

ЯДРЕНАТА ОЙКУМЕНА*

Никола Балабанов*

I. "ВЕЛИКИТЕ ГЕОГРАФСКИ ОТКРИТИЯ" В ЯДРЕНАТА ФИЗИКА

Преди 2500 години древногръцкият историк и географ Хекатей Милетски обозначава с термина “ойкумена” населената от човека част от Земята. Представа за тогавашните географски познания ни дава фиг. 1 [1]. Със заштрихованите части са означени океаните и моретата: Средиземно (1), Черно (2), Каспийско (3) и Черно (4). Хекатей Милетски включва в “Ойкумена” (незаштрихованата част): Европа (без северната ѝ част), Северна Африка, Мала- и Средна Азия, Индия.



Фиг.1

Големият пробив в тези познания е направен две хилядолетия по-късно - по време на “великите географски открития”, с които се доказва кълбовидната форма на Земята, откриват се нови континенти и пътища между тях, обогатява се и се уточнява картографията на земната повърхност. Опиянението, обхванало тогавашните

* проф. дфн, Физ. факултет на ПУ “П. Хилендарски”

мореплаватели, за търсене на нови земи, вълнуващо е описано от Ст. Цвайг в увода на романа “Магелан”:

“Експедициите следват една след друга - навсякъде, на север, на юг, на изток, на запад се появяват нови острови, нови земи ... Картата на света се изменя и разширява от година на година, от месец на месец ...”. За няколко десетилетия, пише писателят, експедициите са открили “повече светове и повече непознати земи, отколкото преди това цялото човечество през стотиците хиляди години на съществуването си”.

Подобно на географията от онова време, ядрената физика - рожба на 20-тото столетие, за кратко време разшири своите “територии”, като откри нови явления и закономерности, обясняващи същността на тези явления. Разликата с мореплавателите от XV и XVI-те столетия е в мащабите на пътешествията. Атомното ядро - този необикновен съгъстък от протони и неутрони, има размери по-малки от милионна част на милионната част от сантиметъра ($< 10^{-14}$ m). Не може да не се възхищаваме от дързостта на онези, които без правилна карта (подобно на Колумб), без да познават териториите, релефа и екзотиката на ядрения свят, тръгнаха да го покоряват и разширяват.

В поредица от статии ще разгледаме някои от “географските” постижения на ядрената физика, без да засягаме подробно нейния теоретичен фундамент.

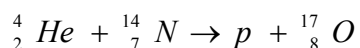
КРАТКА ИСТОРИЯ

*В началото бяха лъчите***

Когато на 1-ви март 1896 г. Анри Бекерел изважда от тъмния шкаф почернената плака, с която преди това е опаковал уранов образец, той едва ли е предполагал, че пръв измежду хората улавя посланието от един непознат дотогава свят. През следващите години, главно благодарение на Мария и Пиер Кюри, както и на Ъ. Ръдърфорд, явлението радиоактивност се превръща в едно от най-важните направления на физиката. През 1900 година Мария Кюри за пръв път изказва хипотезата за възможно взаимно превръщане на елементите при радиоактивните процеси.

Атомното ядро - действителният източник на радиоактивните лъчи е открито през 1911 г. от Ръдърфорд. През 1914 г. той вече

изказва идеята за изкуствено превръщане на атомните ядра, респ. атомите на елементите. Идеята е осъществена от него през 1919 г. Първата ядрена реакция има вида:



Тази реакция може да се смята за начало на новата “алхимия”, в която се осъществява несбъднатата през хилядолетията мечта за превръщане на едни елементи в други.

Друга знаменателна година за ядрената физика е 1932. През тази година Чадуик открива неутрона (n), Андерсън - позитрона (e^+); Кокрофт, Уолтън и Лоуренс пускат първите ускорители и осъществяват ядрени реакции с ускорени частици; Хайзенберг и Иваненко поставят началото на теоретичната ядрена физика.

Благодарение на тези открития вече е изяснен съставът на атомното ядро - това е забележително асорт от протони и неутрони, което природата е скътала дълбоко, дълбоко в пазвите си. С помощта на тези две частици тя е създала близо 300 стабилни ядра, които принадлежат на елементите, разпространени в земната кора. Оказва се, че всеки химичен елемент притежава две - три ядрени разновидности - т.н. изотопи, които имат един и същи брой протони, но се различават по количеството неутрони в състава си.

