

Posudok školiteľa

na bakalársku prácu **Filipa Koňárika**
s názvom

„Vývoj softwaru pro energetickou kalibraci pro SuperNEMO detektor“

Časticová fyzika sa po objave Higgsovoho bozónu ocitla na križovatke. Štandardný Model je etablovaný a rešpektovaný v komunite časticových fyzikov ako doteraz najpresnejší popis sveta elementárnych častíc. Je však zrejmé, že aj táto teória je len istým nízkoenergetickým priblížením všeobecnejšej fyziky. Je preto nevyhnutné nájsť cestu, ktorá povedie k fyzike za Štandardným Modelom. Jednou z možností sa ponúka štúdiom neutrín a procesov, ktoré s ním súvisia. Veľmi zaujímavou otázkou v tomto smere je otázka existencie bezneutrínového dvojitého beta rozpadu ($0\nu\beta\beta$). Je to proces, pri ktorom sa dva neutróny viazané v jadre spontánne premenia na dva protóny za emisie dvoch elektrónov. Keďže sa v tomto procese emitujú dva leptóny (elektróny), avšak žiadne antileptóny (antineutrína), leptónové číslo sa nezachováva a dochádza k produkcii hmoty na úkor antihmoty. Zachovanie leptónového čísla je však symetriou Štandardného Modelu. $0\nu\beta\beta$ nebol doteraz nikdy pozorovaný. Dôkaz jeho existencie by mal vážne dôsledky na rozvoj nielen neutrínovej fyziky, ale aj časticovej a jadrovej fyziky ako takej. Ak by tento proces existoval, poskytol by nám informáciu o hmotnosti neutrín, ktoré stále ostávajú neznáme. Takisto by jeho pozorovanie znamenalo, že neutríno je svojou vlastou antičasticou.

Metodológia experimentov hľadajúcich $0\nu\beta\beta$ je rôznorodá, avšak všetky experimenty, ktoré ho hľadajú, sa zameriavajú na meranie energetického spektra súčtu kinetických energií vylietavajúcich elektrónov. SuperNEMO experiment, ktorému je venovaná predkladaná bakalárska práca, je navyše vybavený aj dráhovým detektorom, ktorý je schopný rekonštruovať dráhy prelietavajúcich nabitých častíc. Okrem možnosti štúdia topológie rozpadu, táto technológia pomáha bezprecedentne potlačiť neželané pozadie. Cieľom je dosiahnuť bezpozadový experiment v oblasti záujmu („Region of Interest“ - ROI). SuperNEMO detektor je momentálne v poslednej fáze výstavby v podzemnom laboratóriu v Modane na francúzsko – talianskej hranici.

Predkladaná práca je zameraná na simulácie kalibračného systému SuperNEMO detektora. Kalibračný systém pozostáva zo 42 ^{207}Bi zdrojov, ktoré sú rozostavené vnútri detektora. Keďže po dostavbe detektora prístup do neho už nie je možný, kolaborácia vyvinula automatický systém pozostávajúci z krokových motorčekov a tyčí, ktoré sú schopné zdroje zasúvať a vysúvať do a z detektora. Autor vo svojej práci skúma ako sa elektróny z rozpadu ^{207}Bi správajú v detektore SuperNEMO. Na túto štúdiu využil simulačný balíček Falaise vyvinutý kolaboráciou. Cieľom bolo skúmať efekty, ktoré môžu rôznym spôsobom ovplyvniť kvalitu energetickej kalibrácie detektora a pripraviť tak stratégiu na vývoj automatického softvéru, ktorý bude kolaborácia neskôr používať na pravidelnú energetickú kalibráciu.

Prvá kapitola je venovaná všeobecnému úvodu do problematiky neutrín a dvojitého beta

rozpadu. V kapitole autor veľmi výstižne zhrnul historický kontext neutrínovej fyziky. Na príklade niektorých kľúčových neutrínových experimentov objasnil aké otázky neutrínovej fyziky už boli v minulosti zodpovedané. Následne na to nadviazal súčasnou otázkou hmotností neutrín, ktorých hodnoty sú malé a nenulové, ale stále neznáme. V závere kapitoly zhrnul motiváciu vedúcu k hľadaniu $0\nu\beta\beta^-$ a v krátkosti opísal základné metódy hľadania tohto zriedkavého procesu. Druhá kapitola je celá venovaná popisu detektora SuperNEMO a princípov, na akých funguje. Každému z hlavných súčastí detektora venuje autor samostatnú sekciu. **V prvých dvoch kapitolách by som rád vyzdvihol priamočiarosť a zrozumiteľnosť výkladu. Neutrínová fyzika je rozsiahla téma, ktorá úzko súvisí so širokým spektrom fyzikálnych špecializácií. Autor podľa môjho názoru v týchto dvoch kapitolách dokázal, že si podrobne naštudoval problematiku neutrín do takej miery, že bol schopný veľmi efektívne vybrať naozaj iba tie najpodstatnejšie fakty potrebné k pochopeniu problematiky, ktorou sa zaoberal.**

