



Kraków, 30 kwietnia 2026

Jak długie i ostre są protonowe „igły” podczas zabiegów radioterapeutycznych?

Wiązki protonów znajdują zastosowania nie tylko w wyrafinowanych eksperymentach fizyki jądrowej. Dziś robią coraz większą karierę w radioterapii, gdzie są trudnym do zastąpienia narzędziem do niszczenia komórek nowotworowych. Ich precyzję lekarze i fizycy mogą zwiększyć dzięki dwóm rozwiązaniom opracowanym w Centrum Cyklotronowym Bronowice IFJ PAN.

W onkologii kluczową rzeczą jest precyzyjne eliminowanie komórek nowotworowych przy jak najmniejszych szkodach dla komórek zdrowych. Dla fizyków z kolei istotna jest dokładna wiedza o warunkach, w jakich realizują swoje doświadczenia. W przypadku wiązek protonów, stosowanych w radioterapii i eksperymentach z fizyki jądrowej, podstawowa jest więc znajomość energii kinetycznej cząstek. W Centrum Cyklotronowym Bronowice (CCB), będącym częścią Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie, powstała nowatorska metoda pomiaru tego parametru, istotnie prostsza, szybsza i potencjalnie dokładniejsza od dotychczas stosowanych.

Głównymi elementami konstrukcyjnymi urządzenia pomiarowego przedstawionego przez fizyków z IFJ PAN są dwie niewielkie płytki scyntylacyjne, wstawiane w bieg wiązki protonów w dobrze znanej odległości od siebie (w eksperymentach w CCB płytki miały rozmiary 9x9 cm, a dzieliła je odległość 3.6 metra). Scyntylatory to materiały, które na przelot cząstki reagują emitując impuls światła. W teorii sprawa jest więc prosta: należy zarejestrować impulsy ze scyntylatora początkowego i końcowego, określić ich przesunięcie w czasie, na tej podstawie wyznaczyć prędkość cząstki, a następnie jej energię kinetyczną. W praktyce pojawiają się jednak problemy.

„Gdy mamy jeden proton, który przelatuje najpierw przez detektor początkowy, a potem przez końcowy, pomiar jest łatwy. My jednak pracujemy z wiązką ciągłą, w każdej chwili składającą się z dużej liczby protonów”, mówi dr Wiktor Parol (IFJ PAN), główny autor nowej metody pomiarowej. „To jak z odcinkowym pomiarem prędkości samochodów na autostradzie. Gdy jedzie jeden samochód, po prostu mierzymy czas potrzebny na przejazd od bramki do bramki – i już. Wyobraźmy sobie jednak wielopasmową autostradę zapchaną samochodami tej samej marki i tego samego koloru, a my musimy zrobić pomiar z daleka, nie widząc tablic rejestracyjnych, kierowców czy jakichkolwiek innych elementów pozwalających odróżnić samochody od siebie. Jak sobie poradzić w takiej sytuacji?”.

W zrozumieniu przedstawianego rozwiązania pomocna jest inna analogia komunikacyjna: kolejowa. Pociągi odjeżdżają według pewnego rozkładu i pokonują trasę z ustaloną prędkością. Co prawda na stacji docelowej mogą się zameldować z różnymi opóźnieniami, jednak można się spodziewać, że w podobnej kolejności, w jakiej wyruszyły w podróż – i z zachowaniem wzorca odstępów czasu między nimi. Krakowscy fizycy rozpoczynają więc rejestrację sekwencji sygnałów na obu detektorach scyntylacyjnych, za pomocą własnych metod matematycznych oczyszczają je z szumów, po czym ograniczają sekwencję z detektora początkowego do odpowiednio dobranego przedziału czasowego i sprawdzają, po jakim czasie podobna sekwencja pojawiła się na detektorze końcowym. Tak znalezione przesunięcie czasowe sekwencji pozwala przy znanej odległości między detektorami na wyliczenie średniej energii kinetycznej wiązki protonów.

„Dla wiązek stosowanych w naszym centrum już dwie milisekundy zbierania danych wystarczają, aby niepewność statystyczna pomiaru średniej energii kinetycznej wiązki spadła poniżej 2.5 promiła”, podkreśla dr Parol.

