

НОВИ РЕЗУЛТАТИ ВЪВ ФИЗИКАТА НА ЧАСТИЦИТЕ И В ЯДРЕНАТА ФИЗИКА

Динко Динев^{*}

1. ФИЗИКАТА НА ЧАСТИЦИТЕ В ЕПОХАТА LHC И СЛЕД НЕЯ

След провала на идеята да се построи в САЩ голям адронен колайдър с енергия в СЦМ 20 TeV, т. нар. Superconducting Super Collider или SSC, погледите и надеждите на физиците, работещи във физиката на високите енергии се обърнаха към CERN. Там, в подземния тунел на демонтирания $e^- - e^+$ колайдър LEP, започна монтирането на т. нар. Large Hadron Collider или LHC – $p - p$ колайдър, с енергия в СЦМ $2 \times 7 \text{ TeV}$ ¹.

Макар и с по-ниска енергия от SSC, строителството на новия ускорител погълна всички финансови, технологични и човешки ресурси на научния център.

Със свой значителен принос в създаването на това уникално научно съоръжение се включиха и голям брой страни, които формално не членуват в CERN – САЩ, Русия, Япония, Канада, Китай, Индия, Пакистан и др.

Някои технически проблеми, свързани с работещите при много ниска температура (1.9 K) свръхпроводящи магнити на колайдъра и с линиите, по които тези магнити се снабдяват с необходимия за охлаждането им двуфазен течен хелий, станаха причина за известно забавяне на сроковете на строителството. Ръководството на CERN предприе безпрецедентни мерки за мобилизиране и концентриране на усилията в създаването на LHC. Според коригирания план ускорителят трябва да бъде напълно готов в началото на 2007 г., а първите $p - p$ състлъкновения се очакват през лятото на същата година.

Монтирането на ускорителното оборудване в 27 km подземен тунел вече е започнало, като се очаква до края на настоящата година да бъдат напълно монтирани два от октантите на колайдъра.

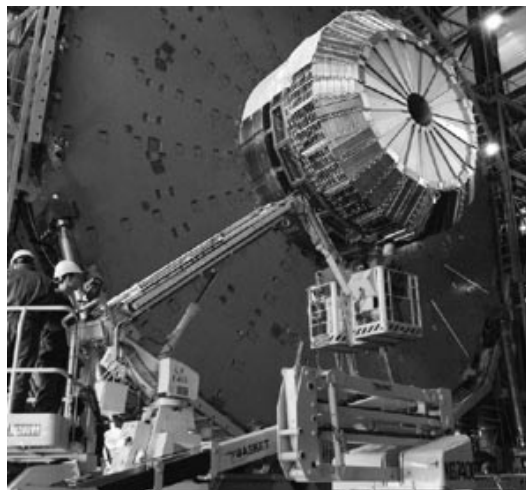
^{*} ст. н. с. д-р, ИЯИЯЕ, БАН

¹ Виж Д. Динев. Ускорителният комплекс на CERN. Светът на физиката, № 2, 2000, стр. 118 - 130

Паралелно със създаването на ускорителя се създават и детекторите и измерителната апаратура. Предвидени са четири мащабни експеримента – CMS, ATLAS, ALICE и LHCb. Трябва да се отбележи, че оборудването за тези експерименти не отстъпва, а в известен смисъл е и по-сложно и по-мащабно от оборудването на самия ускорител. С гордост трябва да се отбележи участието в създаването на оборудването за един от експериментите – CMS, на български физици и инженери. Това са колективи от ИЯИЯЕ на БАН и от ФФ на СУ. Тяхната работа и научен принос заслужават висока оценка и всяческа подкрепа.

Удивително е, че въпреки огромното напрежение около създаването на LHC, ръководството на CERN и европейската общност от физици, работещи във физиката на високите енергии, вече отправят поглед и към времето след LHC.

На 128 сесия на Съвета на CERN, новият генерален директор Р. Аймар (Robert Aymar) представи проект за дълговременна стратегия за научното развитие на CERN. Тази стратегия е обединена в седем пункта. Естествено, най-неотложната задача, стояща пред CERN е успешното завършване на строителството на LHC и провеждането на набелязаните експерименти. Предлага се през 2006 г. да започне строителството на нов линеен ускорител – инжектор на ускорителния комплекс на CERN. Този нов инжектор ще позволи към 2012 г. значително да се повиши светимостта на колайдъра.



