Jacek Dobaczewski
Uniwersytet Warszawski
Instytut Fizyki Teoretycznej

Załącznik Nr 2

Opis kierunku zamierzonych badań

TYTUŁ: Egzotyczne własności jąder atomowych dalekich od stabilności.

DYSCYPLINA NAUKOWA: Teoria struktury jądra atomowego i oddziaływań efektywnych.

a) Opis tematyki badań

Proponowane badania dotyczącą teoretycznych zagadnień fizyki jądrowej. Dziedzina ta uległa w ostatnim dziesięcioleciu całkowitej przemianie. We współczesnym ujęciu obejmuje ona całą tematykę dotyczącą układów silnie oddziałujących, czyli opisywanych w języku fundamentalnym przez chromodynamikę kwantową. Zakres zainteresowań tej dziedziny obejmuje więc zagadnienia od struktury próżni, poprzez własności plazmy kwarkowo-gluonowej i strukturę hadronów, aż do klasycznych zagadnień struktury jąder atomowych (J. Dobaczewski, nucl-th/0301069).

Zjawiska tak rozumianej fizyki jądrowej charakteryzują się skalą charakterystycznych energii od około 1 keV do około 1 GeV, oraz odległościami od około 0.1 fm do około 10 fm, a więc dotyczą skali subatomowej. Charakterystyczną ich cechą jest ich wielociałowa natura związana zarówno z możliwością kreowania w próżni wielu kwantów pól materii i oddziaływań, jak i z obecnością wielu składników w obiektach złożonych. Dokładny opis tego typu układów nie jest ani możliwy ani sensowny, gdyż stopień ich komplikacji jest niezwykle wysoki, a przy tym zakres cech dostępnych w badaniach doświadczalnych jest raczej ograniczony. Dlatego też podstawowe metody ich opisu posługują się narzędziami polegającymi na wyodrębnianiu cech dominujących i zaniedbywaniu efektów nieistotnych w danej skali energii i/lub odległości.

W szczególności, proponowane badania dotyczą struktury jąder ciężkich, w których składnikami elementarnymi są protony i neutrony, a ich oddziaływania mają charakter efektywny. Oznacza to, że w badanych zjawiskach można śmiało zaniedbać strukturę kwarkowo-gluonową nukleonu, zaś oddziaływania między nukleonami należy rozpatrywać w języku cieczy kwantowych, w których efekty korelacji krótkozasięgowych i efekty ośrodka są traktowane w odpowiedniej skali przybliżeń.

W centrum zainteresowań współczesnej teorii struktury jąder ciężkich znajdują się jądra dalekie od stabilności, czyli takie, w których stosunek liczb protonów i neutronów odbiega znacząco od wartości charakteryzujących jądra trwałe. Obiekty takie wykazują wiele cech egzotycznych i pozwalają na badanie oddziaływań efektywnych w zakresie parametrów niedostępnych w inny sposób. Przechodząc do szczegółowego opisu zakresu proponowanych badań, pragnę w nich wyodrębnić następujące główne kierunki:

– *Ewolucja struktury powłokowej.*
Podobnie jak jest w fizyce atomowej, jądra atomowe charakteryzują się niezwykle wyraźnymi efektami powłokowymi, czyli główne ich cechy zależą od rodzaju i stopnia zapełnienia powłok walencyjnych. Okazuje się, że struktura powłokowa jąder dalekich od stabilności może ulec zmianie ze względu na kilka efektów (J. Dobaczewski i in., Phys. Rev. Lett. **72** (1994) 981). Po pierwsze, nadmiar nukleonów jednego rodzaju powoduje modyfikacje pól średnich polegające zarówno na powiększaniu się obszaru powierzchni jądra (w którym potencjał zmienia się od wartości centralnych do zera), jak i na zmianach w oddziaływaniu spin-orbita. W wyniku tych zmian, odległości pomiędzy stanami jednocząstkowymi, a nawet ich kolejność, mogą ulegać zmianie, prowadząc do dramatycznych zmian w strukturze tych jąder. Zjawiska te są analogiczne, na przykład, do zmian własności chemicznych pierwiastków superciężkich związanych z relatywistycznymi przesunięciami orbitali elektronowych. Po drugie, w jądrach o dużym nadmiarze neutronów energia ich wiązania staje się bardzo mała, a więc efekty związane ze sprzężeniem do stanów widma ciągłego zaczynają odgrywać znaczącą rolę (J. Dobaczewski i in., Nucl. Phys. **A422** (1984) 103). Można więc oczekiwać egzotycznych efektów związanych z wpływem rezonansów neutronowych na strukturę jąder (słabo) związanych. Po trzecie wreszcie, nadmiar cząstek jednego rodzaju prowadzi nieuchronnie do obszarów jądra, w których materia jądrowa składa się jedynie z neutronów lub protonów. Obszary takie, zwane obszarami skóry lub halo, stanowią nowy rodzaj materii jądrowej, w którym kluczową rolę mogą odgrywać efekty niejednorodności rozkładów gęstości; zarówno gdy chodzi o wielkie gradienty gęstości, jak i o pojawianie się klastrów materii o innym składzie protonowo-neutronowym.

