

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Analýza dat a energetická kalibrace detektoru typu SpacePix
Jméno autora:	Jiří Kulda
Typ práce:	bakalářská
Fakulta/ústav:	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (FJFI)
Katedra/ústav:	Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Oponent práce:	Ing. Vladimír Linhart, Ph.D.
Pracoviště oponenta práce:	Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
<p>Předložená bakalářská práce se v rešeršní části zabývá popisem kosmického záření a základy technologie polovodičových detektorů. Experimentální část je věnována kalibraci detektoru SpacePix. Zadání práce obsahuje čtyři hlavní body:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Charakterizace kosmického záření ve vesmírném prostoru 2) Seznámení s fyzikálními principy detekce částic polovodičovými detektory 3) Provedení energetické kalibrace detektoru typu SpacePix 4) Analýza dat z měření a/nebo simulací vícevrstvých detekčních systémů <p>Téma má velmi široký záběr. Student musel nastudovat značné množství informací, které běžně nejsou součástí bakalářského studijního plánu – zejména problematiku kosmického záření, fyziku pevné fáze se zaměřením na polovodiče a principy polohově citlivých polovodičových detektorů. Dále si musel osvojit práci s programovými nástroji pro Monte Carlo simulace (konkrétně AllpixSquared založený na Geant4), provést vybrané simulace a následně se naučit měřit s pixelovým detektorem – od kalibračních měření až po měření či simulace vícevrstvých systémů, pravděpodobně složených z těchto pixelových detektorů.</p> <p>Rozsah požadovaných činností je na bakalářskou práci mimořádně velký a svým charakterem se blíží diplomové práci. Zadání proto hodnotím jako nadstandardně náročné.</p>	

Splnění zadání	Zvolte položku.
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
<p>Pokyny pro vypracování bakalářské práce, které zároveň tvoří její zadání, jsou koncipovány poměrně obecně až nejednoznačně.</p> <p>Například první bod „Charakterizace kosmického záření ve vesmírném prostoru“ vyvolává otázky: Co měl zadavatel konkrétně na mysli? Jak a pomocí jakých metod může student charakterizovat kosmické záření, a to přímo v kosmickém prostoru? Cílem snad mělo být provedení rešerše odborných článků na toto téma? Taková rešerše by však byla velmi rozsáhlá. Jaký byl očekávaný výstup tohoto bodu? Student se s úkolem vyrovnal tak, že stručně shrnul poznatky o kosmickém záření v kosmickém prostředí, zejména na oběžných drahách v okolí Země.</p> <p>U druhého bodu „Seznámení s fyzikálními principy detekce částic polovodičovými detektory“ je požadavek zřetelnější a zcela odpovídá nárokům kladeným na studenty, kteří se mají detailněji zabývat polovodičovými detektory a jejich aplikacemi. Student zvolil správný postup: nejprve se věnoval fyzice pevné fáze se zaměřením na polovodiče (pásová struktura energetických hladin, elektron–děrový formalismus, rozdělení polovodičů, p–n přechod a jeho využití pro detekci částic ionizujícího záření). Následně stručně pojednal o polohově citlivých</p>	

polovodičových detektorech, především o hybridních pixelových detektorech. Po připomenutí základních charakteristik detektorů (spektrometrické rozlišení, elektronický šum a kapacita, tvorba klastrů aj.) se zaměřil na popis detektoru SpacePix3. Všechny tyto znalosti jsou pro úspěšné dokončení bakalářské práce vhodné až nezbytné.

Ačkoli nelze s jistotou stanovit, zda student naplnil první dva body zadání přesně podle očekávání, lze konstatovat, že se s nimi vyrovnal odpovědným a smysluplným způsobem.