Фиг. 1. Монтиране на адронния калориметър на експеримента CMS през м. юни 2004 г.

Предполага се, че към 2010 г. получените в различните експерименти на LHC научни резултати ще са довели до очакваното уточняване на физическата картина на микросвета и в частност по отношение на т. нар механизъм на Хигс.

Ако проведените експерименти действително доведат до дългоочакваното регистриране на Хигс бозоните, ще възникне задачата за детайлното изучаване на свойствата на тези частици.

Усилено се обсъжда възможността това да стане с помоща на един бъдещ $e^- - e^+$ линеен колайдър с енергия в СЦМ 500 – 1000 GeV. Предполага се, че това ще бъде един мащабен международен проект, който е наречен International Linear Collider (ILC).

Техническите решения, въз основа на които би могъл да се построи подобен мащабен колайдър, се разработват усилено в три научни центъра – DESY, SLAC и KEK. И в трите центъра са създадени работещи прототипи на бъдещия колайдър. Това са: Tesla Test Facility (TTF) в DESY, Next Linear Collider (NLC) в SLAC и Japanese Linear Collider (JLC) в KEK. Докато проектите в SLAC и KEK са базирани върху ускоряващи резонатори, работещи при стойна температура и честота 11.4 GHz, в DESY е разработен свръхпроводящ ускоряващ резонатор, работещ при температура 2K, честота 1.3 GHz и обезпечаващ много висок темп на ускорение.

Беше създадена международна комисия, т. нар International Technology Recommendation Panel, която да избере по-перспективната от тези технологии.

Резултатите от своята работа тази комисия докладва през август 2004 г. на Международната конференция по физика на високите енергии в Пекин. Комисията препоръчва бъдещият $e^- - e^+$ линеен колайдър да бъде построен на основата на разработената в DESY технология.

Линейният колайдър ще има дължина 30 km.

Предполага се, че инженерният проект на ускорителя ще бъде готов към 2010 г., а строителството на самия колайдър към 2015 г.

В следващите години предстои да се решат въпросите с мястото на бъдещия колайдър и с неговото финансиране.

Литература

1. CERN Courier, v.44, No 6, 2004, p. 5
2. CERN Courier, v. 44, No 8, 2004, p. 5

2. НАРУШЕНАТА СИМЕТРИЯ

За щастие далеч не цялата физика на частиците е свързана с ЛНС.

През 2001 г. започнаха работата два несиметрични $e^- - e^+$ циклични колайдъри: PEP II в SLAC и KEKB в KEK². Енергията в СЦМ на тези колайдъри е специално подбрана така, че при насрещните удари на електроните и позитроните да се ражда голямо количество В мезони и затова те са наречени В – фабрики.

Основните експерименти, провеждани на тези колайдъри, са ВаВар в SLAC и Bell в KEK. Те имат за задача детайлното изучаване на нарушаването на комбиниранията четност, т. нар. CP – violation при В мезоните.



Фиг. 2. Детекторът ВаВар в $e^- - e^+$ колайдъра PEP II в SLAC

И действително, още първите измервания показаха недвусмислено, че и при В мезоните, подобно на случая с К мезоните, комбиниранията четност не се запазва. Тези първи резултати бяха свързани с измерването на един от ъглите в т. нар. “унитарен триъгълник”, който играе основна роля в модела СКМ (Cabibbo – Kobayashi – Maskawa) на слабите взаимодействия. Измерената стойност на този параметър е $\sin 2\beta = 0.78 \pm 0.08$ и е в пълно съгласие с предсказанията на теорията. При В мезоните CP симетрията се

² Виж Д. Динев. Фабрики за частици. Светът на физиката, № 2, 2002, стр. 112 - 119

нарушава. Механизмът на това нарушение е непряк, тъй като е свързан с процеси, включващи $B - \tilde{B}$ осцилации.

През 2004 г. детекторите BaBar и Bell регистрираха и директно нарушаване на комбинираната четност. Както е известно В мезоните имат много малко време на живот и бързо се разпадат до по-малки частици. Един от каналите на разпад е:

$$B^0 \rightarrow K^+ + \pi^-, \quad \tilde{B}^0 \rightarrow K^- + \pi^+ \quad (1)$$

При неговото изучаване е регистрирана значителна асиметрия във вероятностите за двата процеса.

