

# Posudek dizertační práce

předložené na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské  
Českého vysokého učení technického

Autor: **Mgr. Andrej Babič**

Název práce: **Neutrino Interactions with Atoms and Double-beta Decay**

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

Studium neutrin patří mezi nerychleji se rozvíjející témata moderní částicové fyziky. Objev nezachování leptonového flavoru v procesech tzv. neutrinových oscilací a s tím souvisejících nenulových hmotností alespoň dvou odpovídajících fyzikálních stavů představuje první jasný laboratorní signál, který není popsatečný v rámci tzv. Standardního modelu (SM) částic a jejich interakcí.

Zavedení hmotnostních členů neutrinových polí podobně, jako je tomu v případě kvarků a nabitých leptonů ve SM, však nemusí být přímočaré. Hypotéza striktní neutrality odpovídajících pravotočivých komponent nabízí kromě členu „standardního” Dirakova typu též možnost uvažovat tzv. Majoranův hmotový člen, s nímž je spojena možnost nezachování celkového leptonového čísla na *poruchové* úrovni. K přímým fenomenologickým důsledkům takové konstrukce potom patří např. existence tzv. bezneutrinového dvojitého beta-rozpadu, jenž lze experimentálně hledat na moderních aparaturách komplementárně ke studiu „standardních” kanálů dvojitého beta-rozpadu, v nichž se produkuje pár (anti)neutrin.

Problematika studovaná v předkládané dizertační práci se týká teoretického popisu těchto procesů v rámci kvantové mechaniky a kvantové teorie pole.

## Vlastní obsah práce a hlavní výsledky

Hlavním směrem kandidátovy vědecké práce na tomto poli v první části dizertace bylo zejména studium procesů dvojitého beta rozpadu v případě záchytu produkovaných elektronů (jednoho a okrajově obou) v elektronovém obalu dceřiného izotopu, což jsou rozpadové kanály, kterým se v existující literatuře nevěnuje zdaleka tolik pozornosti jako případu emise obou elektronů ve spojité části spektra. V kapitolách 1 a 2 předkládané práce jsou detailně propočítány odpovídající účinné průřezy, a to za použití pokročilých počítačových kódů pro stanovení self-konzistentních tvarů elektronových vlnových funkcí pro odpovídající vázané stavy. Očekávatelným závěrem těchto studií je pak detailní kvantifikace faktorů potlačení relevantních kanálů vůči “standardní” dvojelektronové emisi.

V kapitolách 3 a 4 se kandidát věnuje studiu dvou konkrétních hypotéz o původu neutrinových hmotových členů, jmenovitě tzv. LR-symetrickým modelům a tzv. seesaw modelům s kvarkovým kondenzátem. V prvním případě je studována hypotéza spontánního narušení parity na relativně nízkých škálách (v oboru řádově desítek TeV) a s tím spojené existence pravých nabitých hmotových proudů vázaných na  $W_R$  a  $Z_R$

kalibrační bosony. V tomto kontextu se pak jedná zejména o porovnání příspěvků lehkých a těžkých neutrin v amplitudách různých typů dvojitého beta rozpadu, které však implicitně vyžaduje detailní pochopení kinematiky odpovídajících jaderných maticových elementů. Kandidátovým příspěvkem k této problematice je pak zejména studium odpovídajících interpolačních formulí a jejich porovnání s výsledky detailních mnohačasticových výpočtů. V případě modelů s kvarkovým kondenzátem se pak kandidát zaměřuje na porovnání dvou typů příspěvků k relevantním amplitudám odpovídajícím efektům dvou základních tvarů efektivních operátorů dimenze 7, které v případě konkrétních modelů s dodatečnou symetrií určitého druhu generují vedoucí příspěvky v poruchovém rozvoji neutrinové hmotové matice. Výsledkem je pak jednoznačná identifikace dominantního efektu a studium fenomenologických omezení na odpovídající vazbové konstanty.

## **Hodnocení práce**

### **Odborná úroveň práce**

Až na několik formálních nedostatků a věcných chyb komentovaných níže je odborná úroveň práce velice dobrá. Kandidát svými výpočty prokazatelně přispěl k několika studiím vedoucím k formulaci původních a relevantních výsledků na poli, jež lze pro danou problematiku považovat za stěžejní. To dokumentuje též jeho relativně bohatá publikační a prezentační činnost shrnutá na str. 98 předkládané práce.

