

# Wiązki jąder egzotycznych – dziś i jutro fizyki jądrowej

Zenon Janas

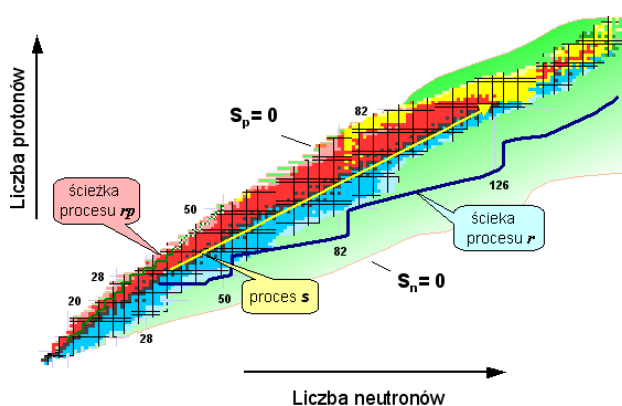
*Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Warszawski*

## Beams of exotic nuclei – present and future of nuclear physics

**Abstract:** In recent years experiments with accelerated beams of unstable isotopes became an important tool in nuclear structure and reaction studies. In the paper, the basic production methods of radioactive nuclear beams are introduced and the key experiments demonstrating possibilities of research studies with exotic nuclei are discussed. New projects of radioactive beam facilities are presented.

### Wstęp

Otoczająca nas materia zbudowana jest z atomów, których centrum zajmują jądra atomowe - układy kwantowymi składające się z silnie oddziałujących cząstek: protonów i neutronów. Obok oddziaływań silnych swoją obecność w jądrach manifestują również inne oddziaływania fundamentalne: elektromagnetyczne i słabe. Natura sił działających w jądrach sprawia, że tylko niektóre kombinacje liczb protonów i neutronów mogą istnieć jako układy związane. Rysunek 1 przedstawia mapę nuklidów z zaznaczoną na osi poziomej liczbą neutronów i liczbą protonów w jądrze odłożoną na osi pionowej.



Rys. 1. Mapa nuklidów. Jądra trwałe, zaznaczone kolorem czarnym, tworzą ścieżkę stabilności  $\beta$ . Kolorem szarym zaznaczono wszystkie obecnie znane izotopy promieniotwórcze. Linie odpadania protonu ( $S_p=0$ ) i neutronu ( $S_n=0$ ) określają granice istnienia związanych jąder atomowych.

Jądra trwałe, nie ulegające przemianom promieniotwórczym, tworzą na mapie nuklidów ścieżkę trwałości przebiegającą początkowo wzdłuż linii  $N=Z$  i odchylającą się w stronę jąder o niewielkim nadmiarze neutronów dla coraz cięższych pierwiastków. Po obydwóch stronach ścieżki trwałości leżą jądra nietrwałe, rozpadające się na drodze przemiany  $\alpha$  lub  $\beta$ . Granice istnienia jąder atomowych jako związanych układów nukleonów określają tzw.

linie odpadania protonu i neutronu odpowiadające zerowej wartości energii separacji ( $S_p, S_n$ ) tych cząstek. Całkowitą liczbę jąder ograniczonych liniami  $S_n=0$  i  $S_p=0$  ocenia się na około 6000, dotychczas w laboratoriach udało się wytworzyć blisko 3000 z nich.

Podstawowym źródłem naszej wiedzy o jądrach atomowych i własnościach sił w nich działających są badania rozpadów promieniotwórczych oraz różnego typu reakcji jądrowych. Dodatkowych danych dostarczają pomiary mas i momentów elektromagnetycznych, a także np. badania atomów elektronowych jak i tzw. atomów egzotycznych, w których miejsce elektronu zajmuje mion lub antyproton. Wszystkie te źródła dostarczają wzajemnie uzupełniającą się informacji i rezygnacja z któregośkolwiek z nich ograniczyłaby możliwości poznania własności jąder atomowych. Tymczasem z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia w przypadku reakcji jądrowych. Do niedawna w laboratoriach można było przyspieszać jedynie jądra stabilnych izotopów i, poza nielicznymi wyjątkami, badać reakcje ze stabilnymi jądrami tarczy. Idea wiązek egzotycznych (radioaktywnych) stanowi próbę przewyżczenia tego ograniczenia. Chodzi o to, aby wytworzyć wiązki dalekich od ścieżki stabilności, nietrwałych izotopów, o własnościach (energii, intensywności i czystości) umożliwiających badanie reakcji pomiędzy tymi jądrami i stabilnymi jądrami tarczy.