Така например, при анализирането на 1600 събития в BaBar е изчислена следната асиметрия:

$$\frac{n_{K^-\pi^+} - n_{K^+\pi^-}}{n_{K^-\pi^+} + n_{K^+\pi^-}} = -0.133 \pm 0.030 (stat) \pm 0.009 (syst) \quad (2)$$

Това означава директно нарушаване на CP симетрията с 13% при точност над 4.2σ .

Детекторът Bell също регистрира директно нарушаване на CP симетрията при системата $B^0, \tilde{B}^0$, но при анализа на по-малко, а именно 1000 събития и с по-малка достоверност – 2.4σ .

Измереното директно нарушаване на комбинираната четност при В мезоните е много по-силно, отколкото е подобният ефект при К мезоните и който беше измерен в експериментите Na48 в CERN и KTeV в Fermilab.

Литература

1. B. Aubert et all. 2004 <http://www.arxiv.org/abs/hep-ex/0407057>
2. Y. Chao et all. 2004 <http://www.arxiv.org/abs/hep-ex/0407025>
3. B. Aubert et all. Phys. Rev. Lett., v. 92, 2004, No 24, p. 241802
4. B. Aubert et all. Phys. Rev. Lett., v. 92, 2004, No 25, p. 251802
5. Phys. Rev. Lett. V. 93, 2004, p. 021601

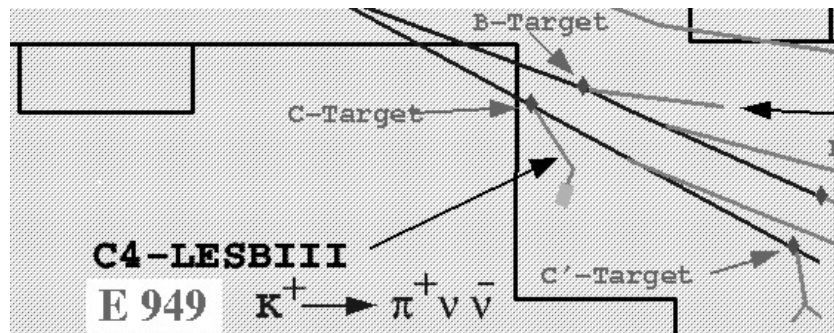
3. РЕДКИ РАЗПАДИ НА К МЕЗОНИТЕ

Експериментът E949 в Националната лаборатория на САЩ в Брукхайвън (BNL) в продължение на много години изучава реакцията:



Тази реакция е с много малка вероятност. Нейното изследване става възможно в BNL, благодарение на рекордно високата интензивност на протонните снопове, постигната в ускорителя AGS. Системата от детектори, използвана при експеримента също има изключително висока интензивност. Взети са и мерки за значителното намаляване на фона.

Схема на експеримента е дадена на Фиг. 3.



Фиг. 3. Схема на експеримента E949 в BNL

Регистрирани са само три събития – една от най-редките реакции регистрирана досега. Измерената вероятност на този канал на разпадане (branching ratio) е $1.47_{-0.89}^{+1.30} \cdot 10^{-10}$. Тази стойност е два пъти по-голяма от стойността, която се предсказва от Стандартния модел. Това окуражава някои физици да говорят за “нова физика”, но все пак трябва да се признае, че събраната досега статистика е все още твърде малка. Очаква се, че до края на 2004 г. ще могат да се регистрират около 20 събития. През 2005 г. измерванията ще продължат с експеримента KPIO.

Литература

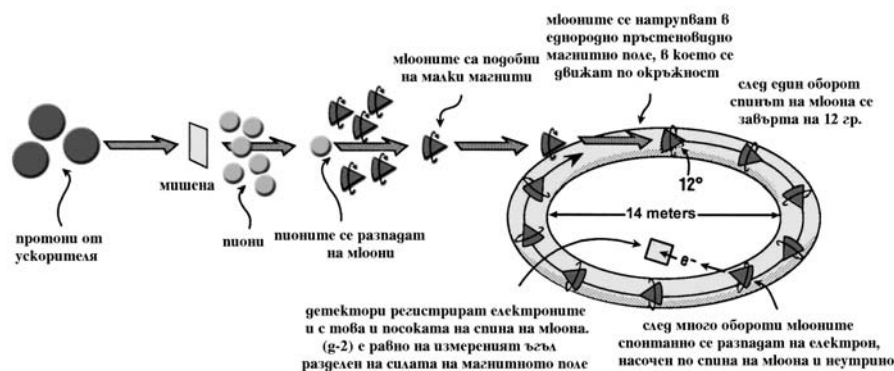
1. E949 Collaboration. <http://www.hep-ex/abs/0403036>
2. E949 Collaboration. Phys. Rev. Lett., v. 93, 2004, No 3, p. 031801.

