

7. Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów UW – M. Palacz

(opracowano z wykorzystaniem materiałów dostępnych na stronach WWW ŚLCJ, prac doktorskich J. Choińskiego i K. Sudlitzta oraz pracy magisterskiej O. Steczkiewicz)

Spis treści:

7.1. Zadania i cele badawcze Laboratorium

7.2. Cyklotron i źródła jonów

- Źródło jonów ECR
- Cyklotron

7.3. Aparatura, eksperymenty i prace badawcze

- Spektrometr dyskretne promieniowanie gamma EAGLE wraz z detektorami dodatkowymi
- Separator produktów reakcji WIGISOL
- Spektrometr cząstek naładowanych ICARE
- Spektrometr wysokoenergetycznego promieniowania gamma JANOSIK
- Eksperymenty radiobiologiczne
- Pracownia detektorów cząstek
- Pracownia tarczowa

7.4. Działalność w zakresie fizyki medycznej

- Ośrodek Produkcji i Badania Radiofarmaceutyków
- Produkcja ^{211}At

7.1 Zadania i cele badawcze Laboratorium

Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów Uniwersytetu Warszawskiego, założone wspólnie przez Ministerstwo Edukacji, Polską Akademię Nauk i Państwową Agencję Atomistyki, jest największym krajowym ośrodkiem eksperymentalnej fizyki jądrowej, jedynym dysponującym akceleratorem ciężkich jonów. W Laboratorium znajduje się również Ośrodek Produkcji i Badania Radiofarmaceutyków, wyposażony w cyklotron przyspieszający protony, przeznaczony do zastosowań medycznych. Ośrodek ten jest centrum badawczym i jednocześnie producentem radiofarmaceutyków stosowanych w technice Tomografii Pozytonowej (PET).

Warszawski akcelerator ciężkich jonów, funkcjonujący od 1993 roku, przyspiesza wiązki jonów do energii w zakresie od 2 do 10 MeV na nukleon. Cyklotron współpracuje z dwoma źródłami jonów ECR (*Electron Cyclotron Resonance*, elektronowy rezonans cyklotronowy). Wiazki jonów wykorzystywane są przez zespoły polskie i zagraniczne do prac badawczych z fizyki jądrowej, fizyki atomowej, badań materiałowych, fizyki ciała stałego oraz biologii i medycyny jądrowej.

Dostęp do wiązki z akceleratora w ŚLCJ jest przyznawany przez Dyrektora Laboratorium na podstawie rekomendacji międzynarodowego Komitetu Programowego (*Programme Advisory Committee*). Jedynymi kryteriami oceny projektów są wartość naukowa i techniczna wykonalność proponowanego eksperymentu. Grupy eksperymentalne mogą bezpłatnie korzystać z układów doświadczalnych

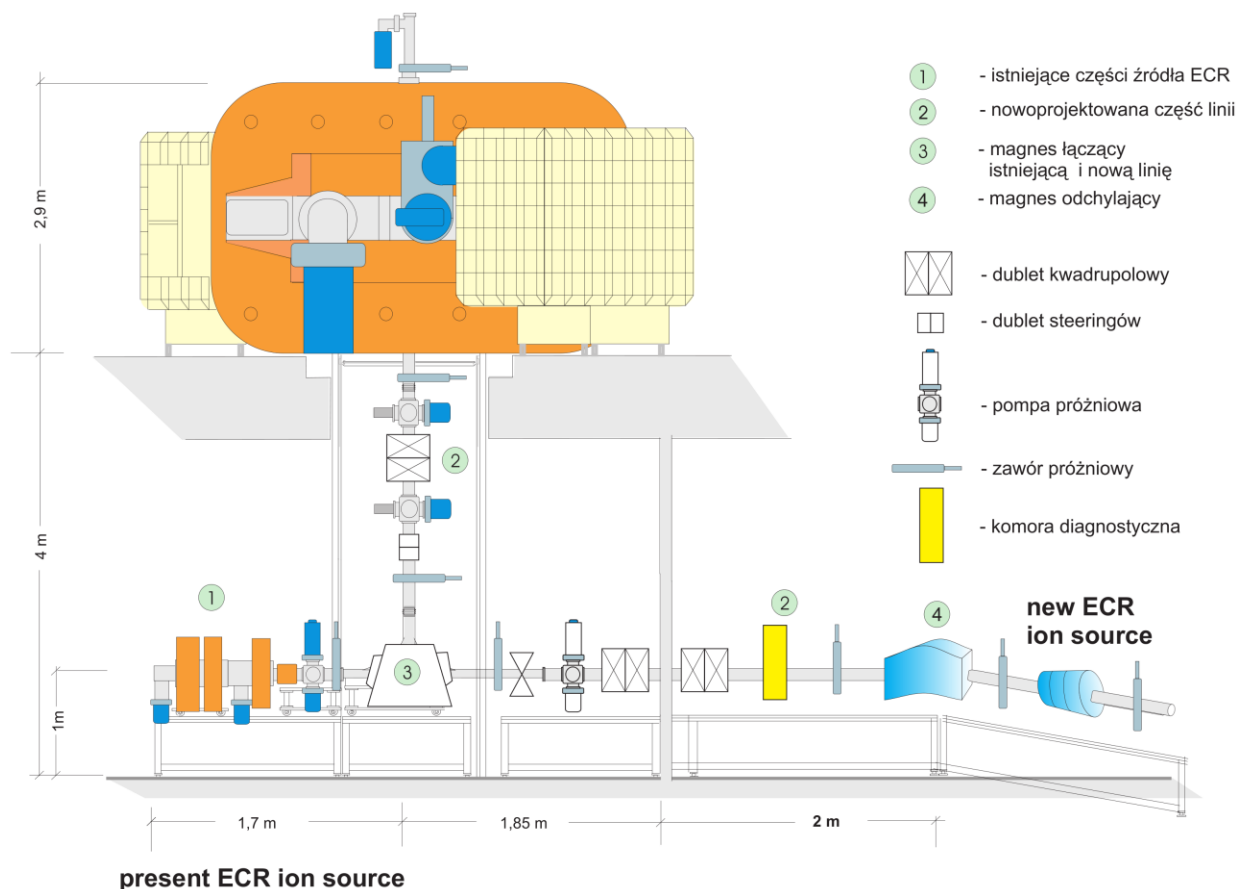
zainstalowanych na stałe na traktach jonowych, lub używać swojej własnej wyspecjalizowanej aparatury. Wśród dostępnych układów pomiarowych należy wymienić: separator masowy WIGISOL, JANOSIK - wielodetektorowy system do rejestracji wysokoenergetycznego promieniowania gamma, w którego skład wchodzi duży kryształ NaI(Tl) z aktywnymi i pasywnymi osłonami oraz 32-częściowy filtr krotności, ICARE, wielodetektorowy układ pozwalający na identyfikację cząstek naładowanych i pomiar ich energii. Najnowszym i wciąż rozbudowywanym narzędziem pomiarowym jest układ EAGLE - wielodetektorowy spektrometr promieniowania γ , który może współpracować z licznymi detektorami pomocniczymi: spektrometrem elektronów konwersji wewnętrznej, filtrem krotności cząstek naładowanych obejmującym kąt bryłowy 4π , komorą rozprożeń wyposażoną w 100 detektorów typu PIN-dioda, filtrem krotności kwantów γ złożonym z 60 kryształów BaF₂, polarymetrem HPGe, plungerem.

Laboratorium współpracuje z wieloma krajowymi i zagranicznymi uczelniami i instytutami. W roku 2010 wraz z Instytutem Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie zawiązało konsorcjum pod nazwą „Narodowe Laboratorium Cyklotronowe”, którego celem jest zapewnienie warunków do prowadzenia w Polsce badań eksperymentalnych z dziedziny fizyki jądrowej oraz jej zastosowań w innych dziedzinach nauki, a także integracja z dużymi, pan-europejskimi infrastrukturami badawczymi. Zgodnie z najnowszym dokumentem „*Perspectives of Nuclear Physics in Europe*” opublikowanym przez ekspertów NuPECC (*Nuclear Physics European Collaboration Committee*) małe regionalne centra eksperymentalne, do których należy ŚLCJ UW, pełnią istotną rolę w krajobrazie europejskiej fizyki jądrowej poprzez prowadzone programy naukowe, rozwój nowych metod i technologii, jak również kształcenie kadr dla wielkich europejskich ośrodków badawczych.

Badania prowadzone z wykorzystaniem wiązek Warszawskiego Cyklotronu owocują znaczną liczbą publikacji w czasopismach naukowych, a także stały się podstawą licznych prac doktorskich, magisterskich, licencjackich i inżynierskich. Urządzenia badawcze ŚLCJ są też wykorzystywane do celów dydaktycznych i szkoleniowych. Laboratorium dysponuje również infrastrukturą umożliwiającą organizację dużych konferencji. ŚLCJ zorganizowało trzy znaczące konferencje międzynarodowe: „*Nuclear Physics Close to the Barrier*” (1998), „*XXIII European Cyclotron Progress Meeting*” (2002), „*PETRAD - Positron Emission Tomography in Research and Diagnostics*” (2012), a także kilka mniejszych konferencji i warsztatów. Dla wygody zewnętrznych użytkowników w budynku ŚLCJ stworzono 10 pokoi gościnnych.

Proces otrzymywania wiązki jonów, wybrane urządzenia badawcze wykorzystywane w ŚLCJ oraz różne aspekty działalności Laboratorium zostały pokrótce omówione poniżej. Więcej informacji można znaleźć na stronach internetowych www.slcj.uw.edu.pl oraz w raportach rocznych Laboratorium (język angielski), również dostępnych w internecie.

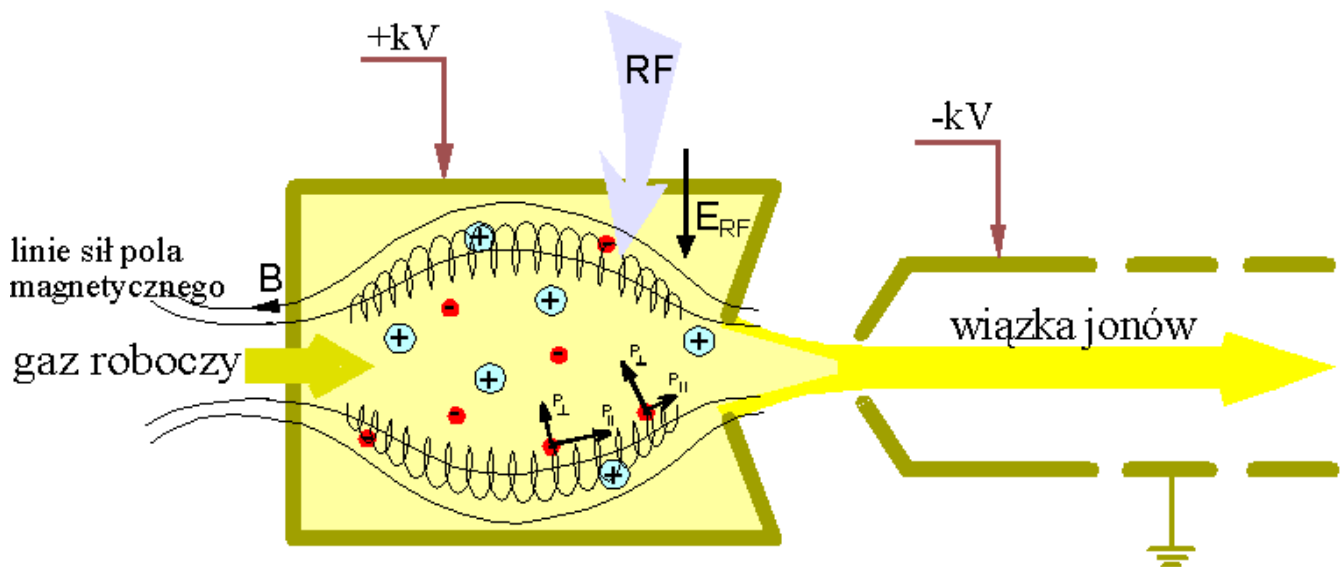
7.2 Cyklotron i źródła jonów



Rys. ŚLCJ-7.1: Cyklotron wraz z dwoma źródłami jonów i liniami iniekcijnymi (rys. E. Kulczycka i I. Skrzeczanowska)

Źródło jonów ECR

Jądra atomowe, które mają być przyspieszone przez cyklotron, muszą być wcześniej przygotowane w postaci niskoenergetycznej wiązki cząstek o ściśle określonym ładunku (stopniu jonizacji). Źródłem takiej wiązki może być komora wypełniona gazem pod niskim ciśnieniem, w którym w wyniku wyładowań elektrycznych część elektronów została wyrwana z powłok atomowych. Gaz zawierający głównie zjonizowane atomy i swobodne elektrony nazywany jest plazmą. Możliwość otrzymania plazmy zawierającej jony o wysokim stopniu jonizacji jest jednak ograniczona przez dość duże prawdopodobieństwo rekombinacji jonów i elektronów oraz przez oddziaływania jonów ze ściankami komory. W celu otrzymania wysokojonizowanych jonów, buduje się urządzenia, w których elektrony rozpędzane są do wysokich energii (plazma jest nagrzewana) strumieniem mikrofal poprzez elektronowy rezonans cyklotronowy (*Electron Cyclotron Resonance, ECR*). Są to tzw. źródła ECR. Warszawski cyklotron ciężkich jonów współpracuje z dwoma takimi źródłami. Cyklotron, źródła i linie iniekcyjne zostały schematycznie przedstawione na rysunku ŚLCJ-7.1.