Мощен тласък на развитието на ядрената физика дава откритата от И. и Ф. Жолио - Кюри изкуствена радиоактивност (1933 - 34 г.), която няколко месеца по-късно Е. Ферми, използвайки неутрони, превръща в основен метод за получаване на нови изотопи. В ръцете на физиците се появява могъщо средство за преобразуване на атомните ядра и за получаване на ядрени разновидности.

Именно по това време (средата на 30-те години) в ядрената физика настъпва онова оживление за търсене на нови “земи”, подобно на описаното от Ст. Цвайг в неговия роман. Въоръжени с източници на α -частици, протони, неутрони и деутрони, експериментаторите започват да получават нови радиоактивни изотопи, дори нови елементи: технеций (1937 г.) и франций (1939 г.). Тези открития ознаменуват началото на “великите географски открития” в ядрената физика.

През 1940 г. Мак-Милан от Калифорнийския университет в САЩ синтезира нептуния ($Z = 93$) и ядрената физика навлиза в областта на трансурановите елементи - нови, неизвестни за науката територии [2]. В духа на описанията на Цвайг, може да се каже, че

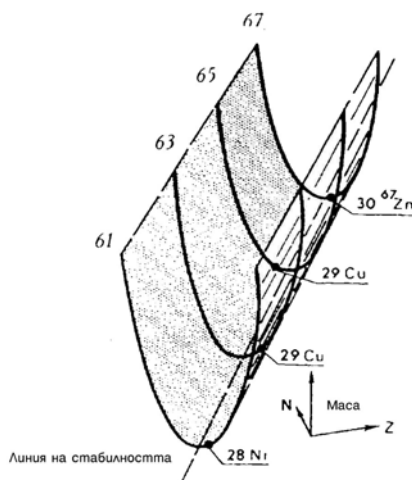
картата на атомните ядра “се изменя и разширява от година на година, от месец на месец” появяват се нови острови, нови земи. На езика на ядрената физика това са т.н. изотопи, изотони, изобари, изомери и т.н.

Преди да опишем някои от най-новите постижения в синтезирането на атомни ядра, нека припомним общите правила, по които природата е изградила

ДОЛИНИТЕ И СТРЪМНИНТЕ НА ЯДРЕНИЯ ЛАНДШАФТ.

Най-простият ядрен модел уподобява ядрото на течна капка от несвиваема течност. На основата на този модел са получени полезни изрази, които свързват устойчивостта на ядрата (т.е. енергията на свързване) с техния нуклеонен състав. С помощта на тези изрази енергията на ядрата може да се представи във вид на функции от броя на протоните (Z), неутроните (N) или на масовото число ($A = Z + N$). При постоянно A зависимостта на масата от Z има параболичен характер: $M \sim (N - Z)^2$.

На фиг. 2 са показани параболите за ядра с $28 \leq Z \leq 30$ при определени стойности на масовото число. На фигурата ясно се очертава “долината”, в която са разположени стабилните ядра. За тези ядра отношението N/Z се изменя от единица в началото на периодичната система, до $N/Z \approx 1,6$ - в края ѝ.

