



UNIVERSITY  
OF WARSAW

Heavy Ion Laboratory



Prof. dr hab. Krzysztof Rusek

Warszawa, 24.08.2022

**Recenzja pracy doktorskiej pana mgr Kacpra Łasochoy zatytułowanej „Non-invasive beam diagnostics with the Schottky signals and Cherenkov Diffraction Radiation”**

Podstawowym celem pracy jest rozwój dwóch metod wyznaczania parametrów akceleratorów i przyspieszanych przez nie wiązek naładowanych cząstek. Jedną z tych metod jest analiza sygnałów Schottky'iego, drugą zaś metoda Dyfrakcyjnego Promieniowania Czerenkowa. Obie metody są bezinwazyjne, nie wymagają bezpośredniego kontaktu z wiązką przyspieszanych cząstek. Metoda Schottky'iego jest stosowana od lat w wielu laboratoriach, w laboratorium CERN układ oparty o tę metodę służy od 2011 roku do określania parametrów Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC) i wiązek przyspieszanych w nim jonów, i jest ciągle unowocześniany. Autor podjął się więc ważnego zadania, bowiem jego wyniki mogą posłużyć do dalszego rozwoju systemu diagnostycznego LHC. W przypadku drugiej metody, prace prowadzone przez Autora związane są z perspektywą jej zastosowania, m.in. w CERN. Z tego powodu wyniki przedstawione w drugiej części pracy wydają mi się bardziej interesujące i mające większe znaczenie naukowe.

Praca ma charakter doświadczalny, ale z elementami teoretycznymi i ma duży potencjał aplikacyjny. Napisana jest w języku angielskim (ma przecież służyć międzynarodowemu środowisku użytkowników CERN), jest bardzo starannie zredagowana, z wieloma ilustracjami. Jak każdy tekst zawiera drobne błędy, np. w spisie publikacji praca nr 2 figuruje także jako praca nr 4, lub też odległość detektora od wiązki elektronów na rys. 3.39 oznaczona jako  $h$ , już na następnym rysunku figuruje jako  $x$ . Tego typu błędów jest jednak bardzo mało i nie stanowią problemu.

Rozdział pierwszy poświęcony jest omówieniu historii i rodzajów akceleratorów cząstek naładowanych, charakterystyce przyspieszanych wiązek tych cząstek, ich diagnostyce a także krótkiemu przedstawieniu zakresu pracy. Całość jest bardzo dobrym wykładem, rozpoczynającym się w połowie dziewiętnastego wieku i prowadzącym do czasów współczesnych, zawierającym podstawowe informacje o akceleratorach cząstek, potrzebne definicje ich parametrów i przyspieszanych przez nie wiązek, używanych następnie w pracy, a także stosowane metody diagnostyczne. Ten rozdział bardzo ułatwia zapoznanie się z badaniami przedstawionymi przez autora w dalszej części pracy. **Pytanie, które nasunęło mi się w czasie czytania dotyczy wielkości „horizontal emittance” (tabela 1.3na str 7), której definicji nie znalazłem.**

Rozdział drugi dotyczy metody polegającej na analizie sygnałów Schottky'iego. Jej rozwój związany jest z pierścieniami akumulacyjnymi, powstającymi od lat siedemdziesiątych, w których wiązki cząstek naładowanych muszą być „schłodzone” (poprzeczne składowe pędu muszą być maksymalnie zredukowane), by mogły długo krążyć w tych pierścieniach. Obecnie metoda ta jest dosyć powszechnie stosowana w wielu laboratoriach do wyznaczania parametrów akceleratorów i wiązek jonów. Autor w przystępny sposób przedstawia szczegóły analizy widm Schottky'iego (podłużnych i poprzecznych). Dużą uwagę poświęca widmom poprzecznym, otrzymywanym z pomiarów intensywności wiązki oraz jej momentu dipolowego, bowiem one dostarczają informacji o stopniu „schłodzenia” wiązek oraz o parametrach układu przyspieszającego takich jak „betatron tunes” – liczbie oscylacji poprzecznych wywołanych zewnętrznymi polami magnetycznymi przypadającymi na jeden obrót czy też o chromatyczności układu. Autor porządkuje wiedzę na ten temat, zwykle przedstawianą częściowo, w formie artykułów naukowych. Przeprowadza formalne wyprowadzenie wzoru łączącego chromatyczność układu z mierzalnymi szerokościami widm poprzecznych Schottky'iego dla wiązki impulsowanej.

Następnie przedstawia technikę analizy mierzonych widm Schottky'iego opartą na dopasowywaniu ich kształtu, a także autorską metodę wyznaczania „betatron tunes” nazwaną „Mirrored Difference”. Opracowany przez Doktoranta projekt poddany został weryfikacji poprzez analizę danych zebranych w czasie eksperymentu przeprowadzonego w CERN w roku 2018, z wiązką Pb. W pierwszym kroku analizie poddane zostało widmo podłużne, pokazujące rozkład częstotliwościowy przyspieszanej w synchrotronie wiązki. Procedurze fitowania poddano fragment widma pochodzący od niekoherentnych wkładów przyspieszanych cząstek, uzyskując dobre jego odwzorowanie. **Przyznam, że zabrakło mi przedstawienia schematu układu pomiarowego stosowanego w LHC do rejestracji widm Schottky'iego. Bardzo wzbogaciły by on krótki opis przedstawiony na stronie 36.**