Třetí bod zadání, který již spadá do experimentální části, se týká provedení energetické kalibrace detektoru typu SpacePix. Očekával jsem, že výstupem bude sada kalibračních křivek (jedna křivka pro každý pixel), tedy závislost mezi nezávislou proměnnou (typicky číselné hodnoty poskytované digitální částí elektroniky detektoru) a závislou veličinou (energie vyjádřená v běžných jednotkách, např. keV). Dále jsem předpokládal, že tato část bude zpracována alespoň ve formě měřicího protokolu, když už ne v podobě esejistického textu. Takový protokol by měl obsahovat cíl měření, popis použitých nástrojů, postup, výsledky a diskusi. Některé pasáže práce se tomuto formátu sice částečně blíží, avšak pro čtenáře, který nebyl přímým účastníkem experimentů, zůstává text prakticky nesrozumitelný.

Není zřejmé, jaký byl cíl měření; postup lze pouze odhadovat; zpracování dat je nejasné a neočekávané; diskuse výsledků působí spíše spekulativně a nelze ji objektivně hodnotit. Samotné výsledky uvedené na Obr. 4.12 až 4.15 jsou velmi zvláštní a naznačují, že detektor mohl pracovat nesprávně. To je v experimentální praxi možné a předpokládám, že vedoucí práce tuto skutečnost komisi vysvětlí. Nicméně nesrozumitelný popis experimentů tím není omluven. Podrobnější výhrady uvádím dále v hodnocení. Z mého pohledu lze proto konstatovat, že bod týkající se energetické kalibrace nebyl splněn, i když student evidentně provedl určité měření a vyhodnocení.

Poslední bod zadání, zaměřený na měření a/nebo simulace vícevrstvých detekčních systémů, nebyl v práci realizován vůbec. Student pouze uvedl simulaci odezvy detektoru na svazek fotonů s energií v oblasti rentgenového záření, což lze chápat spíše jako přípravu k samotné kalibraci.

Protože nelze s jistotou potvrdit splnění prvních dvou bodů zadání a zároveň není zřejmé, proč nebyly splněny zbývající dva body, ponechávám konečné posouzení míry splnění zadání na komisi.

Zvolený postup řešení

částečně vhodný

Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.

Protože popis měření je značně nejasný, mohu se vyjádřit pouze k postupu zpracování rešeršní části práce. Student zvolil správný a logický postup, samotnou realizaci však považuji za problematickou.

Rešeršní část je spíše stručným připomenutím základních poznatků o kosmickém záření a polovodičových detektorech. Většina informací je převzata ze základní literatury. To samo o sobě není chyba, ale je to zbytečné: zadání sice vyžadovalo, aby se student s těmito poznatky seznámil, nicméně jejich přepis do vlastní eseje bez další přidané hodnoty je sporný. Přínos by měl smysl pouze tehdy, pokud by tyto poznatky byly v dalších částech práce využity – což se ve většině případů nestalo, byť experimentální část tomu dává mnoho příležitostí.

Za jedinou skutečnou rešerši lze považovat kapitolu 1.3 na str. 19, kde student shrnul kosmické mise, v nichž byly použity polovodičové detektory. Tato část je zajímavá, avšak příliš stručná a informačně strohá. Převážně vychází z článků jediné výzkumné skupiny. Širší záběr by práci výrazně obohatil – například zahrnutím výsledků jiných týmů, podrobnějším popisem jednotlivých generací detektorů SpacePix, rozborem jejich úspěchů i problémů a

zejména vysvětlením motivací pro vývoj nejnovější generace SpacePix3. Taková rešerše by byla opravdu přínosná.

Vzhledem k tomu, že rešeršní část, kterou jedinou mohu hodnotit, stojí převážně na učebnicových poznacích a jen v malé míře na odborných článcích, hodnotím zvolený přístup jako pouze částečně vhodný.

Odborná úroveň

D - uspokojivě

Posudte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.

Ačkoli je rešeršní část bakalářské práce složena z poznatků převzatých ze základní literatury, kde bych očekával bezchybnost, objevují se v ní terminologické nepřesnosti, nesrozumitelné pasáže a také občasné překlepy. Tyto nedostatky by bylo možné snadno odstranit, pokud by vedoucí práce měl možnost včas nahlédnout do finální verze textu. To je také motivací k mé první otázce uvedené na konci tohoto hodnocení. Naštěstí se jedná spíše o ojedinělé vady, z nichž několik ilustruji na následujících příkladech.

