

Oponentní posudek disertační práce Ing. Václava Olšanského: “Zpracování obrazů z pixelových detektorů při radiografii nabitými částicemi”.

Předložená disertační práce je věnována problematice, která je ze dvou hledisek aktuální. Jednak je to sama radiografie nabitými částicemi, v daném případě se jedná konkrétně o protony, jednak co možná informačně nejobsažnější zpracování signálu z pixelových detektorů Timepix a Timepix3, které jsou použity jako detekční čidla při radiografických experimentech. I když se první práce o protonové radiografii objevují již koncem šedesátých let minulého století, jde stále o rozvíjející se a jen sporadicky využívanou metodu. Hybridní polovodičové pixelové detektory nacházejí sice patrně nejširší uplatnění pro detekci fotonových svazků, ale jsou univerzální v tom smyslu, že jsou schopné registrovat i další druhy záření včetně protonů a dalších těžkých nabitých částic a představují moderní systém pro 2D zobrazení polí ionizujícího záření. Jejich využití v radiografii využívající protony má rovněž inovativní charakter.

Práce je členěná logickým způsobem, v úvodních kapitolách je shrnut stav oboru, tj. základní mechanismy interakce různých druhů ionizujícího záření, principy detekce ionizujícího záření a přehled možností radiografie se zvláštním akcentem na radiografii využívající těžké nabitě částice. Cíle práce jsou stanoveny přehledně a jsou z nich zřejmé inovativní prvky práce. V dalších kapitolách jsou popsána experimentální zařízení a shrnuty výsledky experimentů. Je možné ocenit, že problematika protonové radiografie byla experimentálně studována na třech různých pracovištích, čímž byly zajištěny tři řádově odlišné rozsahy energií protonů. Nejvyšší energie byly získávány v protonovém svazku synchrotronu německého centra HIT (Heidelberg Ion-Beam Therapy Centre), kde bylo ozařování realizováno v monoenergetickém svazku s energií 221 MeV. Další experimenty při energiích 13, 22 a 31 MeV byly uskutečněny na izochronním cyklotronu U-120M Ústavu jaderné fyziky AV ČR a konečně svazek urychlovače Tandetron 4130 MC Ústavu jaderné fyziky AV ČR poskytoval nejnižší využívanou energii protonů 2,9 MeV. Výsledky jednotlivých experimentů jsou v práci podrobně zdokumentovány. Za nejcennější část práce z hlediska osobního přínosu doktoranda lze bezpochyby považovat kapitolu 8, v níž jsou uvedeny nově vytvořené programové systémy pro hromadné zpracování dat z protonové radiografie, které byly použity při vyhodnocování výsledků experimentů. Následuje zhodnocení a závěr práce a 4 přílohy. V příloze A je podán podrobný přehled výsledných radiogramů vytvořených na základě dat naměřených při experimentu na Tandetronu 4130 MC, v příloze B ukázka zdrojového kódu jednoho programového systému, přílohou C je obecný přehled radioaktivního záření a jeho zdrojů a přílohou D přehled detektorů ionizujícího záření.

Po formální stránce sice práce působí úhledným dojmem, ale mohla jí být věnována větší pozornost. Lze v ní nalézt řadu překlepů, chybějících písmen ve slovech nebo neobratných vyjádření (např. „dopadených fotonů“ místo „dopadlých fotonů“, „radioaktivní ztráty“ místo „radiační ztráty“). Vhodným přesunem obrázků bylo možné zabránit častému výskytu prázdných částí stránek i tomu, že popis k obrázku nebo jeho část je až na následující stránce (obr. 14, obr. 67). Rovněž některé obrázky jsou špatně čitelné, konkrétně obr. 4 a několik dalších kvůli malé velikosti písma u popisu os, na obr 74 – 87 je proměřená plocha znázorněna v tak malém měřítku, že jsou

téměř nečitelné. Poněkud čitelnější jsou analogické obrázky v příloze A. Na druhé straně lze ocenit, že je práce vybavena podrobným seznamem použitých symbolů a zkratk, což významně usnadňuje její studium, a seznamem obrázků a tabulek. V seznamu použité literatury je pak autor natolik důkladný, že cituje i zakladatelské práce z konce 19. století (W.C. Röntgen, H.A. Lorentz).

