

Posudek dizertační práce

předložené na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské
Českého vysokého učení technického

Autor: **Ing. Filip Jediný**

Název práce: **Searching for Lightweight Dark Matter in the NOvA Near Detector**

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

Problém temné hmoty patří mezi zásadní témata moderní fyziky. Je-li tato substance podobně jako baryonová materie částicové povahy, je velmi přirozené hledat odpovědi na otázky o jejím původu, vlastnostech, atd. mimo jiné i v terestrických experimentech fyziky vysokých energií. Ty v základním rozdělení pracují typicky buď v módech tzv. přímé případně nepřímé detekce procesů, do nichž částice temné hmoty vstupují v počátečním stavu, popřípadě v režimu produkce, kdy se temná hmota hypoteticky tvoří v kontrolovaných podmínkách, typicky ve vysokoenergetických srážkách „běžné hmoty“ na urychlovačích.

Problematika studovaná v předkládané dizertační práci se týká kombinace obou typů těchto procesů, a to jak možnosti produkce částic temné hmoty specifického typu při srážkách vysokoenergetických protonů s pevným terčem v zařízení NuMI v laboratoři FermiLab v USA (primárně zdroje neutrinových svazků sloužících ke studiu tzv. neutrinových oscilací) tak jejich následné detekce v tzv. blízkém detektoru experimentu NOvA prostřednictvím rozptylu na elektronech v jeho aktivním objemu. Ačkoli se v tomto aspektu jedná o relativně standardní postup užívaný i na dalších podobných zařízeních, uvedená experimentální situace (tj. kombinace vysokého výkonu NuMI a citlivosti blízkého detektoru NOvA) v principu umožňuje testování různých typů pracovních hypotéz týkajících se základních vlastností temné hmoty v unikátních podmínkách. Ty jsou pak speciálně vhodné ke studiu tzv. lehké temné hmoty (jež by měla odpovídat novým typům částic s hmotnostmi v oboru stovek MeV až několika GeV), jež je ve většině případů relativně těžké hledat „tradičními“ technikami (obvykle zaměřenými na studium tzv. WIMPů, tj. slabě interagujících částic s hmotnostmi v multi-GeV oboru).

Vlastní obsah práce

Hlavním směrem kandidátovy vědecké práce na tomto poli je detailní statistická analýza možných signálů spojených s průchodem částic temné hmoty specifického typu blízkým detektorem experimentu NOvA, stanovení jeho citlivosti a s tím spojené úrovně testovatelnosti různých fyzikálních hypotéz (včetně studia odpovídajících systematických chyb). K relevantním výpočtům jsou využívány moderní počítačové prostředky (např. Monte-Carlo simulace založené na event-generátorech PYTHIA a GENIE v konvoluci s flux generátorem FLUKA atd.) včetně pokročilých metod založených na zpracování dat pomocí neuronových sítí.

Hlavní výsledky

Kromě zvládnutí pokročilých technik simulace a zpracování dat z konkrétního experimentu je hlavním výstupem předkládané práce stanovení horního limitu pro velikost tzv. efektivního self-anihilačního parametru Y odpovídajícího kombinaci základních parametrů testovaného modelu jako funkce hmotnosti částic temné hmoty (značených χ) prezentovaného v sekci 6.7 (viz zejména obrázek 58). Tento výsledek lze považovat za principiálně zajímavý jak z hlediska jeho komplementarity s „primárním“ fyzikálním zaměřením experimentu NOvA, tak z hlediska jeho případného porovnání s podobnými studiemi vznikajícími v rámci dalších kolaborací (MiniBooNE, DAE \bar{D} ALUS).

Hodnocení práce

Odborná úroveň práce

Pro řešení vědeckého projektu definovaného v sekci 1 jsou využity klasické metody simulace a zpracování dat včetně využití velmi moderních technik založených na využití umělé inteligence; jejich popis v rámci textu sice není příliš detailní, v hlavních rysech je však srozumitelný i čtenáři bez hluboké znalosti uvedené problematiky. Nezanedbatelnou hodnotu má pak exkurz věnovaný historii objevu temné hmoty v kontextu astronomických pozorování a jejího hledání, líbil se mi i detailní popis vlastního experimentálního zařízení (NuMI svazek, blízký detektor NOvA).

