunuté do dodatku. V každom prípade stratégia z abelovského prípadu slávi úspech aj v prípade elektroslabej teórie, opäť je demonštrovaná existencia symetriu narušujúcich riešení SD rovníc pre kvarkové, leptónové a skalárne propagátory. Priestor možných parametrov modelu je však v tomto prípade obrovský, preto numerická analýza riešení rovníc bola uskutočnená iba pre prípad jednej generácie, jedného typu neutrína a nulovej majoranovskej hmotnosti. Kvalitatívne závery vychádzajú rovnaké ako v abelovskom prípade.

V III. časti práce sa diskutuje zmiešavanie kvarkov. To je v ŠM (v prípade 3 generácií) parametrizované Cabibbovou–Kobayashiho–Maskawovou maticou, ktorá je unitárna a závisí od 3 uhlov a jednej CP-narúšajúcej fázy. Autor dospel k zaujímavému výsledku, že v prípade dynamicky generovaných kvarkových vlastných energií, ktoré závisia od 4-hybnosti, je efektívna CKM matica vo všeobecnosti neunitárna.

V obsiahlej IV. časti práce sa rieši problém hmotností kalibračných bozónov v modeloch s dynamickým narušením symetrie. Najprv je podaná všeobecná formulácia, potom sú podrobne analyzované prípady abelovskej a elektroslabej teórie. Pritom sa predpokladá, že hmotnosti súvisia s narušením symetrie fermiónovými propagátormi a vplyv skalárnych propagátorov je zanedbaný. Cenným výsledkom v tejto časti sú aj korekcie k tzv. Pagelsovmu–Stokarovmu vzťahu.

K dosiahnutým výsledkom mám jedinú pripomienku. Na viacerých miestach prístupu Beneša a spolupracovníkov sa používajú aproximácie, ktorých oprávnenosť je veľmi ťažké overiť. Ako jeden príklad za viaceré možno uviesť zanedbanie skalárneho príspevku k hmotnostnej matici kalibračných bozónov. Na str. 191 je to zdôvodnené iba tým, že so zahrnutím skalárov nebolo možné dosiahnuť,

aby bola hmotnostná matica symetrická, a preto bol skalárny príspevok zanedbaný. To mi pripadá pomerne účelový a spochybiteľný argument.

Napriek uvedenej kritickej poznámke považujem výsledky práce za veľmi zaujímavé, oceňujem autorov systematický prístup k problému generovania hmotností navrhnutým mechanizmom. Výsledky boli publikované v 4 článkoch, 3 z nich vyšli v renomovaných odborných časopisoch. Pokiaľ mi je známe, práce boli doteraz 4-krát citované (podľa databázy INSPIRE).

Otázky k obhajobe dizertačnej práce

Bol by som rád, keby sa v rozprave počas obhajoby dizertant vyjadril k nasledujúcim bodom resp. otázkam:

1. Pri obvyklom spôsobe narušenia symetrie v ŠM platí $\langle 0|\Phi(x)|0\rangle = v \neq 0$ ($v \in R$) v tzv. unitárnej kalibrácii (to je vlastne jej definícia). V prípade, ktorý je diskutovaný v dizertácii, sú dvojbodové Greenove funkcie skalárnych polí tiež závislé od kalibrácie. Nepostrehol som pri jej čítaní, akým spôsobom bola kalibrácia zafixovaná (či už explicitne alebo implicitne).

2. Vyššie som spomínal možnosť neunitárnosti CKM matice, na ktorú autor poukázal v III. časti práce. Aké by boli fyzikálne dôsledky tejto skutočnosti, napr. pre procesy, v ktorých dochádza k CP narušeniu?

3. Higgsov mechanizmus v ŠM vedie k pomerne špecifickej predpovedi obmedzenia na hmotnosti W - a Z -bozónov, konkrétne $m_W > 37$ GeV a $m_Z > 74$ GeV. Zdá sa mi, že v modeli, ktorý je diskutovaný v dizertačnej práci, by tieto hmotnosti mohli byť v princípe ľubovoľné. Možno zo známych hmotností W - a Z -bozónov z experimentov odvodiť nejaké obmedzenia na parametre modelu?


4. Nie je vylúčené, že v priebehu tohto roku bude na zariadení LHC objavený taký Higgsov bozón, aký sa predpokladá v ŠM, čo bude silným argumentom pre "štandardný" spôsob narušenia elektroslabej symetrie. Vidí autor dizertácie nejakú možnosť, ako by narušenie symetrie jednobodovými Greenovými funkciami (à la ŠM) a dvojbodovými funkciami (à la Beneš et al.) mohli koexistovať, napr. v modeli s viacerými Higgsovými poliami? Vidí nejaké iné potenciálne aplikácie svojho prístupu, napr. vo fyzike poza ŠM?

5. Tri zo 4 článkov, v ktorých boli výsledky dizertačnej práce publikované, sú so spoluautormi (so školiteľom, s Braunerom a Smetanom). Bolo by dobré, aby Mgr. Beneš objasnil, v čom vidí svoje hlavné príspevky do spoločných prác.

Záver

Mgr. Petr Beneš vypracoval veľmi kvalitnú dizertačnú prácu o náročnej a aktuálnej téme. Bezpochyby v nej preukázal predpoklady pre samostatnú tvorivú vedeckú prácu v odbore subjadrovej fyziky. **Odporúčam preto, aby mu po úspešnej obhajobe bola udelená vedecko-akademická hodnosť *Philosophiae Doctor* (PhD).**

Bratislava, 1. apríla 2012.



RNDr. Štefan Olejník, DrSc.,
Fyzikálny ústav SAV, Bratislava.