– *Korelacje protonowo-neutronowe.*
Jądra trwałe charakteryzują się dużym stopniem niezależności od siebie struktur protonowych i neutronowych. Mimo tego, że przyciąganie między neutronami i protonami stanowi główny kanał efektywnego oddziaływania nukleonowego, oddziaływania te są w pobliżu stanu podstawowego prawie całkowicie wysycone i dwa rodzaje nukleonów zachowują się prawie niezależnie. Wyjątkiem są tu ciężkie jądra dalekie od stabilności o prawie równych liczbach protonów i neutronów, gdzie oba typy cząstek obsadzają identyczne powłoki. Prowadzi to do egzotycznych efektów korelacji kwantowych między protonami i neutronami, z których najszerzej ostatnio dyskutowanym jest możliwość pojawienia się w tych jądrach skorelowanych par protonowo-neutronowych (pn). Badanie tego typu korelacji wymaga bardzo zaawansowanych metod teoretycznych pozwalających na odróżnienie par pn od standardowych skorelowanych par neutronów (nn) lub protonów (pp), jak również od (niezwykle ciekawych) korelacji czterociałowych typu cząstki α.

– *Obroty jąder słabo związanych.*
W jądrach dalekich od stabilności energia wiązania indywidualnych nukleonów może być bardzo mała. Może to prowadzić do niezwykle egzotycznych efektów obserwowalnych w jądrowych pasmach rotacyjnych. Na przykład, standardowy obraz siły odśrodkowej, która uniemożliwia wiązanie nukleonu w jądrze szybko się obracającym może być zastąpiony przez efekt całkowicie odwrotny, zachodzący dla tak zwanych stanów intruzowych. Jest znanym faktem, że ich energie jednocząstkowe maleją wraz z częstością obrotu (czyli energie wiązania rosną), a więc zbudowane na nich stany rotacyjne mogą istnieć przy wysokiej częstości obrotu, ale rozpadać się przez emisję neutronu w miarę jak jądro zwalnia swój obrót emitując kwanty gamma. Analogiczne efekty były już

obserwowane dla emisji protonów, gdzie obraz fizyczny jest zdominowany przez efekty bariery kulombowskiej, przez którą emitowany proton musi przeniknąć. Dla neutronów emisja zachodziłaby bez penetracji przez barierę, co dawałoby unikalną możliwość badania potencjału jądrowego w warunkach zerowej energii wiązania (W. Nazarewicz, J. Dobaczewski i in., Acta Phys. Pol. **B32** (2001) 2349).

b) Sformułowanie celów

Strategicznym celem proponowanych badań jest poznanie cech jądrowych oddziaływań efektywnych w słabo dotychczas znanych kanałach. Chodzi tutaj przede wszystkim o kanały spinowo-izospinowe, które można jedynie badać poprzez odejście poza stany podstawowe jąder trwałych. Własności oddziaływań efektywnych w kanale izospinowym można najlepiej badać w jądrach atomowych o bardzo dużym nadmiarze neutronów, czyli o maksymalnych dostępnych wartościach izospinu. Kluczowym zagadnieniem jest tutaj zależność tych oddziaływań osobno od gęstości neutronów i protonów, podczas gdy dotychczas badano tylko zależność od gęstości całkowitej. Kanały spinowe oddziaływań efektywnych uwidaczniają się najlepiej w stanach o złamanej symetrii odwrócenia czasu, co w zjawiskach jądrowych realizuje się najlepiej w stanach rotacyjnych o wysokim momencie pędu. Proponowane badanie stanów rotacyjnych w jądrach dalekich od stabilności stanowi połączenie tych dwu typów egzotyki jądrowej i może dostarczyć informacji o wzajemnych współzależnościach między spinowym i izospinowym kanałem oddziaływania.

Oddziaływania efektywne można poznawać albo poprzez ich wyznaczanie z zasad pierwszych, albo poprzez znajdowanie rozwiązań równań dynamicznych i porównywanie otrzymywanych własności jąder z danymi doświadczalnymi. Pierwsza z tych dróg jest niezwykle trudna i postęp na niej, choć istotny, jest dość powolny. Proponowany projekt ma na celu osiągniecie znaczącego postępu na drugiej z tych dróg. Lista konkretnych planowanych zadań przedstawia się następująco:

– *Oddziaływania efektywne do opisu mas jądrowych.*
  Obecnie dostępne parametryzacje oddziaływań efektywnych pozostawiają wiele do życzenia. Na podstawie metod efektywnych teorii pola przewiduje się, że charakterystycznym parametrem rozwinięcia oddziaływań efektywnych powinny być protonowe i neutronowe energie Fermiego, a nie gęstość materii. Parametryzacje tego typu nie zostały jeszcze stworzone, i będą głównym przedmiotem poszukiwań w obecnym projekcie. Równie ważnym składnikiem opisu mas jądrowych są efekty parzysto-nieparzyste, dla których kluczowym elementem są oddziaływania kojarzące nukleony w pary. Obecnie stosowane w tym kanale oddziaływania efektywne są niezwykle schematyczne i ich poprawienie jest palącą potrzebą.

– *Oddziaływania efektywne w opisie zachowującym symetrię izospinową.*
  Większość metod teorii struktury jądra stosowanych dla jąder ciężkich posługuje się funkcjami falowymi będącymi iloczynami składowej protonowej i neutronowej, a więc łamie symetrię izospinową. Dla jąder o niemal równych liczbach protonów i neutronów przywrócenie tej symetrii może być sprawą kluczową, i będzie jednym z głównych elementów obecnego projektu. Efekty izospinowe mogą mieć szczególnie wielkie znaczenie dla opisu rozpadów β, gdzie operator przejścia ma konkretną strukturę izospinową i zachowanie takiej struktury dla stanu początkowego i końcowego jest niezwykle istotne. Co więcej, jedynie usuwając sztuczne mieszanie izospinu wynikające z uproszczeń teoretycznych, można poprawnie badać efekty fizycznego mieszania izospinu powodowane

czy to przez standardową siłę elektrostatyczną, czy też przez słabo poznane składowe łamiące izospin w oddziaływaniu jądrowym.

– *Oddziaływania efektywne do opisu efektów spektroskopowych.*
  Struktura niskich stanów wzbudzonych i pasm rotacyjnych jest niezwykle czuła na własności zdeformowanych orbitali jednocząstkowych. Fenomenologiczny opis tych orbitali daje poprawny opis fizyki zagadnienia, ale oddziaływania efektywne prowadzące do takiej fenomenologii nie zostały jeszcze zbudowane. Liczba dostępnych spektroskopowych danych jądrowych jest gigantyczna, i stale rośnie – szczególnie dla jąder dalekich od stabilności. Wykorzystanie tych danych do opisu oddziaływań efektywnych jest całkowicie możliwe przy użyciu narzędzi teoretycznych, jakimi dysponuje nasza grupa, ale wymaga wielkiej i systematycznej pracy. Dane spektroskopowe wymagają przy tym często znajomości położenia orbitali jednocząstkowych z dokładnością rzędu 50 keV, i jest zagadnieniem fascynującym czy konkretne oddziaływanie efektywne będzie potrafiło opisać dane spektroskopowe z tak znaczną dokładnością.

b) Uzasadnienie wyboru kierunku poszukiwań

Proponowane badania skupione są na dwu najważniejszych kierunkach rozwoju współczesnej teorii struktury jądra atomowego, a mianowicie, na badaniach jąder słabo związanych i badaniach jąder o wysokim momencie pędu. Pierwszy z tych kierunków jest w przededniu dramatycznego rozwoju związanego z projektowanymi i konstruowanymi narzędziami doświadczalnymi, mającymi na celu produkcję i przyspieszanie niezwykle egzotycznych jąder atomowych [*Opportunities in Nuclear Science – A long-range plan for the next decade*, http://www.sc.doe.gov/production/henp/np/nsac/nsac.html]. Drugi z nich, jest nadal intensywnie rozwijany w oparciu o wielodetektorowe układy rejestrujące promieniowanie gamma, i uzyska wielokrotnie zwiększone możliwości poprzez konstrukcje układów śledzących promieniowanie gamma w kuli germanowej (Tracking Arrays) [projekt GRETA, http://greta.lbl.gov/, projekt AGATA, http://www-dapnia.cea.fr/Sphn/Deformes/Agata/agata-www/index.shtml].