Rys. ŚLCJ-7.2: Zasada działania źródła jonów ECR (rys. E. Kulczycka)

W źródle ECR (rys. ŚLCJ-7.2) wykorzystuje się fakt, że elektrony umieszczone w polu magnetycznym o indukcji B prostopadłej do płaszczyzny ich ruchu, poruszają się po orbitach kołowych z częstotliwością kołową równą $\omega_{CE} = eB/m$ (e – ładunek elementarny, m – masa elektronu). Jeżeli elektrony takie zostaną poddane oddziaływaniu fali elektromagnetycznej o częstotliwości równej ω_{CE} to prostopadła do wektora B składowa wektora pola elektrycznego, będzie rezonansowo przekazywać energię elektronom, zwiększając ich prędkość. Częstotliwość stosowanej fali elektromagnetycznej wynosi kilka do kilkunastu GHz, czyli lokuje się w zakresie mikrofal. Pole magnetyczne dające rezonans przy częstotliwości 10 GHz ma wartość 0.36 T.

Strumień mikrofalowego promieniowania elektromagnetycznego wprowadzany jest do komory wyładowań umieszczonej w polu magnetycznym, w której znajduje się gaz pod niskim ciśnieniem. Częstotliwość mikrofal jest tak dobrana, by odpowiadała ona częstotliwości ω_{CE} swobodnych elektronów w gazie. Elektrony są „nagrzewane” przez mikrofały. Wysokoenergetyczne elektrony, zderzając się z atomami gazu powodują ich jonizację. Powstają plazma o wysokiej temperaturze – rzędu 100 mln K, co odpowiada energii elektronów kilkadziesiąt keV. Pole magnetyczne w komorze, wytwarzane przez solenoidy i magnesy stałe, jest jednocześnie tak ukształtowane, by tworzyło pułapkę magnetyczną. Elektrony zbliżające się do krańców komory zostają z powrotem skierowane do jej środka. Ponadto wysoka temperatura elektronowa zapobiega nagrzewaniu jonów, gdyż przekrój czynny na rozpraszanie elektronów na jonach jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu energii elektronu. Jony pozostają więc zimne (~ 1 eV, 10000 K), co wydłuża ich czas przebywania w komorze i wpływa korzystnie na jakość wiązki wyprowadzanej ze źródła. Długi czas przebywania sprawia, że możliwe są wielokrotne kolizje z elektronami. Niskie ciśnienie gazu utrudnia rekombinację. W takich warunkach możliwa jest jonizacja nawet głębokich powłok atomowych. Na wyjściu z komory znajduje się diafragma oraz układ soczewek elektrostatycznych, które formują wiązkę jonów. Energia jonów wychodzących ze źródła to zwykle 10-20 keV/q (q – ładunek jonów, wynoszący od kilku do kilkunastu ładunków elementarnych).

W ŚLCJ zainstalowane są dwa źródła jonów ECR. Pierwsze, zbudowane w Laboratorium i uruchomione w 1998 roku, pracuje z częstotliwością 10 GHz i produkuje wiązki jonów od ^4He do ^{40}Ar (źródło może wytworzyć również wiązkę ^{84}Kr , wiązka taka nie była jednak nigdy przyspieszana w

cyklotronie). W roku 2011 w Laboratorium zainstalowano nowe źródło ECR o nazwie SUPERNANOGAN, wyprodukowane przez firmę Pantechnik, znacznie rozszerzające spektrum dostępnych wiązek. Nowe źródło pracuje z częstotliwością 14.5 GHz i może między innymi wytwarzać wiązki metali. Na liście jonów, który wkrótce przyspieszać będzie warszawski cyklotron w połączeniu z nowym źródłem znajdują się izotopy Kr, Ag, Xe, Ta, Au i Pb.

Po wyjściu ze źródła, kontrolowana przez układy magnesów wiązka jonów podąża najpierw poziomo, a następnie kierowana jest pionowo do góry, do centrum cyklotronu. W centrum cyklotronu znajduje się inflektor – rodzaj zwierciadła elektrostatycznego – który zakrzywia wiązkę jonów, ponownie nadając jej kierunek poziomy, tak by możliwe było przyspieszanie jonów w cyklotronie.

Cyklotron

Warszawski cyklotron (rys. ŚLCJ-7.3 i ŚLCJ-7.4) jest cyklotronem izochronicznym, tzn. wszystkie przyspieszane cząstki mają tę samą częstotliwość obrotową, niezależnie od promienia. Przyspieszanie cząstek następuje na skutek oddziaływania zmiennego pola elektrycznego o częstotliwości 12 do 21 MHz, przykładanego na dwie elektrody, tzw. duanty. Częstotliwości takie lokują się w zakresie częstotliwości radiowych – przy omawianiu pola elektrycznego w cyklotronie powszechnie stosuje się więc określenie RF (*Radio Frequency*). Przyspieszanie jest możliwe, gdy spełniony jest podstawowy warunek rezonansu między częstotliwością obrotową f , a częstotliwością przyspieszającego pola RF, f_{RF}

$$f_{RF} = h \cdot f$$

Naturalna liczba h nazywana jest numerem harmonicznym, na której pracuje cyklotron. Dla warszawskiego cyklotronu wartość h wynosi 2 do 4.

Częstotliwość obrotowa f określona jest jednoznacznie przez pole magnetyczne B oraz ładunek q i masę spoczynkową m_0 przyspieszanej cząstki

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{qB}{m_0 \gamma}, \text{ gdzie } \gamma \text{ to czynnik relatywistyczny, } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Z powyższej zależności wynika, że w cyklotronie izochronicznym, pole magnetyczne musi zmieniać się wraz z przyrostem prędkości cząstki, proporcjonalnie do czynnika γ . Oznacza to również, że pole B musi rosnać wraz z promieniem ruchu cząstki. Taką zmienność pola B osiąga się przez odpowiednie ukształtowanie szczeliny pomiędzy biegunami magnesu, w której poruszają się jony – wysokość szczeliny maleje z odległością od centrum cyklotronu. W istocie szczelina ta ma strukturę składającą się z 70 schodków o wysokości zmieniającej się od 0.1 do 0.3 mm, wykonanych z dokładnością do 0.01 mm. Minimalna szerokość szczeliny wynosi 26 mm. Pole magnetyczne zostało uformowane, przy założeniu, że ma ono umożliwiać przyspieszanie wzorcowego jonu o stosunku masy do ładunku $Q/A=0.25$, przy maksymalnej indukcji pola równej 2.03 T w części centralnej.

Pole magnetyczne w cyklotronie jest również niejednorodne azymutalnie – płaszczyzna, w której poruszają się cząstki podzielona jest kątowo na 4 pary obszarów o większej i mniejszej wartości pola magnetycznego. Obszary o większym polu magnetycznym, to tzw. sektory (w nich szczelina między biegunami magnesu jest mniejsza, zbiegając do wspomnianej wyżej minimalnej wartości 26 mm) oraz tzw. doliny (z minimalną wysokością szczeliny 150 mm). Takie ukształtowanie szczeliny (a więc pola B) jest niezbędne dla zapewnienia pionowego ogniskowania wiązki.

Często używanym parametrem charakteryzującym własności cyklotronu jest tzw. liczba cyklotronowa K zdefiniowana równaniem

$$\frac{E}{A} = K \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2$$

Liczba K pozwala obliczyć maksymalną energię E na nukleon wyrażoną w MeV, osiąganą w cyklotronie przez jon o ładunku Q (podanym w jednostkach ładunku elementarnego) i liczbie masowej A. Dla warszawskiego cyklotronu i wzorcowego jonu o $Q/A=0.25$, liczba K wynosi 160, co oznacza, że jon ten może być przyspieszony do maksymalnej energii 10 MeV na nukleon.

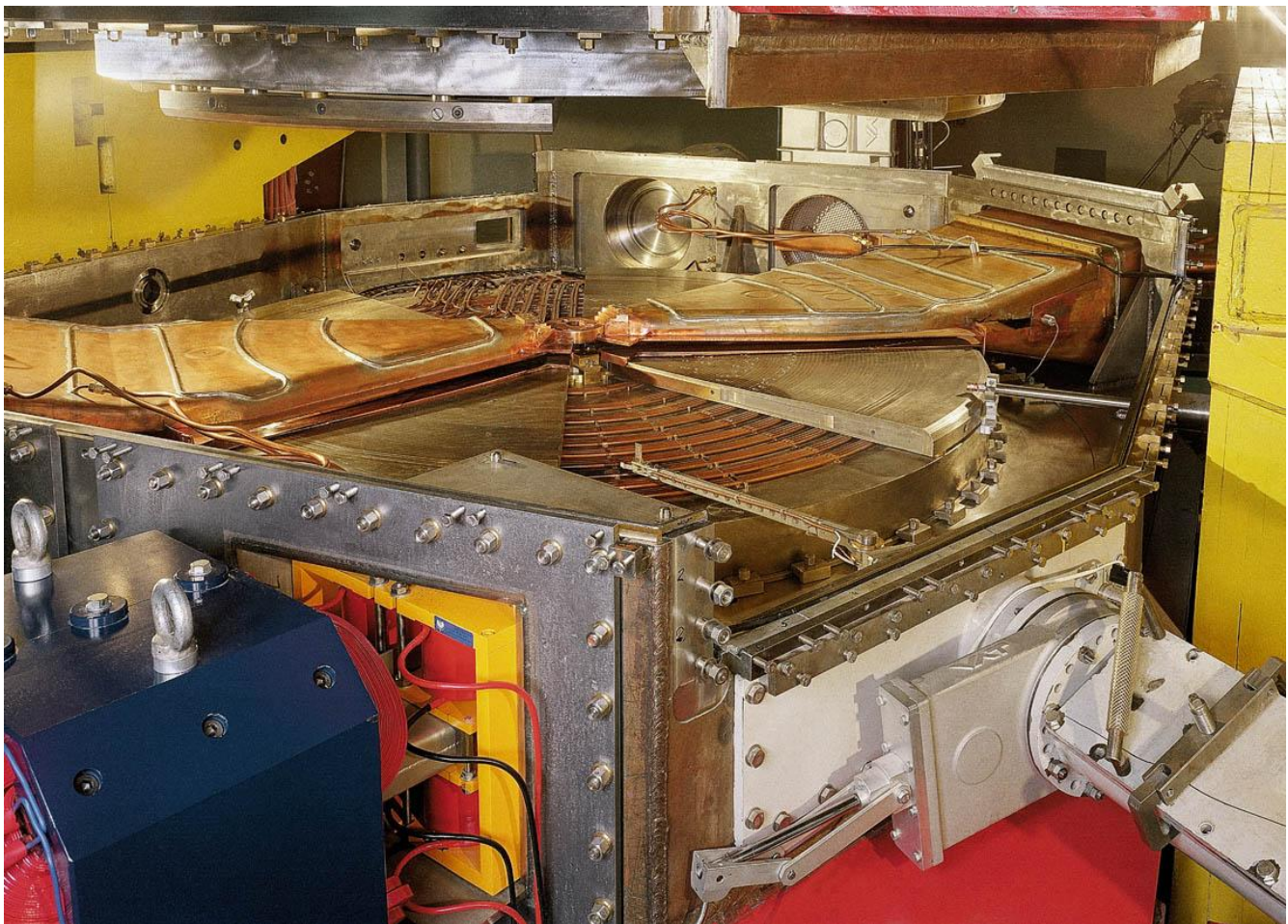
Cyklotron o stałej wartości liczby K nadawałby się do przyspieszania jedynie określonej rodziny jonów (jedna wartość Q/A). Cyklotron warszawski umożliwia przyspieszanie jonów o stosunku ładunku do masy w zakresie od 0.2 do 0.5. Konieczną zmianę pola magnetycznego w cyklotronie uzyskuje się przez zmianę prądu płynącego w uzwojeniach głównego magnesu w zakresie 800-1100 A. Ponadto, pole magnetyczne jest modyfikowane przez zestaw 10 par tzw. cewek korekcyjnych. W efekcie liczba K dla warszawskiego cyklotronu zawiera się w przedziale 90 do 160.