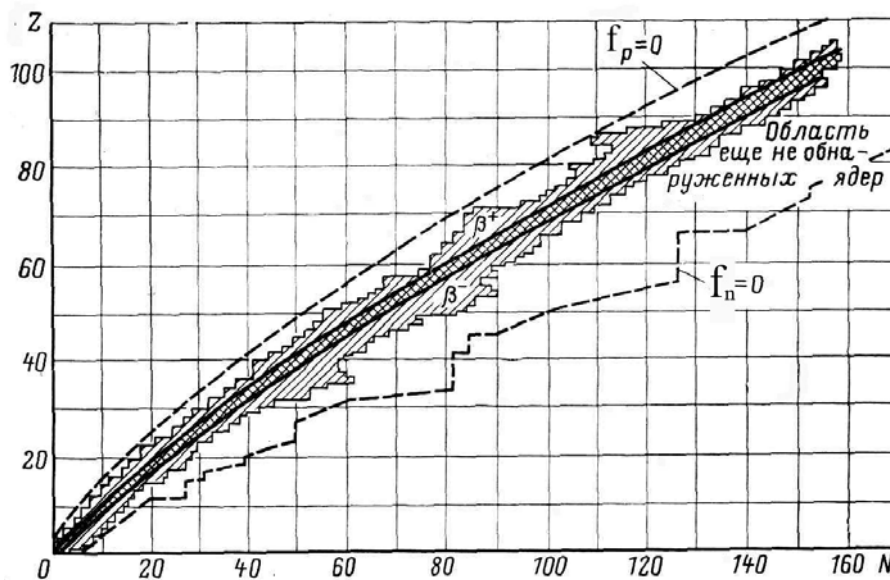


Фиг. 2

Ядрата, които са разположени по “склоновете” се стремят да “паднат” в долината, претърпявайки радиоактивно разпадане. Изотопите с “излишен” брой неутрони, в сравнение със стабилните изотопи на даден елемент, са неустойчиви по отношение на изпускане на бета-частици (β^-). В такива случаи неутронът се превръща в протон ($n \rightarrow p$) и изотопът на даден елемент (Z, A) се превръща в изотоп на друг елемент ($Z+1, A$), който се намира по-близо до долината на стабилността, понеже има един неутрон по-малко и един протон повече. От другата страна на долината са разположени неутронодефицитните ядра, които имат в състава си твърде много протони. Те се приближават към долината на устойчивост, превръщайки в процеса на позитронното разпадане ($p \rightarrow e^+ + n$) един от протоните в неутрон.

С увеличаване броя на нуклеоните от който да е “сорт” (в сравнение със стабилните ядра) тяхната връзка с ядрото намалява, в резултат на което неговото време на живот се скъсява. За определен брой неутрони в ядрото N , съществува някакъв максимален брой протони $Z_{\text{макс}}$, който може да се присъедини към ядрото и да образува протонноустойчиво ядро. Присъединяването на още един протон ($Z_{\text{макс}} + 1$) не е възможно, защото за него енергията на свързване ще бъде отрицателна. Ако през всички стойности на $Z_{\text{макс}}(N)$ се прекара линия, тя ще образува границата на протонната стабилност, $f_p = 0$.

Аналогично, за всеки брой протони Z , съществува някакъв максимално възможен брой неутрони $N_{\text{макс}}$, при който могат да се образуват неутроноустойчиви ядра. Съвкупността от стойностите $N_{\text{макс}}(Z)$ определя границата на неутронноустойчивите ядра, $f_n = 0$. Общият вид на неутронно-протонната диаграма на изотопите е показан на фиг. 3. Със заштрихованата ивица е обозначена областта на известните изотопи. Зад външните линии ($f_p = f_n = 0$) започва “морето на нестабилността”.



Фиг. 3

За да стане по-ясна представата за релефа на ядрената карта ще прокоментираме една от важните характеристики на нестабилните ядра - тяхното “време на живот”, τ . Според този параметър ядрата могат да се класифицират така:

Радиоактивни ядра - при $\tau \geq 10^{-12}$ s;

Квазистационарни състояния - $10^{-12} \geq \tau \geq 10^{-22}$ s;

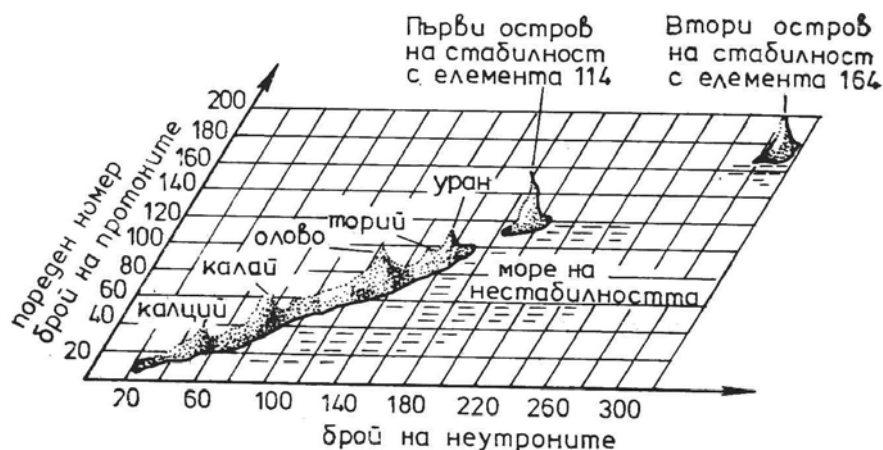
При $\tau \leq 10^{-22}$ s ядрата не могат да съществуват.

