



Kraków, 18 lipca 2025

Radioterapia nowotworów: Jak lepiej panować nad wiązką protonową?

Współczesne metody radioterapii zwalczałyby nowotwory efektywniej i bezpieczniej, gdyby leczenie można było planować uwzględniając jakość promieniowania terapeutycznych wiązek protonowych. Osiągnięcie fizyków z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie przybliży nas do tego celu.

W dzisiejszej medycynie zależność jest prosta: jeśli chcemy leczyć nowotwory skuteczniej i dla pacjenta bezpieczniej, zwykle musimy zainwestować w lepszą aparaturę do napromieniania, co w przypadku nowoczesnych wiązek protonowych oznacza wydatki liczone w dziesiątkach lub setkach milionów złotych. Okazuje się jednak, że poprawa wyników leczenia za pomocą już działającego sprzętu jest możliwa do osiągnięcia przy relatywnie niewielkich kosztach – dzięki rozwiązaniu przedstawionemu przez zespół fizyków z Centrum Cyklotronowego Bronowice (CCB) Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie. Innowacja, możliwa do wykorzystania nawet w odniesieniu do aparatury już funkcjonującej, pozwala fizykom medycznym na etapie planowania terapii zweryfikować parametr dotychczas niemierzony w praktyce klinicznej: jakość wiązki protonowej.

„Gdy uwzględniamy jakość wiązki promieniowania, jesteśmy w stanie precyzyjniej określać efekty biologiczne radioterapii i skuteczniej niszczyć komórki nowotworowe, redukując przy tym uszkodzenia zdrowych tkanek. Współczesne oprogramowanie do planowania leczenia z wykorzystaniem radioterapii protonowej pozwala już wziąć ten parametr pod uwagę. W praktyce nikt tego nie robi, a jednym z powodów jest fakt, że dotychczas nie było szybkiej i prostej metody na eksperymentalną weryfikację jakości promieniowania przed leczeniem. My pokazaliśmy, że istnieje praktyczne rozwiązanie tego problemu, tanie i stosunkowo łatwe w realizacji”, mówi dr inż. Jan Gajewski (IFJ PAN).

W walce z komórkami nowotworowymi lekarze stosują obecnie napromieniania głównie fotonami lub – w przypadku niewielkiej części pacjentów – protonami. Kluczowe są tu dwa fakty. Po pierwsze, gdy wiązka wysokoenergetycznych cząstek oddziałuje z elementami komórki, niszczy jej DNA, co prowadzi do śmierci komórki. Po drugie, komórki nowotworowe na ogół są bardziej wrażliwe na promieniowanie niż komórki zdrowe. Krytyczny w tej sytuacji staje się sposób podania wiązki terapeutycznej. Aby uniknąć późniejszych powikłań, takich jak martwice zdrowych tkanek, wiązka powinna oddziaływać przede wszystkim z komórkami w obrębie nowotworu. Nie jest to jednak możliwe, ponieważ aby dotrzeć do guza, promieniowanie zazwyczaj musi przejść przez zdrowe tkanki. Jednocześnie napromienianiu trzeba poddać całą objętość zmiany nowotworowej wraz z otaczającym ją niewielkim marginesem. Praktyka uczy bowiem, że jeśli część komórek rakowych przeżyje zabieg, nawrót choroby często ma postać groźniejszą od pierwotnej.

Wszystkie napromieniania są starannie przygotowywane. Lekarz najpierw określa zasięg zmiany nowotworowej, a następnie za pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania planuje leczenie w kilkutgodniowej serii codziennych zabiegów, precyzyjnie ustalając, z których kierunków nowotwór będzie naświetlany, cząstkami o jakich energiach, jak intensywną wiązką i jak długo. To właśnie dzięki planowaniu można później dostarczyć odpowiednią dawkę promieniowania w objętość

nowotworu przy jednoczesnej redukcji do minimum uszkodzeń zdrowych tkanek. Jednak sam plan nie wystarczy. Aby potwierdzić zgodność działania wiązki terapeutycznej z planem, przed każdym zabiegiem fizyk medyczny musi bezpośrednio na stanowisku zmierzyć rozkłady dawek promieniowania, jakie otrzyma pacjent.

Gdy wiązka terapeutyczna składa się z fotonów, wszystkie one w podobny sposób oddziałują z napotkanymi komórkami ciała pacjenta. Jeśli chodzi o biologiczne skutki tego oddziaływania, fizycy mówią o jakości promieniowania, która dla fotonów będzie taka sama w każdym napromienianym punkcie. Ale hamujące protony zachowują się inaczej: początkowo tracą niewiele energii, jednak im są wolniejsze, tym ich hamowanie staje się gwałtowniejsze. W efekcie wiązka protonowa większość energii deponuje na końcu swojej drogi, na precyzyjnie określonej głębokości wewnątrz ciała pacjenta. Jakość takiej wiązki jest istotnie różna od jakości wiązki fotonów.