Na str. 18, 2. odstavec odspoda:

„The radiation can be divided into particle radiation and electromagnetic radiation, where particle radiation is simple emission of particles, which are either charged (e.g. α particles, protons), or neutral (neutrons, π^0 ...). The electromagnetic interaction is a beam of fotons [17].“

I elektromagnetické záření lze samozřejmě chápat jako tok částic (fotonů), což práce správně využívá. Za podstatně vážnější nepřesnost však považuji tvrzení, že elektromagnetická interakce je svazek fotonů. Tento omyl je motivací k mé druhé otázce. Ukázka navíc obsahuje i překlep – slovo photon není v angličtině psáno s písmenem „f“.

Na str. 30, 2. odstavec odspoda:

„These effect leads to positively charged region in the n-type close to the junction and negatively charged region in the p-type close to the Junction. The accumulated space charge creates a new electric field that flows in opposite direction than the electric field which rises from the charge inequalities in n- and p-type further from the Junction. The region with interrupted electric field is called depletion region [23]. The electric field being generated by the Junction ensures that no more charge carriers will diffuse from one side to the other within the junction. Overall, the electric field generated by Junction prevents the diffusion processes and stablishes the stable zone [17].“

Tento odstavec je příkladem textové vady, která pravděpodobně vznikla při snaze přeformulovat pasáže odborných knih vlastními slovy. Výsledkem je nesrozumitelný text s problematickými částmi (v příkladu vyznačenými žlutě). Pokusil jsem se vyhledat v citovaných zdrojích [17] a [23] pasáže, které by k takovému formulování mohly vést, avšak žádné odpovídající jsem nenalezl. Tento příklad mě proto motivoval k položení třetí otázky.

Experimentální část bakalářské práce se skládá ze dvou částí. První je věnována MC simulacím, jejichž cílem byla simulace kalibrace detektoru. Byla vytvořena rentgen-fluorescenční spektra několika prvků, určeny polohy piků plné absorpce odpovídající charakteristickému záření zvolených prvků a z takto získaných bodů byla prokladem určena kalibrační křivka. Pro převod mezi nábojem a výstupními hodnotami digitální části elektroniky detektoru (nezbytný, protože Geant4 poskytuje pouze převod mezi absorbovanou energií a velikostí náboje vzniklého ionizací) student správně vycházel z dokumentace detektoru SpacePix3. Tento postup je adekvátní a simulovaná spektra mají očekávaný tvar. Přesto se i zde vyskytují nejasnosti a chyby ve zpracování dat. Nejzávažnějším

problémem je, že z popisu není zřejmé, proč a jakým způsobem student postupoval. Pokud by někdo chtěl simulaci zopakovat, musel by jeho postupy pouze odhadovat, a ani tak není jisté, že by dosáhl stejných výsledků.

Příklady nedostatků:

- V prvních třech odstavcích podkapitoly Detector (od str. 44) jsou uvedeny parametry simulace detektoru (geometrie a nastavení senzoru). Překvapivé je, že při napětí 150 V byla nastavena velikost vyprázdněné oblasti pouze na 50 μm , údajně s ohledem na technologické možnosti – bez jakékoli diskuse, co k této volbě vedlo. Tato nejasnost motivuje mou čtvrtou otázku.
- Není zřejmé, proč student nejprve prokládal data z dokumentace lineární závislosti a následně zavádí tzv. relativní ADC, které prokládá polynomem vyššího stupně. Čtenář se zde nijak nedozví, jaký je praktický smysl tohoto postupu a jak s výsledky dále pracovat.
- Postup nalezení kalibrační křivky z dat uvedených na obr. 4.10 (str. 52) je nevhodný. Chyby experimentálních bodů jsou zjevně nadhodnocené, protože student je odvozoval z FWHM píků plné absorpce, nikoli z chyb jejich poloh. Šířka píku přitom nezávisí na počtu detekovaných událostí, zatímco neurčitost určení polohy ano. Nemohu proto souhlasit s tvrzením uvedeným ve druhém odstavci kapitoly 4.2.2 (str. 51), nemohu ani souhlasit s jeho motivací.