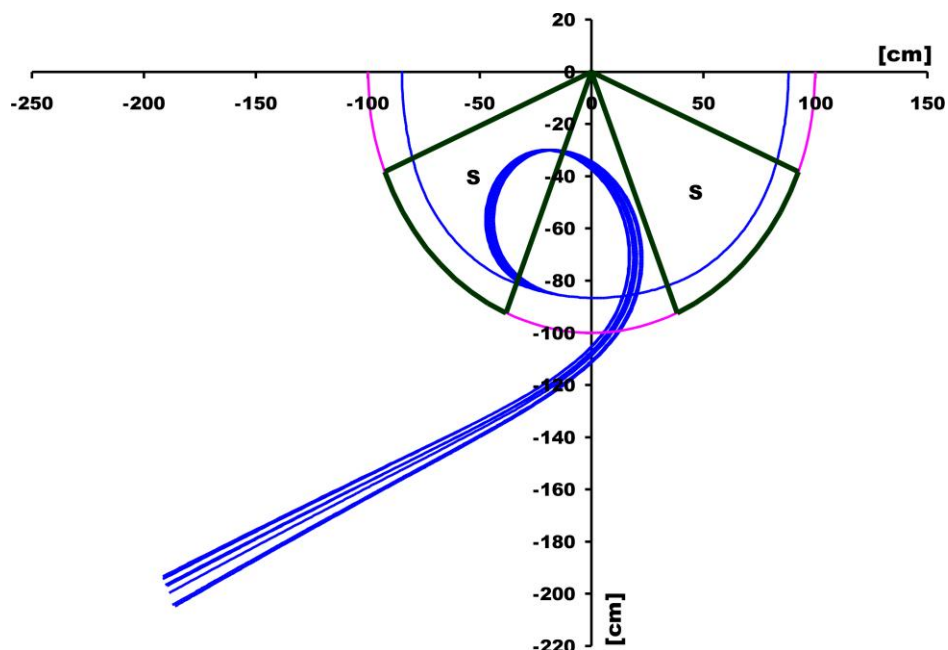
Rys. ŚLCJ-7.3: Cyklotron w ŚLCJ. Widoczny jest fragment jonowodu prowadzący jony do stanowisk eksperymentalnych (lewa strona zdjęcia) oraz układ służący do pozycjonowania folii strippera (z prawej strony) (fot. ŚLCJ)

Jony przyspieszone do odpowiedniej energii muszą zostać z cyklotronu wyprowadzone - skierowane do jonowodu i posłane do stanowisk eksperymentalnych. W cyklotronie warszawskim stosowana jest metoda wyprowadzenia wykorzystująca skokową zmianę ładunku przyspieszanych jonów przy

przejściu przez cienką folię węglową, ustawioną na drodze jonów wewnątrz cyklotronu. Folia taka ma grubość około $1\ \mu\text{m}$ i zwana jest stripperem (czyli „obdzieraczem”). Zmiana energii przy przejściu przez folię jest zanedbywalna, natomiast zmiana ładunku, związana zwykle z obdarciem większości (lub wszystkich) elektronów przyspieszanego jonu, powoduje natychmiastowe zwiększenie promienia krzywizny toru ruchu. Precyzyjne radialne i azymutalne ustawienie strippera pozwala wybrać jony o określonej energii i skierować je do wejścia jonowodu. Metoda ta zilustrowana jest na rysunku ŚLCJ-7.5. Czym głębiej w kierunku do centrum cyklotronu wsunięty jest stripper, tym mniejsza jest energia wyprowadzanych jonów. W niektórych przypadkach, spełnienie wymagań eksperymentatorów odnośnie energii wiązki, wymaga wsunięcia strippera tak głęboko, że przeladowane jony mogą opuścić cyklotron dopiero po wykonaniu dwóch, lub więcej pełnych obrotów. Stosowana w ŚLCJ metoda wyprowadzenia wiązki jest technicznie względnie prosta i pozwala na uzyskiwanie z dość dobrą wydajnością jonów o szerokim zakresie energii.

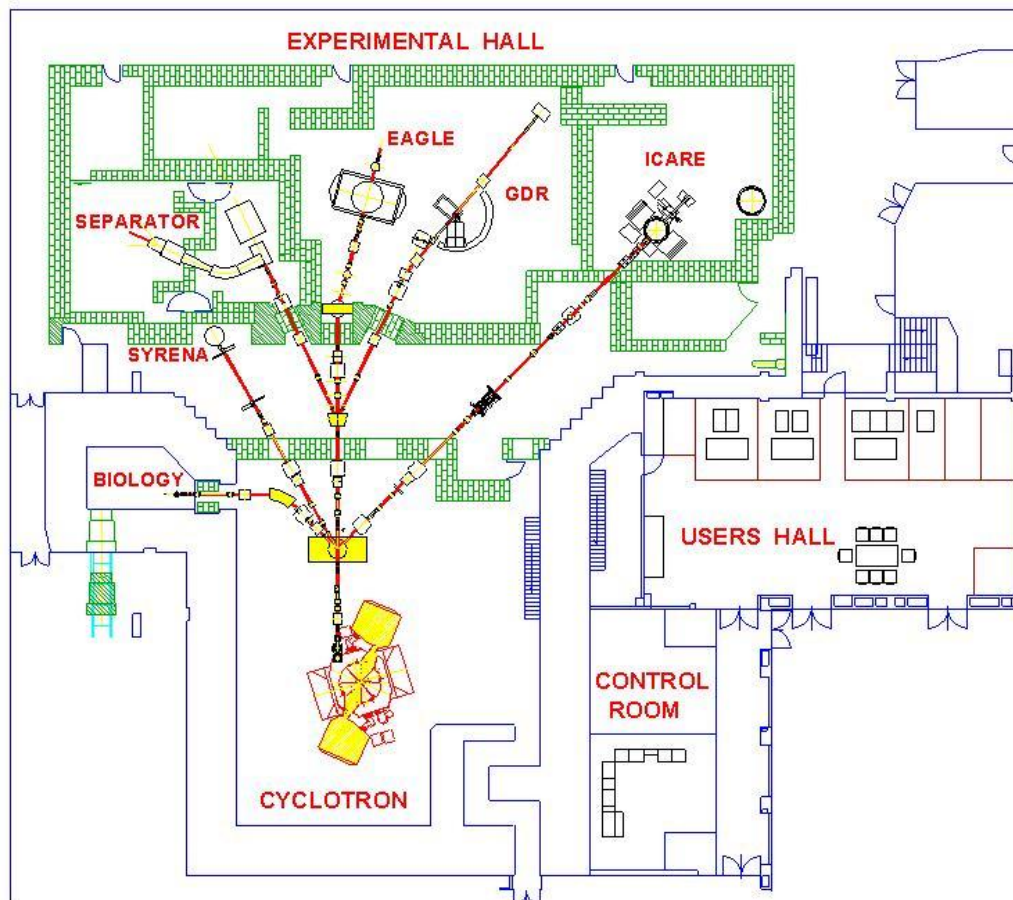


Rys. ŚLCJ-7.4: Wnętrze cyklotronu. Widoczne są dwie trójkątne elektrody przyspieszające (duanty), sektory, doliny, jak również ramię i ramka folii strippera. W lewej części zdjęcia widać pierwszy magnes kwadrupolowy (kolor niebieski) – początek jonowodu prowadzącego do stanowisk eksperymentalnych (fot. ŚLCJ).



Rys. ŚLCJ-7.5: Wyprowadzenie jonów $^{14}\text{N}^{7+}$ przez zmianę ładunku do stanu $7+$, z promienia 83 cm. Literami „s” zaznaczono sektory, czyli obszary o wyższym polu magnetycznym (rys. J. Choiński)

Wyprowadzone z cyklotronu wiązki prowadzone są jonowodami do stanowisk eksperymentalnych, wyposażonych w różne urządzenia pomiarowe, co przedstawione jest na rysunku ŚLCJ-7.6. Niektóre z zainstalowanych urządzeń omówione zostały w następnym podrozdziale.



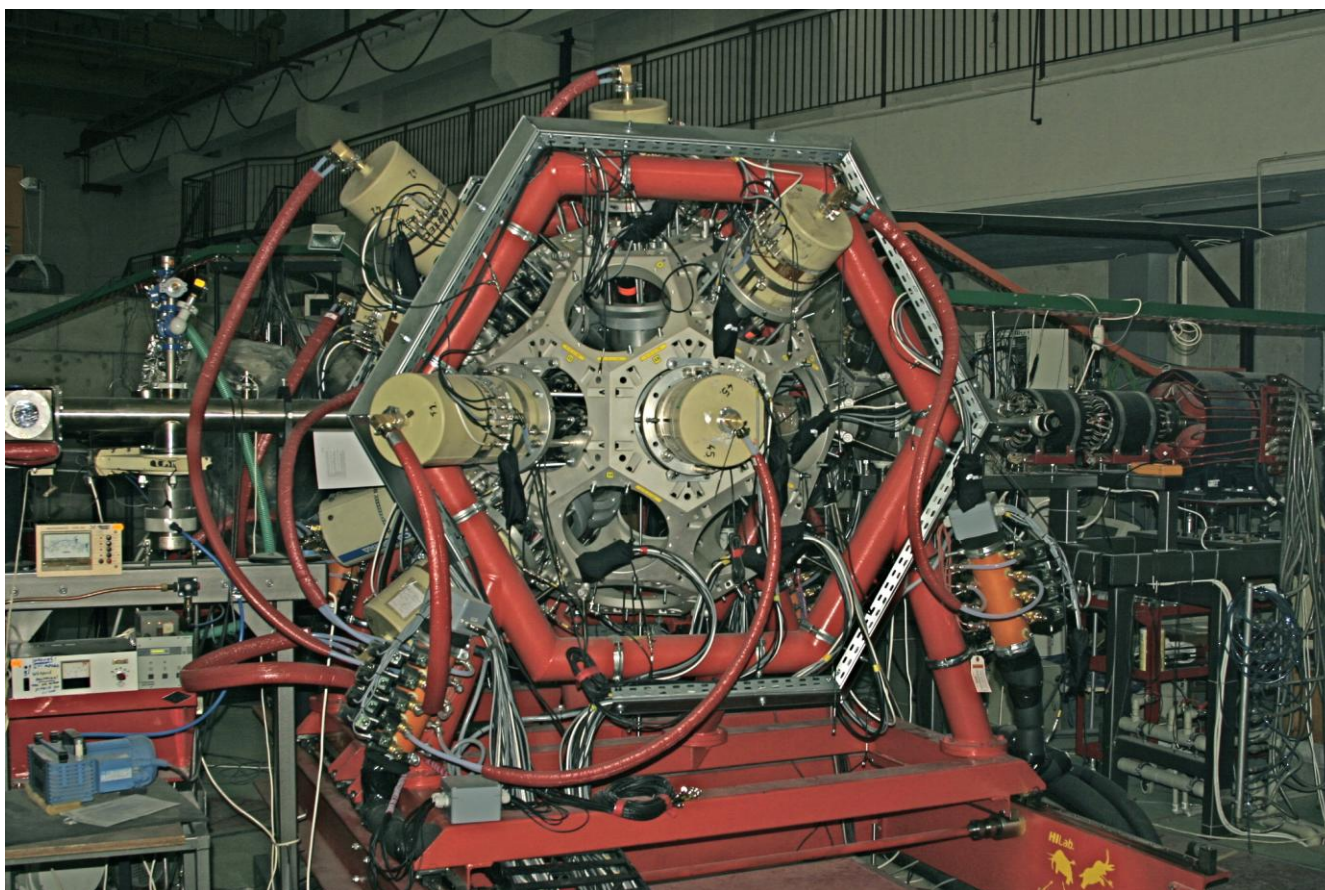
Rys. ŚLCJ-7.6: Plan eksperymentalnej części Laboratorium - cyklotron i hala eksperymentów (rys. I. Skrzeczanowska)

Istotnym parametrem wytwarzanych wiązek jest ich intensywność. Użyteczną jednostką intensywności otrzymujemy dzieląc natężenie prądu niesionego przez jony (wyrażone np. w nanoamperach) przez ładunek pojedynczego jonu. Tak obliczona wielkość daje informację o liczbie cząstek wiązki przechodzącej przez przekrój poprzeczny jonowodu w ciągu 1s. Jednostka ta oznaczana jest jako pA (*particle nanoamper*). Wiązki wyprowadzone z warszawskiego cyklotronu mają maksymalne intensywności od jednego do kilkuset pA. W ogólności, dla bardziej intensywnych wiązek, oczywiście stosuje się również jednostki μA i pA . Niekiedy, intensywność wiązki określa się podając wprost liczbę jonów na sekundę (oznaczenie p/s – *particles per second*). Jak łatwo obliczyć, 1 pA odpowiada $6.2 \cdot 10^9$ p/s. Aktualna lista wiązek wytwarzanych przez warszawski cyklotron ciężkich jonów, wraz z ich maksymalnymi intensywnościami, dostępna jest na stronie WWW Laboratorium.

7.3 Aparatura i eksperymenty

EAGLE

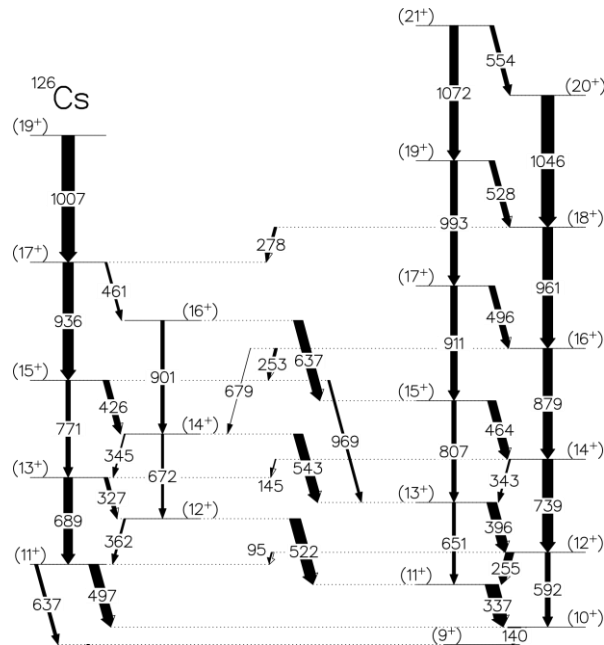
EAGLE (*central European Array for Gamma Levels Evaluations*) to wielodetektorowy układ do precyzyjnych pomiarów promieniowania gamma (rys. ŚLCJ-7.7). Określenie „precyzyjne” oznacza w tym przypadku przede wszystkim dużą dokładność pomiaru energii kwantów gamma. Mechanika układu pozwala na instalację do 30 detektorów germanowych HPGe (High Purity Germanium) w osłonach antykomptonowskich z kryształów BGO. Układ EAGLE służy do rejestrowania promieniowania gamma emitowanego z dyskretnych stanów wzbudzonych jąder atomowych, otrzymywanych w wyniku oddziaływania z tarczą wiązki ciężkich jonów przyspieszonych przez cyklotron. W większości eksperymentów prowadzonych z użyciem układu EAGLE, jądra w stanach wzbudzonych produkowane są w wyniku reakcji fuzji-ewaporacji lub wzbudzenia kulombowskiego. Możliwe są również inne procesy prowadzące do powstania jąder w stanach wzbudzonych, np. reakcje głęboko nieelastyczne, reakcje przekazu jednego lub kilku nukleonów, rozszczepienie indukowane wiązką ciężkich jonów, czy różnego rodzaju rozpady radioaktywne.



