

Vyjádření školitele k doktorské disertační práci Mgr. Martina Slezáka

“Monitoring of the energy scale in the KATRIN neutrino experiment“.

Doktorská disertace je logickým výsledkem práce Martina Slezáka ve Skupině elektronové spektroskopie ÚJF dlouhodobě zaměřené na výzkum z oblasti neutrinové fyziky. Práci ve skupině zahájil v rámci částečného pracovního úvazku v roce 2008. Získané výsledky uplatnil v bakalářské práci za akademický rok 2008/2009. Během následujícího magisterského studia pracovní úvazek ve skupině pokračoval a vyústil ve vypracování diplomové práce za akad. rok 2010/2011.

M. Slezák byl přijat do doktorského studia v říjnu 2011. Předkládaná disertace představuje příspěvek k mezinárodnímu projektu KATRIN, jehož cílem je stanovení hmotnosti elektronového antineutrina nebo zlepšení dosavadního horního limitu na tuto hmotnost faktorem deset. Podstatou experimentu je změření tvaru konce beta spektra v rozpadu tritia. Hmotnost neutrina představuje fundamentální přírodní konstantu, která je důležitá pro fyziku elementárních částic, astrofyziku a kosmologii. Realizace projektu KATRIN probíhající v KIT Karlsruhe je náročná, protože na řadu parametrů systému KATRIN jsou kladeny požadavky na hranici možností současných technologií. Mezi tyto požadavky patří také zajištění vysoké stability energetické stupnice spektrometru KATRIN - její nerozpoznaná variabilita již na úrovni několika desítek meV snižuje projektovanou citlivost 200 meV na hmotnost neutrina. Stabilita stupnice závisí přímo na analyzačním vysokém napětí 20 kV. Obecně je dlouhodobé přesné měření takového napětí obtížné, a proto bude použit vedle klasického způsobu s děličem napětí a voltmetrem i přídavný monitorovací spektrometr (MoS), který bude měřit spektrum monoenergetických elektronů s použitím téhož analyzačního napětí. Změna energie monoenergetických elektronů měřená s pomocí MoS bude indikátorem driftu analyzačního napětí. Tomuto účelu nejlépe vyhovují konverzní elektrony ze slupky K přechodu 32 keV (K-32) z rozpadu izotopu ^{83m}Kr s energií 17824 eV. Pro realizaci uvedeného záměru jsme ve skupině navrhli použít zdroj založený na implantaci mateřského izotopu ^{83}Rb do platinové fólie. Stabilita energie elektronů z uvedeného zdroje na potřebné úrovni představuje hlavní výstup doktorské disertace. Tato stabilita není zdaleka samozřejmá, protože emise elektronů představuje atomárně jaderný proces závislý na stabilitě okolí rozpadajících se jader ^{83m}Kr ve fólii.

Disertace o 192 stránkách je napsána v anglickém jazyce a obsahuje 80 obrázků. Text se skládá z úvodu, sedmi kapitol, závěru a seznamu literatury v rozsahu 152 citací.

V první kapitole dizertant uvádí soudobé poznatky z oblasti fyziky neutrin zejména s ohledem na problémy spojené s jejich hmotností. Druhá kapitola je věnována popisu experimentu KATRIN, především jeho spektrometru, který se vyznačuje vysokým energetickým rozlišením a současně i vysokou světelností, a dále také nejistotám systematických efektů ovlivňujících výslednou citlivost na stanovení hmotnosti neutrina. K systematickým efektům se řadí i eventuální nestabilita energetické stupnice, která přímo souvisí s nestabilitami analyzačního vysokého napětí a i tzv. výstupních prací jak zdroje elektronů, tak i spektrometru. V následující kapitole jsou poprvé odvozené teoretické vzorce umožňující výpočet vlivu uvedených nestabilit, pro několik jejich různých časových průběhů po dobu měření KATRIN, na stanovovanou hmotnost neutrina a energii konce beta rozpadu tritia. Dále jsou zde uvedeny vlastnosti konverzních elektronů z rozpadu ^{83m}Kr a je analyzováno jejich použití v MoS, pro energetickou kalibraci v experimentu KATRIN a také pro studium parazitního elektrického napětí tritiového zdroje vyvolaného elektrickým nábojem vznikajícím v důsledku velkého množství rozpadů beta tritia.

Čtvrtá kapitola je věnována technice měření spekter monoenergetických elektronů na MoS a metodikám jeho vyhodnocování. Jsou popsány metody opravy spekter na mrtvou dobu a stanovení transmisní funkce spektrometru. V posledním případě dizertant vedle obvykle

uvažované nehomogenity elektrického a magnetického pole MoS poprvé zahrnuje i nehomogenitu plošného rozložení aktivity v použitém zdroji elektronů. V dalším následuje podrobná analýza teoretického popisu spekter. Pro popis základního tvaru čáry konverzních elektronů je poprvé zavedena funkce navržená autory Doniachem a Sunjicem pro spektrum fotoelektronů. Ukazuje se, že tato funkce poskytuje výrazně lepší popis čáry v porovnání s dosud užívaným dubletem Voigtovy funkce. Do celkového popisu spekter jsou zahrnuty i jevy související s energetickými ztrátami elektronů jak v atomu (efekty shake up a shake off) tak i v materiálu zdroje (energy loss-electrons). Polohy čar (tj. energie) získané fitem postupně naměřených experimentálních spekter představují informaci o stabilitě vysokého napětí. V kapitole je také popsána referenční metoda, při které se získají polohy čar relativně vůči jednomu zvolenému spektru.