4. НОВИ ИЗМЕРВАНИЯ НА АНОМАЛНИЯ МАГНИТЕН МОМЕНТ НА МЮОНА

Съгласно квантовата механика отношението на магнитния момент към спина, т. нар. жиромагнитно отношение за лептоните има стойност $g = 2$. Стандартният модел внася малка поправка към тази стойност, отчитайки процесите на непрекъсната емисия и абсорбция на виртуални частици.

През 2004 г. експериментът E821 в Националната лаборатория на САЩ в Брукхайвън (BNL) представи нови резултати по измерването на величината ($g-2$) при μ^- . Международната колаборация включва над 60 физика от 11 научни института на САЩ, Германия, Холандия, Русия и Япония. Новите резултати имат относителна точност 0.7 ppm.

Принципна схема на експеримента е дадена на Фиг. 4.



Фиг. 4. Принципна схема на експеримента E 821 в BNL за измерване на ($g-2$) на мюона

Измерената стойност на аномалния магнитен момент на мюона е:

$$a_{\mu} = 11\,659\,214\,(8)(3) \times 10^{-10} \text{ (0.7 ppm)} \quad (4)$$

Заедно с получените по-рано резултати по измерването на $(g - 2)$ за μ^+ , това представлява над 14 пъти повишаване на точността на измерванията на $(g - 2)$ проведени през 70-те години на миналия век в CERN. Полученият резултат се различава от предсказанията на теорията с 2.9σ .

Литература

1. G. W. Bennett et al. 2004 <http://www.arxiv.org/hep-ex/0401008>
2. Muon (g-2) Collaboration. Phys. Rev. Lett., v. 92, 2004, No 16, p. 161802.

5. ПЕНТАКВАРКЪТ, X(3872) И D_s(2317)

Известните досега частици са съставени от кварк и антикварк (мезони) или от три кварка (бариони). Съгласно QCD са възможни и частици съставени от четири, пет и повече кварки. Въпреки тези предсказания, досега подобни частици не бяха регистрирани.

И ето, че през 2003 г. при бомбардирането на въглеродни атоми с високоенергетични фотони, “произведени” в източника на синхротронно лъчение³ Spring-8 в Хариана, Япония беше регистрирана първата частица, съставена от 5 кварка – четири кварка и един антикварк. Тя беше наречена θ^+ (1540).

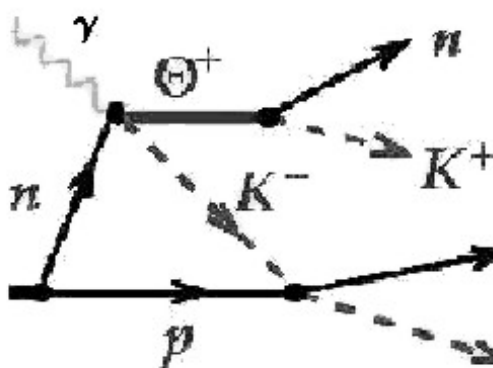
Пентакваркът е открит от групата на Т. Nagano след повторен анализ на експерименталните данни, извършен по методика, предложена от руският теоретик Д. Дяконов, работещ в NORDITA, Копенхаген. В рамките на киралния модел Дяконов предсказва съществуването на антидекуплет от десет състояния, представляващи комбинации от четири кварка и един антикварк.

Скоро след това, съществуването на новата частица беше потвърдено при експерименти на електронния ускорител CEBAF в

³ Виж Д. Динев. Синхротронното лъчение. Светът на физиката, № 3, 1998, стр. 162 - 167.

Националната лаборатория на САЩ “Т. Джеферсън” в Нюпорт, Вирджиния (JLAB). Това е експериментът CLAS (достоверност 7.8σ).

Предполага се, че пентакваркът се образува при сливането на K^+ мезон с неутрон, при процеса на фотораждане на K^+K^- двойка – Фиг. 5.



Фиг. 5. Процес на раждане на θ^+ (1540) частица, състояща се от пет кварка

В момента в JLAB се провеждат мащабни експерименти по изследване на свойствата на θ^+ (1540) – спин, четност и естествена ширина.

При изследването на разпадните продукти на B мезоните “произвеждани” в B- фабриката KEKB в KEK в Цукуба, Япония е открита друга нова частица X (3872) (в скобите е масата на частицата в MeV). Тази частица, наречена “мистериозният мезон”, тежи колкото един хелиев атом и е изключително краткоживуща. За да се обяснят нейните свойства, трябва да се предположи, че X (3872) е съставена от четири кварка – два кварка и два антикварка.

По-късно, съществуването на X (3872) беше потвърдено и от експерименти в FNAL.

Друга частица, която може би също се състои от четири кварка е открита при експерименти на B – фабриката PEP – II в SLAC. Тази частица е наречена Ds (2317).

Литература

1. <http://www.jlab.org/intralab/calendar/archive03/pentaquark>
2. Nature, v. 424, 03 July 2003, p.7
3. CERN Courier, September 2003, p.5
4. E. van Beveren, G. Rupp. Phys. Rev. Lett., v.91, 2003, No 1, p. 012003

6. НАРУШАВАНЕ НА ЗАРЯДОВАТА СИМЕТРИЯ

Съгласно предположението на В. Хайзенберг протонът и неутронът са две, леко различаващи се състояния на една и съща частица, т. нар. нуклон (известната концепция за изоспина). И наистина, много ядрени реакции протичат напълно идентично при замяната на протона с неутрон и обратно. Тази симетрия на микросвета е наречена зарядова симетрия (CS). CS е ядренофизичен ефект и не трябва да се бърка със зарядовата (C) четност във физиката на частиците (замяната на всички частици с техните античастици).

Подобно на други симетрии, съществуващи в микросвета, CS не е пълна симетрия – съществуват примери за нарушаване на CS, т. нар. Charge Symetry Breaking (CSB).

Експерименти проведени през 2003 –2004 г. в циклотронните центрове IUCF в университета в Индиана, САЩ и TRIUMF, във Ванкувър, Канада дадоха нови доказателства за нарушаването на зарядовата симетрия в ядренофизичните процеси.

Изучаването на CSB хвърля светлина върху причината, поради която протонът и неутронът имат леко различаващи се маси. В крайна сметка, това се свежда до уточняването на масите на u и d кварките. QCD е приблизително инвариантна спрямо операцията за размяна на местата на u и d кварките. Но тази симетрия се нарушава поради наличието на макар и малка разлика в масите на u (4 MeV) и d (8 MeV) кварки и в техния електричен заряд: u (+2/3) и d (-1/3). Ако зарядовата симетрия не се нарушаваше неутронът и протонът биха били напълно идентични частици. Всъщност докато протонът е положително зареден, неутронът е неутрален. Той е и малко по-тежък, като се разпада по схемата: $n \rightarrow p + e + \tilde{\nu}_e$.

В IUCF се изучава реакцията:

$$D + D \rightarrow \alpha + \pi^0 \quad (5)$$

Очевидно, вълновите функции на D и α са инвариантни спрямо размяната на местата на u и d кварките. Но вълновата функция на $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$ не е. Следователно, докато началното състояние на тази реакция е “четно” спрямо размяната на u и d кварките, то крайното състояние е “нечетно”- зарядовата симетрия забранява тази реакция. Следователно, регистрирането на реакцията е пряко доказателство за CSB.

Ускорени в циклотрона на IUCF деутрони бомбардират деутериева газова мишена. Възникналите в резултат на реакцията хелиеви ядра се сепарират и детектират. Получаваните пиони имат много малко време на живот и се разпадат на двойка γ - кванти, които също се регистрират.

За период от 2 месеца в IUCF са регистрирани няколко десетки подобни реакции. Измереното сечение на реакцията се съгласува много добре с теоретичните модели.

В циклотронния център TRIUMF изучават друга реакция:

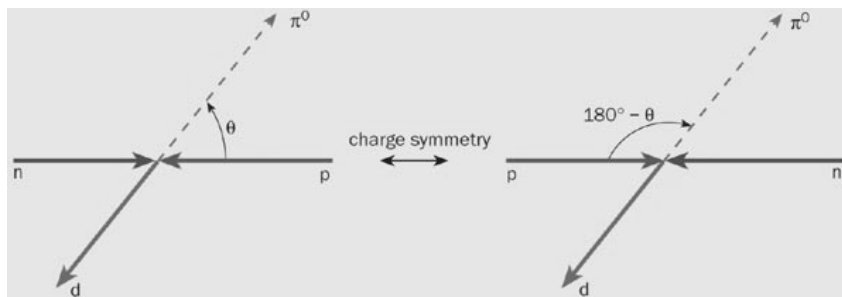
$$p + n \rightarrow D + \pi^0 \quad (6)$$

Сечението на тази реакция зависи от ъгъла θ между направлението на налитания неутрон и отлитания пион. Ако зарядовата симетрия беше точна и не се нарушаваше, то сечението на реакцията в СЦМ би било симетрично спрямо стойността $\theta = 90^\circ$ - Фиг. 7.

Наличието на асиметрия в ъгловата зависимост на сечението на реакцията спрямо тази стойност е недвусмислено указание за CSB. Измерванията проведени в TRIUMF показват наличието на подобна малка асиметрия от 0.17%.

Литература

1. E. J. Stephenson et al. Phys. Rev. Lett., v. 91, No 14, 2003, p. 142302.



Фиг. 7. Изследване на нарушаването на зарядовата симетрия в реакцията $p + n \rightarrow D + \pi^0$

7. СИНТЕЗИРАНЕ НА 113-ТИЯ И НА 115-ТИЯ ЕЛЕМЕНТИ

През 2002 г. в международната научна общност се разгоря грандиозен скандал свързан с предполагаемото синтезиране в Националната лаборатория на САЩ в Бъркли (LBNL) на елемент с атомен номер $Z = 118$. След продължително разследване се оказва, че данните за това “откритие” са фалшифицирани. За съжаление, основна роля в тази научна фалшификация изигра нашият сънародник д-р Виктор Нинов⁴.

След този скандал е съвсем естествено всяко съобщение за синтезирането на нови елементи да се посреща с известна доза скептицизъм.

И ето, че през 2004 г. се появи съобщение за синтезирането наведнъж на два нови свръхтежки елемента – с атомни номера $Z=113$ и $Z= 115$. За щастие, в този случай всичко изглежда О. К. и достатъчно солидно.

Откритието е извършено от международен колектив, включващ физици от Лабораторията за ядрени реакции (ЛЯР) на Обединения

⁴ Виж Св. Рашев. За законите на морала и честта в науката. Светът на физиката, №3, 2003, стр. 241 - 249

институт за ядрени изследвания в Дубна и от Лоурънсовата национална лаборатория на САЩ в Ливърмор (LLNL). Експериментите са проведени в ЛЯР на циклотрона $U - 400$ с помощта на специален газонапълнен магнитен сепаратор.

Първите свръхтежки (трансуранови) елементи бяха синтезирани в LBNL между 1940 – 1950 гг. чрез използването на реакции на неутронен захват⁵. Като източник на неутрони е използван ядрен реактор. По този метод в LBNL е синтезирана цяла поредица от химически елементи, до елемента с $Z=100$, наречен Фермиум.

За синтезирането на по-тежки ядра този метод се оказва неприложим. Новото ядро се разпада, преди да има време да захване достатъчен брой неутрони.

За синтезирането на елементи с $Z>100$ се използват ядрени реакции с тежки йони.

Проблемът при този подход е, че новото ядро, получено при сливането на налитащото с висока енергия ядро и ядрото на мишената, е в силно възбудено състояние и има голяма вероятност то да претърпи спонтанно деление.

Пробивът е направен през 1974 г., когато в ЛЯР са открити т. нар. реакции с тежки йони на студено сливане. При този тип ядрени реакции мишени от тежки елементи (Pb, Bi) се бомбардират с ускорени ядра с маса по-голяма от $A=40$. Значителна част от кинетичната енергия на налитащите ядра се поглъща в мишената и резултатното ядро се оказва много по-малко възбудено.

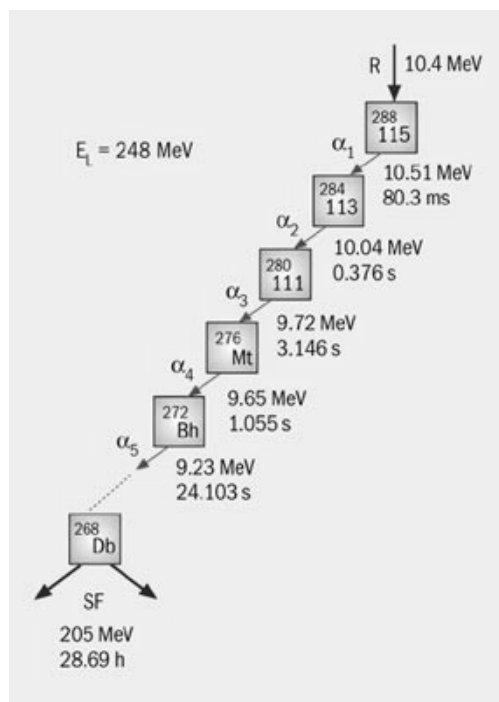
Използвайки реакции на студено сливане физиците от Центъра за изследвания с тежки йони GSI в Дармщадт, Германия успяха през 90-те години на миналия век да синтезират елементи с $Z=107$ до $Z=112$. Елементът с $Z=110$ е наречен Дармщадтиум.

В същото време в ЛЯР, под ръководството на Г. Н. Фльоров, бяха синтезирани елементи с $Z= 102$ до $Z = 106$. Елемента с атомен номер $Z = 105$ беше наречен Дубнийум.

За съжаление, вероятността за образуването на ново свръхтежко ядро при сливането на две тежки ядра спада експоненциално с атомния номер Z . Освен това, съставното ядро, което се образува при реакцията на студен синтез съдържа относително малък брой неутрони, далеч по-малко то магическите числа $N=162$ и $N=184$.

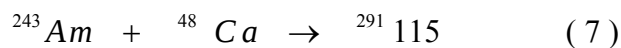
⁵ Виж Н. Балабанов. Ядрената ойкумена. Светът на физиката, №3, 2001, стр. 210 - 217

разпад. В резултат на подобен α - разпад от елемент с атомен номер Z се получава дъщерно ядро с атомен номер $(Z - 2)$, “ядро - внуче” с атомен номер $(Z - 4)$ и т. н. В резултат на подобна серия от α - разпади се пресича островът на стабилност докато се попадне в област, в която преобладава вероятността за спонтанно делене – Фиг. 8.



Фиг. 8. Експеримент по синтезирането на елемент с $Z = 115$ в ЛЯР на ОИЯИ, Дубна

В експеримента е осъществена реакцията:



Ядрото на елемента $Z = 115$ съдържа нечетен брой протони и неутрони, а това значително намалява вероятността за спонтанно делене.

Полученото ядро $^{291}115$ има 30 MeV енергия на възбуждане и се освобождава от излишъка от енергия чрез излъчването три неутрона и един γ - квант, преминавайки в ядро на изотопа $^{288}115$.

Този изотоп също има нечетен брой протони и неутрони. По-нататък той се разпада за 90 ms чрез излъчването на α - частица до по-лекия елемент с $Z = 113$. Елементът с $Z = 113$ е много по-дългоживущ, $T_{1/2} = 1.2$ s. Той от своя страна се разпада също чрез излъчването на α - частица и т. н., докато след пет последователни α - разпада не се достигне до елемента Db ($Z = 105$).

Следователно в експеримента трябва да се регистрира последователност от пет α - разпада, като енергията и времето на излъчване на α - частиците са строго корелирани.

Цели 28.7 часа по-късно, т. е. на другия ден, се регистрират два сигнала при енергия 200 MeV от спонтанното делене на Db ($Z = 105$).

В проведените в ЛЯР експерименти досега са регистрирани три подобни верижки от последователни α - разпада.

Ако тези резултати се потвърдят, това ще е голям пробив в ядрената физика – съществено доближаване до острова на стабилност.

Литература

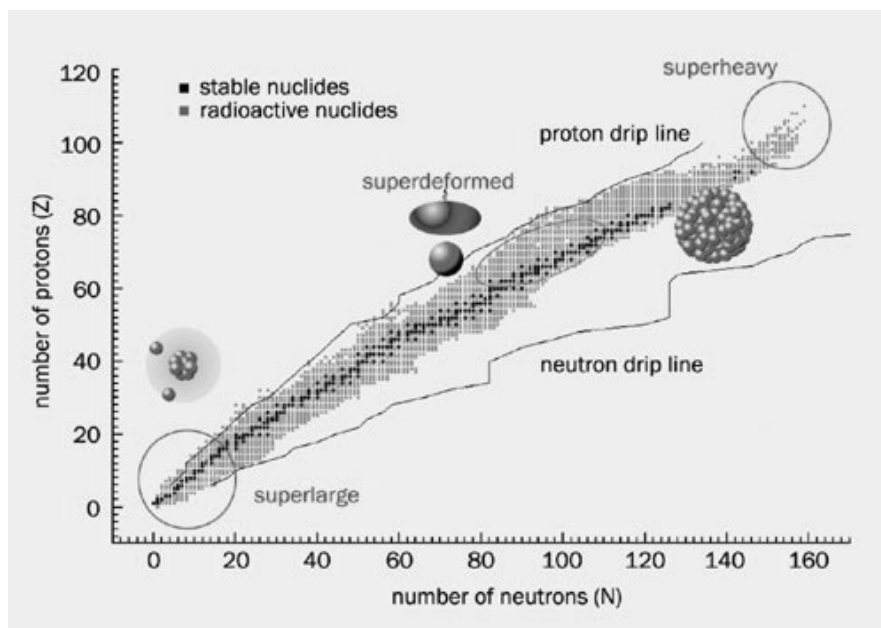
1. Y. Oganessian et al. LLNL Report, UCRL- ID- 151619, 2003
2. Y. Oganessian et al. Phys. Rev. C, v. 69, 2004, p. 021609
3. Y. Oganessian et al. Phys. Rev. C, v. 69, 2004, p. 054607

8. ЕКЗОТИЧНИ ЯДРА

През 2004 г продължиха изследванията на супердеформираните и свръхголемите ядра. Тяхното експериментално изследване е от голямо значение за проверка на различните ядрени модели.

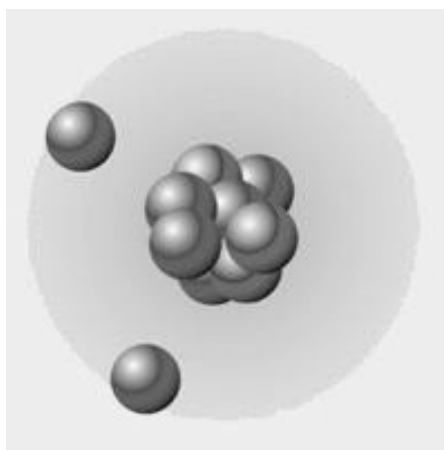
Известно е, че ядрата с неблагоприятно отношение на броя на протоните към броя на неутроните имат форма, която се отклонява силно от сферичната. Такива ядра приемат формата на цилиндър или пък на диск. Това са т. нар. спердеформирани ядра. Те притежават голям излишък на ротационна енергия и спектърът им се състои от серия от каскадни γ - линии.

Друг тип екзотични ядра са свръхголемите ядра – Фиг. 9.



Фиг. 9. Екзотични ядра

С помощта на on-line изотопния сепаратор ISOLDE в CERN е получено голямо количество ядра ^{11}Li . Това ядро има 8 нейтрона и 3 протона. Радиусът на това ядро е почти равен на радиуса на ^{208}Pb , а в същото време ^{11}Li е 20 пъти по-леко ядро.



Фиг. 10. Модел на ядрото ^{11}Li

В ядрото ^{11}Li два от неутроните са отдалечени на голямо разстояние от останалите нуклони, които образуват своеобразна сърцевина – Фиг. 10. Енергията на свързване на двата неутрона от халото е само 300 KeV. Други свръхголеми ядра са: ^{14}Be , ^{19}C , ^{17}Ne .

Литература

1. X. Jensen et al. Rev. Mod. Phys., v. 76, 2004, p. 215
2. B. Jonson. Physics Reports, v. 389, 2004, p.1

