

► integralnym dojrzewamy do rozumienia żyznej i bogatej całości, całości świata, świata, do którego przynależymy, za który ponosimy jakąś odpowiedzialność. Pisał o tym poruszająco Adam Zagajewski w zbiorze esejów *W cudzym pięknie*. Tylko idący w świat absolwenci takiego uniwersytetu mogą ten świat czynić lepszym, choć, istotnie, nie zawsze tak czynią.

Entuzjaści zdalnej przyszłości uniwersytetu argumentują, że na jego rzecz przemawia kryterium efektywności, czyli głównie kosztów. To prawda, ona stała się współcześnie w pewnych środowiskach obsesją i wyrządziła już niejedną szkodę, także w procesie globalizacji, co widzimy dzisiaj w związku z pandemią koronawirusa. Z tą efektywnością jest trochę jak z „efektami kształcenia”, iluzją, którą tworzymy dla wypełnienia biurokratycznego kwestionariusza. Była o tym niedawno mowa na łamach PAUzy. Efekty prawdziwego uniwersytetu są niepoliczalne i nieprzeliczone. Niech nas pragmatyczni technokraci nie straszą, że jeśli uniwersytet nie stanie się zdalny, to jego rolę przejmą wyspecjalizowane firmy edukacyjne, a dyplomy uniwersyteckie będą się nadawać na podkładki pod doniczki. Takie firmy mogą w ramach kilkumiesięcznych kursów

dostarczyć jedynie wyspecjalizowanej wiedzy ludziom już wykształconym. Takie kursy były od zawsze i one uniwersytetu nie zastąpiły. A jeśli tak miałyby się stać, stracimy wszyscy – całe społeczeństwa i ich kultura.

Gdyby zdalny uniwersytet miał się utrwalić i zastąpić uniwersytet prawdziwy, to byłby to „sztuczny miód” z piosenki Agnieszki Osieckiej. Nieco tylko trawstując jej słowa, to byłby „ersatz, cholera, nie uniwersytet”. W oryginale zamiast uniwersytetu jest „życie”. Zatem władze szkolnictwa wyższego i władze uniwersytetów powinny zrobić wszystko, aby od początku roku akademickiego do polskich uniwersytetów zaczęło wracać życie. Oczywiście, nie ignoruję odpowiedzialności, spoczywającej na władzach uniwersytetu za bezpieczeństwo zdrowotne tych, którzy się znajdują na jego terenie. Dlatego to będzie wymagać wysiłku, kreatywności, być może pewnych nakładów związanych z zapewnieniem tego bezpieczeństwa studentom i pracownikom. Ale stawką jest sam uniwersytet, więc nie wolno go łatwo oddawać zdalnej technologii, co mogłoby być może nawet wygodne dla samych władz. Ale to technologia ma służyć uniwersytetowi, nie odwrotnie.

ROMAN KUŹNIAR  
Uniwersytet Warszawski

## Centrum Cyklotronowe Bronowice – od fizyki do medycyny

PAWEŁ OLKO, MAREK JEŹABEK, RENATA KOPEĆ, ADAM MAJ

15 października 2015 roku uroczyście otwarto Centrum Cyklotronowe Bronowice w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (CCB IFJ PAN) w Krakowie. W lutym 2016 roku napromieniono w ośrodku pierwszego pacjenta z nowotworem oka. W listopadzie 2016 roku ruszyło napromienianie pacjentów Centrum Onkologii w Krakowie na stanowiskach gantry. Od tego czasu CCB IFJ PAN, jako jedyny w ośrodku Polsce, łączy codzienne napromieniania pacjentów na ultranowoczesnych stanowiskach do radioterapii protonowej z prowadzeniem badań z zakresu fizyki jądrowej, dozymetrii i radiobiologii.

Zaletą radioterapii protonowej jest zdolność precyzyjnego podania dawki na leczonej objętości przy minimalizacji dawki na zdrowe tkanki. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu zjawiska tzw. piku Bragga, czyli przekazu największej energii wiązki pod koniec jej zasięgu. Właściwy dobór energii protonów zapewnia więc podanie najmniejszej dawki wejściowej i chroni położone za guzem zdrowe narządy.