Práce je v podstatě mezioborová a zasahuje jednak do jaderné a radiační fyziky, jednak do oblasti zpracování experimentálních výsledků a zpracování obrazu. Je zřejmé, že její autor je podstatně více „doma“ ve druhé z obou oblastí, tomu ostatně odpovídá i obor studia, ve kterém práci obhájí. O tom také svědčí značné množství drobných připomínek k jednotlivým místům v textu, uvedených dále.

Připomínky a dotazy k jednotlivým místům v textu:

Str. 18: Je diskutabilní, zda miony lze považovat za těžké částice. Z hlediska vlastností mají blíže k elektronům než k protonům.

Str. 19: Je rozšířeným omylem, že záření X má menší energii než záření gama. Liší se způsobem vzniku. Stejná připomínka platí i ke str. 37.

Str. 21: Závěr kapitoly „Základní principy protonové radiografie a její historie“ se věnuje (bez citace pramene) elektronům. Buď jde o omyl, nebo by poslední odstavec kap. 2.1.1. vyžadoval podrobnější komentář.

Str. 24 nahoře: Z formulace textu by vyplývalo, že k aktivaci dochází při interakci sekundárních elektronů nebo fotonů. Za jaderné reakce vedoucí k aktivaci však odpovídají především protony a sekundární neutrony.

Kap. 3.1.1.: V přehledu interakce protonů a dalších těžkých nabitých částic s látkou by bylo vhodné pro úplnost uvést též Rutherfordův rozptyl, případně při energiích převyšujících Coulombovskou potenciálovou bariéru jádra i jaderné interakce (jaderný rozptyl, jaderné reakce).

Str. 25: Střední excitační potenciál I je definován i v relativistické oblasti energií procházejících částic.

Str. 26: V souvislosti s brzdným zářením by měl být odkaz na obr. 2, nikoli na obr. 1.

Kap. 3.1.2. a kap. 3.2.1.: Z hlediska tematiky práce má interakce elektronů a fotonů minoritní význam. Buď měla být pro úplnost zahrnuta i interakce neutronů nebo mohly být tyto dvě kapitoly vynechány.

Str. 28: Náboj vytvořený v aktivním objemu detektoru odpovídá energii v objemu deponované, což nemusí být celá energie částice, která do objemu vstoupila.

Str. 35: Popis Houghovy transformace je poněkud zjednodušený. V původní „klasické“ podobě sloužila k detekci přímků v obraze a teprve následně byla zobecněna na další tvary, jako jsou kružnice nebo elipsy.

Str. 37: První odstavec kap. 7 opakuje zbytečně totéž, co již bylo řečeno v úvodním textu.

Str. 40: Vzhledem k charakteru interakce těžkých nabitých částic by bylo možné zanedbat rozptyl i při tlustších vzorcích (možná za cenu mírného zvýšení pozadí).

Str. 40: Jestliže je uvažován pokles energie protonu ve vrstvě, která není infinitezimální, bylo by místo označení deponované energie dE/dx korektnější použít $\Delta E/\Delta x$ (v daném případě nejde o derivaci energie podle dráhy).

Str. 42: Tvrzení o subpixelovém rozlišení by bylo vhodné podepřít rozborem statistické neurčitosti probíhajících procesů energetických ztrát a vzniku nosičů náboje, která má na rozlišení patrně vliv.

Obr. 8, 10 a 12: Vizuálně jsou rozdíly mezi rekonstruovanými obrázky při různém rozlišení v měřítku, ve kterém jsou uvedeny v práci, natolik malé, že zanikají. Byl by vhodný podrobnější komentář.

Str. 49: „Maximální energie urychlených iontů vyvedených z urychlovače dosahuje 120 MeV. Maximální energie protonů urychlených cyklotronem U120M je 37 MeV.“ Toto tvrzení vyžaduje upřesnění týkající se náboje urychlovaných iontů, jinak obsahuje rozpor.

Str. 61: U údajů o rozsahu energií iontů z Tandetronu by bylo vhodné poznamenat, že pro protony (které byly použity v experimentech) je rozsah energií jen 0,4 – 6 MeV.

Tab.2, řádek G2: Je uvedeno, že pootočení bylo o nedefinovaný úhel. V zájmu serióznosti bylo vhodné učinit alespoň přibližný odhad velikosti úhlu.

Popis k obr. 64: Odkaz na obr. 15 a 16 je chybný.

Str. 90, poslední odstavec kap. 7.3.5: Při experimentech s reálnými (tj. nikoli dobře známými modelovými) vzorky zpravidla nelze vhodně volit maximální tloušťku zkoumaného materiálu, je třeba volit energii protonů.

Str. C1: Střední energie tepelných elektronů při pokojové teplotě je 0,025 eV, v rozmezí energií 10 eV – 20 MeV nejde o pomalé neutrony. K rozdílu mezi zářením X a gama již byla učiněna poznámka ke str. 19.

Str. C1: Jednotkou aktivity je 1 Becquerel, nikoli Bequerel.

Příloha C1: Místy je zaměňován počet radionuklidů a počet jader daného konkrétního radionuklidu.

Str. D1: U scintilátorů ovšem nejsou na krajích aktivního objemu elektrody, na které je přivedeno vysoké napětí. V textu popis poněkud splývá s popisem plynových a polovodičových detektorů (z dalšího textu vyplývá, že jde spíše o neobratnou formulaci a autor práce pak princip scintilátorů uvádí správně).

Str. D1: Jednotkou dávky je 1 Gray, nikoli Grey.

Str. D2: Napětí na elektrodách ionizačních komor může mít podle typu komory široké rozmezí, nebývá jednotně nastaveno na 250 V.

Str. D2: Proporcionální detektory mohou detekovat v závislosti na jejich konstrukci i vnější záření, nejen záření z radionuklidů umístěných dovnitř jejich aktivního objemu.

Přes poměrně značné množství připomínek považuji práci za hodnotnou a přínosnou pro danou oblast. Většina těchto připomínek se týká jaderně fyzikální stránky práce a nedomnívám se, že by měly být při obhajobě podrobně diskutovány. Je skutečností, že některé části úvodních kapitol a zejména přílohy C a D zřejmě sloužily autorovi k ujasnění si problematiky jaderné a radiační fyziky, která mu není vlastní. Jsou zjednodušující a v práci zbytečné, protože skutečnosti v nich uvedené lze nalézt v základních učebnicích atomové a jaderné fyziky. Rozsáhlé experimentální práce a jejich vyhodnocení představují pro doktorskou práci nadstandardní množství aktivit. Za nejcennější část práce považuji zpracování výsledků experimentů programovými systémy popsány v kap. 8. Je trochu škoda, že je v přílohách k práci uveden zdrojový kód jen jednoho z těchto systémů (příloha B).

V diskusi bych uvítal, kdyby doktorand odpověděl na následující otázky:

1. Detektory Timepix jsou poměrně nákladné a přitom mají relativně malou účinnou plochu. Domníváte se, že je reálné uvažovat pro aplikace v radiografii větší panely sestavené z těchto detektorů?
2. Jakou vidíte perspektivu protonové radiografie, její výhody a možné oblasti aplikací v porovnání s jinými radiografickými metodami?
3. Předpokládáte, že budete v těchto pracích pokračovat, a pokud ano, v jakém směru?

Z výše uvedeného vyplývá, že přes řadu možných připomínek autor práce v celém rozsahu vyhověl požadavkům kladeným na doktorskou disertační práci, jak jsou stanoveny zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a článkem 28, bod 1 Studijního a zkušebního řádu pro studenty Českého vysokého učení technického v Praze, tj. prokázal schopnost samostatně tvůrčím způsobem pracovat a jeho práce obsahuje původní výsledky vědecké práce. Seznam uveřejněných výsledků je součástí práce. Doporučuji proto disertační práci pana Ing. Václava Olšanského k obhajobě.

V Praze 23.7.2022

Prof. Ing. Ladislav Musílek, CSc.
FJFI ČVUT v Praze