Oczekuje się, że badania jąder dalekich od ścieżki trwałości dostarczą odpowiedzi na kluczowe pytania o rzeczywiste granice istnienia jąder atomowych – w przypadku jąder neutronowo-deficytowych granice te zostały dotychczas określone dla jąder o  $Z \leq 91$ , natomiast po stronie neutronowo-nadmiarowej przebieg linii odpadania neutronu udało się określić jedynie dla najlżejszych pierwiastków [1]. Interesującym zagadnieniem związanym z badaniem jąder dalekich od ścieżki trwałości jest poszukiwanie nowych rodzajów promieniotwórczości – ostatnio duże zainteresowanie wzbudziła obserwacja nieznanego dotąd typu przemiany jądrowej - rozpadu z emisją dwóch protonów. Dzisiaj znane są dwa izotopy rozpadające się w ten sposób -  $^{45}\text{Fe}$  [2, 3] i  $^{54}\text{Zn}$  [4].

Kolejnym problemem, którego rozwiązanie mamy nadzieję znaleźć dzięki rozwojowi wiązek radioaktywnych jest pytanie o ewolucję kształtu i struktury jąder w miarę

oddalania się od ścieżki trwałości. Szczególnie ciekawe jest pytanie o zachowanie struktury powłokowej, której odzwierciedleniem jest istnienie wyróżnionych (magicznych) liczb neutronów i protonów w jądrach leżących blisko ścieżki stabilności. Być może jądra dalekie od ścieżki trwałości charakteryzują się innymi liczbami magicznymi, a struktura powłokowa obserwowana dla jąder stabilnych zanika?

Odpowiedź na to, między innymi, pytanie jest szczególnie istotna dla opisu przebiegu ważnych procesów nukleosyntezy – procesu szybkiego wychwytu neutronu (proces  $r$ ) [5] i procesu szybkiego wychwytu protonu (procesu  $rp$ ) [6]. Jak pokazano na rys. 1, ścieżki procesów  $r$  i  $rp$  przebiegają przez jądra dalekie od linii trwałości i możliwość poznania lub wiarygodnego przewidywania własności jąder leżących na ich drodze ma kluczowe znaczenie dla opisu tych procesów.

W dalszej części tego artykułu omówione zostaną podstawowe metody wytwarzania wiązek radioaktywnych. W kolejnych rozdziałach przedstawione zostaną przykłady eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem tych wiązek. W następnych rozdziałach omówiony zostanie projekt budowy nowego laboratorium wiązek egzotycznych izotopów w GSI Darmstadt oraz plany wykorzystania wiązek radioaktywnych do otrzymywania wiązek neutrin.

## Metody wytwarzania wiązek radioaktywnych

W działających obecnie laboratoriach wykorzystuje się dwie metody produkcji wiązek radioaktywnych. Pierwsza z nich wywodzi się ze znanej od lat 60-tych ubiegłego wieku techniki ISOL (z ang. *Isotope Separation On-line*) będącej metodą ciągłej separacji izotopów produkowanych w reakcjach jądrowych. W układach opartych o technikę ISOL do produkcji izotopów promieniotwórczych wykorzystuje się intensywne wiązki lekkich jonów (np. protonów) lub neutronów padające na grubą tarczę (rys. 2a). Produkty reakcji dyfundują na powierzchnię tarczy skąd są transportowane do źródła jonów, gdzie pod wpływem wysokiej temperatury ulegają jonizacji. Pozbawione elektronów atomy są ekstrahowane ze źródła jonów, przyspieszane a następnie selekcyjonowane przy pomocy separatora masowego. Po wyjściu z separatora jony mają energię rzędu kilkudziesięciu keV i aby mogły być wykorzystane do wywołania reakcji jądrowych muszą być przyspieszone w akceleratorze do energii przekraczającej wysokość bariery kulombowskiej dla badanego układu pocisk-tarcza.

Zaletą układów pracujących z wykorzystaniem techniki ISOL jest bardzo dobra jakość (tzn. duża czystość, małe rozmycie energii i dobre ogniskowanie) wiązki wtórnej. Ograniczeniem jest możliwość separacji i przyspieszania jonów o czasach życia dłuższych niż 1 s oraz selektywność chemiczna źródła jonów, która sprawia, że np. przyspieszanie jonów pierwiastków trudno topliwych jest praktycznie niemożliwe.