Установено е, че ядрата, намиращи се в квазистационарно състояние, запазват своите специфични свойства (маса, състав, заряд, квантови характеристики) и могат да се разглеждат като нуклеонностабилни. Грубите оценки показват, че областта на нуклеонностабилните ядра се населява от 6 - 8 хиляди изотопа. Синтезирането на ядрата в тази област е една от най-интересните задачи на ядрената физика. Особен интерес представлява изучаването на ядрата около границите на стабилност, дори и тези с отрицателна енергия на свързване. Подобно на краткоживущите състояния на елементарните частици, те се проявяват във вид на резонанси.

Изследванията на такива резонансни състояния носят важна информация за възможностите за по-нататъшно предвиждане към границите на стабилност, предсказани от теорията на атомното ядро. А тези предсказания не могат да претендират за точност и изчерпателност.

Въпреки значителния прогрес на нашите теоретични и експериментални знания за свойствата на ядрата, те трудно могат да се екстраполират в неизвестните още области на неутронообогатените ($N \gg Z$) и неутронодефицитни ($N \leq Z$) ядра. По образното сравнение на американския физик А. Бромли екстраполацията на натрупаните знания за предсказване на свойствата на възможните атомни ядра напомня за опитите да се опише ландшафта на една страна, основавайки се на познанията за дъното и най-близките склонове на едно от нейните дефилета.

Капковият (макроскопичен) модел на ядрото е нагледен и полезен, но с него може само грубо да се опише релефът на ядрената ойкумена. Много експериментални данни за характеристиките на ядрата показват, че в тях се наблюдава някаква структура, аналогична на електронните слоеве в атомната обвивка. Едно от удивителните свойства на ядрената структура е високата устойчивост на “ансамбъла” от нуклеони при определен брой протони или неутрони, а именно: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Поради особеното им място в ядрената физика, тези числа са наречени “магически” и определят броя на нуклеоните в запълнените слоеве. Всички ядра с магически брой протони или неутрони в състава си, притежават повишена стабилност, т.е. имат по-голяма енергия на свързване в сравнение с околните. Ползвайки нагледните представи на географията, посочените особености могат да се илюстрират с релефната карта на фиг. 4. На нея се извисяват “планините” на калция ($Z = 20$), калая ($Z = 50$) и оловото ($Z = 82 = 126$) [3]. Особено забележително е, че тази карта демонстрира едно от важните предсказания на слоестия (микроскопичния) модел на ядрото - съществуването на свръхтежки стабилни елементи - т.н. “Острови на стабилността” (при $Z = 114, 164$ и др.).



Фиг. 4

Не по-малък е интересът и към леките и средни ядра, които лежат близо до границите на стабилност. Този интерес непрекъснато расте, причините за което са съвсем основателни:

- пограничните ядра дават уникална възможност за проверка на теоретичните подходи, които се развиват за обяснение на ядрените свойства, вече приложени в нови условия, за нови, необикновени комбинации от протони и неутрони;

- има указания, че ядрата, лежащи близо до границите на стабилност, изпитват необикновени превръщания;

- изследванията в тези области имат важно значение за астрофизиката, по-специално за т.н. "r-процеси" (бързи процеси, в които получените в резултат на залавяне на неутрони нестабилни изотопи, успяват да заловят допълнителни неутрони преди да се разпаднат.

Естествено, една от задачите на ядрената физика е възможно по-пълно изучаване на всички ядра, които могат да съществуват достатъчно дълго време ($\tau > 10^{-22}$ s). За тази цел физиците трябва да разполагат с необходимата

Артилерия за покоряване на нови територии.