Do opisu jakości promieniowania, która wpływa na efekt biologiczny, używa się parametru fizycznego nazywanego liniowym przekazem energii (Linear Energy Transfer, LET). Niesie on informację o tym, ile energii cząstka deponuje na ustalonym odcinku swojej drogi i jak strata ta się zmienia w zależności od energii cząstki. Przygotowanie planów leczenia z uwzględnieniem parametru LET nie stanowi dziś problemu. Niestety, w obecnej praktyce klinicznej brakuje przyrządów i technik pomiarowych pozwalających zweryfikować rozkład liniowego przekazu energii bezpośrednio w pracowni radioterapeutycznej.

W trakcie badań zrealizowanych w ośrodku CCB z użyciem wiązki protonowej z cyklotronu Proteus C-235, naukowcy z IFJ PAN do scharakteryzowania parametru LET użyli dostępnego na rynku detektora Timepix3. Ten niewielki i stosunkowo prosty w obsłudze detektor to rezultat działań kolaboracji Medipix3, sformowanej w 2005 roku w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) z myślą o szerokich zastosowaniach rozwiązań technicznych powstałych pod kątem rejestrowania cząstek w eksperymentach fizyki wielkich energii. Liczne przykłady użycia detektorów Timepix w sposób wręcz modelowy pokazują, jak pozornie oderwane od codziennej rzeczywistości pionierskie badania fizyczne przekładają się na poprawę jakości ludzkiego życia.

„Detektor Timepix3 jest wyposażony w krzemowy czujnik o grubości 300 μm . Jego elektronikę odczytu stanowi matryca o rozdzielczości 256 na 256 pikseli, która pozwala na rejestrację śladów pojedynczych cząstek. Odpowiedź każdego piksela zależy od zarejestrowanej przez niego energii. Informacja ta wraz z parametrami śladu pozwala – z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji – na identyfikację pojedynczego protonu oraz oszacowanie jego parametru LET. Zaproponowana metodologia umożliwia charakterystykę LET w warunkach napromieniania zgodnych z planami terapeutycznymi, co stanowiło dla nas kluczowe wyzwanie”, wyjaśnia doktorantka Paulina Stasica-Dudek (IFJ PAN), pierwsza autorka artykułu opisującego osiągnięcie, opublikowanego na łamach czasopisma „Physics in Medicine & Biology”.

Nim zaproponowana przez krakowskich fizyków metoda pomiaru jakości wiązek protonowych stanie się codzienną praktyką, trzeba będzie pokonać pewną przeszkodę techniczną. Współczesne cyklotrony medyczne wytwarzają bowiem wiązki do zastosowań klinicznych, a więc o dużej intensywności. Tymczasem pomiary realizowane z użyciem detektorów Timepix wymagają wiązek o niskiej intensywności. Wiadomo jednak, że problem ten producenci cyklotronów mogą rozwiązać za pomocą odpowiedniej aktualizacji oprogramowania sterującego konkretnym urządzeniem.

„Po raz pierwszy możemy mówić o gotowej do wprowadzenia do praktyki klinicznej metodzie pomiaru jakości wiązki promieniowania bezpośrednio w pracowniach radioterapeutycznych, niemal tuż przed zabiegiem. Jej rozpowszechnienie to droga do wymiernej poprawy skuteczności i bezpieczeństwa nie tylko współczesnej terapii protonowej, ale też bardziej zaawansowanych metod napromieniania, wykorzystujących wiązki jonów helu, węgla czy tlenu”, podsumowuje prace zespołu dr hab. inż. Antoni Ruciński, prof. IFJ PAN.

Badania nad metodologią pomiaru jakości wiązek promieniowania zrealizowano w ramach grantu LIDER XII przyznanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

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 inż. Jan Gajewski
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 3996136
email: jan.gajewski@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Experimental validation of LET in intensity-modulated proton therapy with a miniaturized pixel detector”
P. Stasica-Dudek, C. Granja, R. Kopeć, D. Krzempek, C. Oancea, A. Ruciński, M. Rydygier, M. Winiarz, J. Gajewski
Physics in Medicine & Biology 2025, 70, 095007
DOI: [10.1088/1361-6560/adcaf9](https://doi.org/10.1088/1361-6560/adcaf9)

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:

IFJ250718b_fot01s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2025/07/18/IFJ250718b_fot01.jpg
Stanowisko do napromieniania w Centrum Cyklotronowym Bronowice. Doktorantka Paulina Stasica-Dudek z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN prezentuje detektor użyty do pomiaru jakości wiązki protonowej. (Źródło: IFJ PAN)