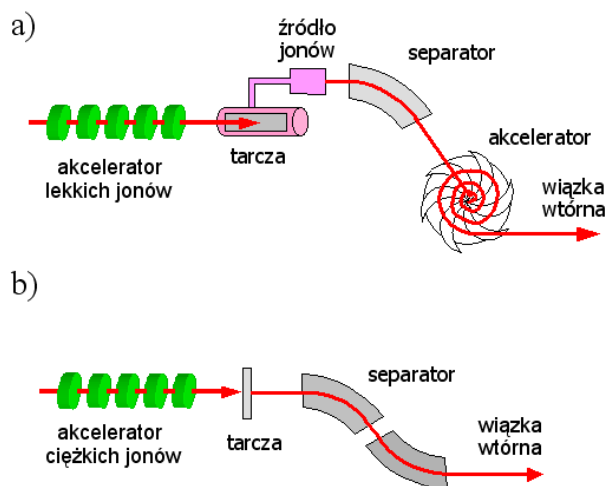
Obecnie działającymi instalacjami ISOL są układy REX-ISOLDE w CERN w Genewie (Szwajcaria) [7],

SPIRAL-GANIL w Caen (Francja) [8] oraz HRBIF-ORNL w Oak Ridge (USA) [9].

Inną metodą otrzymywania wiązek radioaktywnych jest technika separacji jąder w locie. W układach tego typu (rys. 2b) wykorzystuje się reakcję fragmentacji lub rozszczepienia ciężkich jonów o energiach przekraczających 50 MeV/nukleon. Fragmenty pocisku poruszają się do przodu z prędkością zbliżoną do prędkości wiązki pierwotnej i są (prawie) całkowicie zjonizowane. Jony właściwego rodzaju są separowane spośród wszystkich produktów reakcji w polu magnetycznym separatora.

Niewątpliwą zaletą układów opartych o technikę separacji produktów reakcji w locie jest jej niezależność od własności chemicznych pierwiastków i zanedbywalne ( $< 1 \mu s$ ) opóźnienie procesu separacji. Wiązki wtórne otrzymywane w układach z separacją w locie charakteryzują się jednak dużym rozmyciem energii i są słabo zogniskowane.

Metodę separacji radioaktywnych produktów reakcji w locie wykorzystuje się np. w układach FRS-GSI w Darmstadt (Niemcy) [10], LISE3-GANIL w Caen (Francja) [11], RIPS-RIKEN niedaleko Tokio (Japonia) i A1900-NSCL w Michigan State University (USA) [12].



Rys. 2. Metody wytwarzanie wiązek radioaktywnych: a) metoda ISOL, b) metoda separacji w locie.

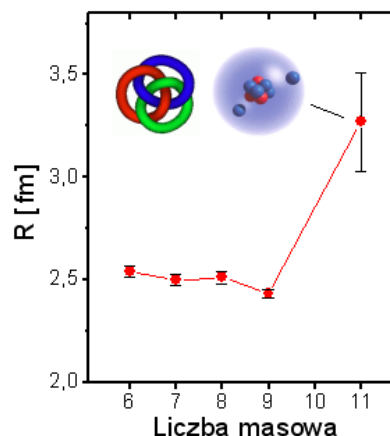
Zestawienie zalet i wad urządzeń wykorzystujących metodę ISOL i technikę separacji w locie prowadzi do wniosku, że obydwie metody w dużym stopniu uzupełniają się. W przypadku pierwiastków dla których wydajność źródła jonów jest wysoka (np. gazy szlachetne) metoda ISOL gwarantuje wyższe intensywności wiązek wtórnych, dla skrajnie egzotycznych izotopów bardziej przydatna staje się technika separacji w locie umożliwiającą identyfikację pojedynczych jonów i prowadzenie eksperymentów przy skrajnie niskich intensywnościach wiązek wtórnych.

## Przykłady eksperymentów z wykorzystaniem wiązek jąder egzotycznych

### Halo neutronowe

Historia wiązek radioaktywnych rozpoczęła się w połowie lat 80-tych XX wieku od klasycznego dziś eksperymentu I. Tanihaty i innych [13], w którym badano przekrój czynny na oddziaływanie izotopów litu z tarczą węglową. Najlżejsze izotopy litu –  ${}^6\text{Li}$  i  ${}^7\text{Li}$  są stabilne,  ${}^8\text{Li}$  i  ${}^9\text{Li}$  rozpadają się na drodze przemiany  $\beta$ . Jądro  ${}^{10}\text{Li}$  istnieje jedynie jako stan rezonansowy o czasie życia  $5 \cdot 10^{-22}$  s. Kolejny izotop litu,  ${}^{11}\text{Li}$ , tworzy związany, chociaż, podobnie jak  ${}^8\text{Li}$  i  ${}^9\text{Li}$ , nietrwały układ nukleonów.  ${}^{11}\text{Li}$  rozpada się na drodze przemiany  $\beta^-$  z okresem półrozpadu równym 8.5 ms. Jądro  ${}^{11}\text{Li}$  jest przykładem tzw. systemu boromejskiego, tzn. układu, który jest związany jako całość, ale którego żadne dwa składniki (tzn.  ${}^9\text{Li}$  + neutron, neutron + neutron) nie są związane. Nazwa ta pochodzi od nazwiska włoskiego rodu Boromeuszów, którego herbem są trzy pierścienie połączone w ten sposób, że przecięcie któregokolwiek z nich powoduje rozpad całego układu.