Сред начините за получаване на радиоактивни изотопи основни са следните:

- делене на ядрата и залавяне на неутрони в ядрените реакции;
- ядрени реакции с леки частици (p , d , α) при сравнително ниски енергии;
- реакции с високоенергетични частици (стотици MeV);
- реакции с ускорени тежки йони.

В това отношение ядрената физика получи мощен тласък от развитието на ускорителните установки, предназначени за получаване на интензивни снопове тежки йони - атоми на химическите елементи с маса по-голяма от масата на хелиевия атом. Ролята на ускорителите на тежки йони може да се сравни с онази, която откриването на телескопа е изиграло в астрономията.

С помощта на електростатични ускорители могат да се получат снопове от тежки йони в масовия диапазон $A \leq 100$ с енергии до 10 MeV/нуклеон и с интензитет $10^9 \div 10^{11} \text{ s}^{-1}$. По-нататъшно увеличаване на енергията и разширяване диапазона на ускоряваните маси става с ускорители от типа на циклотрона, синхротрона, линейните ускорители и др. Например линейният ускорител UNILAC (Германия, Дармщадт) произвежда йони от ^{14}N до ^{238}U с максимална енергия 20 MeV/нуклеон и с интензитет $10^{11} \div 10^{13} \text{ s}^{-1}$. Циклотронът Y-400 в Дубна (Русия) ускорява йони от ^{12}C до ^{238}U с енергии $15 \div 20$ MeV/нуклеон и интензитет $10^{12} \div 10^{13} \text{ s}^{-1}$.

Най-новото поколение ускорители на тежки йони позволява да се получат високоинтензивни снопове от радиоактивни ядра, които се оказаха превъзходен метод за изследване свойствата на ядрената материя. С помощта на този метод силно се разширява фронтът на изследване на екзотичните ядра, отдалечени от долината на стабилността.

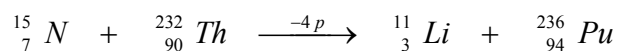
Поради изключителната важност на

ЯДРЕНИТЕ РЕАКЦИИ С ТЕЖКИ ЙОНИ

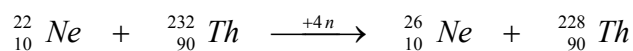
за синтезиране на нови нуклиди, ще посочим най-ефективните от тях:

1. Реакции на сливане. При тях се образуват промеждутъчно възбудено ядро, което след това преминава няколко етапа на преобразуване: изпускане на няколко бързи нуклеона, установяване на статистическо равновесие и делене (или “изпаряване” на няколко неутрона). Тези реакции се използват за синтез на силнонеутронодефицитни ядра.

2. Реакции с предаване на нуклеони: две сложни ядрени системи се сблъскват, в резултат на което става интензивен обмен на нуклеони, например



или



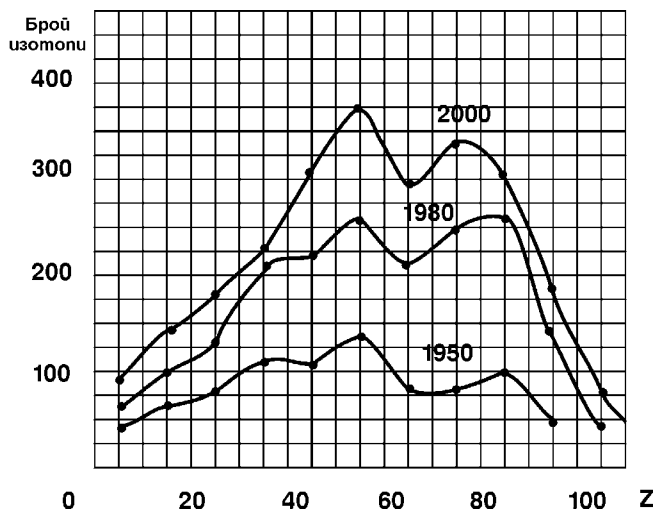
С тези реакции успешно се синтезират неутронообогатени изотопи на леките елементи.