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

### **Rozsah práce, jazyková a grafická úroveň**

Co do rozsahu je předkládaná dizertační práce standardní, její jazyková úroveň je výborná.

Po stránce technického zpracování poněkud překvapí vyvedení na křídovém papíře, který dílu výrazně přidává na celkové hmotnosti; to je ovšem více než kompenzováno výslednou kvalitou tisku, čitelností legend obrázků atp.

### **Formální nedostatky**

1– Za hlavní formální nedostatek považuji velmi nízkou frekvenci komentářů, které by jasně identifikovaly kandidátovy konkrétní příspěvky ke studované problematice; vyjádření školitele a hlavního spolupracovníka v závěru jsou pro tento účel poněkud málo konkrétní. Uvedené se týká zejména kapitol 3 a 4, v nichž jsou studována specifická teoretická rozšíření Standardního modelu s ohledem na strukturu odpovídajících hmotových neutrinových členů. Z textu těchto kapitol je patrné, že se jedná o problematiku, která je kandidátovu profesnímu profilu vzdálenější nežli materiál z kapitol 1 a 2, kde lze jeho konkrétní přínos relativně dobře identifikovat i bez přímého označení, a to zejména z vysoké míry jejich detailnosti jakož i z celkové koherence a logické linearity rukopisu v této části.

2– Orientaci v textu částečně ztěžuje nekonzistence značení respektive používání totožných symbolů pro různé veličiny (a s tím související absence tabulky značení, která by měla být v takto rozsáhlém textu standardem); příkladem může být “přetížení” symbolů

definovaných formulí (1.54), které jsou o několik stránek dříve (viz. formule 1.3) použity v jiném významu; totéž platí pro (2.17) vs. (2.22) atd.

3– Ke čtivosti textu nepřispívá ani relativně časté opakování některých základních formulí (typicky definic), např. (1.25)=(2.15), (1.31)=(2.19) atd.

4– Text v sekci 4 trpí jistou mírou nekoherence/nelinearity prezentace – smysl diskuse struktury relevantního majoranovského hmotového členu v sekci 4.3 se ozřejmí až v sekci 4.4, velikost kvarkového kondenzátu, jejíž znalost je nutná pro výpočty veličin na obrázku 4.2 v sekci 4.4 na str. 80 je diskutována až v sekci 4.5 o několik stran později atd.

### Věcné chyby

S jistým překvapením konstatuji, že práce není prosta ani relativně vážných věcných nedostatků a zkreslení (typicky v částech týkajících se širšího kontextu studované problematiky), jež sice nepředstavují problém z hlediska validity obdržných výsledků, zbytečně však kalí celkový pozitivní dojem z předkládaného rukopisu:

1– Za nejzávažnější chybu považuji opakované tvrzení (na stranách 1 a 55), že se ve SM celkové leptonové číslo zachovává. To je ovšem pravda pouze na poruchové úrovni; vzhledem k nenulové hodnotě relevantní anomálie lze snadno nahlédnout, že instantonové efekty  $L$  narušují, a to podstatným způsobem (alespoň v principu). Vzhledem k tématu práce (fenomenologie interakcí neutrin Majoranova typu), které velmi úzce souvisí s možným řešením fundamentálního problému baryonového a leptonového čísla v kosmologii (prostřednictvím mechanismu leptogeneze) je obtížné tento nedostatek pochopit, zvláště pak vzhledem k tomu, že v kapitole 4 instantonové efekty v krátkosti diskutovány jsou.

2– Ke kvalitě práce nepřispívá autorův poněkud volnější přístup k nakládání s pojmy označujícími různé typy neutrinových polí (ve smyslu vlastních stavů hmotnosti a flavoru, případně tzv. sterilních neutrin, viz. např. str. 3). Textu by zároveň slušela větší pozornost při diskusích chirální struktury konkrétních neutrinových operátorů, která je v případě vlastních stavů hmotnosti komplikovanější než jak je uvedeno např. na str. 54, 56 atd.; slovní spojení “light left-handed”, “heavy right-handed” apod. jsou v tomto smyslu vysloveně zavádějící.