W eksperymencie Tanihaty izotopy litu były produkowane w reakcji fragmentacji wiązki  ${}^{20}\text{Ne}$  o energii 850 MeV/nukleon. Po odseparowaniu od wiązki pierwotnej i innych produktów reakcji jony wybranego izotopu litu uderzały w tarczę  ${}^{12}\text{C}$ . Jądra wychodzące z tarczy były analizowane w polu magnetycznym spektrometru i identyfikowane. Rejestrowana była liczba jonów danego izotopu  ${}^A\text{Li}$ , które padły na tarczę i liczba jonów tego samego izotopu, które przeszły przez tarczę nie wywołując reakcji. Porównując te dwie liczby określono całkowity przekrój czynny na reakcję  ${}^A\text{Li} + {}^{12}\text{C}$ . Pomiary te wykazały istotny wzrost wartości przekroju czynnego dla  ${}^{11}\text{Li}$ . Interpretacja tej obserwacji staje się możliwa jeśli zważyć, że dla energii dla których przeprowadzono pomiary całkowity przekrój czynny reakcji ( $\sigma$ ) jest w dobrym przybliżeniu równy geometrycznemu przekrojowi czynnemu:  $\sigma = \pi(R_t + R_p)^2$ , gdzie  $R_t$  i  $R_p$  oznaczają odpowiednio promień tarczy i pocisku. Znając wartość przekroju czynnego oraz promień jąder tarczy  ${}^{12}\text{C}$  ( $R_t = 2.6$  fm) można obliczyć promienie kolejnych izotopów litu. Wartości tak wyznaczonych promieni przedstawia rys 3. Uwagę zwraca gwałtowny wzrost promienia  ${}^{11}\text{Li}$ . W pracy Tanihaty podano interpretację tego efektu. Zgodnie z nią jądro  ${}^{11}\text{Li}$  należy traktować jako układ zbudowany z  ${}^9\text{Li}$  stanowiącego rdzeń  ${}^{11}\text{Li}$  oraz dwóch słabo związanych neutronów, które poruszają się z dala od centrum tworząc tzw. halo neutronowe. Poprawność tej interpretacji potwierdziły dalsze badania z wykorzystaniem wiązki radioaktywnego  ${}^{11}\text{Li}$ . Tak np. badając rozpraszanie  ${}^{11}\text{Li}$  na protonach określono rozkład materii w tym jądrze i zaobserwowano obecność rdzenia o rozmiarach odpowiadających wielkości  ${}^9\text{Li}$  oraz ogona w rozkładzie gęstości materii w jądrze  ${}^{11}\text{Li}$ .



Rys. 3. Promienie izotopów litu wyznaczone w oparciu o pomiary całkowitego przekroju czynnego na reakcję z jądrami  ${}^{12}\text{C}$  [1]. Rysunki przedstawiają pierścienie boromejskie oraz strukturę  ${}^{11}\text{Li}$  jako jądra zbudowanego z rdzenia  ${}^9\text{Li}$  i dwóch słabo związanych neutronów.

Efekt halo nie jest zjawiskiem specyficznym dla  ${}^{11}\text{Li}$  lecz efektem kwantowym charakterystycznym dla systemów słabo związanych. W tego typu układach funkcja falowa rozciąga się poza obszar działania sił jądrowych i istnieje skończone prawdopodobieństwo znalezienia cząstek w dużej odległości od jądra.

Od momentu zaobserwowania halo dwuneutronowego w  ${}^{11}\text{Li}$  badania tego efektu były prowadzone bardzo intensywnie i zjawisko to zaobserwowano również w innych jądram np.  ${}^6\text{He}$  czy  ${}^{17}\text{B}$ . Odkryto także inne rodzaje halo np. halo czteroneutronowe w  ${}^8\text{He}$  i  ${}^{14}\text{Be}$ , a także halo protonowe w  ${}^8\text{B}$  [14].