Druhá část experimentální části bakalářské práce je zaměřena na vlastní měření s detektorem SpacePix3. Již na první pohled je patrné, že detektor nepracoval zcela dle očekávání. Na obr. 2.8 (str. 39), kde je znázorněno schéma detektoru SpacePix3, je vidět nábojově citlivý zesilovač následovaný detektorem vrcholu. Jedná se o klasický spektrometrický řetězec, u něhož lze předpokládat, že bude z každého pixelu zpracovávat událost po události. V experimentu byl však použit spíše jakýsi integrální režim s komplikovanějším zpracováním surových dat.

Výsledkem jsou spektra uvedená na obr. 4.12 a 4.13 (str. 55). Ta vykazují periodickou strukturu s periodou 8, což odpovídá mocnině dvou. Navíc jsou nevhodně vykreslena v lineární škále – použití semilogaritmického zobrazení by umožnilo odhalit i části spektra s nízkým počtem událostí. Na základě toho lze usoudit, že se platné spektrum pravděpodobně nepodařilo získat. Student se sice pokusil poměrně komplikovaným způsobem z dat vyextrahovat smysluplné výsledky, nicméně podle mého názoru to v daném případě není možné.

Hodnocení se proto neopírá o samotné experimentální výsledky, ale především o způsob, jakým student o experimentu referuje. Tento popis považuji za nedostatečný a důrazně doporučuji, aby se student v rámci obhajoby zaměřil především na prezentaci simulací a experimentů – alespoň na úrovni, která se běžně vyžaduje v rámci laboratorních měření.

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

C - dobře

Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.

Bakalářská práce po formální stránce obsahuje vše, co obsahovat má, je přehledná a lze vytknout jen pár drobností. Na titulní stránce člověka překvapí různé zarovnání nadpisů. Student v textu používá často příliš mnoho cifer u vyjádření chyb měření (např. na poslední řádce na str. 51: místo údaje $-0,56475(1736)$ by bylo vhodnější $-0,56(2)$).

Práce je napsaná v anglickém jazyce, který lze dobře číst, byť obsahuje drobné chyby. Pro posouzení kvality angličtiny jsem použil chatGPT na kapitolu Conclusion (str. 62) s tímto výsledkem:

Celkový dojem

Text je srozumitelný a gramaticky převážně správný. Není tam zásadní chyba, která by bránila pochopení. Je vidět, že autor má dobrou úroveň technické angličtiny (řekněme B2/C1 podle CEFR). Obsah je odborný, ale styl není vždy úplně přirozený a plynulý. Čtenář pozná, že autorem není rodilý mluvčí.

Silné stránky

Gramatika: Většina vět je správně postavená, nejsou tam hrubé chyby.

Odborná slovní zásoba: Používání pojmů jako characterisation, band structure, calibration curve, relative terms je správné.

Srozumitelnost: Navzdory stylistickým nedostatkům lze text bez problémů číst.

Slabší stránky

Nepřirozený slovosled a těžkopádné formulace

„In Chapter 3 are simulations described only theoretically.“ → přirozenější by bylo: Chapter 3 provides only a theoretical description of the simulations.

„This topic is examined beginning with band structure of solids...“ → lépe: The discussion begins with the band structure of solids...

Malé chyby ve slovní zásobě a kolokacích

„properties of electron-hole pair“ → správně properties of electron-hole pairs.

„application of semiconductors as detection volume“ → lépe use of semiconductors as a detection medium.

„Earth’s magnetospheretogogether“ → chybí mezera → magnetosphere together.

Český vliv na angličtinu

„The possible work to do in future“ → přirozenější Possible future work includes...

„the formula is;“ → správně the formula is: (má být dvojtečka místo středníku)

Styl a soudržnost

Věty jsou někdy příliš doslovně přeložené a málo hladké. Rodilý mluvčí by používal plynulejší spojky (Moreover, Furthermore, In addition) a méně těžkopádný rytmus. Opakování slov (analysis of simulation together with data analysis of real measurement). To by šlo zestručnit: analysis of both simulated and real measurement data.

