



Kraków, 28 maja 2020 r.

Dogodna lokalizacja rezonansu w ^{11}B w pobliżu progu emisji protonu

Polscy naukowcy pracujący w Polsce, Francji i Stanach Zjednoczonych przedstawili wyjaśnienie zagadkowego zjawiska emisji protonu opóźnionej rozpadem β^- ze słabo związanego stanu podstawowego jądra ^{11}Be z halo neutronowym. Badania w ramach modelu powłokowego zanurzonego w kontinuum sugerują istnienie kolektywnego rezonansu posiadającego wiele cech pobliskiego kanału emisji protonu, który wyjaśnia ten egzotyczny rozpad. Wykazano, że taki kolektywny rezonans jest powszechnym zjawiskiem w każdym otwartym układzie kwantowym, w którym występuje silne mieszanie stanów związanych i niezwiązanych.

Klasteryzacja jądrowa jest jednym z najbardziej tajemniczych zjawisk w fizyce subatomowej. Do licznych przykładów takich struktur należy stan podstawowy jądra ^{11}Li z halo dwóch neutronów i słynny rezonans Hoyle'a w ^{12}C , który odgrywa kluczową rolę w syntezie cięższych pierwiastków w gwiazdach. Wąskie rezonanse w pobliżu progu są bardzo ważne w warunkach astrofizycznych, w których większość reakcji zachodzi przy bardzo niskich energiach. W przypadku takich stanów kanały emisji cząstek mogą skutecznie konkurować z innymi rodzajami rozpadów, takimi jak rozpad przez emisję kwantów γ . Powszechność występowania wąskich rezonansów w pobliżu progu emisji cząstek sugeruje, że jest to ogólne zjawisko w każdym otwartym układzie kwantowym, w którym związane i niezwiązane stany silnie się mieszają, co skutkuje pojawianiem się kolektywnego stanu o cechach pobliskiego kanału rozpadu.

W niedawno opublikowanej pracy („Physical Review Letters” **124**, 042504 (2020)) polscy fizycy z IFJ PAN w Krakowie, GANIL w Caen i FRIB w East Lansing przedstawili wyjaśnienie emisji protonu opóźnionej rozpadem β^- ze słabo związanego stanu podstawowego jądra ^{11}Be . W pierwszym etapie tego zagadkowego, dwustopniowego procesu, neutron w stanie podstawowym jądra ^{11}Be o strukturze halo rozpada się na elektron, antyneutrino i proton, powodując transformację stanu podstawowego w ^{11}Be do rezonansu w ^{11}B . W drugim etapie następuje emisja protonu z tego rezonansu (patrz załączony diagram) do stanu ^{10}Be . Możliwość takiego procesu rozpadu stanu halo w ^{11}Be została wyjaśniona istnieniem rezonansu w ^{11}B o całkowitym momencie pędu i parzystości $1/2^+$, który posiada wiele cech pobliskiego kanału z emisją protonu. Bliskość progów emisji protonu i trytu w ^{11}B sugeruje, że rezonans ten może również zawierać domieszkę konfiguracji klastrowej.

Badania przeprowadzono w ramach modelu powłokowego zanurzonego w kontinuum (SMEC). Miarą kolektywizacji stanów w pobliżu progu na emisję cząstki (nukleon, deuteron, cząstka α itp.) jest energia korelacji, którą wylicza się dla każdego stanu własnego modelu SMEC. Energiami wzbudzenia, przy której kolektywizacja jest maksymalna, określają konkurujące efekty: sprzężenia do kanałów rozpadu oraz bariery kulombowskiej i odśrodkowej. Dla wyższych wartości momentu pędu ($L > 1$) w sprzężeniu stanu modelu powłokowego do kanału rozpadu i/lub dla sprzężenia do kanału z emisją cząstki naładowanej, ekstremum energii korelacji znajduje się powyżej energii progu tego kanału – wyjaśnia prof. Jacek Okołowicz z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

W najnowszych pracach doświadczalnych grupy Y. Arrada zaobserwowano emisję protonu w ^{11}B

ze stanu o całkowitym momencie pędu $1/2^+$ lub $3/2^+$, energii 11,425(20) MeV i szerokości 12(5) keV, który jest populowany w rozpadzie β^- stanu podstawowego ^{11}Be . Rezonans w ^{11}B , proponowany w tym eksperymencie, leży 197(20) keV powyżej progu na emisję protonu i 29(20) keV poniżej progu na emisję neutronu.

W badaniach teoretycznych z użyciem modelu SMEC uwzględniono efektywne oddziaływanie nukleon-nukleon w stanach dyskretnych modelu powłokowego, oraz oddziaływanie Wignera-Bartletta opisujące sprzężenie między nukleonami w dyskretnych stanach związanych i w stanach kontinuum. Obliczenia przeprowadzono dla stanów $J^\pi = 1/2^+$ i $3/2^+$ w ^{11}B , próbując określić najbardziej prawdopodobny moment pędu proponowanego rezonansu. Stany modelu powłokowego są mieszane przez sprzężenie z protonowym i neutronowym kanałem reakcji. Kolektywizację funkcji falowej stwierdzono tylko dla wzbudzonego, trzeciego w kolejności stanu $1/2^+$, dla którego maksymalna energia korelacji występuje 142 keV powyżej progu na emisję protonu. Stąd wywnioskowano, że rezonans w ^{11}B , pośredniczący w rozpadzie stanu podstawowego ^{11}Be do ^{10}Be , musi mieć całkowity moment pędu i parzystość $J^\pi = 1/2^+$.