### Ewolucja struktury powłokowej jąder egzotycznych

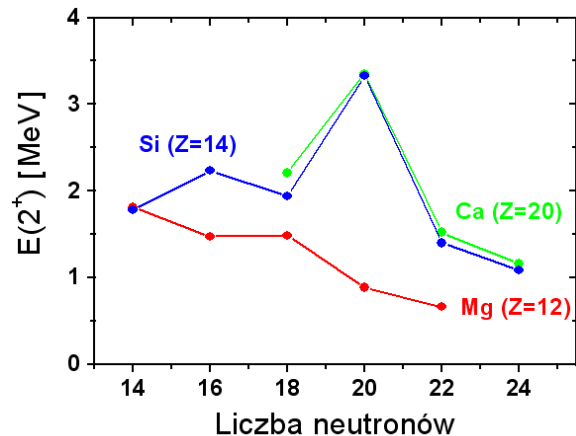
Pewne własności jąder wyróżniają na mapie nuklidów układy o określonej liczbie protonów i neutronów. Liczby te noszą nazwę liczb magicznych i przyjmują wartości  $N, Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$ . Jądra o magicznych liczbach neutronów lub protonów są szczególnie silnie związane, energia separacji nukleonu osiąga w nich swoje maksimum. W świecie atomów odpowiednikiem jąder magicznych są gazy szlachetne - pierwiastki o wyjątkowo wysokich wartościach energii jonizacji.

Fakt istnienia magicznych liczb nukleonów został wyjaśniony przez model powłokowy jądra atomowego. W najprostszej wersji tego modelu ruch nukleonu w jądrze traktuje się jako ruch cząstki w średnim potencjale opisującym jej oddziaływanie ze wszystkimi innymi nukleonami w jądrze. Ważną częścią tego potencjału jest składnik opisujący oddziaływanie orbitalnego momentu pędu i spinu nukleonu. Silniej związane są te cząstki, dla których wektory spinu i orbitalnego momentu pędu są ustawione równolegle. Rozwiązując równanie Schrödingera dla nukleonu zwiazanego w średnim potencjale otrzymuje się układ jednocząstkowych poziomów energetycznych. Protony i neutrony zapełniają stany jednocząstkowe zgodnie z zakazem Pauliego. Fenomen liczb magicznych jest zwią-

zany z występowaniem dużych przerw energetycznych pomiędzy grupami stanów jednocząstkowych. Zaawansowane wersje modelu powłokowego dosyć dobrze opisują wiele własności jąder bliskich ścieżki stabilności. Otwarte jednak pozostaje pytanie o ewolucję struktury jednocząstkowej oraz trwałość liczb magicznych wraz z oddalaniem się od ścieżki stabilności. Można wskazać szereg powodów, dla których oczekuje się zmian w strukturze powłokowej jąder o wielkim nadmiarze neutronów – odmienny niż w przypadku jąder stabilnych rozkład materii protonowej i neutronowej zmienia parametry potencjału, w którym poruszają się nukleony i modyfikuje położenia orbitali jednocząstkowych. Rozmycie powierzchni jąder słabo związanych wpływa na siłę oddziaływania spin-orbita i prowadzi do migracji orbitali jednocząstkowych między powłokami. W konsekwencji, w obszarze przerw energetycznych obserwowanych w jądrach bliskich stabilności mogą pojawić się orbitale przesunięte z sąsiednich powłok, tworzące nową strukturę powłokową z nowymi liczbami magicznymi.

Charakterystyczną cechą parzysto-parzystych jąder magicznych jest wyjątkowo wysoka wartość energii wzbudzenia pierwszego stanu  $2^+$  oraz niska wartość elementu macierzowego przejścia elektromagnetycznego pomiędzy tym stanem a stanem podstawowym. Obydwie te wielkości można wyznaczyć jednocześnie mierząc energię i natężenie promieniowania gamma emitowanego po wzbudzeniu kulombowskim jąder przelatujących w pobliżu jąder tarczy. Technika wzbudzeń kulombowskich jest dobrze ugruntowaną i szeroko stosowaną metodą badania jąder stabilnych. Dostępność wiązek radioaktywnych otwiera nowe możliwości wykorzystania tej metody do badania jąder egzotycznych.

Rysunek 4 przedstawia zależność energii wzbudzenia pierwszego stanu  $2^+$  w parzysto - parzystych izotopach wapnia, krzemu i magnezu. Dane o energii wzbudzenia stanu  $2^+$  radioaktywnych jąder  $^{30}\text{Mg}$  ( $T_{1/2} = 335$  ms),  $^{32}\text{Mg}$  ( $T_{1/2} = 120$  ms) i  $^{34}\text{Mg}$  ( $T_{1/2} = 20$  ms) uzyskano w pomiarach z wykorzystaniem wiązek tych egzotycznych izotopów [15, 16]. Warto zaznaczyć, że pomiary dla  $^{34}\text{Mg}$  przeprowadzono dysponując wiązką o natężeniu zaledwie 4 atomów/s [16]. W przypadku izotopów wapnia i krzemu wysoka energia wzbudzenia stanu  $2^+$  w izotopach o  $N = 20$  wskazuje na magiczność tej liczby neutronów. W przypadku  $^{32}\text{Mg}$ , jądra o  $Z=12$  i  $N=20$ , zaobserwowano jednak gwałtowne obniżenie energii wzbudzenia stanu  $2^+$  [15]. Efekt ten jest związany ze zmniejszeniem się przerwy energetycznej w układzie stanów jednocząstkowych  $^{32}\text{Mg}$ . Dzięki temu możliwe jest mieszanie się stanów z wyższej powłoki co prowadzi do deformacji jądra. Stan  $2^+$  staje się stanem kolektywnym o niskiej energii wzbudzenia i wysokiej wartości elementu macierzowego przejścia  $0^+ \rightarrow 2^+$ .



Rys. 4. Energii wzbudzenia pierwszego stanu  $2^+$  w parzysto - parzystych izotopach wapnia, krzemu i magnezu. Dane dla  $^{30, 32, 34}\text{Mg}$  uzyskano badając wzbudzenia kulombowskie tych egzotycznych jąder.

Zrozumienie ewolucji struktury jąder atomowych w miarę oddalania się od ścieżki stabilności ma kluczowe znaczenie dla opisu astrofizycznego procesu  $r$  przebiegającego przez jądra o wielkim nadmiarze neutronów w stosunku do jąder stabilnych. Zmiana struktury powłokowej tych jąder wpływa na ich czas życia, energię wiązania oraz energię separacji neutronu. Wszystkie te wielkości są niezbędne do skonstruowania modeli opisujących przebiegu procesu  $r$ .

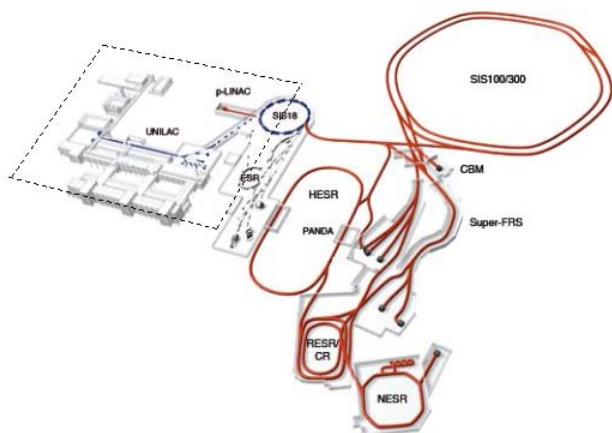
## Perspektywy rozwoju i wykorzystania wiązek radioaktywnych

### Projekt FAIR

Obecnie większość czołowych laboratoriów jądrowych posiada programy budowy II generacji instalacji umożliwiających produkcję intensywnych wiązek jąder egzotycznych. Jednym z najbardziej ambitnych i interesujących jest projekt FAIR (z ang. *Facility for Antiproton and Ion Research*) realizowany w ośrodku badań ciężkojonowych GSI w Darmstadt (Niemcy) [17]. Budowa tego laboratorium umożliwi prowadzenie eksperymentów zarówno z wykorzystaniem intensywnych wiązek stabilnych izotopów jak i wiązek jąder egzotycznych oraz antyprotonów.

Centralną część projektu FAIR (zob. rys. 5) będą stanowiły dwa nadprzewodzące synchrotrony SIS100/300 umieszczone we wspólnym podziemnym tunelu o długości 1100 m. Jako akceleratory wstępne dla synchrotronów SIS100/300 zostaną wykorzystane istniejące już akceleratory UNILAC i SIS18. SIS100 będzie przyspieszał jądra dowolnego pierwiastka do maksymalnej energii  $\sim 2.5$  GeV/nukleon. Intensywność przyspieszonej wiązki osiągnie wartość  $2.5 \cdot 10^{13}/s$  dla protonów i  $5 \cdot 10^{11}/s$  dla jąder uranu. SIS300 umożliwi dalsze przyspieszanie wiązek do energii  $\sim 35$  GeV/nukleon. W projekcie FAIR do wytwarzania wiązek radioaktywnych zostanie wykorzystana technika separacji w locie produktów reakcji fragmentacji lub rozszczepienia relatywistycznych wiązek ciężkich

jonów. Odpowiednią selekcję pożądaných izotopów zapewni separator SuperFRS [18]. Wiązka jąder egzotycznych wybranych przez SuperFRS może być skierowana do różnych układów pomiarowych, w szczególności do pierścieni akumulacyjnych CR/RESR i NESR.



Rys. 5. Projekt laboratorium wiązek radioaktywnych FAIR w GSI-Darmstadt. Linia przerywaną zaznaczono istniejącą część ośrodka GSI.