Výběr zdrojů, korektnost citací

D - uspokojivě

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Práce obsahuje celkem 35 citací, z nichž pouze 7 odkazuje na vědecké odborné články a 11 na knihy. Zbývající zdroje tvoří převážně on-line materiály (např. Wikipedie, datasheety či uživatelské manuály). Citace však nejsou zpracovány v souladu s normou ČSN ISO 690. Mezi nejčastější nedostatky patří chybějící označení [online], nesprávné pořadí jednotlivých prvků a míchání citačních stylů (APA/Chicago s českou normou).

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Nejohodnotnější částí práce je kapitola věnovaná MC simulacím, která ukazuje, že student má v této oblasti velmi dobré předpoklady. Na druhou stranu je patrné, že zpracování výsledků a jejich prezentace v souvislé textové podobě studentovi působí obtíže. Do budoucna bych proto doporučil, aby se více zaměřil na rozvíjení svých silných stránek právě v oblasti simulací, ideálně v rámci spolupráce v týmu, kde může své schopnosti plně využít. Zároveň je však třeba počítat s tím, že v jeho oboru se experimentální činnosti zcela vyhnout nelze, a proto bude vhodné se v této oblasti dále postupně zlepšovat.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Bakalářská práce je podle mého názoru především o schopnosti nastudovat odborný problém a smysluplně o něm referovat ve formě uceleného textu. Základem kvalitní práce bývá rešerše relevantních odborných článků k danému tématu, která zde bohužel chybí a která nejvýrazněji ovlivnila mé hodnocení. Experimentální část může být vhodným doplněním bakalářské práce a příležitostí ukázat vlastní aktivitu studenta, není však nezbytně nutnou podmínkou.

S ohledem na absenci ucelené rešerše a množství textových nedostatků nelze práci hodnotit nejvyšší známkou (A–B). Zároveň je však zřejmé, že se student seznámil jak s problematikou kosmického záření, tak s detektorovou technologií (včetně MC simulací), a proto by hodnocení stupněm F bylo nepřiměřeně přísné, byť ani toto nelze vyloučit s ohledem na nekvalitní popis činností v experimentální části bakalářské práce. Jako spravedlivé se zatím jeví hodnocení v rozmezí C–D–E; v rámci mého posudku volím střední variantu. Výsledná známka však bude záležet hlavně na tom, jak se student připraví na obhajobu a jak se mu podaří vysvětlit a rozptýlit nejasnosti uvedené v tomto hodnocení. V tom mu mohou pomoci i následující otázky.

1. Vedoucí práce je v jistém smyslu prvním oponentem studenta – podobně jako recenzenti odborných článků, kteří posuzují jejich kvalitu před publikací. Článek je sice samostatným dílem autorů, ale připomínky recenzentů výrazně ovlivňují jeho výslednou podobu. V práci se vyskytuje řada zbytečných chyb, které by šlo odstranit již jen tím, že by si text vedoucí důkladně přečetl. Proto se ptám: Kdy vedoucí práce poprvé viděl finální, případně téměř finální verzi bakalářské práce, aby k ní mohl poskytnout zpětnou vazbu?
2. V práci uvádíte tvrzení, že elektromagnetická interakce je svazek fotonů. Můžete prosím citovat konkrétní pasáž z publikace [17], která Vás k tomuto tvrzení vedla?
3. Vysvětlete Vaše pojmy z druhého odstavce odspoda na str. 30: „... a new electric field that flows ...“, „The region with interrupted electric field is called depletion region [23].“. Dále uveďte pasáž z publikace [17], která Vás vedla na větu: „Overall, the electric field generated by Junction prevents the diffusion processes and establishes the stable zone [17].“.
4. Vysvětlete důvody volby tak malé vyprázdněné oblasti při dost velkém závěrném napětí.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **D - uspokojivě**.

Datum: 20.8.2025

Podpis:

