

Od: Mgr. Peter Filip, PhD.  
Fyzikální ústav, Česká Akademie Věd  
Na Slovance 1999/2  
18200, Praha

Věc: Posudek na dizertační práci Ing. F. Jediného,  
(144 stran, Akademický rok 2018/2019) s názvem:  
"Searching for Lightweight Dark Matter in the NOvA Near Detector"

Předložená dizertační práce Ing. F. Jediného se týká velmi zajímavé problematiky, hledání příznaků interakce částic "lehké" temné hmoty v detektoru NOvA, který je umístěn 100m pod povrchem, a vystaven intenzivnímu neutrinovému svazku NuMI, generovaném ve Fermilabu za účelem zkoumání neutrinových oscilací. Možnou přítomnost částic temné hmoty v neutrinovém svazku (s nižší energií než NuMI svazek) ověřoval i další Fermilab experiment MiniBooNE (2018), což potvrzuje, že tematika práce je opravdu aktuální a má potenciál být i vědecky přínosnou.

Hlavním cílem práce je hledání statisticky signifikantního nadbytku elektronových spršek, v datech z „blízkého detektoru“ NOvA, kinematicky odpovídajících elastickému rozptylu předpokládané příměsi neutrálních částic (lehké temné hmoty) ve svazku mionových a elektronových neutrin (NuMI). Autor práce korektně konstatuje na str. 102, že hledaný nadbytek interakcí v očekávané kinematické oblasti nepozoruje v objemu analyzovaných dat ( $1.1 \times 10^{20}$  PoT), a následně přistupuje i k určení vrchního omezení na parametry produkce a interakce částic temné hmoty pro konkrétní model Temné hmoty.

Autor uvažuje model temné hmoty standardního typu, obsahující parametr kinetického mixingu „ $\epsilon$ “, interakční konstantu „ $\alpha_D$ “, a pro vybraný poměr hmotnosti  $m_\nu$  temného fotonu (dark mediátoru) ke hmotnosti  $m_X$  hledaných částic temné hmoty určuje vrchní limit pro v publikacích standardně používaný anihilační parametr  $Y = \epsilon^2 \alpha_D (m_X/m_\nu)^4$ , s hodnotou  $\alpha_D = 0.5$  na hranici aplikovatelnosti poruchové teorie. Určení vrchního omezení na anihilační parametr modelu temné hmoty je potenciálně hlavním přínosem předložené práce k fyzikálnímu poznání.

K metodám zpracování dizertační práce mám nasledovní poznámky, připomínky a otázky:

- Dizertační práce obsahuje jasný přehled kapitol (obsah), cituje více než 170 zdrojů literatury a zahrnuje téměř 60 ilustračních i vědeckých obrázků s daty. Uspokojivě a pečlivě je popsán zdroj neutrinového svazku, systematická neurčitost aproximované intenzity neutrin procházejících detektorem NOvA, rekonstrukce dat s použitím moderních metod CVN neuronových sítí, i detektor NOvA-ND samotný, ke konstrukci kterého autor předkládané práce, F. Jediný, významně přispěl.
- v seznamu použité literatury jsou nepřesnosti (např. citace (103) nemá číslo strany, a seznam autorů absentuje pro reference: 3, 4, 5, 6, 8, 20, 29, 30, 40, 79, 116).
- v textu je více nefunkčních odkazů, které editovací program nahrazuje řetězcem „zdroj odkazů nenalezen“ (jde např. o strany: 34-35, 87, 89, 107, 111).

1. může autor práce objasnit jak k takovým formálním nedostatkům mohlo dojít ?

- u rovnice (13) na str. 29 je uváděn zdroj (106), který ale danou rovnicí neobsahuje. Možná že je citace (106) uváděna pro SM-HS vazbovou konstantu „ $C$ “ v rovnici (13), ovšem ani pro vztah (15) na str. 76, který se používá na výpočet vrchního limitu pro parametr „ $\epsilon$ “ (na str. 107), není uveden zdroj literatury. Dále, z rovnice (14) autor vyvozuje hlavní kinematické omezení („cut“)  $E_e \theta_e^2 < 2m_e$  pro hledání signálu přítomnosti interakcí temné hmoty v datech, opět bez reference na zdroj, a není úplně zřejmé zda je použitá aproximace pro kinematické omezení  $\cos(\theta_e)$  spolehlivá a přesná.

2. může autor práce dokladovat zdroj a tím korektnost rovnic (13), (14), (15), anebo explicitně ukázat, že důležité kinematické omezení (cut) na  $E_e \theta_e^2$  elektronových spršek plyne z rovnice (14) pro relevantní hodnoty předpokládaných energií  $E_x$  a měřených energií  $E_e$  ?

K některým obrázkům:

- na obrázku 41 (str. 93) chybí popis významu jednotlivých křivek (legenda), a obr. 36 (str. 87) obsahuje graf (nalevo dole) pro spektrum elektronových neutrin (v NOvA blízkém detektoru) abnormálně velkou škálu na Y-ose ( $\varphi=10^{21}$ ), která magnitudou zjevně nekoresponduje s ostatními sub-panely obr. 36. Uvedená citace (160) pod obrázkem 36 je asi uvedena omylem, protože zdroj (160) takový obrázek ani data neobsahuje.

- obrázek 37 (str. 88) ukazuje předpokládaný příspěvek od elastických interakcí částic temné hmoty s elektrony v NOvA detektoru a taky příspěvek elastických interakcí neutrin svazku NuMI s elektrony v detektoru (fialová barva označuje příspěvek „ $\nu$ -e“ druhý sezhora), který je signifikantní i pro oblast binu  $T\theta_e^2 = E_e \theta_e^2 = 0.005-0.01 \text{ GeV} \cdot \text{rad}^2$ . Zároveň, obr. 54 na str. 102, už příspěvek od elastických interakcí „ $\nu$ -e“ neuvádí, i když pro první bin  $T\theta_e^2 = 0.005-0.01 \text{ GeV} \cdot \text{rad}^2$  by tento příspěvek mohl být statisticky nezanedbatelný (usuzováno na základě obr. 37 ze str. 88).

3. může autor zdůvodnit, proč obr. 54 na str. 102 neobsahuje simulovaný příspěvek od elastických interakcí „ $\nu$ -e“, a taky vysvětlit jak vychází „integrál pozorovaných událostí“  $182 \pm 19.79$  (uvedeno v popisu obrázku 54), i když tato hodnota svou velikostí neodpovídá součtu experimentálně naměřených bodů na obr. 54 (součet vychází cca. 90) ?

K hlavnímu výsledku dizertační práce, který potenciálně představuje vedecký přínos (kapitola 6.7 LDM upper limit, a kapitola 7 Conclusions) mám nasledovní poznámky a otázky:

4. na str. 107 je určen vrchní limit pro parametr kinetického mixing:  $\epsilon = (1.6 \pm 0.28) \times 10^{-5}$  a zároveň je z rovnice (1) určena hodnota self-anihilačního parametru:  $Y = (1.59 \pm 0.28) \times 10^{-12}$   
=> jak je možné, že relativní chyby určených  $Y$  a „ $\epsilon$ “ parametrů jsou cca. stejné, když  $Y \sim \kappa \epsilon^2$  ? (poznámávám, že vynechání závorek u hlavních výsledků na str. 107 mění jejich význam)
5. na základě rovnice (18) str. 106, se počítá prahová hodnota počtu událostí  $N_s^{90} = 39.16$ , s použitím  $N_{\text{obs}} = 182$  pozorovaných událostí, a pozadím  $N_b = 161.38$ . Může autor objasnit, jak získal hodnotu  $N_b = 161.38$  ? (popis obr. 54 na str. 106 indikuje 169 událostí pozadí).
6. obrázek 58, na str. 109 ukazuje získanou závislost vrchního omezení pro hodnotu anihilačního parametru  $Y$ , za předpokladu  $\alpha_D = 0.5$ ,  $(m_\nu/m_X) = 3$ , pro různé hmotnosti částic  $m_X$  v rozsahu 0.01 – 0.1 GeV. Jak vysvětluje autor fakt, že v publikaci Phys.Rev.D99 (2019) 051701(R), citované v předložené dizertační práci pod číslem [14], je na Fig. 1 indikován vrchní limit pro anihilační parametr  $Y$  více než 10x větší (tj. jde o slabší omezení hodnoty parametru  $Y$ , v publikaci [14]) pro stejnou kombinaci parametrů temné hmoty  $\alpha_D = 0.5$ ,  $(m_\nu/m_X) = 3$ , a pro větší uvažovanou statistiku dat ( $2.97 \times 10^{20}$  a  $6 \times 10^{21}$  PoT) z NOvA blízkého detektoru, než použil ke své analýze ( $1.1 \times 10^{20}$  PoT) autor dizertační práce ?
7. jak interpretuje autor znaménko nerovnosti  $Y > (1.59 \pm 0.28) \times 10^{-12}$  (uvedené na str 110) ?

Z textu dizertační práce, na str. 108, je možno usuzovat (viz odkaz na „Figure 588“, a text „simulation in 0“), že závěr práce byl psán v časové tísní, což je velká škoda, protože právě tato část práce obsahuje výsledky potenciální vědecké hodnoty.

Dovolím si poznamenat, že hledání příznaků interakcí temné hmoty v experimentálních datech je velmi náročné nejen z odborného, ale i z psychologického hlediska, protože nepozorování přítomnosti hledaného signálu v analyzovaných datech a následné technicky netriviální stanovení vrchního omezení na modelově závislé parametry předpokládaného teoretického modelu temné hmoty klade opravdu zvýšené nároky na koncentraci, cílevědomost, vnitřní disciplínu a odborné znalosti nejen pro postgraduálního studenta, ale často i pro zralého vědeckého pracovníka.

K zhodnocení vědeckého přínosu předložené dizertační práce je potřeba znát odpovědi na výše uvedené odborné otázky č. 4, 5, 6, a proto doporučuji, aby autor osobně obhajoval svou práci před komisí v řádné obhajobě.

V Praze, dne 27.5. 2021

.....  
Peter Filip