Tretia a zároveň narozsiahlejšia kapitola predkladanej práce je už plne venovaná samotnej študentovej pôvodnej práci. Autor najskôr predstavuje simulačný balíček Falaise, vyvinutý kolaboráciou SuperNEMO na základe známeho balíčka Geant4. Falaise bol použitý vo všetkých simuláciách v práci. Autor nás najskôr zoznamuje s elektrónovým energetickým spektrom ^{207}Bi , tak ako ho budeme môcť zaznamenať v SuperNEMO detektore. Podrobne sa venuje problematike energetických strát elektrónov v plyne, ktorý sa nachádza vnútri dráhového detektora. Autor navrhol model korekcie týchto strát, na základe znalosti detegovanej energie elektrónu a dĺžky dráhy, ktorú elektrón prešiel v plyne. Veľkou výhodou tohto modelu je fakt, že je postavený na základe veličín, ktoré sú dostupné nielen v simuláciách, ale budú merateľné aj priamo skutočným detektorom. Autor takisto dokázal, že má ním navrhnutá korekcia potenciál zúžiť kalibračné píky, čo by viedlo k spresneniu kalibrácie detektora. V druhej časti tretej kapitoly sa autor venuje hľadaniu čo najpresnejšieho fitovacieho modelu kalibračných spektier. Bral do úvahy aproximatívny model uvažujúci iba gaussovské krivky, ako aj presnejší model vychádzajúci z konvolúcie gaussovského a landauovského rozdelenia. V závere kapitoly sa autor zameril na fitovanie spektier jednotlivých segmentov kalorimetra (tzv. optických modulov) a študoval ako sa dva vyššie zmienené fitovacie modely správajú pre každý optický modul zvlášť. Ukázal, že vo všeobecnosti model uvažujúci konvolúciu gaussovského a landauovského rozdelenia opisuje rozdelenia extrémne presne v prípade veľmi vysokých zozbieraných štatistík. Avšak, v prípade nižšej zozbieranej štatistiky, na úrovni tisícov až desaťtisícov udalostí v kalibračnom spektre, môže byť gaussovský model takmer rovnako presný. Autor odhadol, že takéto množstvo štatistiky by bolo možné zozbierať v každom optickom module hlavnej steny kalorimetra pri približne osem hodín trvajúcich kalibračných meraniach. **V tretej kapitole by som rád vyzdvihol rozsah výsledkov, ktoré autor dosiahol. Môžem konštatovať, že všetky ciele bakalárskej práce boli nielen splnené, ale aj prekonané. Výsledky predkladanej práce budú dôležitým podkladom pri vývoji automatického kalibračného softvéru. Pomôžu nielen k vylepšeniu kvality kalibrácie (energetická korekcia), pri rozhodovaní, ktorý z fitovacích modelov je vhodnejší pre opis kalibračných spektier, ale aj pri určovaní ideálneho trvania kalibračného merania.**

Prácu po formálnej stránke hodnotím pozitívne, práca obsahuje minimum preklepov a štylistických chýb a nemám k nej žiadne námietky. **Z pohľadu školiteľa by som rád vyzdvihol zopár faktov, ktoré nemusia byť z práce evidentné. Počas jeho krátkeho pôsobenia v medzinárodnej kolaborácii SuperNEMO sa Filip Koňárik stal jej viditeľnou a rovnocennou súčasťou. Filip Koňárik sa počas riešenia bakalárskej práce zúčastnil aj dvojtýždňovej expedície do Francúzska kde fyzicky pomáhal s prácami na výstavbe detektora. Výsledky svojej práce prezentoval v angličtine na dvoch celokolaboračných stretnutiach v decembri 2021 a v júli 2022. Jeho príspevok sa stretol s veľmi pozitívnym ohlasom. V júni 2022 tieto výsledky odprezentoval na medzinárodnej konferencii MEDEX'22 a takisto pripravil príspevok do konferenčného zborníka, ktorý bude publikovaný v AIP Conference Proceedings.**

Záverom by som rád odporučil **uznať** danú prácu **za bakalársku** a ohodnotiť ju známku **výborne (A)**.

V Prahe, 4.8.2022

.....
Mgr. Miroslav Macko, Ph.D. (školiteľ)