Rys. ŚLCJ-7.7: Układ detektorów germanowych EAGLE (fot. G. Jaworski)

Rejestracja promieniowania gamma pozwala na określenie energii stanów wzbudzonych, ich spinu, parzystości, czasów życia, momentów magnetycznych i prawdopodobieństw przejść (rozpadów) do innych stanów. Często wynikiem eksperymentów są schematy stanów wzbudzonych jądra (rys. ŚLCJ-

7.8), niejednokrotnie zawierające informacje o kilkudziesięciu lub nawet kilkuset stanach wzbudzonych konkretnego izotopu. W innych sytuacjach, celem eksperymentu może być szczegółowe zbadanie własności jednego stanu wzbudzonego, szczególnie istotnego dla weryfikacji fizycznej hipotezy, czy modelu, opisującego strukturę materii jądrowej. Mierzone parametry stanów wzbudzonych pozwalają na określenie kształtów jąder oraz ich dynamicznych własności - niosą informacje o rotacji, wibracji i innych ruchach nukleonów.



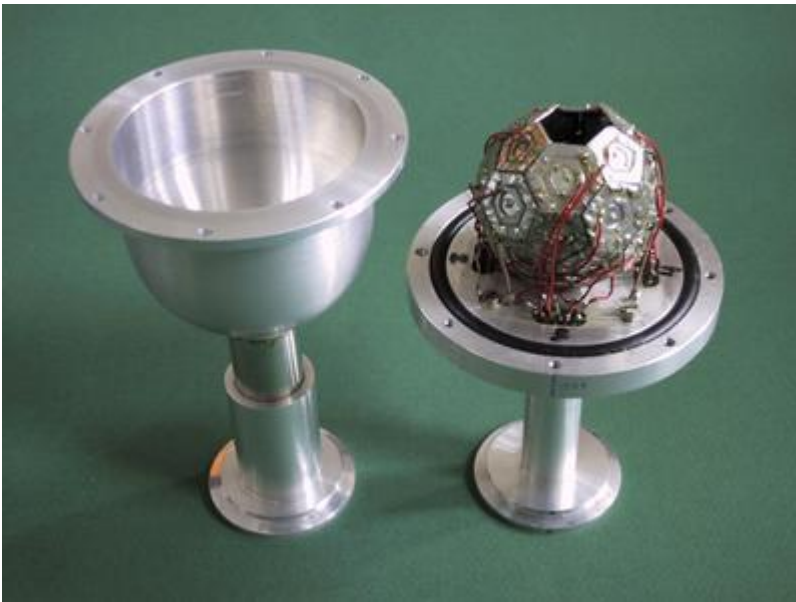
Rys. ŚLCJ-7.8: Schemat stanów wzbudzonych jądra ^{126}Cs analizowany z użyciem układu EAGLE. Analiza własności stanów wzbudzonych tego jądra, a szczególnie pomiary czasów życia, umożliwiły stwierdzenia łamania symetrii chiralnej (E.Grodner et al. Phys. Lett. B703 (2011) 46)

W układzie EAGLE okresowo instalowanych jest 20 dużych detektorów (o wydajności ok. 80% względem standardowego detektora NaI) wypożyczanych przez GAMMAPOOL - konsorcjum europejskich laboratoriów prowadzących badania z zakresu fizyki jądrowej, użyczające nowoczesną aparaturę badawczą wyróżniającym się projektem z tej dziedziny. Detektory takie zostały umieszczone w układzie EAGLE w roku 2011 i będą w nim używane do połowy roku 2013. Trwają starania o wypożyczenie detektorów GAMMAPOOL na kolejne okresy, po mniej więcej dwuletniej przerwie. Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów dysponuje też kilkunastoma, mniejszymi detektorami HPGe, wykorzystywanymi w okresach, gdy duże detektory HPGe są niedostępne.

Detektory germanowe zainstalowane w układzie EAGLE mogą być wykorzystywane łącznie z różnymi detektorami pomocniczymi. Są to np. urządzenia rejestrujące cząstki naładowane (protony, cząstki alfa), detektory neutronów i elektronów emitowanych w reakcji wiązki z tarczą, inne detektory promieniowania gamma, jak również układy służące do pomiarów czasów życia, czy momentów magnetycznych. Przykładem detektora pomocniczego jest filtr krotności promieniowania gamma, składający się z 60 scyntylatorów BaF_2 , pokrywających niemal pełny kąt bryłowy wokół tarczy –

niepokryte scyntylatorami są jedynie otwory na jonowód, detektory germanowe, przepusty kabli i niezbędne elementy mechaniczne. Detektory filtra krotności, w przeciwieństwie do detektorów germanowych, nie dają precyzyjnej informacji o energii pojedynczych przejść gamma, ale pozwalają na określenie liczby kwantów gamma emitowanych w reakcji i ich całkowitej energii, co jest istotne w niektórych eksperymentach z reakcjami fuzji-ewaporacji, szczególnie przy badaniu stanów o wysokich spinach.

W innych eksperymentach, wewnątrz układu EAGLE umieszczany jest 30-elementowy detektor krzemowy, tzw. SiBall, (rys. ŚLCJ-7.9), pozwalający na rejestrację oraz identyfikację protonów i cząstek alfa. Detektor ten umożliwia wybranie interesującego kanału reakcji fuzji-ewaporacji (określonego przez emisję konkretnej liczby protonów i cząstek alfa). Można również badać mechanizm reakcji, poprzez analizę rozkładów kątowych emitowanych cząstek.

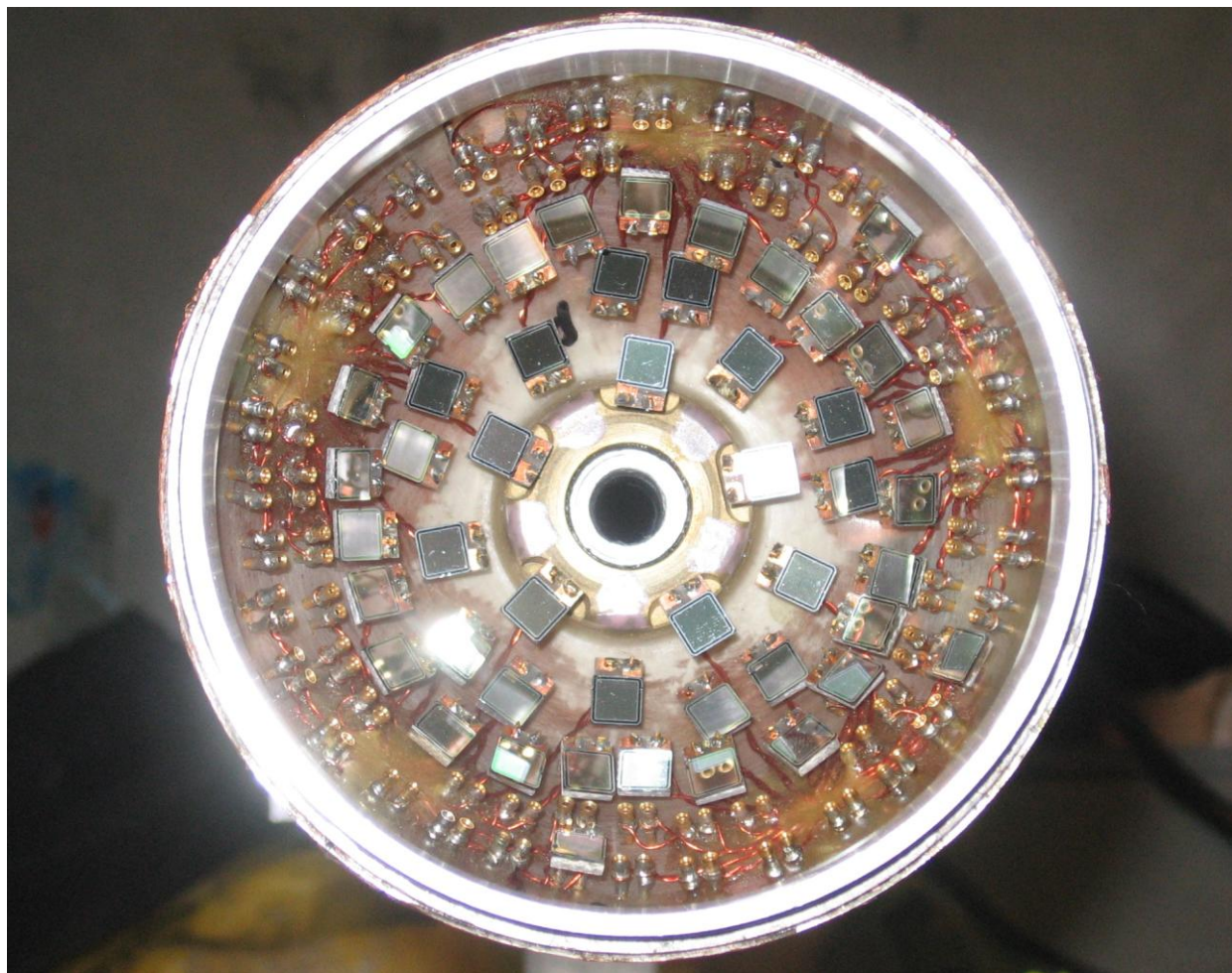


Rys. ŚLCJ-7.9: SiBall - układ detektorów krzemowych do rejestracji i identyfikacji protonów i cząstek alfa w koincydencji z detektorami germanowymi układu EAGLE (fot. A. Korczyk)

Ważnym rodzajem prac prowadzonych z użyciem układu EAGLE są badania struktury jąder atomowych metodami wzbudzenia kulombowskiego. W takich eksperymentach, energia wiązki jest tak dobierana, by tarcza i jony wiązki mogły ze sobą oddziaływać tylko poprzez oddziaływania elektrostatyczne – energia wiązki jest zbyt mała by przełamać barierę odpychania kulombowskiego dodatnio naładowanych jąder i w reakcji nie uczestniczą oddziaływania jądrowe. Proces wzbudzenia może być zatem opisany w sposób modelowo-niezależny, przy użyciu równań elektrodynamiki klasycznej. Zastosowanie różnych wiązek i badanie rozprożeń pod różnymi kątami pozwala w ogólności na wyznaczenie pełnego zestawu parametrów struktury elektromagnetycznej badanego jądra aż do stanów o wysokich spinach. Wyznaczone w ten sposób przejściowe i diagonalne elementy macierzowe przejść elektromagnetycznych pozwalają na wyliczenie rozmaitych danych spektroskopowych - czasów życia, stosunków rozgałęzień, współczynników zmieszania, prawdopodobieństw przejść, momentów kwadrupolowych. Znajomość pełnego zestawu elementów macierzowych pozwala także na określenie kształtu badanego jądra, niezależnie w każdym stanie wzbudzonym.

W eksperymentach wzbudzenia kulombowskiego realizowanych z użyciem EAGLE, tarcza

umieszczana jest w komorze, w której instaluje się maksymalnie 110 detektorów krzemowych typu PIN-dioda (rys. ŚLCJ-7.10), służących do detekcji ciężkich jąder. Detektory takie pozwalają na zarejestrowanie elastycznie rozproszonej na tarczy cząstki wiązki lub jądra wybitego z tarczy. Znajomość kąta rejestracji i energii jednej z cząstek uczestniczących w rozpraszaniu elastycznym, pozwala na odtworzenie kinematyki reakcji – określenie wartości i kierunku wektorów prędkości partnerów reakcji. Dzięki temu energie kwantów gamma rejestrowanych w detektorach germanowych mogą być skorygowane o przesunięcie dopplerowskie, wynikające z ruchu źródła promieniowania. Możliwa jest też selekcja przypadków, w których rozproszenie nastąpiło pod określonym kątem, a więc określona część energii kinetycznej pocisku została przekazana jądro tarczy, co wpływa na populację poszczególnych stanów wzbudzonych w obu jądrach i jest wykorzystywane przy analizie danych.

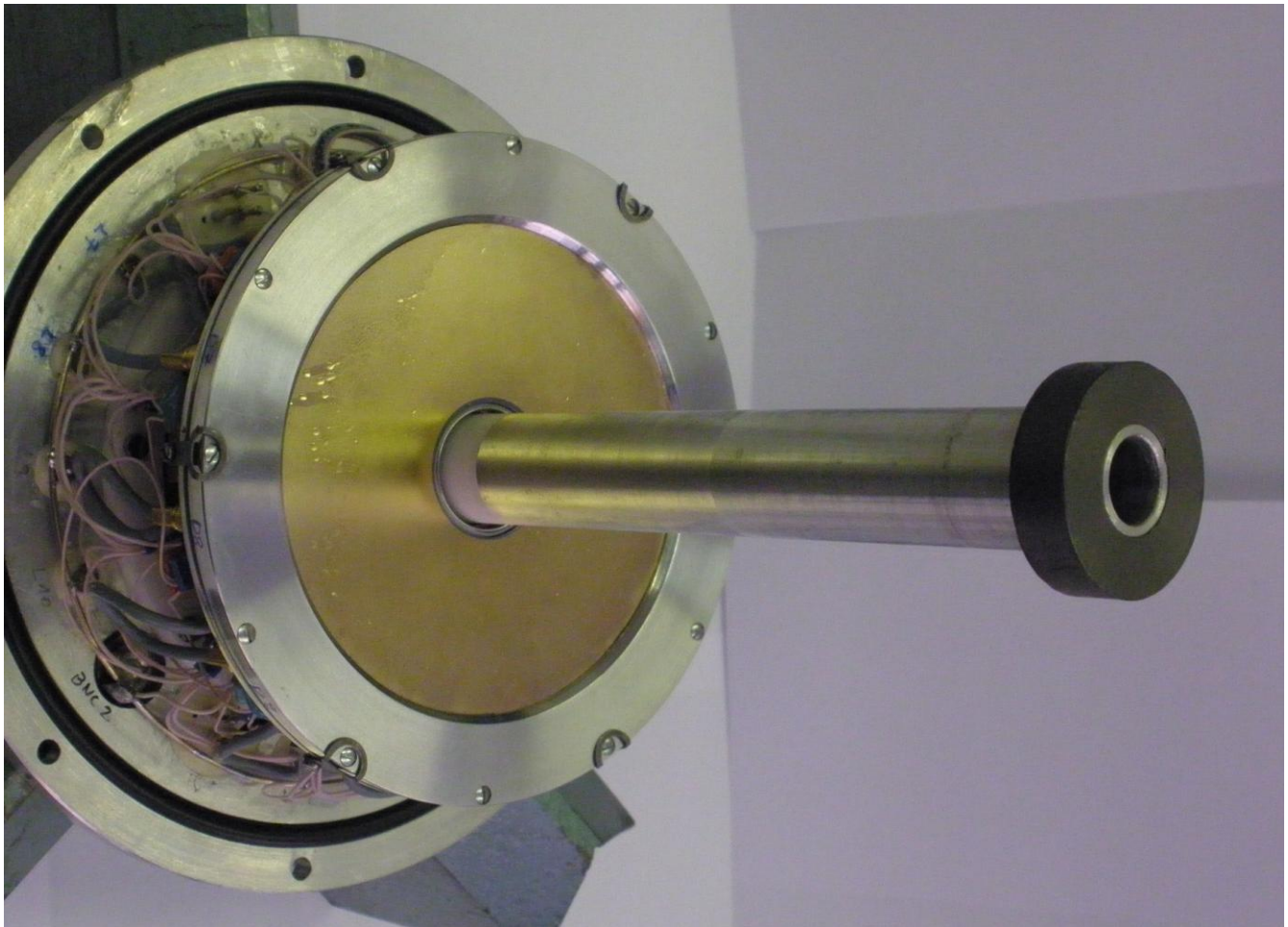


Rys. ŚLCJ-7.10: Wnętrze komory wykorzystywanej w eksperymentach, w których stany wzbudzone jąder badane są metodą wzbudzenia kulombowskiego. Widoczne są detektory typu PIN-dioda (fot. K. Wrzosek-Lipska).

Przejścia elektromagnetyczne pomiędzy stanami jądrowymi mogą zachodzić nie poprzez emisję promieniowania gamma, a przez przekazanie energii elektronowi znajdującemu się na powłoce atomowej i emisję tego elektronu (zjawisko konwersji wewnętrznej). Takie elektrony mogą być rejestrowane przez specjalny układ detektorów krzemowych. Przy pomiarach elektronów konwersji „na wiązkę” dużym utrudnieniem jest dominujące tło elektronów wybijanych z powłok atomowych w

wyniku oddziaływania wiązki z tarczą (tzw. elektrony delta). Dlatego, bardzo istotną częścią spektrometru elektronów konwersji jest układ przesłon i magnesów, osłaniających detektory krzemowe przed elektronami delta. W ŚLCJ, w połączeniu z układem EAGLE, wykorzystywany jest spektrometr elektronów (rys. ŚLCJ-7.11) skonstruowany w Uniwersytecie Łódzkim.

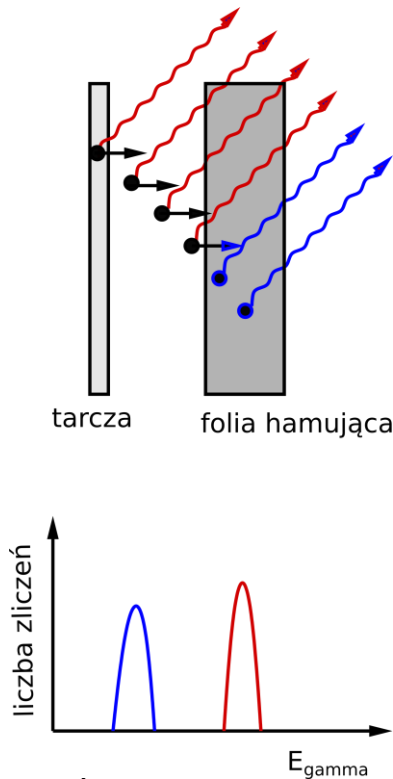
Prawdopodobieństwo konwersji wewnętrznej jest silnie zależne od energii, parzystości, multipolowości i rodzaju przejścia elektromagnetycznego (przejście elektryczne lub magnetyczne). Niskonergetyczne przejścia w jądrach o dużej liczbie atomowej (Z), są tak silnie skonwertowane, że ich obserwacja możliwa jest jedynie przez rejestrację elektronów (przynajmniej brak emisji kwantów gamma). W innych sytuacjach, pomiar elektronów konwersji daje precyzyjne informacje o własnościach przejść elektromagnetycznych i pozwala wydedukować własności uczestniczących w procesie stanów.



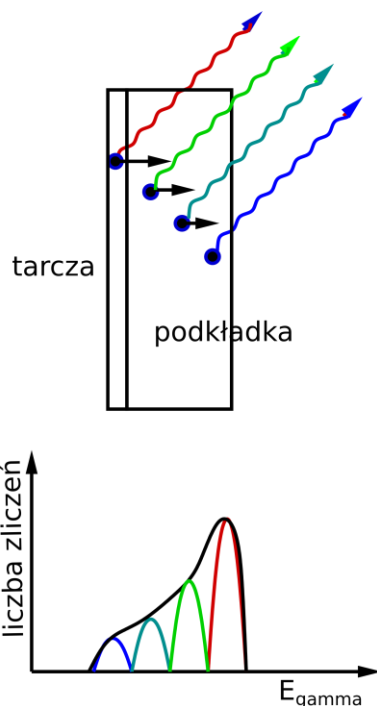
Rys. ŚLCJ-7.11: Część detekcyjna spektrometru elektronów (fot. J. Perkowski)

Istotnym parametrem stanów jąder atomowych są ich czasy życia. W przypadku stanów żyjących długo (czas połowicznego zaniku ponad 1 ns), możliwe jest bezpośrednie wyznaczenie czasu życia poprzez pomiar rozkładu czasowego liczby zliczeń rejestrowanych w detektorach germanowych. W przypadku stanów o krótszych czasach życia, stosuje się metody oparte o zjawisko Dopplera. Pomiary czasów życia w zakresie 1 ns – 2 ps wykonywane są za pomocą urządzenia o nazwie plunger (brak jest polskiego odpowiednika nazwy, tłumacząc dosłownie należałoby użyć określenia „grzeźnik”), które umożliwia obserwację kwantów gamma emitowanych przez jądra w locie, po oddziaływaniu w

cienkiej tarczy, oraz kwantów emitowanych później, po zatrzymaniu jąder w folii oddalonej o 10 do 500 μm od tej tarczy. Energia kwantów emitowanych w tych dwóch sytuacjach różni się o wartość przesunięcia dopplerowskiego. Stosunek liczb kwantów emitowanych przez lecące jądra i jądra zatrzymane zależy od odległości tarcza-folia oraz od czasu życia emitującego poziomu (rys. ŚLCJ-7.12). Jeszcze krótsze czasy życia wyznacza się analizując kształt pików w widmie kwantów gamma, emitowanym w trakcie spowalniania jąder w grubej tarczy, lub w podkładce tarczy – metoda ta nosi nazwę DSAM (*Doppler Shift Attenuation Method*). W takich pomiarach pik rejestrowany w widmie gamma ma kształt zależny od czasu życia (rys. ŚLCJ-7.13). Analizując ten kształt można zmierzyć czasy porównywalne z czasami hamowania jąder w tarczy, czyli 10^{-11} - 10^{-14} s.



Rys. ŚLCJ-7.12: Pomiar czasu życia z użyciem plungera. Kolorem czerwonym oznaczono kwanty gamma emitowane w locie, kolorem czerwonym - w spoczynku, po zatrzymaniu produktów reakcji w folii hamującej (rys. M. Zielińska).



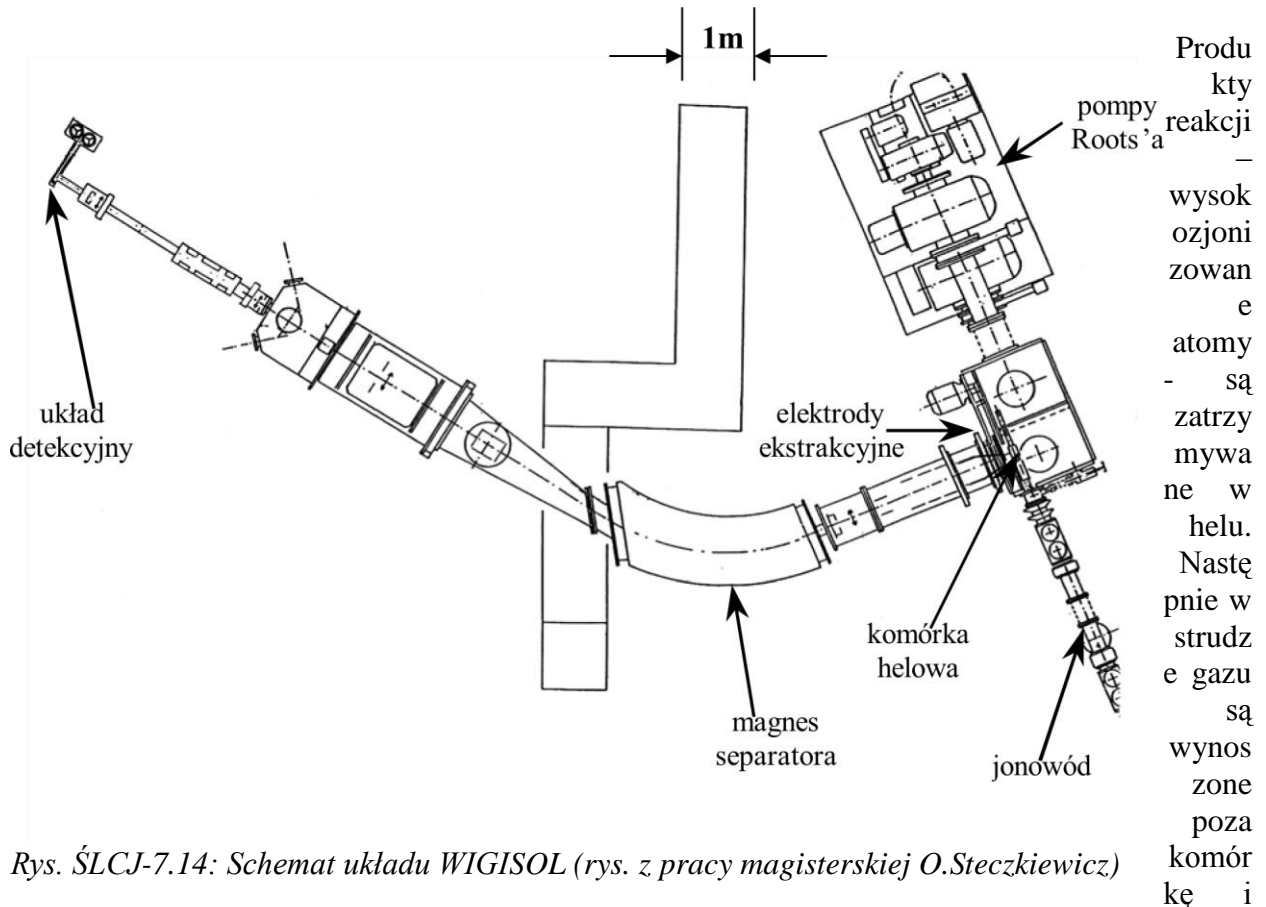
Rys. ŚLCJ-7.13: Pomiar czasu życia metodą DSAM. Kolorem czerwonym oznaczono kwanty gamma emitowane w locie, przy pełnej prędkości emitującego jądra. Kolor niebieski oznacza kwanty emitowane w spoczynku, a zielony – przy pośrednich prędkościach (rys. M.Zielińska)

WIGISOL

W wyniku oddziaływania wiązki jonów z tarczą, np. w reakcjach fuzji-ewaporacji, powstaje wiele różnych izotopów. Niektóre z nich są bardzo interesujące, lecz znajdują się daleko od ścieżki stabilności i mają krótkie czasy życia. Poznanie własności takich nuklidów wymaga zastosowania układów, w których wybrane egzotyczne jądra atomowe będą w krótkim czasie wyseparowane spośród wielu różnych produktów reakcji i następnie umieszczone w stanowisku detekcyjnym, gdzie będzie możliwe badanie ich rozpadów. Zainstalowane w ŚLCJ urządzenie o nazwie WIGISOL (*Warsaw Ion Guide and Isotope Separator On-Line*) umożliwia obserwację krótkożyjących produkcji reakcji. Minimalna wartość okresu połowicznego zaniku, przy której możliwe jest badanie rozpadów radioaktywnych z użyciem WIGISOL, to mniej więcej 0.1 ms. Badanie prowadzone za pomocą WIGISOL koncentrują się na poszukiwaniach stanów izomerycznych w jądrach cięższych od ołowiu, rozpadających się poprzez emisję cząstki alfa.