Z myślą o terapii protonowej testy energii kinetycznej wiązek protonowych standardowo przeprowadza się za pomocą certyfikowanych fantomów wodnych. Procedura wymaga zastąpienia stołu zabiegowego stołem technicznym z fantomem, który trzeba odpowiednio wypozycjonować, by następnie zmierzyć zasięg protonów w wodzie. Cały pomiar zajmuje kilkadziesiąt minut i zwykle może być wykonywany co najwyżej raz dziennie. W rozwiązaniu proponowanym przez IFJ PAN wystarczy w bieg wiązki na chwilę wsunąć scyntylatory (ingerencja w infrastrukturę akceleratora jest więc minimalna) i zebrać kilka sekwencji pomiarowych. Analiza sygnałów zależy od mocy komputera i w przeprowadzonych testach offline zwykle nie trwała dłużej niż kilkanaście-kilkadziesiąt sekund. Wszystko to oznacza, że pomiary energii kinetycznej wiązki protonowej można byłoby realizować praktycznie przed każdym zabiegiem, istotnie podnosząc jego precyzję i bezpieczeństwo.

Bardzo dokładne wyznaczenie średniej energii kinetycznej protonów w wiązkach to niejedyna informacja, jaką można otrzymać dzięki metodzie zaproponowanej przez krakowskich fizyków. Innym ważnym parametrem wiązek akceleratorowych, którego mierzenie sprawiało dotychczas problemy, jest rozmycie energii kinetycznej wiązki. Jest bowiem oczywiste, że skoro wiązka składa się z dużej liczby protonów, muszą między nimi występować drobne różnice w prędkościach ruchu, a zatem i w energii kinetycznej. A ponieważ to od energii kinetycznej zależy interakcja wiązki z materiałem w eksperymentach fizycznych czy głębokość, na jakiej protony deponują swoją energię w ciele pacjenta, wiedza o rozmyciu energii kinetycznej wiązki pozwala ustalić, jak „ostra” jest protonowa „igła”.

„Możliwość określenia rozmycia energii kinetycznej protonów pojawiła się jako naturalna konsekwencja zastosowanego przez nas podejścia. Kluczowe jest tu spostrzeżenie, że skoro w danych z końcowego detektora mamy znaleziony fragment odpowiadający sekwencji impulsów z początkowego detektora, to możemy dokładnie ustalić, który impuls z początkowego detektora odpowiada któremu z końcowego”, wyjaśnia dr Parol.

Dzięki wiedzy o czasach przelotu poszczególnych protonów można wyznaczyć ich indywidualne energie kinetyczne, a to pozwala przeanalizować, jak bardzo energie te różnią się między sobą. W ten sposób operator wiązki zdobywa wiedzę o przestrzennym rozmyciu długości obszaru depozycji energii protonów w badanym materiale bądź w ciele pacjenta.

Ważną zaletą obu przedstawionych metod jest ich skalowalność. Obie powstały w Centrum Cyklotronowym Bronowice, gdzie podczas zabiegów radioterapeutycznych i eksperymentów fizycznych używa się protonów o energiach od 60 do 200 megaelektronowoltów. Nie ma jednak przeszkód, by umiejętnie dobierając detektory i odległości między nimi mierzyć energie kinetyczne i ich rozmycia także w potężniejszych akceleratorach, przyspieszających cząstki do energii rzędu wielkości większych, liczonych w gigaelektronowoltach.

Metody pomiaru średniej energii kinetycznej wiązek hadronowych i jej rozmycia, już opatentowane, powstały przy współfinansowaniu ze strony Narodowego Centrum Nauki.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W kategoryzacji MEIN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

dr **Wiktor Parol**
Zakład Reakcji Jądrowych i Procesów Hadronowych
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628213
email: wiktor.parol@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Sposób wyznaczania energii kinetycznej wiązki hadronowej”
Patent PL 249360
„Sposób wyznaczania rozmycia energii kinetycznej wiązki hadronowej”
Patent PL 249361
W. Parol, P. Kulesa, A. Kozela

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ260430b_fot01s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2026/04/30/IFJ260430b_fot01.jpg
Jedna z dwóch płytek scyntylicyjnych nowego miernika parametrów wiązek hadronowych. (Źródło: IFJ PAN)

IFJ260430b_fot02_PLs.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2026/04/30/IFJ260430b_fot02_PL.jpg
Główna idea nowego pomiaru energii kinetycznej wiązki hadronowej polega na rejestrowaniu sekwencji sygnałów na detektorze początkowym i poszukiwaniu jej odpowiednika w sekwencji z detektora końcowego. (Źródło: IFJ PAN)