Wąski rezonans $5/2^+$ przy energii 11,600(20) MeV, który leży nieco powyżej progu na emisję neutronu i rozpada się przez emisję neutronu lub cząstki α , ma istotny wpływ na wartość przekroju czynnego na wychwyt neutronu przez jądro ^{10}B . Olbrzymia wielkość tego przekroju czynnego sugeruje, że funkcja falowa rezonansu $5/2^+$ jest silnie zmodyfikowana przez sprzężenie do pobliskiego kanału emisji neutronu. Rzeczywiście, w obliczeniach modelu SMEC występuje szósty z kolei stan $5/2^+$ w pobliżu progu na emisję neutronu, który sprzęga się silnie w fali parcjalej $L=2$ do kanału $[^{10}\text{B}(3^+) + n]^{5/2^+}$. Wyznaczona teoretycznie kolektywizacja dla tego stanu jest maksymalnie 113 keV powyżej progu na emisję neutronu, blisko eksperymentalnej energii stanu $5/2^+$.

Badaliśmy zagadkowy przypadek rozpadu $\beta^- p^+$ jądra ^{11}Be z halo neutronowym. Analiza w modelu powłokowym zanurzonego w kontinuum potwierdza istnienie kolektywnego rezonansu w ^{11}B w pobliżu progu na emisję protonu i faworyzuje przypisanie mu liczb kwantowych $J^\pi = 1/2^+$. Funkcja falowa tego rezonansu upodabnia się do pobliskiego kanału emisji protonu. Oznacza to, że rozpad β^- w tym procesie można interpretować jako quasi-swobodny rozpad neutronu z halo ^{11}Be do rezonansu w ^{11}B , w którym pojedynczy proton jest sprzężony z rdzeniem ^{10}Be . Upodobnienie rezonansu $J^\pi = 1/2^+$ do kanału $[^{10}\text{Be} + p]$ wyjaśnia również duży współczynnik spektroskopowy dla rozpadu protonu i bardzo małą szerokość parcjalej rozpadu α tego stanu. Natomiast własności pobliskiego stanu $J^\pi = 3/2^+$, który głównie rozpada się przez emisję cząstki α , mogą być wyjaśnione przez czwarty stan $3/2^+$ modelu powłokowego zanurzonego w kontinuum. Stan ten bardzo słabo sprzęga się z kanałami emisji jednego neutronu bądź jednego protonu. Powyżej progu na emisję neutronu $[^{10}\text{B} + n]$ znajduje się rezonans $5/2^+$, który jest kluczowy dla wychwytu neutronów w ^{10}B . Funkcja falowa stanu szóstego $5/2^+$ modelu powłokowego zanurzonego w kontinuum wykazuje w pobliżu progu emisji neutronu bardzo silną kolektywizację, która jest wytłumaczeniem olbrzymiego obserwowanego przekroju czynnego na wychwyt neutronu przez ^{10}B – mówi prof. Okołowicz.

Powodem pojawienia się kolektywnego protonowego (neutronowego) rezonansu wokół progu emisji protonu (neutronu) jest sprzężenie $L=0$ ($L=2$) z przestrzenią protonowych (neutronowych) stanów rozproszonych. Pod tym względem, przypadek ^{11}B podąża za innymi przykładami stanów progowych w ^{12}C , ^{11}Li , czy ^{15}F . W przyszłości konieczne będą badania eksperymentalne reakcji $^{10}\text{Be}(p,p)^{10}\text{Be}$, by zrozumieć naturę rezonansu protonowego przy energii 11,425 MeV. Dla lepszego poznania natury neutronowego kanału reakcji i sąsiednich rezonansów neutronowych niezbędne będą badania reakcji $^{10}\text{B}(d,p)^{11}\text{Be}$. Ponadto, pogłębionej analizy eksperymentalnej i teoretycznej będzie wymagało określenie współczynnika rozgałęzienia dla kanału $\beta^- p^+$, gdyż obecnie sugerowana wartość eksperymentalna jest o czynnik 2 większa od przewidywań modelu powłokowego zanurzonego w kontinuum. Przyszłe badania teoretyczne powinny również wyjaśnić wpływ $L=0$ wirtualnego stanu neutronu na kanał reakcji $[^{10}\text{B} + n]$.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie zajmuje się strukturą materii i własnościami oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po wnętrza cząstek elementarnych. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”

o statusie Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) na lata 2012-2017. Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. W 2017 roku Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W klasyfikacji MNiSW Instytut został zaliczony do kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

KONTAKT:

dr hab. Jacek Okołowicz
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel. +48 12 662 8493
e-mail: jacek.okolowicz@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

1. Jacek Okołowicz, Marek Płoszajczak i Witold Nazarewicz
„Convenient Location of a Near-Threshold Proton-Emitting Resonance in ^{11}B ”
Physical Review Letters **124**, 042504 (2020)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.042502

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ20200528_foto1PLs.jpg

HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2020/05/28/IFJ20200528_foto1PLs.jpg

Emisja protonu opóźniona rozpadem β^- w ^{11}Be . Stan podstawowy ^{11}Be z halo neutronowym ulega rozpadowi beta do stanu wzbudzonego ^{10}B , który znajduje się tuż powyżej progu rozpadu protonu. Stan ten następnie rozpada się do stanu ^{10}Be poprzez emisję protonu. (Źródło: IFJ PAN)