### Budowa

Budowa CCB IFJ PAN sfinansowana została z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Za kwotę 265 mln zł budowano kompletnie wyposażony ośrodek z halą eksperymentalną, dwoma stanowiskami terapeutycznymi typu gantry oraz kompletną, nowoczesną infrastrukturą medyczną. Umożliwia ona prowadzenie napromieniania w każdej lokalizacji guza, również u dzieci w znieczuleniu ogólnym. Ogromnym sukcesem projektu było zaprojektowanie i zbudowanie przez zespół fizyków, inżynierów i techników z IFJ PAN stanowiska do radioterapii protonowej oka oraz uzyskanie jego europejskiej certyfikacji medycznej CE Medical. Również skomplikowana integracja informatyczna ośrodka została przeprowadzona przez naszych specjalistów. Część naukowa z halą eksperymentalną i laboratoriami do przygotowania eksperymentów została wydzielona w odrębnej części budynku i nie koliduje z ruchem pacjentów. Otwarcie CCB IFJ PAN nastąpiło po 4 latach budowy, zgodnie z programem i bez opóźnień.

Projekt został podjęty w okresie przełomu w rozwoju radioterapii protonowej. Postawiliśmy na raczkującą wtedy technologię wiązki skanującej. Przełom polegał na wyeliminowaniu z radioterapii mechanicznych elementów formujących wiązkę protonów, przygotowywanych w warsztatach mechanicznych indywidualnie dla każdego pacjenta. Zastosowanie w przekroju kilkumilimetrowej, odchylanej magnetycznie wiązki protonowej – o energii dobieranej do głębokości guza, umożliwia precyzyjne objęcie dawką leczonego ob-

szaru. Sklejenie kilku pól z różnych kierunków daje możliwość formowania skomplikowanych kształtów obszarów leczonych, nieosiągalnych innymi technikami. Dzięki temu IFJ PAN zostało jednym z pierwszych w Europie i jednym z nielicznych ośrodków w świecie prowadzących rutynowo najbardziej zaawansowany rodzaj napromieniania – radioterapię protonową o modulowanej intensywności (Intensity Modulated Proton Therapy, IMPT).



Rys. 1. Cyklotron izochroniczny Proteus C-235. Dostarcza wiązkę protonów o energii maksymalnej 230 MeV do hali eksperymentów fizycznych, hali radioterapii oka oraz do dwóch stanowisk terapeutycznych gantry.

### Technika

Ośrodek CCB-IFJ PAN wyposażony jest w cyklotron Proteus C-235 i dwa stanowiska terapeutyczne typu gantry, belgijskiej firmy Ion Beam Applications, światowego lidera w budowie instalacji protonowych (Rys.1). Cyklotron produkuje wiązkę o maksymalnej energii wiązki 226 MeV i prądzie protonów od 0,5 do 500 nA. Wiązka wyprowadzona z cyklotronu przechodzi przez berylowo-grafitowy degradator energii, umożliwiający szybkie zmniejszenie energii w zakresie od energii maksymalnej do 70 MeV. Wiązka przechodzi następnie przez selektor energii, zmniejszający jej rozmycie energetyczne i jonowodem kierowana jest na odległość kilkudziesięciu metrów do stanowisk w hali eksperymentalnej, w hali terapii oka oraz do dwóch stanowisk gantry. Stanowiska gantry zapewniają możliwość napromieniania pacjenta z dowolnego kierunku w zakresie kątów 0–360°. W tym celu zestaw magnesów prowadzących ►

► wiązkę o wadze 20 ton jest zamontowany na obracanej, stutonnej kratownicy o średnicy 11 metrów. Magnesy odchylające wyznaczają kierunek padania wiązki, ale głębokość jej penetracji zależy od doboru jej aktualnej energii. Bezpieczeństwo zapewniają wielostopniowe systemy kontroli położenia i intensywności wiązki.

Ośrodek jest wyposażony w halę eksperymentalną o powierzchni ok. 100 m<sup>2</sup>, wykorzystywaną przez fizyków jądrowych, oraz pokoje przygotowania eksperymentów. Radiobiolodzy mogą korzystać z dwóch w pełni wyposażonych laboratoriów biologicznych do przygotowania i wstępnej obróbki napromienionego materiału.