Tento veskrze pozitivní první dojem byl však při bližším zkoumání podstatně zkalen několika skutečnostmi, jimž se věnuji níže v sekci „Věcné chyby a nedostatky“.

Rozsah práce, jazyková, grafická a formální úroveň

Co do rozsahu je předkládaná dizertační práce standardní, její jazyková úroveň je výborná. Po formální stránce mě poněkud překvapila „recyklace“ vazby z její původní verze z roku 2019, přičemž je zřejmé, že některé části obsahu jsou mladšího data. Co do grafického zpracování, rozhodně nemohu pochválit volbu bezpatkového písma, jež významně ztěžuje čitelnost textu jako celku.

Za podstatný formální nedostatek ovšem považuji způsob, jakým se autor vypořádává s nutností jasně rozlišit vlastní originální příspěvky od již existujících výsledků dalších skupin (případně jednotlivců), na nichž je podstatná část prezentované práce založena. Již „disclaimer“ na druhé straně předmluvy upozorňující na „netrivialitu takového rozlišení, jehož implementace by navíc zatemnila strukturu a zhoršila čitelnost textu“ (volný překlad oponenta) je poněkud bizarní; zvolená metoda spočívající v použití ich-formy pro popis vlastních a wir-formy pro identifikaci kolektivních výsledků je pak přinejmenším nešťastná, neboť i pro prvotní orientaci vyžaduje detailní studium celého textu. V příloženém seznamu publikací jsem doplňující komentáře též hledal marně.

K originalitě textu jako celku se nemohu vyjádřit, poněvadž jsem neměl k dispozici výstupy z žádného z běžně užívaných systémů její kontroly.

Věcné chyby a nedostatky

Kromě výše zmíněných formálních záležitostí bohužel předkládaná práce trpí několika věcnými nedostatky na různých úrovních závažnosti:

1– Výrazně jsem postrádal jakékoli komentáře týkající se struktury základních fenomenologických formulí, na nichž jsou založeny výpočty event rates v blízkém detektoru NOvA, tj. jednak účinné průřezy produkce DM v terči a zároveň formule pro účinný průřez rozptylu chi-částic na elektronech v detektoru. První z nich jsem v práci nenašel vůbec; výraz pro diferenciální účinný průřez interakce chi-elektron je sice ve formuli (13) uveden, v práci citované jako zdroj této informace jsem však odpovídající formuli nenalezl.

2– Veličinou hlavního autorova zájmu je tzv. efektivní self-anihilační parametr Y definovaný výrazem (1), tj. veličina, která úzce souvisí s kosmologickým chováním chi-částic coby kandidátů na roli temné hmoty. V této souvislosti mě poněkud zarazilo, že v práci nejsou v souvislosti s odvozením hlavního výsledku v sekci 6.7 diskutována další existující omezení na možné hodnoty tohoto parametru, nebo alespoň přibližné odhady citlivosti konkurenčních experimentů (ať už by se jednalo o velmi populární programy hledání WIMP-like temné hmoty s přesahem do sub-GeV oboru nebo např. axion-like kandidátů s hmotnostmi řádově menšími). To by umožnilo zasadit dosažené výsledky do širšího kontextu.

3– Orientaci v textu podstatně ztěžuje nekonzistence značení; jednoduchým příkladem je parametr odpovídající síle interakce v temném sektoru (viz též bod 4) jenž je v občas (např. na str. 77) značen symbolem alfa (a lze jej pak snadno zaměnit s konstantou jemné struktury) a občas jako alfa_D.