Urządzenia te zostaną wyposażone w systemy umożliwiające np. schładzanie (tzn. drastyczne ograniczenie rozmycia energetycznego) i/lub spowalnianie wiązek jąder egzotycznych i antyprotonów przed ich wykorzystaniem do prowadzenia eksperymentów w pierścieniach lub poza nimi. W pierścieniu NESR możliwe będą pomiary mas jąder dalekich od stabilności, badanie reakcji na gazowych tarczach przecinających bieg wiązki a nawet badanie rozproszeń elektronów na krążących w pierścieniu jądrach dzięki którym możliwy będzie pomiar rozkładu ładunku w jądrach egzotycznych izotopów. Pierścień HESR jest przeznaczony do prowadzenia eksperymentów z wykorzystaniem antyprotonów.

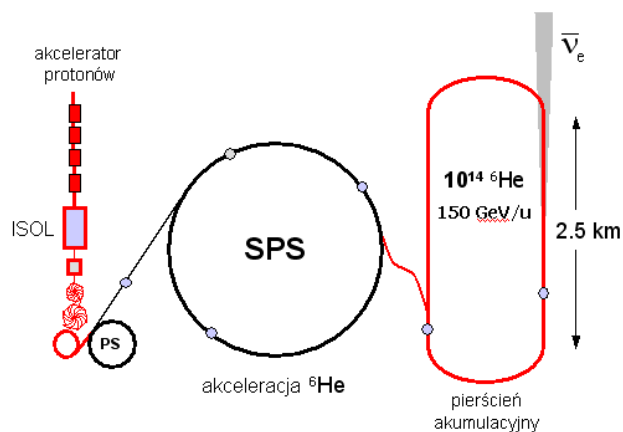
Przewidywany w projekcie FAIR wzrost intensywności wiązek pierwotnych (o czynnik kilkaset dla najcięższych pierwiastków) oraz zwiększenie akceptancji separatora SuperFRS i pierścieni akumulacyjnych zaowocuje wzrostem intensywności wiązek radioaktywnych o czynnik  $10^3 - 10^4$  w stosunku do wartości osiąganych w obecnie działającym układzie SIS18-FRS. Dzięki temu możliwe będzie np. badanie własności jąder o wielkim nadmiarze neutronów leżących na ścieżce astrofizycznego procesu  $r$ .

Projekt FAIR uzyskał w 2003 roku akceptację rządu niemieckiego. Budowa nowej części laboratorium GSI rozpocznie się w 2008 roku, zakończenie prac planuje się na rok 2015. Całkowity koszt inwestycji wyniesie około 700 mln euro z czego 75% pokryje rząd Niemiec, a pozostałą część powinno zapewnić konsorcjum 12 krajów (wśród nich Polska), które zadeklarowały swój udział w projekcie.

## Wiązki beta

Fizyka neutrin jest jedną z dziedzin fizyki subatomowej, która przeżywa w ostatnich latach gwałtowny rozwój. Badaniom poddaje się neutrina słoneczne i atmosferyczne, wykorzystuje się również wiązki neutrin wytwarzane w reaktorach jądrowych i przy pomocy akceleratorów. Rozwój wiązek radioaktywnych otwiera możliwość wykorzystania intensywnych, relatywistycznych wiązek nietrwałych izotopów do wytworzenia wiązek neutrin lub antyneutrin elektronowych powstających w wyniku rozpadu  $\beta$  przyspieszonych jąder. Tak wytworzone wiązki neutrin nazywa się wiązkami beta.

Rysunek 6 przedstawia schemat układu do produkcji wiązek beta zaprojektowany w oparciu o system akceleratorów działających w CERN [19]. Projekt ten przewiduje, że radioaktywne jony wytworzone metodą ISOL będą przyspieszane w układzie akceleratorów PS i SPS do energii około 100 GeV/nukleon, a następnie wprowadzane do pierścienia akumulacyjnego w kształcie owalu o całkowitym obwodzie około  $\sim 7$  km i prostoliniowych odcinkach o długości 2.5 km. Nietrwale jądra krążące w pierścieniu będą ulegały przemianie  $\beta^+$  lub  $\beta^-$ , której towarzyszy emisja  $\bar{\nu}_e$  lub  $\bar{\nu}_e$ .



Rys. 6. Projekt koncepcyjny schematu produkcji wiązek beta w oparciu o układ akceleratorów działających w CERN.

W układzie odniesienia związanym z poruszającymi się jądrami neutrina emitowane są izotropowo ale efekt ogniskowania kinematycznego sprawi, że w układzie laboratoryjnym można uzyskać wiązkę neutrin skolimowaną wzdłuż prostoliniowych odcinków pierścienia akumulacyjnego skierowanych w stronę (będącego w planach) detektora neutrin umieszczonego np. w podziemnym laboratorium we Fréjus odległym o 130 km od Genewy.