W układzie WIGISOL (rys. ŚLCJ-7.14) jądra atomowe powstałe w cienkiej tarczy bombardowanej przez wiązkę jonów z cyklotronu wpadają do aluminiowej komory, przez którą przepływa struga helu.

Oś przepływu helu jest prostopadła do kierunku wiązki z cyklotronu. Materiał tarczy napylony jest od wewnątrz na okienko komory. Okienko to musi być na tyle cienkie, by nie zatrzymywało wiązki jonów. Jednocześnie musi utrzymać wewnątrz komory ciśnienie dochodzące do 350 hPa. Spełnienie tych przeciwstawnych wymagań jest możliwe dzięki zastosowaniu specjalnego materiału - okienko wykonane jest z materiału o nazwie Havar i ma grubość ok. 2 μm .



Rys. ŚLCJ-7.14: Schemat układu WIGISOL (rys. z pracy magisterskiej O.Steczkiwicz)

wpadają w obszar ekstrakcji. Jony są przyspieszane w potencjale elektrycznym 40 kV i przelatują dalej w kierunku magnesu separatora. Hel - na tym etapie już zbędny, a wręcz niepożądany, gdyż mógłby rozpraszać jony - jest w większości zatrzymywany przez skomplikowany układ przesłon z niewielkimi otworami, kierowany na zewnątrz obszaru ekstrakcji i odpompowywany przez wysokowydajne pompy.

Separacja produktów odbywa się w układzie, którego głównym elementem jest magnes o promieniu 1500 mm i kącie zakrzywiającym 55 stopni. Tor ruchu naładowanych cząstek w polu magnetycznym zależy od ich energii, ładunku i masy. Większość jonów po ekstrakcji ma taki sam ładunek i podobną prędkość, więc tor ruchu zależy od liczby masowej A. Parametry jonowodu są tak dobrane, by do układu detekcji mogły dotrzeć tylko wybrane izotopy.

W układzie detekcyjnym jony zatrzymywane są na folii węglowej, wokół której rozmieszczone są detektory krzemowe, pokrywające 65% pełnego kąta bryłowego. Zatrzymane na folii produkty ulegają rozpadom z emisją cząstek alfa o charakterystycznych energiach, co umożliwia ich identyfikację, wyznaczenie czasów życia oraz ewentualnie określenie energii wzbudzenia stanów izomerycznych.

ICARE

ICARE to wielodetektorowy układ detekcji cząstek naładowanych (rys. ŚLCJ-7.15 i ŚLCJ-7.16),

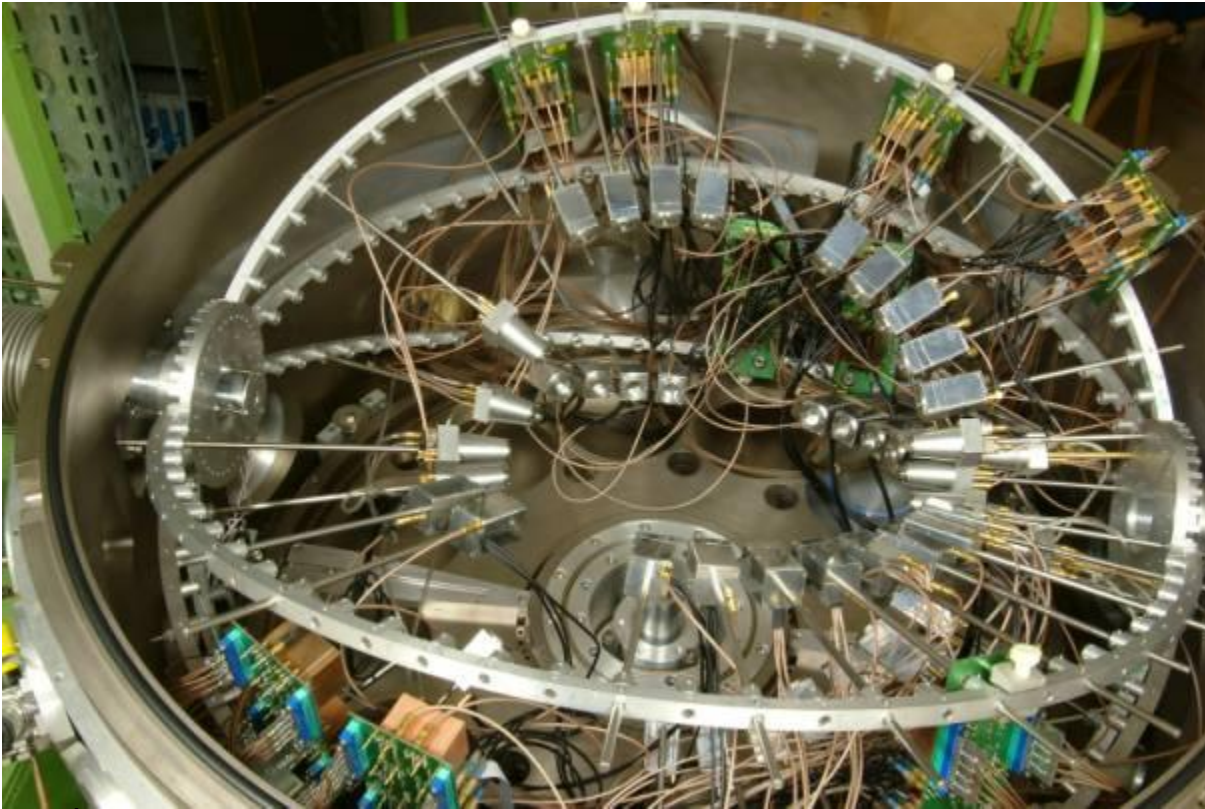
sprowadzony do Laboratorium z ośrodka IreS ze Strasburga we Francji w 2006 roku. W komorze ICARE o średnicy 1 m zainstalowanych może być do 48 gazowych i półprzewodnikowych detektorów umożliwiających jednoczesny pomiar straty energii cząstki (ΔE) w cienkiej warstwie materiału oraz całkowitej energii cząstki (E). Są to tzw. „teleskopy E- ΔE ”. Jednoczesny pomiar tych dwóch parametrów umożliwia precyzyjną identyfikację cząstek.



Rys. ŚLCJ-7.15: Komora ICARE do pomiarów cząstek naładowanych (fot. E. Piasecki)

Konstrukcja komory pozwala dopasować geometrię ustawienia detektorów do potrzeb danego pomiaru oraz umożliwia zmianę położenia kąтового części detektorów w trakcie pomiaru bez konieczności otwierania komory. W komorze można również zainstalować układ identyfikujący produkty reakcji metodą czasu przelotu (ToF). Pomiaru czasu inicjowany jest przez detektor typu *Microchannel Plate* (MCP), a kończony przez detektor krzemowy. Układ taki umożliwia pomiaru czasu przelotu z dokładnością do ok. 250 ps.

Układ ICARE wykorzystywany jest do eksperymentów, które wymagają dużej precyzji przy identyfikacji i pomiarze energii cząstek naładowanych. Są to m.in. badania mechanizmów reakcji jądrowych, realizowane przez pomiary rozkładów kątowych produktów reakcji oraz przekrojów czynnych, przy energiach wiązki bliskich barierze kulombowskiej. Inne eksperymenty służą wyznaczeniu rozkładów wysokości barier na fuzję metodami rozpraszania quasi-elastycznego. Planowane są badania własności izotopów leżących daleko od ścieżki stabilności produkowanych w reakcjach ciężkojonowych oraz badania deformacji jąder poprzez analizę widm emitowanych lekkich cząstek naładowanych.

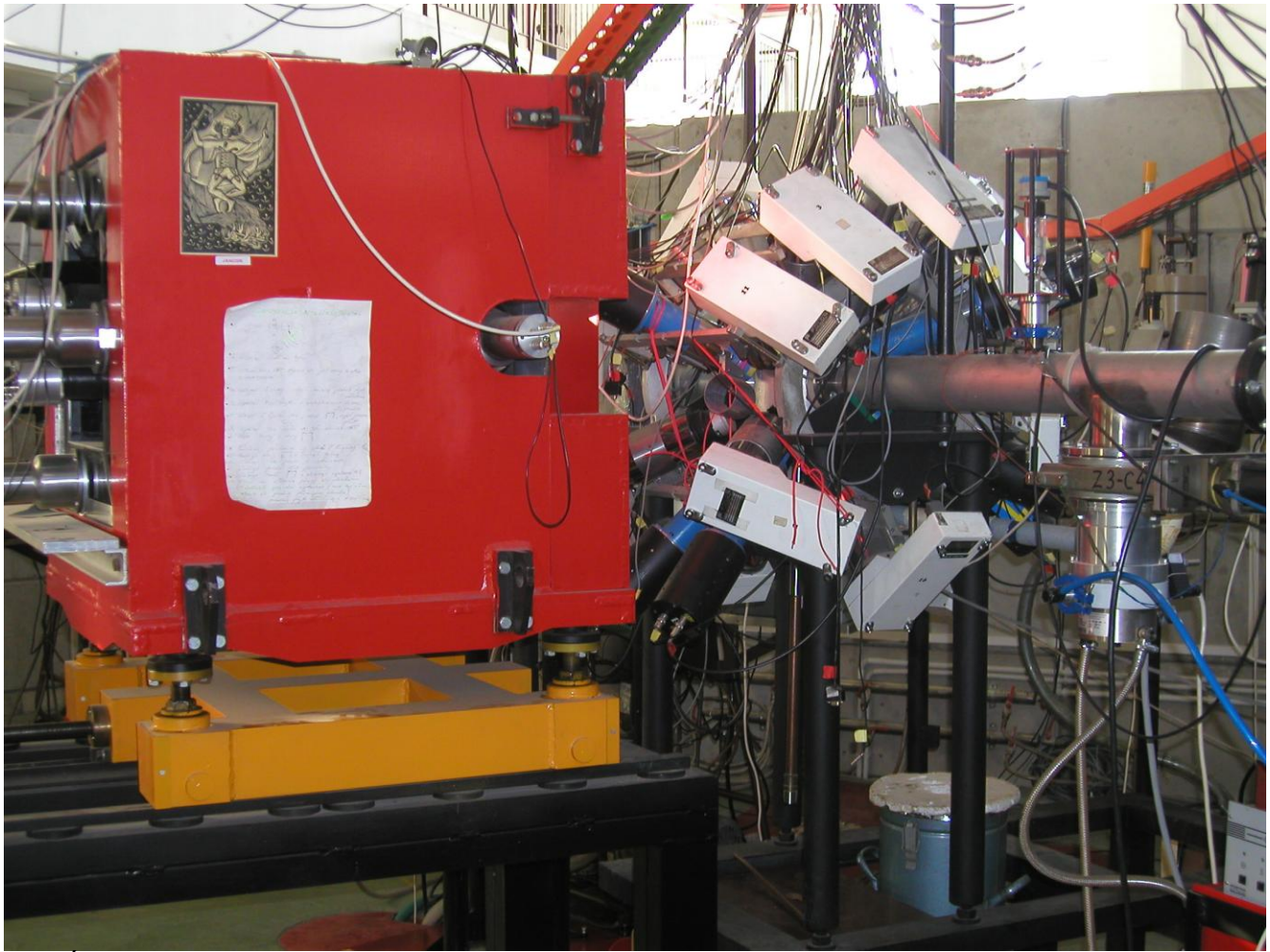


Rys. ŚLCJ-7.16: Wnętrze komory ICARE (fot. IReS Strasbourg)

JANOSIK

JANOSIK to wielodetektorowy układ pomiarowy przeznaczony do detekcji fotonów o energiach od 4 do 40 MeV (rys. ŚLCJ-7.17). Głównym elementem układu jest duży scyntylator z kryształu NaI(Tl) (25,4 cm x 29,0 cm). Promieniowanie kosmiczne tworzy w takim detektorze wysokie, niepożądane tło i dlatego detektor znajduje się wewnątrz trójwarstwowej osłony. Wewnętrzna warstwa osłony ma charakter aktywny - wykonana jest z plastikowego scyntylatora, co umożliwi odrzucenie przypadków, w których zarejestrowany został sygnał w osłonie. Środkowa warstwa zatrzymuje (spowalnia) neutrony i wykonana jest z wodoru litu ${}^6\text{LiH}$, zawierającym egzotyczny izotop ${}^6\text{Li}$. Zewnętrzną warstwę tworzy powłoka ze specjalnie dobranego, niskoaktywnego ołowiu. Całkowita wydajność osłony dla promieniowania kosmicznego wynosi ponad 98%. Detektor wraz z osłoną może być ustawiany w różnych odległościach od tarczy (w zakresie od 60 do 120 cm) oraz pod różnymi kątami w stosunku do osi wiązki, w zakresie od 40 do 140 stopni. W układzie zainstalowany jest też 32-elementowy filtr krotności gamma z detektorów scyntylacyjnych BaF_2 i NaI(Tl). Ponadto możliwe jest wykorzystanie zestawu 16 detektorów krzemowych do rejestracji cząstek naładowanych.

