

POSUDEK OPONENTA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: Eva Fialová

Název práce: Měření charakteristik SiPM pro experiment DUNE

Fyzika neutrin je od jejich objevu až do dnešních dní prestižním a významným odvětvím, které přispívá k poznání Vesmíru na fundamentální úrovni. Jaká je hierarchie neutrin? Jsou majoranovskými částicemi? Existují pouze tři druhy neutrin? Tolik několik namátkou zvolených nezodpovězených otázek. Další přírůstkem do rodiny významných neutrinových experimentů bude DUNE, který úzce souvisí s tématem této práce.

Neutrina s látkou neinteragují příliš ochotně, účinné průřezy jejich interakcí jsou velice nízké. Wolfgang Pauli, který jejich existenci postuloval, dokonce předpokládal, že k jejich přímé experimentální detekci nikdy nedojde. V tom se sice mýlil, přesto jejich detekce zůstává do dnešní doby výzvou, která pro dosažení dobrých výsledků vyžaduje nasazení detektorů s vynikajícími parametry. S potřebou zvyšovat přesnost měření, případně pozorovat stále vzácnější jevy, se nároky na detektory navíc neustále zvyšují.

Experiment DUNE není v tomto výjimkou, detekční technika v něm použitá musí odpovídat stanovenému úkolu. Tato technika je částečně založená na scintilačním principu, což vznáší požadavek detekce scintilačních fotonů, v ideálním případě s vysokou účinností, s počítáním jednotlivých fotonů, s dobrým časovým i solidním prostorovým rozlišením a dobrým poměrem signál/šum. Jako fotodetektory budou použity SiPMs (tzv. křemíkové fotonásobiče), u nichž se předpokládá, že náročným požadavkům vyhoví. Není to však samozřejmé – proto musí být parametry použitých SiPMs nejprve ověřeny. Předkládaná práce se právě ověřením některých důležitých parametrů SiPMs zabývá. Téma je tedy aktuální a potřebné.

Členění práce

Práce je členěna do pěti kapitol. V první autorka popisuje cíle a základní uspořádání experimentu DUNE. Kapitola druhá se zaměřuje na základní popis vlastností, konstrukce a principu různých fotodetektorů. V třetí kapitole je podrobněji pojednáno o SiPMs, což připraví studentce půdu pro kapitolu čtvrtou, v níž prezentuje experimentální výsledky. Kapitola pátá celou práci shrnuje. Členění práce je logické, v teoretické práci je postupováno od obecného ke konkrétnímu, které se pak v kapitole 4 stane předmětem praktické části práce.

Jazyková a formální úroveň

Oponent bohužel musí konstatovat, že z hlediska formálního a jazykového nedosahuje práce ideální úrovně. Často se vyskytují hrubky, např.: str. 11 „kladně nabyté piony“, str. 17 „byli vyrobeny“, str. 19 a 36 „jež“ namísto „jenž“, „SiPMS byli“, str. 48 „způsoby spočívali“. Autorka se nevyvarovala řady dalších dílčích jazykových prohřešků, např. str. 12-13 „dichronický“ namísto „dichroický“, str. 13 „zanecahjí“, str. 33 „trvajících desítek nanosekund“, str. 43 „nízko kapacitní“, str. 44 „ponářena“ namísto „nořena“, apod. Autorka místy používá jen hrubě počestěné výrazy namísto korektního překladu nebo používá anglických výrazů tam, kde ustálený český termín existuje, např. str. 11 „beton-ocelový blok“ namísto „železobetonový blok“ případně „ocelobetonový blok“, str. 20 „shot šum“ namísto „výstřelový šum“. Do této chvíle si nicméně jedná jen o drobnosti.

Autorka se na některých místech vyjadřuje vágně a nepřesně, byt by byla na místě kvantifikace, např. str. 11 „ohromné množství“, byt se nabízí uvést konkrétní hodnotu, alespoň řádově.

Závažnější jsou pochybení ve slovních spojeních, větné vazbě apod. V některých případech tyto prohřešky jen znepříjemňují čtení, mnohdy se ale sdělení stává obtížně srozumitelným, případně částečně nesrozumitelným. Naštěstí tato nesrozumitelnost prakticky nikdy není úplná.

K těm pouze „čtení znepříjemňujícím“ nedostatkům patří např. „zpřesnění znalostí této teorie“ na str. 10, „doba časového spektra“ na str. 20, „daly za vznik“ na str. 27, „síla světla“ na str. 31, „vhodnost výběru“ na str. 31 (má být jen „vhodnost“), „nashromáždění elektronu“ na str. 34. Na str. 13 říká, že složení blízkého detektoru se může ještě změnit, má ale zřejmě na mysli jeho konstrukci.