### Napromienianie

Podstawą bezpiecznego napromieniania pacjenta jest dozymetria wiązki. Tradycje badawcze w IFJ PAN i prowadzona od 2011 roku radioterapia protonowa oka na cyklotronie AIC-144 pozwoliły na wypracowanie wysokich standardów w tej dziedzinie. Pomiar porównawcze prowadzone corocznie z Laboratorium Dozymetrycznych Wzorców Wtórnych w Narodowym Instytucie Onkologii (NIO) w Warszawie dają zgodności poniżej 0,5%. W 2016 IFJ PAN, jako ośrodek wiodący w tej dziedzinie, zorganizował pomiary porównawcze wysyłkowych dozymetrów wiązki protonowej dla 14 ośrodków terapii protonowej w Europie i USA. Zespół IFJ PAN koordynuje też pomiary dozymetryczne promieniowania rozproszonego w terapii protonowej w ramach prac Europejskiej Grupy Dozymetrycznej EURADOS. Pomiary te wykazały, że użytkowane w IFJ PAN stanowiska gantry zapewniają najlepszą ochronę pacjenta ze względu na niepożądane dawki od promieniowania rozproszonego.

Proces szkolenia kadr i testowania aparatury trwał od 2014 roku, kiedy to nastąpiło testowe uruchomienie pierwszego stanowiska gantry. Ze względu na brak w Europie analogicznych instalacji nowo powstające ośrodki w Trento, Krakowie, Wiener Neustadt, Pradze i w Uppsali zawarły porozumienie IPACS (I-PL-A-CZ-S), by wypracować wspólne procedury i standardy dla nowej radioterapii. Od tego czasu współpracujące zespoły porównują i optymalizują plany leczenia wykonywane na tych samych zanonimizowanych danych pacjentów. Pozwala to na zapewnienie jakości i standaryzację procesu planowania leczenia w Europie. Leczenie każdego pacjenta w CCB IFJ PAN jest planowane wg tych procedur.

Cały cykl codziennego napromieniania pacjentów rozłożony jest na wiele tygodni, a procesu tego nie powinno się przerywać. Dlatego ośrodek działa nieprzerwanie, zaś awarie sprzętu są niezwłocznie usuwane. Dzięki ponad 50-letniemu doświadczeniu IFJ PAN w budowie i użytkowaniu cyklotronów, cały kompleks terapeutyczny jest obsługiwany i prawie w całości serwisowany przez naszych inżynierów i informatyków. Pozwala to zaoszczędzić wiele milionów złotych rocznie. W chwili obecnej tzw. beam-on time, czyli dostępność kliniczna wiązki w ciągu roku, wynosi 95%, co po 5 latach pracy jest doskonałym wynikiem. Warto nadmienić, że zaledwie kilka ośrodków na świecie nie jest obsługiwanych i serwisowanych przez producentów systemów terapii.

Obecnie napromienianych jest około 20 pacjentów dziennie i nie ma kolejek do leczenia. Naszymi głównymi partnerami klinicznymi są Narodowy Instytut Onkologii Oddział w Krakowie (radioterapia na gantry) oraz Szpital Uniwersytecki w Krakowie (radioterapia oka). Pacjenci dowożeni są transportem medycznym lub przyjeżdżają samodzielnie, gdy leczenie prowadzone jest ambulatoryjnie. Pacjentom zawsze towarzyszy lekarz. Przygotowanie do napromieniania jest kilkustopniowe. Przy pierwszej wizycie pacjent ma przygotowane indywidualne elementy do unieruchomienia, co jest podstawą precyzyjnego napromieniania. Wykonywany jest skan tomografii komputerowej, który następnie służy do wykonania planu leczenia. W procesie tym lekarz radioterapeuta wyznacza obszary podlegające napromienianiu oraz zakresy podania dawki, a fizyk medyczny ustala optymalne kierunki, energie i intensywności podanych wiązek. Po zatwierdzeniu planu leczenia fizycy medyczni z CCB IFJ PAN przeprowadzają pomiary dozymetryczne z użyciem fantomów, potwierdzające spełnienie warunków ekspozycji. Po wielostopniowej, codziennej kontroli aparatury i dozymetrii wiązki można przystąpić do napromieniania. Pacjent jest unieruchamiany na stanowisku terapii i pozycjonowany z wykorzystaniem zaawansowanych systemów rentgenowskich i optycznych. Dla osoby dorosłej cała procedura trwa przeciętnie od 20 do 30 minut. W przypadku

napromieniania dzieci stoi do dyspozycji zaawansowana aparatura anestezjologiczna, przystosowana do pracy w warunkach terapii protonowej.