JANOSIK służy do rejestracji wysokoenergetycznego promieniowania gamma emitowanego jako wynik deekscytacji kolektywnych oscylacji materii jądrowej, szczególnie tzw. gigantycznych rezonansów dipolowych (*Giant Dipole Resonance – GDR*). Gigantyczne rezonanse dipolowe są oscylacjami protonów względem neutronów w jądrach atomowych. Indukowane mogą być w wyniku oddziaływania wiązki jonów z tarczą i związane są z emisją pojedynczych kwantów dipolowego promieniowania elektrycznego (przejście E1).

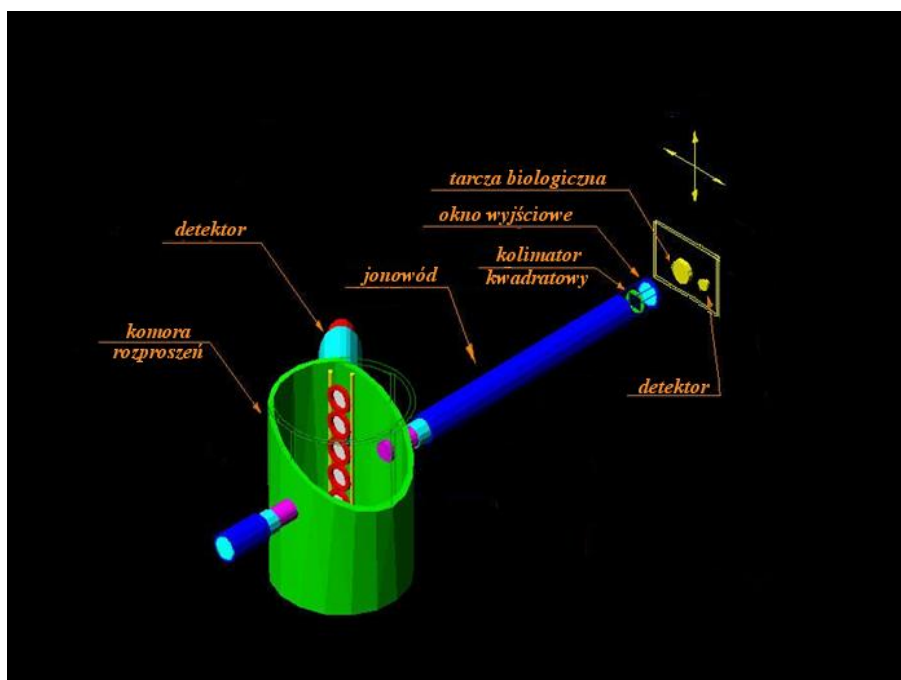


Rys. ŚLCJ-7.17: Układ do rejestracji wysokoenergetycznego promieniowania gamma JANOSIK. Na pierwszym planie widoczna jest masywna (czerwona) osłona detektora NaI (fot. J. Pluta).

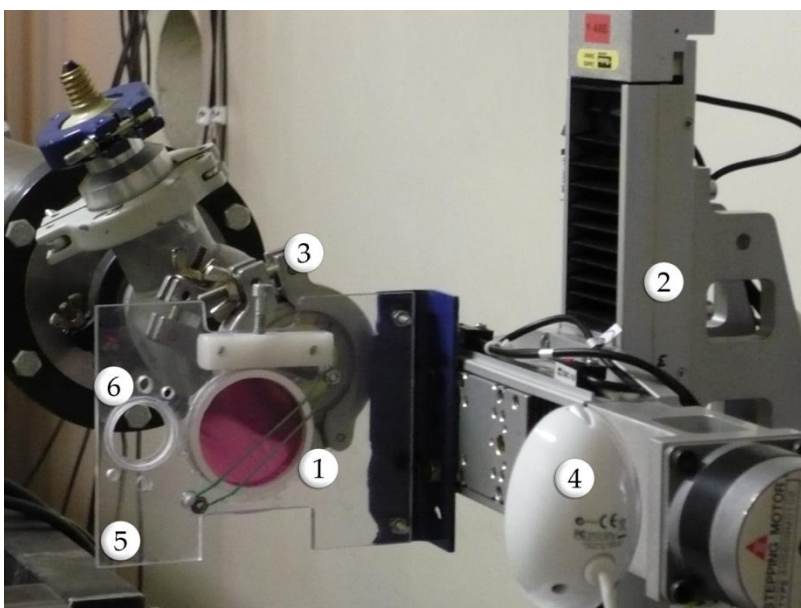
EKSPERYMENTY RADIOBIOLOGICZNE

Znajomość oddziaływania promieniowania jonizującego na organizmy żywe ma zasadnicze znaczenie we wszelkich medycznych zastosowaniach metod jądrowych oraz w ochronie radiologicznej. W ŚLCJ prowadzone są badania, których celem jest poznanie fizycznych mechanizmów zmian genetycznych indukowanych w jądrze komórkowym w wyniku bombardowania ciężkimi jonami. Prace te prowadzone są w specjalnie do tego celu zbudowanym układzie, przedstawionym na rys. ŚLCJ-7.18 i ŚLCJ-7.19. Przyspieszone przez cyklotron wiązki jonów węgla lub neonu o energii 5-9 MeV/nukleon są wstępnie rozpraszane na tarczy wykonanej z cienkiej folii złotej, w celu otrzymania możliwie szerokiego i jednorodnego strumienia cząstek o odpowiedniej energii. Po rozproszeniu i przejściu w jonowodzie odległości około 2 metrów za tarczą, wiązka jest wyprowadzana do atmosfery, przez okienko z materiału o nazwie Havar. Za okienkiem umieszczana jest próbka z materiałem biologicznym. Materiałem tym są najczęściej komórki jajnika chomika chińskiego (CHO-K1). W układzie znajduje się też detektor krzemowy, który pozwala określić liczbę jonów bombardujących próbkę i wyznaczyć energię deponowaną w próbce. Wartości współczynnika liniowego przekazu energii (LET) (czyli deponowana energia na jednostkę grubości materiału) mieści się w granicach 900-400 keV/ μm dla jonów węgla oraz 1700-1000 keV/ μm dla neonu.

Po naświetleniu, próbka biologiczna jest badana w celu określenia liczby powstałych uszkodzeń w komórkach, w zależności od wartości LET, przy czym stosowane są tu trzy metody. Pierwsza, to tzw. test przeżywalności, w którym liczbę żywych komórek w materiale ocenia się przez pomiar liczby kolonii komórek (widocznych gołym okiem), po ich kilkakrotnym (6-7 razy) podziale, co następuje mniej więcej 3 doby od naświetlenia. Materiał naświetlony porównywany jest przy tym z próbką kontrolną, która nie była naświetlana. Druga metoda to wyznaczenie pod mikroskopem liczby chromosomów o uszkodzeniach określonego typu, a trzecia obserwacja przy podziałach komórek tzw. mikrojąder komórkowych i określenie liczby przypadków, w których występuje co najmniej jedno mikrojądro.



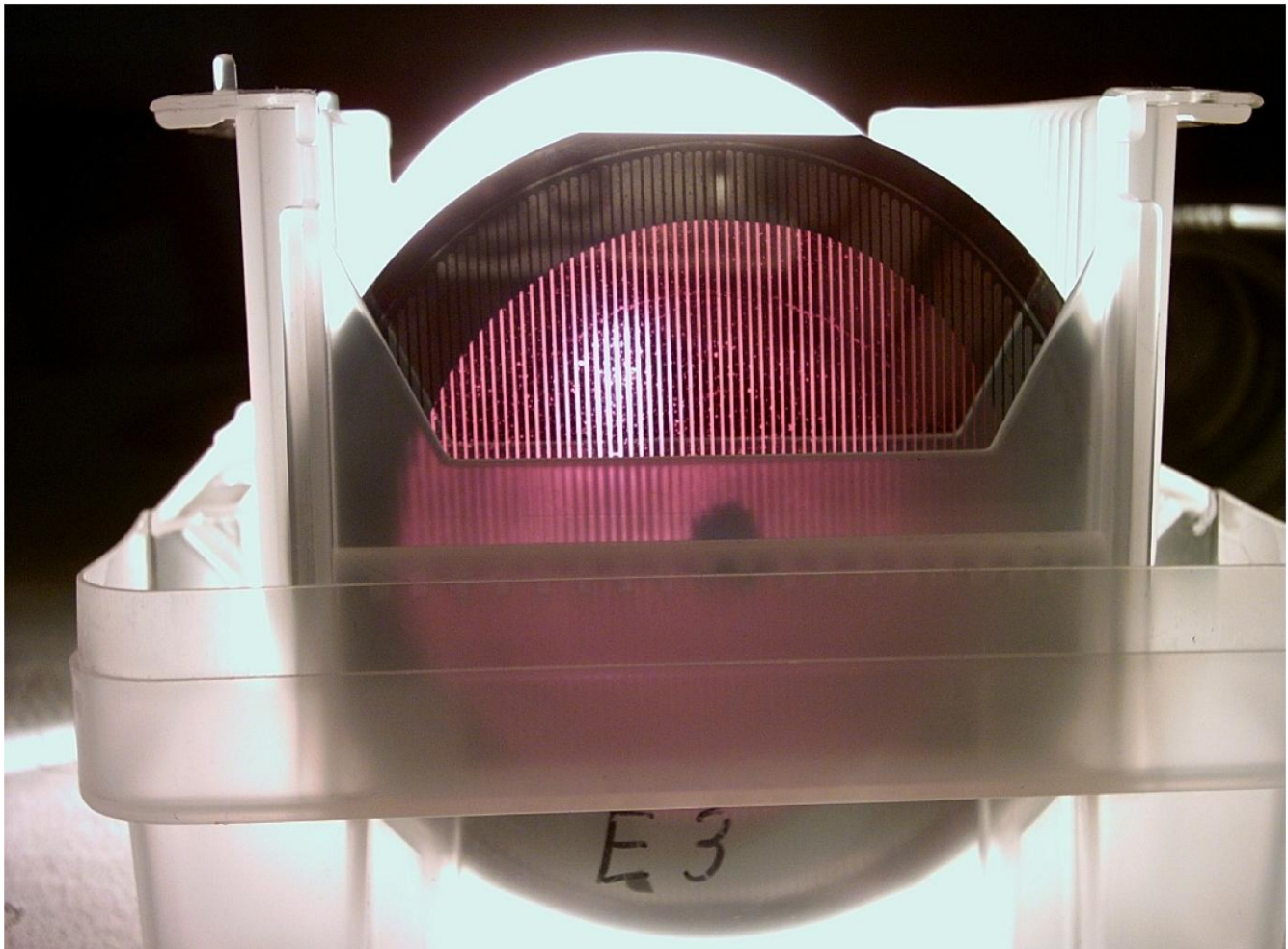
Rys. ŚLCJ-7.18: Schemat układu pomiarowego do badań radiobiologicznych (rys. Z.Szepliński).



Rys. ŚLCJ-7.19: Widok układu eksperymentalnego służącego do napromieniania hodowli komórkowych wiązkami jonów. Specjalna szalka Petriego z komórkami w pożywce (nr 1) umocowana w płytce (nr 5) przytwierdzonej do stolika pomiarowego (nr 2), kamera internetowa (nr 4), zakończone folią Havarową wyjście jonowodu (nr 3), miejsce na detektor pod kątem 0 stopni względem podającej wiązki (nr 6) (fot. Z. Szefliński)

PRACOWNIA DETEKTORÓW CZĄSTEK

W pracowni opracowuje się i wykorzystuje nowe technologie budowy detektorów cząstek naładowanych, w szczególności rozwijana jest technologia produkcji monolitycznych detektorów krzemowych metodą kwazi-seletywnej epitaksji. Nowym projektem, który rozpoczęto w 2007 r., jest produkcja detektorów diamentowych opartych na monokryształach. Detektory takie mają kilka cech bardzo pożądanых przez eksperymentatorów: dają szybki sygnał, mogą pracować w wysokich temperaturach i, co najważniejsze, są znacznie bardziej odporne na uszkodzenia radiacyjne, niż detektory półprzewodnikowe. W ramach międzynarodowego projektu FAZIA prowadzone są pomiary jednorodności warstw krzemu i opracowywana jest metoda korekty oporności z wykorzystaniem strumienia neutronów z reaktora MARIA w Świerku. Wytworzenie detektorów krzemowych o wysokiej jednorodności pozwoli na wykorzystanie metody analizy kształtu impulsu do identyfikacji mas produktów reakcji jądrowych. Wspomniany wcześniej układ SiBall również został skonstruowany w pracowni detektorów cząstek. Na rys. ŚLCJ-7.20 przedstawiono cienki krzemowy detektor paskowy zbudowany z wykorzystaniem nowej technologii opracowanej w ŚLCJ. Laboratorium jest liczącym się ośrodkiem rozwijającym technologie półprzewodników dla potrzeb badań jądrowych.