Obtížnější srozumitelnost pak nastupuje ve spojeních jako „závislost temných pulzů“ namísto „závislost četnosti temných pulzů“ na str. 42. Z I-V křivky nebylo průrazné napětí definováno, nýbrž bylo na jejím základě stanoveno (str. 44). Namísto „množství temných proudů“ byl zřejmě určen nějaký jiný parametr SiPMs, těžko ale říci, zda to byl temný proud sám (jeho hodnota v A), četnost temných pulzů, případně něco docela jiného (str. 44). Poměr signál šum není vztahem (2.3) definován, vztah (2.3) nám říká, na čem tento poměr závisí u některých fotodetektorů (str. 20). Jedná se o chybu v překladu, slovo „define“ má více významů. Na str. 17 autorka chce definovat základní veličiny detektorů. Ve skutečnosti definuje veličiny, pomocí nichž lze kvantifikovat parametry detektorů.

Jak podle autorky souvisí šum s Poissonovým rozdělením (str. 20), se mohu jen domýšlet. Snad se nám snaží říci, že v amplitudovém spektru temných pulzů lze pozorovat ekvidistantní píky. Plocha k-tého píku je rovna $P(k) = A p_{\text{poiss}}(k)$, kde A je konstanta nezávislá na k a $p_{\text{poiss}}(k)$ je pravděpodobnost, že náhodná veličina daná Poissonovým rozdělením s vhodnou střední hodnotou nabyde hodnoty k. Jinými slovy, že poměry ploch píků jsou stejné jako poměry pravděpodobností v Poissonově rozdělení. Citovaná literatura hovoří o distribuci počtu fotonů, tj. vstupním signálu, což z textu pochopit nelze.

Na str. 50 se píše o vyšších napětích. Čtenář je bohužel zmaten, neboť napětí jsou záporná a nemůže si být jist, zda se jedná opravdu o vyšší napětí nebo o vyšší absolutní hodnoty napětí.

Nejasný je i popis vlivu časového průběhu intenzity dopadajícího světla nacházející se na str. 31. Je to opravdu vliv na parametry detektoru? Nebo jde jen o vliv na průběh signálu z fotodetektoru? Nebo se pouze autorka snaží říci, že při konstantním toku světla nemají některé parametry, např. náběžná doba, pro uživatele význam?

Práce se vyznačuje i dalšími formálními nedostatky. V grafech jsou desetinné tečky místo desetinných čárek, odkazy nejsou řazeny podle pořadí výskytu. Není definována zkratka PIP-II (Proton Improvement Plan-II) na str. 11. Zisk v tabulce 2.1 (str. 29) by měl být 10^5 - 10^6 nikoliv 105-106, mm² namísto mm2. Rozměr SiPM na straně 33 by bylo lepší udávat spíše jako 1×1 až 6×6 mm² spíše než 1-6 mm². Popisky os na obr. 4.4 jsou téměř nečitelné (str. 46) Na obr. 4.9 a 4.10 jsou chybně popsány osy y.

Faktické a terminologické nedostatky

Bohužel ani v této oblasti se autorka chyb nevyvarovala. Na str. 17 tvrdí, že u Čerenkovových detektorů se neužívá reflektorů, zatímco u scintilátorů ano (str. 17). S reflektory se však setkáme často i u Čerenkovových detektorů. Naopak scintilační detektory mohou být mimořádně i bez reflektoru.

Autorčino vysvětlení existence krátkovlnné hrany v závislosti kvantové účinnosti na vlnové délce lze beze zbytku uplatnit pouze na polovodičové detektory, ale text na str. 19 hovoří o fotodetektorech obecně.

Energetická rozlišovací schopnost, jak ji zavádí autorka na str. 19, je vhodná pro popis vlastností detektorů ionizujícího záření, např. SiPM ve spojení se scintilátorem. Rozhodně se nicméně nejedná o veličinu, která by odrážela vlastnosti samotného SiPM.

Tvrzení, že šířka frekvenčního pásma udává rozsah frekvencí, při kterých je detektor schopen pracovat, lze považovat v nejlepším případě za nepřesné (str. 20), spíše ale neodpovídající skutečnosti. Je sice pravda, že daná věta je uvedena i v odkazované literatuře, tam je nicméně dále upřesněna. PMT

nejsou provozovány při napětí řádově kV, spíše v blízkosti 1 kV (str. 21), což ostatně potvrzuje i citovaný zdroj.

Na str. 11 by autorka měla zdůraznit, že vzniklá neutrina jsou mionová.

Na str. 48 není vysvětleno, co je to teplotní napětí U_T .