4– Za největší a velmi podstatnou věcnou chybu předkládané práce ovšem považuji skutečnost, že výše zmíněné formule pro produkci chi-částic v terči a též pro účinný průřez rozptylu chi na elektronech v detektoru byly s největší pravděpodobností použity mimo obor jejich platnosti. Ze struktury Feynmanových diagramů popisujících první z nich (obr. 3) jakož i ze struktury výrazu (13) pro druhou z těchto centrálních veličin je jasně patrné, že obě byly aproximovány základními příspěvky v rámci poruchového rozvoje v mocninách odpovídající „konstanty jemné struktury v temném sektoru“ (alfa_D), potažmo relevantní kalibrační vazby. Autor si pro účely numerické simulace volí hodnotu alfa_D = 0.5, (tj. zhruba 70x větší, než je velikost konstanty jemné struktury v QED!), čímž se ovšem dostává do situace, kdy jsou kalibrační interakce v temném sektoru hrubě neporuchové (dokonce až 5x silnější než odpovídající interakce v QCD); výsledkům získaným v prvním řádu poruchového rozvoje tak nelze příliš věřit.

Na druhou stranu je třeba poznamenat, že se tak děje ve shodě s postupy použitými v několika předcházejících publikacích jiných autorů, což spíše než pochybnosti o kvalitě kandidátovy vlastní práce vyvolává otázky kolem kvality peer-review procesu v odpovídajících periodikách.

Celková úroveň práce

Ve světle výše uvedeného považuji předkládanou práci za celkově nepříliš zdařilou. Nemohu se zbavit dojmu, že studovaná problematika je dostatečně atraktivní, aby si ze strany autora zasloužila kvalitnější a v některých ohledech detailnější zpracování, a to včetně pokusů porozumnět alespoň základním souvislostem v rámci možností jejího teoretického popisu.

Kromě věcných nedostatků předkládaná práce trpí též několika zbytečnými formálními neduhy. Prezentace klíčových vstupů, na nichž je založen originální autorův příspěvek, je málo detailní. Popisky některých obrázků jsou velmi rudimentární; příkladem budiž horní panel obrázku č. 14, kde je výraznými černými šipkami identifikována jistá oblast energií bez jakéhokoli bližšího vysvětlení; poněkud zvláštní jsou i grafické artefakty v horním panelu obrázku 28. Naprosto nestandardním aspektem dále narušujícím celkový dojem z předložené práce je pak dosti nepochopitelný výskyt chybových hlášení textového procesoru namísto odkazů v celé sekci 3.1.2. Nemohu se zbavit dojmu, že toto je druh chyby, která by neměla uniknout byť jen základní kontrole textu před jeho finálním svázáním, tím spíše pak před jeho odevzdáním coby výsledku mnohaletého autorova úsilí.

Otázky k obhajobě a náměty do diskuze

1– Na straně 79 je vysloven předpoklad, že se vektorový mediátor produkce χ -párů V rozpadá prakticky okamžitě. Vzhledem k tomu, že jsou jeho charakteristiky dostatečně specifikovány, očekával bych alespoň jednoduché ověření této skutečnosti. Je možné být jen řádově odhadnout dobu života V -bosonu respektive jeho „rozpadovou délku“ (decay length)?

2– Jak spolu souvisí obrázky č. 13 a 28?

3– Čemu odpovídá veličina V_{χ} v obrázcích 28 a 29?

4– Z jakého důvodu se liší mocniny alfa ve formulích 13 a 15?

5– Horní limit (90% C.L.) pro hodnotu parametru Y na obrázku 58 vykazuje výrazně nelineární (na log-log- škále) závislost na m_{χ} v okolí cca 30 MeV. Jaká je fyzikální podstata takto výrazné změny chování self-anihilačního parametru v uvedeném oboru hmotností?

Resumé

Ačkoli považuji problematiku studovanou v posuzované dizertační práci za navýsost zajímavou a potenciálně přínosnou, vzhledem k výše popsáným skutečnostem mohu předloženou studii doporučit k uznání jako doktorskou práci jen s maximálními výhradami, a to pouze za předpokladu, že budou v průběhu její obhajoby uspokojivě zodpovězeny všechny výše uvedené otázky a zevrubně okomentována výtka v bodě 4 sekce „Věcné chyby a nedostatky“.

V Praze 14. května 2021

doc. Ing. Michal Malinský, Ph.D.