Przeważająca większość wysiłków doświadczalnych w badaniach struktury jąder atomowych jest obecnie skoncentrowana na badaniu jąder dalekich od stabilności. W Europie kierunek ten jest intensywnie rozwijany w laboratoriach GANIL (Francja), REX ISOLDE (Szwajcaria) czy GSI (Niemcy). Poza Europą są to laboratoria ORNL (USA), RIKEN (Japonia) lub TRIUMF (Kanada). Co więcej, wszystkie plany wieloletniego rozwoju dziedziny przewidują dramatyczne powiększenie doświadczalnego potencjału badawczego w tym właśnie kierunku. W porównaniu do znanych 253 jąder trwałych i około 2500 jąder radioaktywnych, planuje się w najbliższych 10 latach doświadczalne zbadanie około 1500 nowych jąder dalekich od stabilności. Będzie to możliwe dzięki budowie „fabryk" rzadkich izotopów, w których poprzez kruszenie jąder ciężkich uzyskiwane będą nuklidy o niezwykle egzotycznym składzie i własnościach.

Proponowane badania znakomicie wykorzystują wiedzę i umiejętności już zgromadzone w warszawskiej grupie teorii struktury jądra atomowego (załącznik 3). Posiadamy nie tylko odpowiednie narzędzia obliczeniowe i napisane przez nas programy numeryczne, ale co ważniejsze, olbrzymie doświadczenie w badaniach teoretycznych w tej dziedzinie.

d) Prognoza znaczenia wybranych badań dla nauki

Proponowane badania stanowią fragment badań podstawowych mających na celu dogłębne poznanie otaczającej nas rzeczywistości. Własności obiektów jądrowych stanowią podstawowy element ludzkiej wiedzy. Dotyczą one obiektów fizycznych, z których zbudowane jest 99% materii Wszechświata i dają odpowiedzi na fundamentalne pytania dotyczące budowy materii i jej cech charakterystycznych.

Badania jąder dalekich od stabilności mają olbrzymie znaczenie dla poznania procesów astrofizycznych, a w szczególności dla badania kreacji pierwiastków w gwiazdach. Ponad połowa pierwiastków i izotopów znajdowanych na Ziemi wytworzona została w procesach astrofizycznych zachodzących w obiektach eksplodujących (gwiazdy supernowe lub zderzenia gwiazd neutronowych), gdzie materia jądrowa znajduje się w stanach ekstremalnych, i większość jąder atomowych to jądra bardzo dalekie od stabilności. Obserwowane rozpowszechnienie pierwiastków w przyrodzie jest bezpośrednią konsekwencją własności tych jąder. Teoretyczny opis jąder dalekich od stabilności jest więc jednym z podstawowych elementów poznania otaczającego nas świata. Część z tych własności może być zbadana bezpośrednio, w obecnych lub planowanych doświadczeniach, ale przewidywania teoretyczne będą jeszcze bardzo długo jedynym źródłem wiedzy o olbrzymiej większości z nich. Poznanie oddziaływań w jądrach dalekich od stabilności, będące treścią proponowanych badań, jest więc jednym z najważniejszych zadań fizyki jądrowej.

Jądra atomowe stanowią też podstawowe laboratorium do badania funadmentalnych teorii materii. Jako jedne z licznych przykładów należy wymienić tu badanie podwójnego rozpadu β jąder atomowych, które mogą dostarczyć unikalnych informacji o własnościach i masach neutrin, oraz badanie superdozwolonych rozpadów β, które są obecnie źródłem najprecyzyjniejszych danych o macierzy mieszania stanów kwarkowych. Wydobycie informacji fundamentalnych z badań jąder atomowych wymaga precyzyjnej znajomości stanów jądrowych, dla których wykonywane są doświadczenia, a więc zrozumienie cech struktury jąder atomowych ma tutaj pierwszorzędne znaczenie. W szczególności, proponowane badania korelacji protonowo-neutronowych mają olbrzymie znaczenie w modelowaniu wyżej omówionych rozpadów β.