Na str. 9 by měly být lépe kriticky zhodnoceny scintilační vlastnosti LAr (kapalný argon). Světelný výtěžek 10 f/keV, vlnová délka maxima emise 128 nm, ani mikrosekundový dosvit nemůžeme označit za špičkové scintilační parametry – nejsou však ani tragické. Přesto má použití LAr v experimentu nepochybně smysl – je levný i ve velkých objemech, transparentní a lze ho použít jako TPC komoru, což s pevnolátkovými scintilátory možné není. Je zřejmě též velmi málo kontaminovaný radioaktivními látkami.

Nedokonalá čeština a faktická opomenutí zatemňují vysvětlení rozdílu v poloze krátkovlnné hrany v závislosti kvantové účinnosti na vlnové délce mezi P na N a N na P SiPM strukturami na str. 34. Autorka např. píše o vyšší ionizační účinnosti elektronu. Znamená to, že je ionizační účinnost elektronu vyšší v jedné struktuře oproti druhé? Podle mého názoru by to mohlo znamenat i to, že ionizační účinnost u elektronů je vyšší než u děr a fyzikálně mi to též dává větší smysl. Z textu to nicméně zřejmě není.

Praktická část práce

Autorka úspěšně změřila a zpracovala rozsáhlý soubor experimentálních dat a určila požadované parametry několika sad SiPM. K použité metodologii a její aplikaci nemám námitek. Jediným nedostatkem je fakt, že změřená data jsou velmi stručně a poměrně povrchně diskutována. Diskuse a závěr by měl být něčím více než shrnutím předchozích kapitol.

Práce s literaturou

Práce někdy přebírá celé pasáže z textu zdrojů, aniž by je dala do souvislosti se svým tématem. Např. na straně 32 je odstavec nazvaný „Výběr založený na prostorových charakteristikách dopadajícího světla“. Jedná se o překlad ze zdroje [9] diskutující, za jakých podmínek má smysl nasazení fokusační optiky. Očekával jsem, že studentka sdělí, na tomto místě či níže, zda jsou tyto podmínky pro její měření splněny či nikoliv. Nesdělila. S tímto druhem nedostatků se setkáme v práci na více místech. Nepotřebná pro práci je např. definice spektrální zářivé citlivosti, neboť pro SiPMs se jedná o pramálo vhodný parametr.

Zvláště patrné je to v kapitole 3, která celá stojí na zdrojích [6, 7 a 14], vše od firmy Hamamatsu. Oponent uznává, že Hamamatsu má příslušné materiály zpracovány kvalitně a sám z nich rád čerpá při výuce. Opět je nicméně třeba poznamenat, že studentka by se tu a tam měla pokusit vložit vlastní text, který dává údaje převzaté ze zdrojů do souvislosti s tématem práce.

O stanovení poměru S/N vztahem (2.3) citovaná literatura tvrdí, že daný vztah je vhodný pro detektory s jednotkovým ziskem, což rozhodně není případ SiPM. Pro SiPM uvádí tentýž zdroj jiný vztah. Pojednání o linearitě odezvy z téhož zdroje také autorka ochudila o mnohé cenné pasáže, které by pro práci mohly mít smysl.

Použitá literatura je kvalitní. Množství zdrojů je hraniční, ale přeci jen ještě akceptovatelné. Až na vzácné výjimky autorka cituje důsledně a v souladu se zdrojem.

Otázky

Během obhajoby bych chtěl studentce položit následující dotazy:

- 1) Na str. 31 píšete, že omezení náběžné doby zlepší poměr S/N. Jak?
- 2) Tvrdíte, že rozdíl v určení R_Q pomocí rovnice (4.3) je způsoben nezahrnutím sériového odporu diody, který ovlivňuje měření zbylými dvěma metodami. Šlo by tento nezahrnutý odpor určit,

provést na něj opravu a pak provést srovnání výsledků různých metod znovu? Pokud je to snadné, proveďte.

- 3) Hodnoty V_{br} na obr. 4.9 a 4.10 se zdají být nižší pro vyšší pořadová čísla boardu (16-20). Je to náhoda? Nebo to má nějakou identifikovatelnou fyzikální příčinu? Jakou?
- 4) Jak se slučuje vztah (2.4) s definičním vztahem šířky frekvenčního pásma B na str. 20?

Přes všechny výše uvedené nedostatky se jedná o poměrně solidní práci, která splňuje, byť s určitými výhradami, nároky, které jsou na FJFI kladeny na absolventa bakalářského studijního programu. Oponent studentce doporučuje, aby při vypracování výzkumného úkolu a diplomové práce zvýšila jazykovou a formální úroveň a zároveň vždy myslela na to, že její práce má určité téma, tj. aby zařazovala do práce jen informace s tématem související a zároveň tuto souvislost čtenáři vysvětlovala tam, kde není zcela zřejmá.

Práci doporučuji k obhajobě a navrhuji hodnocení C (dobře).

V Praze dne 3.9.2021

doc. Ing. Petr Průša, Ph.D.
KDAIZ, FJFI, ČVUT v Praze