PRACOWNIA TARCZOWA

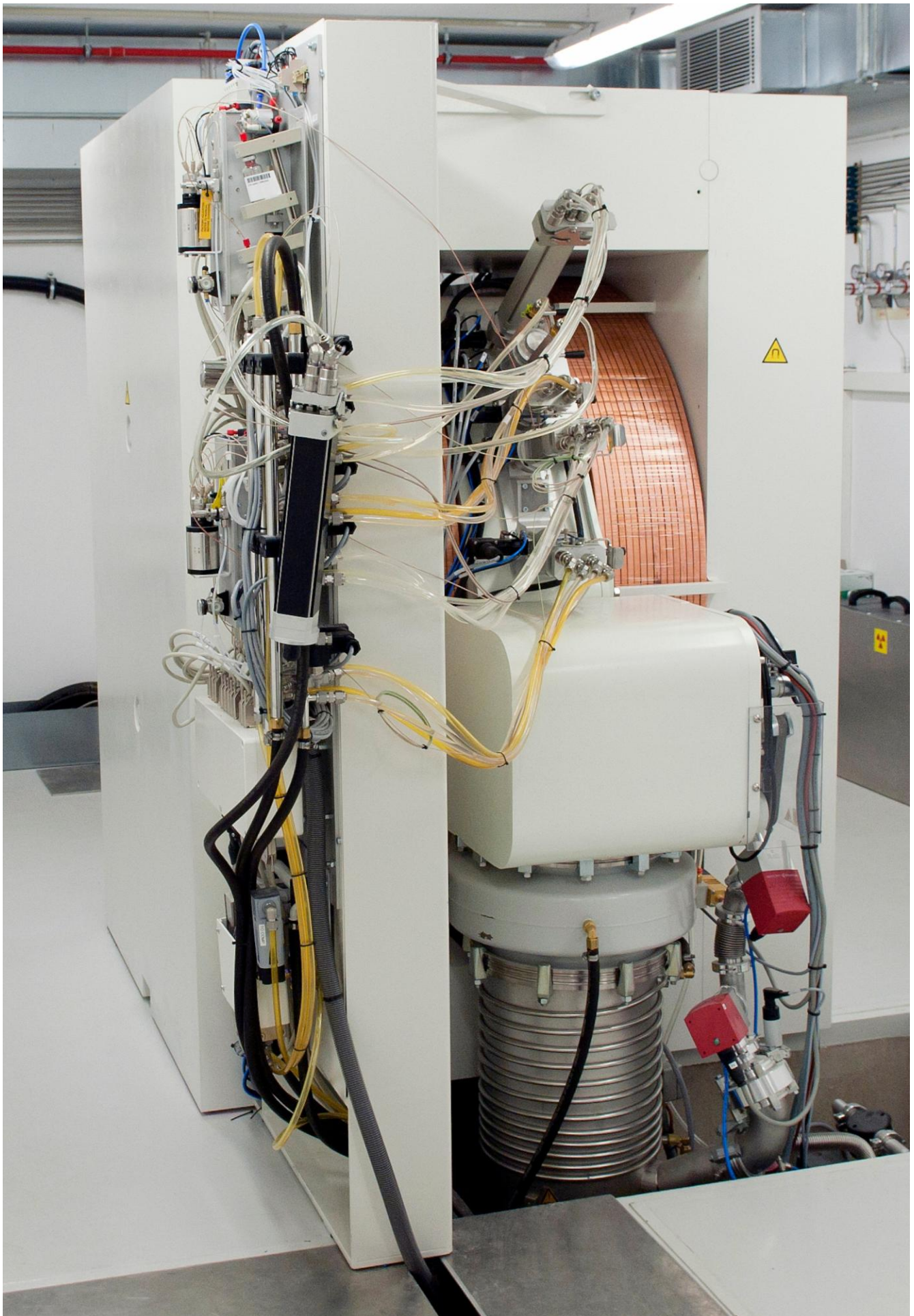
We wszystkich eksperymentach wykonywanych z wiązkami jonów przyspieszonych przez akcelerator, jony bombardują specjalnie przygotowany materiał, czyli tarczę. W ŚLCJ funkcjonuje pracownia przygotowująca tarcze na potrzeby wielu eksperymentów. W pracowni tej rozwijane są również nowe metody wytwarzania tarcz.

Tarcza może być gazem, cieczą lub ciałem stałym. W eksperymentach fizyki jądrowej najczęściej używane są tarcze w postaci ciała stałego. Parametry tarcz są narzucane przez wymogi eksperymentu. Tarcze często wykonane są z kosztownych materiałów, m.in. takich w których zawartość konkretnego izotopu danego pierwiastka została sztucznie zwiększona, w stosunku do jego naturalnej abundancji (mówimy wtedy o materiale izotopowo wzbogaconym). Istotnymi parametrami tarcz są grubość, czystość (również stopień wzbogacenia), obecność lub brak podkładki. Przy przygotowywaniu tarcz stosuje się metody mechaniczne (walcowanie, prasowanie), elektro-chemiczne (elektro-osadzanie ze środowiska wodnego lub organicznego), czy osadzanie par materiału w wysokiej próżni. Jako podkładki używane są cienkie folie metalowe, folie węglowe lub materiały plastikowe, np. Mylar, Kapton, Formvar.

7.5 Działalność w zakresie fizyki medycznej

Ośrodek PET

Ośrodek Produkcji i Badania Radiofarmaceutyków (OPBRT-PET-UW) w Środowiskowym Laboratorium Ciężkich Jonów, którego budowa została zakończona w czerwcu 2012 roku, będzie jednocześnie centrum badawczym oraz producentem radiofarmaceutyków stosowanych w technice Tomografii Pozytonowej (PET). Ośrodek wyposażony jest w cyklotron PETrace firmy General Electric, przyspieszający protony do energii 16.5 MeV, przy czym intensywność wiązek (nateżenie prądu) sięga aż 75 μA . Istnieje również możliwość przyspieszania w tym cyklotronie deuteronów do energii 8.4 MeV.



Rys. ŚLCJ-7.21: Cyklotron PETrace w ŚLCJ (fot. M. Kaźmierczak)

izotop ^{18}F (fluorodeoksyglukoza - FDG), na które składają się: dwa syntezery FDG, podwójna komora gorąca dla syntezatorów, dwie tarcze do produkcji ^{18}F , dwa dyspensery i dwie komory gorące dla dyspenserów. Posiadane tarcze pozwalają na uzyskanie maksymalnej aktywności wytworzonego izotopu, aż do 3.5 Ci. Przewidywane jest też wytwarzanie innych radiofarmaceutyków opartych na izotopie fluoru ^{18}F (^{18}F -cholina, ^{18}F -DOPA) jak i innych radioizotopach krótkożyjących, takich jak: ^{11}C (^{11}C -metionina) ^{15}O (H_2^{15}O) czy radioizotopach metalicznych.

Ośrodek będzie produkował radiofarmaceutyki na potrzeby warszawskich szpitali. Będą w nim również prowadzone prace badawcze nad nowymi farmaceutykami.

Produkcja ^{211}At

We współpracy z Uniwersytetem Śląskim, Instytutem Fizyki Jądrowej PAN oraz Instytutem Chemii i Techniki Jądrowej w ŚLCJ UW realizowany jest projekt związany z zastosowaniem izotopów alfa-promieniotwórczych w radioterapii nowotworów. W jego ramach, w roku 2011 rozpoczęto wytwarzanie w ŚLCJ izotopu astatu ^{211}At .

Izotop ^{211}At jest jednym z kilku izotopów najbardziej użytecznych w terapii nowotworów. Charakteryzuje się on stosunkowo niską energią emitowanych cząstek alfa, z której wynika ich niewielki zasięg w tkankach (50-70 μm), brakiem emisji promieniowania gamma, oraz krótkim czasem połowicznego zaniku (7.2 godziny). Wyprodukowanie tego izotopu jest jednak trudne – wymaga użycia akceleratora cząstek alfa i obecnie możliwe jest jedynie w kilku laboratoriach w Europie.

W ŚLCJ izotop ^{211}At produkowany jest z wykorzystaniem wiązki cząstek alfa przyspieszonych przez cyklotron do energii 31 MeV. Stosuje się tarczę ^{209}Bi , w której ^{211}At otrzymywany jest po emisji 2 neutronów z jądra złożonego powstałego w wyniku fuzji cząstki alfa z jądrem tarczy. Niezwykle istotne jest precyzyjne kontrolowanie energii wiązki w takim procesie, ponieważ zbyt wysoka energia prowadzi do wytworzenia silnie toksycznego izotopu ^{210}Po , produkowanego z emisją 3 neutronów. Próbkę naświetlonego wiązką alfa ^{209}Bi (zawierające ^{211}At), transportowane są do Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, gdzie poddawane są obróbce chemicznej, mającej na celu wbudowanie radioizotopu w odpowiednie biomolekuły.

7.6 Edukacja i popularyzacja

W uzupełnieniu do prac badawczych, Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów prowadzi działalność dydaktyczną i popularyzatorską. Szczególne miejsce w działalności dydaktycznej ŚLCJ zajmują warsztaty studenckie. Corocznie, od 2005 roku, w Laboratorium organizowane są tygodniowe zajęcia dla zainteresowanych fizyką jądrową studentów z różnych uczelni krajowych. Uczestnicy warsztatów, pracując w 3-4 osobowych grupach, wykonują pomiary z wykorzystaniem aparatury znajdującej się w Laboratorium, opracowują zebrane dane i przygotowują prezentację na temat wykonanego ćwiczenia. Cyklotron w tym czasie pracuje na potrzeby realizowanych ćwiczeń, umożliwiając przeprowadzenie w ciągu tygodnia kilku krótkich eksperymentów z różnymi zestawami detektorów. Uzupełnieniem pomiarów jest cykl wykładów poświęconych wybranym zagadnieniom z fizyki, chemii jądrowej, technikom detekcyjnym i metodom pomiarowym. Prelegentami są pracownicy Laboratorium oraz zaproszeni goście. Zamiejscowi uczestnicy zakwaterowani są w pokojach gościnnych Laboratorium. Uczestnictwo w warsztatach jest nieodpłatne. Warsztaty stwarzają studentom unikalną możliwość zapoznania się z nowoczesną aparaturą, tematyką aktualnie prowadzonych prac badawczych oraz specyfiką eksperymentalnej pracy naukowej. Uczestnicy pozyskują praktyczną wiedzę nie tylko z fizyki jądrowej i technik detekcyjnych promieniowania jonizującego, ale również z innych dziedzin nauki i techniki, w tym elektroniki, techniki próżniowej,

chemii jądrowej, a nawet mechaniki. Warsztaty służą też zacieśnieniu współpracy z ośrodkami fizyki jądrowej z całej Polski, inspirując niejednokrotnie nowe programy badawcze.

Uzupełnieniem i rozszerzeniem warsztatów przeznaczonych dla studentów krajowych są podobne zajęcia międzynarodowe organizowane w ŚLCJ od 2010 roku w ramach programu ERASMUS, w których uczestniczą studenci z uniwersytetów w Huelva (Hiszpania), Sofii (Bułgaria) i z Uniwersytetu Warszawskiego. W 2011 roku do tego grona dołączyli studenci z Antalii (Turcja). Program warsztatów międzynarodowych jest podobny do warsztatów krajowych, trwają one jednak dłużej – dwa tygodnie. Wykładowcami i opiekunami studentów w trakcie dotąd zrealizowanych edycji warsztatów byli naukowcy z ŚLCJ, innych krajowych instytucji oraz goście zagraniczni, m.in. z Hiszpanii, Bułgarii i USA. Warsztaty, zarówno w formie krajowej i międzynarodowej, spotykają się z entuzjastycznym przyjęciem ich uczestników i opiekunów z macierzystych uczelni.

Laboratorium przyjmuje również studentów na praktyki wakacyjne. Z tej możliwości regularnie korzystają studenci uczelni krajowych, np. Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, Uniwersytetu Łódzkiego i Politechniki Gdańskiej. W ostatnich latach do grona praktykantów dołączyli studenci z Uniwersytetów Sofii, Huelvie i w Ioanninie (Grecja).

W oparciu o dane eksperymentalne zebrane w ŚLCJ powstają liczne prace licencjackie, inżynierskie, magisterskie i doktorskie. Promotorami wielu z nich są pracownicy Laboratorium. W innych przypadkach, opiekunami prac są naukowcy z innych instytucji, którzy w swoich badaniach wykorzystują wiązki jonów i urządzenia dostępne w Laboratorium. Warto zauważyć, że autorzy wspomnianych prac niejednokrotnie rekrutują się spośród uczestników warsztatów i praktykantów.

Popularyzując fizykę jądrową wśród szerokiej publiczności, Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów co roku przyjmuje kilkadziesiąt grup uczniów i studentów (około 1000 osób rocznie) w ramach wycieczek popularno-naukowych. Zwiedzającym prezentowany jest cyklotron oraz zainstalowane na liniach pomiarowych układy eksperymentalne. Pokazom towarzyszą zawsze prelekcje na temat podstaw działania akceleratora i prowadzonych w Laboratorium badań. Co roku, Laboratorium, włączając się w Festiwal Nauki, przygotowuje wykłady, pokazy i otwiera swoje drzwi dla wszystkich zainteresowanych. Spotkania organizowane w Laboratorium, jak na przykład cykl dyskusji panelowych poświęconych fizyce jądrowej i jej zastosowaniom w medycynie i energetyce, cieszą się dużą popularnością. Laboratorium regularnie uczestniczy też w innych imprezach popularno-naukowych organizowanych w Warszawie, takich jak „Wieczór z Nauką” w trakcie którego goście mieli okazję uczestniczyć w pomiarze promieniowania gamma przy pomocy układu EAGLE i urządzeń dozymetrycznych, czy prezentacja cyklotronu i innych urządzeń w trakcie „Nocy Muzeów”, która cieszyło się wielkim zainteresowaniem, zarówno wśród młodej jak i starszej publiczności (ok. 600 odwiedzających).