3– Veličina  $\theta_W$  by měla být ve shodě s historickou skutečností důsledně nazývána “slabý směšovací úhel”, nikoli “Weinbergův úhel“, jak je uvedeno např. na str. 18 a 19 – duchovním otcem tohoto pojmu je ve skutečnosti S. Glashow.

4– SM jako jednotná teorie elektroslabých a silných interakcí nebyl formulován v roce 1968 (jak je uvedeno na str. 10), ale fakticky až zhruba ve druhé polovině 70. let 20. století, kdy začala být kvantová chromodynamika všeobecně přijímána jako mikroskopická teorie silných interakcí.

5– Tvrzení o identitě škály potlačení Weinbergova operátoru  $\Lambda$  a hmotnosti mediátoru v seesaw I., II. a III. typu na str. 73 není pravdivé. V seesaw II. typu je díky

přítomnosti trilineární skalární vazby možné uvažovat i velmi lehký skalární triplet při zachování Lambda řádu  $10^{14}$  GeV.

6– Str. 81:  $SU(3)_L \times SU(3)_R$  není kalibrační nýbrž globální symetrií tříkvarkové QCD; v tomto případě se patrně jedná o triviální chybu, která unikla závěrečné kontrole.

7– Na několika místech textu (např. na str. 91) je naznačována problematičnost případných malých hodnot Yukawovských vazeb kvarků (a leptonů); to však nemá racionální základ, poněvadž tyto parametry jsou „chráněny“ vůči velkým radiačním korekcím existencí odpovídajících přibližných globálních symetrií SM.

### **Celková úroveň práce**

Jelikož výše uvedené nedostatky ani jistá míra nekoherence textu v jeho druhé polovině podstatným způsobem neovlivňují správnost a relevanci obdržených výsledků, lze předkládanou práci jako celek považovat za relativně zdařilou.

### **Otázky k obhajobě a náměty do diskuze**

Závěrem bych si dovilil položit autorovi několik otázek pramenících zčásti z prosté zvědavosti a zčásti z mého neúplného chápání kontextu i některých technických detailů prezentované práce:

1– Stanovení analytické struktury formfaktoru ve vzorci (1.87) se jeví jako relativně přímočarý důsledek aplikace tabulky integrálů na předchozí vztah(y), přesto je uvedena formule prezentována jako důležitý a nový výsledek. Je-li tomu tak, zajímalo by mě, proč bylo toto relativně jednoduché pozorování jinými autory opomenuto.

2– Verze kódu GRASP2K z roku 2015 použitá k výpočtům radiálních částí vlnových funkcí v kapitole 2.4 funguje pouze pro  $n$  menší nebo rovno 9. Jaký je důvod pro toto omezení?

3– Proč se ve formuli (3.20) faktorizuje (ve jmenovateli) hmotnost protonu?

4– Na základě čeho je “rozumné očekávat” identitu  $V_0$  a  $U_0$  v diskusi pod formulí (3.32) a čím jsou motivovány vztahy (3.35) a později též univerzalita směšovací části matic (3.39) a (3.49)?

5– Na str. 82 dole je multiplikace obou stran rovnice (4.30) kvarkovou hmotou motivována “zajištěním invariance vůči renormalizační grupě”. Čeho a proč?

6– Klíčem k dominanci příspěvku typu (a) z obrázku 4.3 je pozorování z konce kapitoly 4.7, že relevantní formfaktor je cca 200krát větší než formfaktor odpovídající příspěvku typu (b). Tento závěr byl učiněn na základě detailního a relativně komplikovaného výpočtu na úrovni mikroskopické teorie nukleonových interakcí. Zajímalo by mě, jestli je možné řádový rozdíl ve velikostech těchto NME pochopit heuristicky (např. na základě symetrií).

## **Resumé**

Až na několik výše specifikovaných výhrad a nepřesností v textu a s přihlédnutím ke struktuře a bohatosti kandidátova profesního profilu mohou předloženou práci s klidným svědomím doporučit k uznání jako doktorskou práci.

V Praze 27. srpna 2022

---

doc. Ing. Michal Malinský, Ph.D.