### Nauka

Zasadniczą rolę w sformułowaniu celów naukowych projektu CCB odegrało polskie środowisko fizyki jądrowej. Dostępność profesjonalnie zaprojektowanej hali eksperymentalnej i wiązki o regulowanej energii stworzyły doskonałe warunki do realizacji projektów z zakresu fizyki jądrowej, fizyki medycznej, radiobiologii i elektroniki. Już w kwietniu 2011 roku odbyło się pierwsze spotkanie przyszłych użytkowników CCB, a w sierpniu 2013 powołano Międzynarodowy Komitet Doradczy. Komitet spotyka się raz w roku, by ocenić i rekomendować do realizacji zgłaszane eksperymenty. W hali doświadczalnej zainstalowano dwa podstawowe zestawy eksperymentalne: układ do badania wzbudzeń jądrowych i rozszczepienia, składający się z zestawu detekcyjnego PARIS (Photon Array for Radioactive and Stable ion studies), sprzężonego do zestawu detektorów KRATTA (Krakow Triple Telescope Array) oraz układ do badania oddziaływania kilkunukleonowego BINA (Big Instrument for Nuclear polarization Analysis). Stanowiska te zostały udostępnione dla użytkowników z całego świata poprzez tzw. dostęp transgraniczny (TNA – TransNational Access), finansowany w ramach europejskiego projektu ENSAR-2 (European Nuclear Science and Applications Research). Wiązki protonów z cyklotronu Proteus były wykorzystywane do realizacji projektów naukowych z 27 instytucji i 14 krajów. Od 2018 roku, w ramach TNA z projektu INSPIRE (INfrastructure in Proton International Research), finansowany jest dostęp również do urządzeń terapeutycznych CCB dla zespołów fizyków medycznych i radiobiologów całego świata. Prowadzone są również napromieniania odporności elektroniki na promieniowanie dla eksperymentów fizycznych i lotów kosmicznych. Od 2015 roku w ramach działalności Europejskiej Grupy Dozymetrycznej (European Radiation Dosimetry Group, EURADOS), koordynowanej przez IFJ PAN, prowadzone są regularne pomiary w dziedzinie dozymetrii



Rys. 2. Zespół Europejskiej Grupy Dozymetrycznej EURADOS po zakończeniu pomiarów na stanowisku gantry w CCB IFJ PAN. Pomiary wykazały, że niepożądane dawki promieniowania rozproszonego dla pacjentów w CCB są przynajmniej rząd wielkości niższe niż w radioterapii konwencjonalnej.

promieniowania rozproszonego generowanego przez wiązkę protonową (Rys. 2). Uczestniczą w niej zespoły z 9 europejskich krajów. Do chwili obecnej obroniono 8 rozpraw doktorskich prowadzonych z wykorzystaniem infrastruktury CCB.

Centrum Cyklotronowe Bronowice IFJ PAN stało się ważnym obiektem na mapie naukowej Polski i Europy. CCB będzie w dalszym ciągu rozwijało regularne napromienianie pacjentów onkologicznych. Planowane poszerzenie wskazań do takich zabiegów, finansowanych z Narodowego Funduszu Zdrowia, umożliwi pełne użycie potencjału terapeutycznego ośrodka, obecnie spożytkowywanego w 50%. Pozostały czas na wiązce protonowej nie jest tracony i jest wykorzystywany do eksperymentów naukowych. Doświadczenia zdobyte w budowie i użytkowaniu CCB-IFJ PAN będą wyzyskane przy budowie kolejnych ośrodków terapii protonowej w Polsce. Ośrodek w Krakowie będzie pełnił dla nich rolę ośrodka referencyjnego z fizyki medycznej i dozymetrii wiązki protonowej.