3. Преки ядрени реакции. Те се съпровождат с избиване на нуклеони и отделни кластери от ядрата - мишени. На основата на законите за запазване, чрез определяне свойствата на едно от ядрата, се съди за характеристиките на другото. Така се изследват ядрата в квазистационарно състояние, когато прякото им регистриране е невъзможно.

4. Реакции с фрагментация. С увеличаване на енергията на бомбардиращите ядра ($E > 30 \text{ MeV/n}$), мишената се разбива на множество фрагменти - по-леки ядра, с широк диапазон на масите,

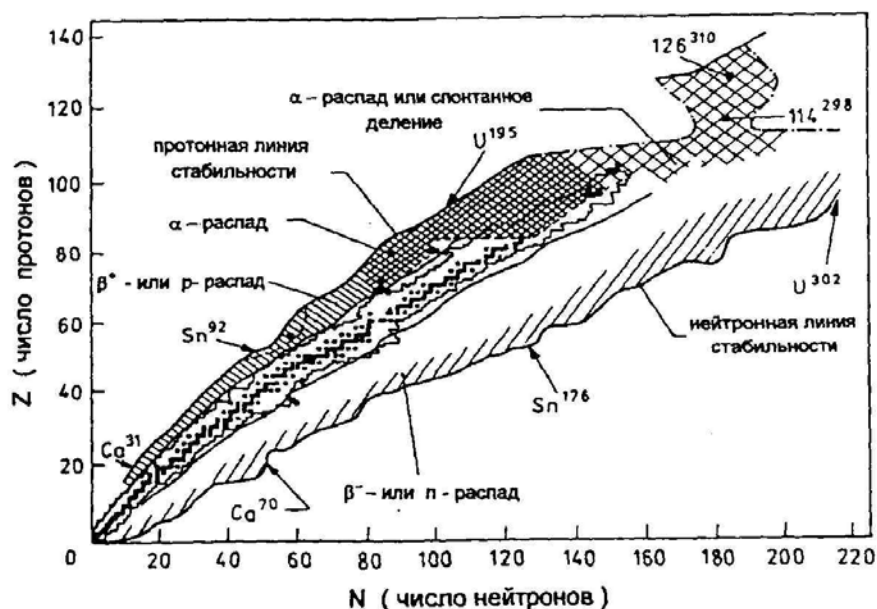
електричния заряд и енергията. Изкуството на експериментаторите се състои в отделянето на интересуващите ги ядра на фона на множеството фрагменти.

В заключение ще посочим в най-общ вид постиженията в синтезирането на нови изотопи и елементи. На фиг. 5 е показано, как се е изменял броят на известните изотопи през последните 50 години (за всяка група елементи с $Z = 10$). Както се вижда, по-целия фронт настъплението е мощно и резултатно. Понастоящем са известни над 2500 ядра - изотопи.



Фиг. 5

По-цялостна представа за постиженията може да се добие от фиг. 6, на която е показана неутронно-протонната карта на изотопите (подробен вариант на картата, показана на фиг. 3). Стабилните и дългоживущи ядра са представени с черни квадратчета. Близко до тях, с непрекъснати линии са показани границите на известните понастоящем ядра. Външните непрекъснати криви ограничават предполагаемата област на квазистабилни ядра. Зад тези линии започва “морето” на нестабилността.



Фиг. 6

Освен постиженията на картата ясно се виждај недостигнатите рубежи, към които се цели ядрената артилерия. Това се илюстрира по-конкретно с изотопите на няколко елемента: калций, калай и уран. Например, сравнително неотдавна беше синтезиран изотопът ^{100}Sn (двойно магическо ядро със $Z = N = 50!$). В неговия състав има 12 неутрона по-малко отколкото в най-лекия изотоп на калая, който се среща в природата. Ядрото на ^{100}Sn живее малко повече от 0,5 s. На другия край на известните калаени изотопи стои ^{134}Sn - преобогатено с неутрони ядро ($\tau \sim 1$ s).

Както се вижда постиженията са внушителни - границите на природното съдържание са далеч надхвърлени. А теоретиците показват "на хоризонта" още много перспективи. Протонната граница за калая се смята ^{92}Sn , а неутронната - ^{176}Sn . От възможните 80 изотопа на калая сега са известни 35, т.е. по-малко от половината.

Подобна е ситуацията и при другите елементи. Например, за да се достигне до ^{302}U , който лежи на границата на ядрената стабилност, трябва да се синтезират още 60 нови тежки изотопа на този елемент.

Както се вижда, на ядрената карта остават още огромни неизучени терени, което ще осигури на следващите поколения изследователи още много грижи, вълнения и постижения. Няма съмнение, че ХХІ-ият век ще разшири нашите представи за ядрената ойкумена.

II. ПОСТИЖЕНИЯТА В СИНТЕЗА НА ЛЕКИТЕ ЯДРА

Както показвахме настъпление за завоюване на нови територии, за търсене на нови ядрени разновидности, се води по целия фронт на протонно-неутронната карта. Целта на тези действия е приближаването до границите на ядрената стабилност, която разделя ядрата на “свързани” или “съществуващи” и “несвързани” (“несъществуващи”). Особен интерес представляват свойствата на “пограничните” ядра. Тъй като понастоящем границите на стабилността не са точно известни, не е изключено в тези райони да ни очакват изненади, които могат да изменят представите за ядрения свят.

В това отношение е засилен интересът към изучаването на свойствата на елементите и изотопите в двата края на периодичната система. Там предизвикателствата са най-големи. При леките ядра се постигат най-резки отклонения от “равновесните” стойности на отношението между броя на неутроните и протоните (при тях $N/Z \approx 1$), което дава възможност по-детайлно да се изучава влиянието на нуклеонния състав върху ядрената стабилност. На другия фланг - в областта на свръхтежките елементи - е потвърдено вече съществуването на “острови на стабилност”, което предвещава срещи с отдавна търсените ядра - “дълголетници”.

В тази статия ще бъдат разгледани постиженията в синтезирането на най-леките ядра и някои от изучените техни свойства. Те са интересни с това, че притежават рязко индивидуален характер, докато свойствата на средните и тежки ядра се изменят сравнително плавно. В интересувашата ни област две съседни ядра - изотопи или изобари - могат да имат свършено различни свойства. Пейзажът на ядрената повърхност тук е много по-разнообразен и релефен.

Нека разгледаме по-подробно постиженията при синтеза на най-леките ядра ($Z = 0, 1, 2$).

НЕУТРОННИ ЯДРА ($Z = 0$)

От многобройните изследвания на ядрените взаимодействия е известно, че силите, които действат между два неутрона, не са достатъчни за образуване на свързана система. Това обаче не означава, че в природата не може да съществуват устойчиви системи, съдържащи по-голям брой неутрони. В това отношение ние имаме обнадеждаващ пример със съществуването на макроскопични капки от течен хелий, въпреки че атомите на хелия не могат да образуват двуатомна молекула.

Защо да не разчитаме на подобна природна щедрост? Според някои теоретични модели в областта на ядра с много голям брой неутрони може да се очаква съществуването на относително стабилни системи - т.н. "неутронни капки". За техните свойства сега е трудно да се каже нещо определено. Те безспорно ще се различават съществено от познатите ни ядрени системи, което би обогатило представите ни за тази материя. Неутронните ядра (в какъвто и вид да съществуват) не са деформирани от кулоновите полета на протоните и взаимодействията в тях биха се изследвали в най-чисти условия.

Досега е изследвана стабилността на системи с два неутрона - динеутрон ($2n$), три неутрона ($3n$) и тетранеутрон ($4n$). Всички те са нестабилни. Констатирано е само квазистационарно състояние ($\sim 10^{-22}$ s) на динеутронната система. Много е любопитен фактът, че динеутронът е почти стабилен - той има много малка отрицателна енергия на свързване - около 70 keV.

Голям брой експериментални изследвания, засега безуспешни, са проведени за търсене на тетранеутрон. Въпреки отрицателните резултати, интересът към търсенето на мултинейтронни системи продължава да е голям. В някои теоретични работи се прогнозира съществуването на стабилно магическо неутронно ядро, съставено от осем неутрона. Ако се докаже съществуването на такива ядра, това би предизвикало качествено изменение на нашите представи за ядрата, което ще окаже влияние и на други научни области, например на астрофизиката.