Pátá kapitola je nejrozsáhlejší. Týká se přípravy zdrojů implantací iontů ^{83}Rb na zařízeních ISOLDE a BONIS (zde ^{83}Rb poskytuje cyklotron ÚJF), charakterizace zdrojů spektroskopickými metodami, a jejich dlouhodobá měření s ohledem na stabilitu energie linky K-32 na MoS. Disertantovi „prošlo rukama“ 7 zdrojů připravených na ISOLDE a 15 zdrojů ze zařízení BONIS. U zdrojů měřil jejich aktivitu ^{83}Rb a stupeň retence plynného isotopu $^{83\text{m}}\text{Kr}$ v nich s pomocí detektorů HPGe, Si(Li) a SDD (silicon drift detector). Rozložení radioaktivity v ploše stanovoval s pomocí pixelového detektoru Timepix. Pro detektory Timepix a SDD, nově zavedené na našem pracovišti, vypracoval potřebné metodiky měření. Ve spolupráci s německými kolegy se zúčastnil různě dlouhých měření (až několik měsíců) výše uvedených zdrojů na MoS. V oblasti zpracování naměřených spekter a analýzy a interpretace výsledků byl jeho podíl rozhodující. Je popsán průběh a výsledky měření se zdroji z ISOLDE a pěti generacemi zdrojů z BONIS. Tato práce byla náročná na koordinaci, protože jak pracoviště obou implantátorů tak i vlastní MoS jsou využívány i jinými fyzikálními skupinami. V případě měření na MoS bylo nutno počítat se sdílením děliče vysokého napětí s fyziky na universitě v Münsteru. Jako první výsledek disertant ověřil, že energie elektronů K-32 měřená na MoS závisí lineárně na čase. Dále prokázal, že lze vyrobit reprodukovatelně zdroje s velikostí driftu energie ~ 5 meV/měsíc. Tato hodnota je minimálně o řád lepší než připouští limit KATRIN na systematickou nejistotu vysokého napětí. Poprvé odhalil prakticky lineární závislost velikosti driftu na maximální hustotě ^{83}Rb ve zdroji. Aktivně se účastnil i prvního několikadenního měření, při kterém spektrometr KATRIN i MoS pracovaly v monitorovacím režimu tj. se společným vysokým napětím.

Nad rámec zadání doktorské práce se disertant zúčastnil prací spojených s vývojem zdroje plynného $^{83\text{m}}\text{Kr}$ určeného pro systematická měření elektrického náboje tritiového zdroje a pro energetickou kalibraci stupnice KATRIN. Uvedený zdroj je založen na depozici ^{83}Rb do substrátu zeolitu. V šesté kapitole jsou uvedeny základní vlastnosti zdroje, zejména retence kryptonu ve zdroji v závislosti na typech zeolitu a prostředí, do kterého byl zdroj umístěn. Byl zkoumán vliv substrátu zdroje na kvalitu ultravysokého vakua. V poslední kapitole si dizertant všímá vlastní techniky monitorování a zabývá se diskusí opatření pro snížení statistické nejistoty polohy (energie) konverzní linky. Cenný je zejména návrh optimálního rozložení měřených bodů ve spektru a/nebo optimálně volených dob měření v bodech spektra. Při současném užití obou optimalizací dojde ke zmenšení statistické nejistoty polohy konverzní čáry o 38 % v porovnání případem rovnoměrného rozložení bodů a stejné doby měření v bodech. Kapitola je zakončena seznamem doporučení pro provádění monitorování..

Závěr disertace obsahuje kvalitní shrnutí celé práce a také řadu cenných doporučení pro budoucí měření na monitorovacím spektrometru KATRIN zejména s ohledem na monitorování analyzačního vysokého napětí při vlastním měření hmotnosti neutrina.

M. Slezák se důkladně obeznámil s praktickou jadernou spektroskopií záření gama i elektronů zahrnující přípravu radioaktivních zdrojů, zásady bezpečnosti práce se zdroji včetně jejich transportu, vlastní měření zdrojů s pomocí detektorů, analýzu měření i jejich interpretaci. Je seznámený s technikami ultra vysokého vakua, kryogenními i vysokého stejnosměrného

napětí i jeho měření na úrovni jednotek ppm. Velmi dobře zvládal matematické zpracování měření různého typu včetně vypracování potřebného programového vybavení v jazyce C++. Úspěšně strávil řadu měsíců při dlouhodobých měřeních na monitorovacím spektrometru v KIT Karlsruhe. V posledních letech zaujímal rozhodující pozici při plánování dlouhodobých měření stability energie elektronů K-32 na MoS.

Vedle autorství na šesti publikacích M. Slezák vystoupil s výsledky své práce prakticky na všech zasedání spolupráce KATRIN pořádaných dvakrát za rok. Vybrané části práce prezentoval na dvou mezinárodních konferencích, MEDEX v Praze 2013 a Neutrino 2014 v Bostnu USA, a dále na semináři W. a E. Herausových v Bad Honnefu 2014, SRN.

Jsem přesvědčen, že předložená doktorská práce má vysokou úroveň a doporučuji, aby po úspěšné obhajobě byl M. Slezákovi udělen titul PhD.

29. 1. 2016

Mgr. Drahošlav Vénos, CSc.
Oddělení jaderné spektroskopie ÚJF