W następnym kroku Doktorant przystąpił do analizy widm poprzecznych Schottky'iego wykorzystując ich fitowanie i stosując cztery scenariusze. Uzyskane wartości chromatyczności porównał z danymi eksperymentalnymi (uzyskanymi w czasie eksperymentu ze standardowej, inwazyjnej metody „RF modulation”). Wyniki analizy różnią się od eksperymentalnych, czasami znacznie. **Szczególnie dziwi mnie wynik uzyskany ze scenariuszem 1-V, dający chromatyczność dwukrotnie wyższą od eksperymentalnej, Figure 2.24 (chętnie usłyszę wyjaśnienie od autora w tej sprawie).** Autor wspomina, że pomiary metodą RF obarczone są błędem, jednak określa ten błąd bardzo ogólnie i trudno wywnioskować, czy wyniki analizy mieszczą się w jego ramach. Nie podaje też oszacowania błędu samej procedury fitowania. Można się jednak zgodzić ze stwierdzeniem, że ” the non-invasive methods presented here are show to provide

**chromaticity estimantes that are at least comparable to the ones obtained from the RF modulation technique” (str 50), natomiast stwierdzenie „Schottky fitting methods ... were proved to give ....accurate results” ze str 52 jest jednak trochę na wyrost.**

Drugą z metod nieinwazyjnej detekcji i monitorowania wiązki naładowanych cząstek badanych w pracy doktorskiej jest metoda Dyfrakcyjnego Promieniowania Czerenkowa (ChDR). Mimo dużego potencjału, nie była ona dotąd użyta do takich celów, choć budzi duże zainteresowanie w kilku światowych laboratoriach, z CERNem włącznie. W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia teorię ChDR a także wyniki prac eksperymentalnych przeprowadzonych w CERN w celu zbadania możliwości wykorzystania tego promieniowania do monitorowania wiązek jonów mi. in. w LHC.

ChDR jest promieniowaniem o charakterze zbliżonym do promieniowania Czerenkowa, obserwowanym w ośrodku dielektrycznym (zwanym radiator), w pobliżu którego porusza się cząstka naładowana z prędkością większą od prędkości światła w tym ośrodku. Wydaje się więc, upraszczając niesłychanie, że w jonowodzie zbudowanym z materiału dielektrycznego można oczekiwać rejestracji ChDR. Sprawa jednak nie jest tak prosta. Istnieją modele teoretyczne pozwalające przewidzieć własności promieniowania ChDR w zależności od pewnych parametrów i Autor robi ich krótki przegląd na początku rozdziału trzeciego. Istotne parametry to przenikalność dielektryczna radiatora, prędkość naładowanej cząstki oraz odległość jej toru od powierzchni radiatora, a także kształt radiatora i jego budowa (skład). Dostępne modele pozwalają przewidzieć zależności między tymi parametrami a energią emitowanego promieniowania i jego częstotliwością. W szczególności, intensywność ChDR wzrasta wraz ze wzrostem prędkości cząstek, stąd akcelerator LHC przyspieszający protony do bardzo wysokich energii może być tym urządzeniem, w którym system diagnostyczny oparty na rejestracji ChDR ma szansę zadziałać. Wykorzystując istniejące modele, Autor przeprowadza obliczenia w oparciu parametry LHC, projektuje eksperyment, a następnie buduje układ doświadczalny i sprawdza eksperymentalnie wyniki obliczeń modelowych.

Eksperyment zaprojektowany został przez Autora i przeprowadzony w dwóch etapach w roku 2021, wykorzystując wiązkę elektronów przyspieszonych w liniowym akceleratorze CLEAR w CERN. Jego celem było zbadanie zależności intensywności promieniowania ChDR od odległości wiązki elektronów od powierzchni radiatora układu detekcyjnego, zbudowanego przez Autora co jeszcze raz podkreślam. Ta bowiem zależność powinna, zgodnie z obliczeniami, najlepiej służyć weryfikacji istniejących modeli teoretycznych. Uzyskane wyniki pokazały, że intensywność spada eksponentalnie z odległością od radiatora, nie potwierdzając żadnego z wyników przewidywań modelowych. To bardzo interesujący rezultat, otwierający pole dla teoretyków modelujących promieniowanie ChDR. **Patrząc na dane doświadczalne zebrane w drugim z eksperymentalnych runów, interesujący jest rozrzut punktów**

**eksperymentalnych zebranych dla danej odległości. Z czego on wynika? Dlaczego rozrzut ten maleje wraz z odległością radiatora odwiązki? Na te pytania chciałbym uzyskać odpowiedź.**

Podsumowując, praca doktorska pana mgr Kacpra Łasochy jest bardzo obszerną monografią, w której Autor wykazał się wiedzą dotyczącą modeli teoretycznych i metod obliczeniowych, a także samodzielnością w prowadzeniu badań naukowych, szczególnie w jej drugiej części gdzie zaprojektował i zrealizował badania doświadczalne samodzielnie konstruując układ detekcyjny. Przyniosły one bardzo interesujące wyniki, trudne do interpretacji na podstawie istniejących modeli teoretycznych, stymulujących więc ich rozwój. Badania te przysłużą się wprowadzeniu metody Radiacyjnego Promieniowania Czerenkowa do monitorowania wiązek naładowanych cząstek w światowych laboratoriach. Uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania stawiane w ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku i wnioskuję o dopuszczenie pana mgr Kacpra Łasochy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.



Krzysztof Rusek