Aby zapewnić odpowiednio wysokie natężenie wiązki neutrin docierającej do detektora konieczne jest zgromadzenie w pierścieniu odpowiednio dużej ilości jonów o możliwie krótkim czasie życia i przyspieszenie ich do odpowiednio wysokiej energii. Do wytworzenia wiązki  $\bar{\nu}_e$  planuje się wykorzystanie wiązki  $2 \cdot 10^{14}$  jonów

${}^6\text{He}$  ( $T_{1/2} = 0.8$  s) o energii 150 GeV/nukleon krążących w pierścieniu akumulacyjnym. Wiązka  $\nu_e$  będzie produkowana w wyniku rozpadu  $\beta^+$   $10^{13}$  jonów  ${}^{18}\text{Ne}$  ( $T_{1/2} = 1.7$  s) zgromadzonych w pierścieniu.

Tak wytworzone wiązki neutrin posiadają szereg pożądanych własności – są to czyste wiązki neutrin o określonym zapachu, dobrze znanym widmie energetycznym, intensywności i strukturze czasowej. Przewiduje się wykorzystanie wiązek beta do obserwacji oscylacji neutrin, badania niezachowania symetrii CP (kombinowanej symetrii związanej z zamianą cząstki na antycząstkę i inwersji przestrzennej) w sektorze leptonowym, a także, ważne np. z punktu widzenia astrofizyki, badania oddziaływania (anty)neutrin elektronowych z jądrami atomowymi. Badania z wykorzystaniem wiązek beta będą stanowiły istotne uzupełnienie prac prowadzonych z zastosowaniem konwencjonalnych źródeł neutrin.

## Podsumowanie

Działające obecnie laboratoria wiązek radioaktywnych I generacji udowodniły ogromny potencjał badawczy eksperymentów prowadzonych z wykorzystaniem wiązek egzotycznych jąder atomowych. Odkrycia nowych, nieoczekiwanych efektów, takich jak np. istnienie halo neutronowego w lekkich jądrami czy też nagła zmiana układu poziomów jednocząstkowych prowadząca do zanikania powłok magicznych obserwowanych dla jąder stabilnych i pojawiania się efektów deformacji w jądrami o wielkim nadmiarze neutronów otworzyły nowe kierunki badań struktury jąder atomowych oraz fizyki reakcji jądrowych.

Nowa generacja instalacji wytwarzających wiązki jąder egzotycznych dostarczy wiązek o intensywnościach nawet  $10^4$  razy większych niż osiągalne obecnie. Można więc oczekiwać istotnego postępu w wielu dziedzinach, w których wiązki radioaktywne znajdują zastosowanie: począwszy od badań struktury jąder i dynamiki reakcji jądrowych poprzez astrofizykę po fizykę cząstek elementarnych i oddziaływań fundamentalnych.

## Literatura

- [1] M. Thonnessen, *Rep. Prog. Phys.* **67**, 1187 (2004).
- [2] M. Pfutzner i in., *Eur. Phys. J. A* **14**, 279 (2002).
- [3] J. Giovinazzo i in., *Phys. Rev. Lett.* **89**, 102501 (2002).
- [4] B. Blank i in., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 232501 (2005).
- [5] F. Kappeler i in., *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **48**, 175 (1998)
- [6] H. Schatz i in. *Phys. Rep.* **294**, 168 (1998).
- [7] O. Kester i in., *Hyperfine Interactions* **129**, 43 (2000), <http://isolde.web.cern.ch/ISOLDE/>
- [8] M. Lewitowicz, *Nucl. Phys. A* **746**, 11c (2004). <http://www.ganil.fr>
- [9] G.D. Alton, J.R. Beene, *J. Phys. G* **24**, 1347 (1998).
- [10] H. Geissel i in., *Nucl. Inst. and Meth. B* **70**, 286 (1992).
- [11] A.C. Mueller i R. Anne, *Nucl. Inst. and Meth. B* **56/57**, 559 (1991).

- [12] B.M. Sherill i in., *Nucl. Inst. and Meth. B* **204**, 90 (2003).
- [13] I. Tanihata i in., *Phys. Rev. Lett.* **55**, 2676 (1985).
- [14] A.S. Jensen i in., *Rev. Mod. Phys.* **76**, 215 (2004).
- [15] T. Motobayashi i in., *Phys. Lett. B* **346**, 9 (1995).
- [16] H. Iwasaki i in., *Phys. Lett. B* **522**, 227 (2001).
- [17] K. Gross, J. Eschke, *Nucl. Phys. News* **15**, 5 (2006), <http://www.gsi.de/fair/>.
- [18] H. Geissel i in., *Nucl. Inst. and Meth. B* **204**, 71 (2003).
- [19] P. Zucchelli, *Phys. Lett. B* **532**, 166 (2002).