ИЗОТОПИ НА ВОДОРОДА ($Z = 1$)

Известно е, че в природата съществуват два стабилни изотопа на този елемент: протий, ^1H и деутерий ^2H (0,015 %). Условно към тях може да причислим и бета-радиоактивният тритий, ^3H , с период на

полуразпадане $T_{1/2} = 12,3$ години. Изотопите на водорода са най-простите и добре изучени системи от силно взаимодействащи частици.

В огромния брой експерименти не е открит нито един нуклеоностабилен изотоп на водорода с масово число $A \geq 4$. Получени са квазистационарни състояния на системи, съдържащи протон и 3 до 5 неутрона (${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$, ${}^6\text{H}$). Особен интерес предизвиква откриването на квазистационарното състояние ${}^6\text{H}$, тъй като то представлява ядрена система с огромно съотношение между броя на неутроните и протоните - $N/Z = 5$! Друг изключително важен резултат е, че “водород-6” се оказва по-стабилна система от ядрото ${}^4\text{H}$. Този факт позволява с по-голям оптимизъм да се гледа на проблема за съществуването на свръхтежки изотопи. За да се потвърди наблюдаваната тенденция - повишаване стабилността на водородните изотопи с увеличаване броя на неутроните, е необходимо да се придвижим по-нататък и да бъдат измерени масите (енергиите на свързване) на ядрата ${}^7\text{H}$ и ${}^8\text{H}$. Понастоящем се провеждат такива експерименти.

ИЗОТОПИ НА ХЕЛИЯ ($Z = 2$)

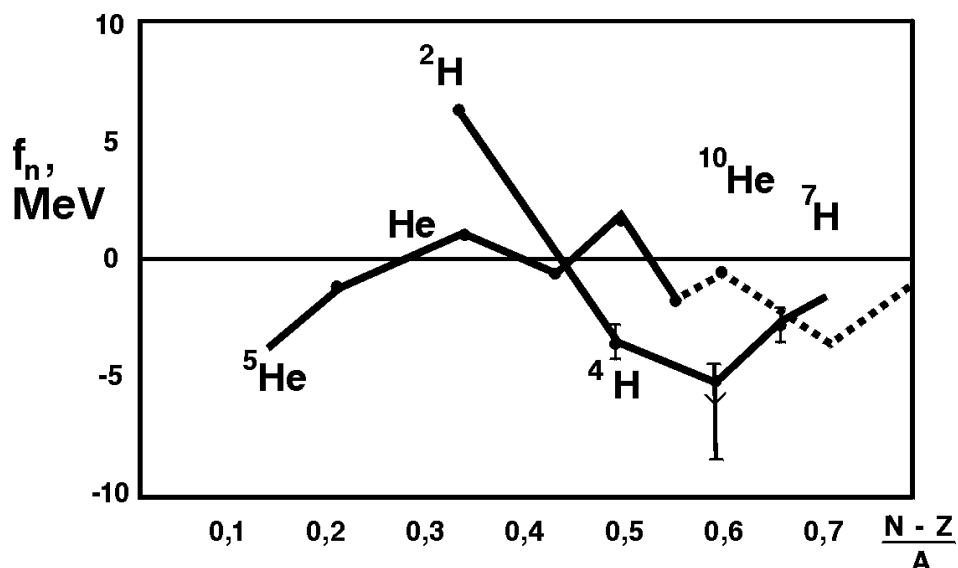
Изследванията на хелиевите изотопи, съдържащи в състава си два протона и няколко неутрона, носят допълнителна полезна информация за ядрените сили. Именно при тях бяха открити редица интересни закономерности, потвърдени по-късно от изследвания на съседните елементи.

Експериментите по синтезирането на тежки хелиеви изотопи ($A = 5 \div 10$) показаха, че ядрата с четен брой неутрони са стабилни по отношение на нуклеонно разпадане, а с нечетно N (респ. A) - нестабилни. За разлика от другите ядра в изотопите на хелия нарастването на броя на неутроните не предизвиква намаляване, а обратно - увеличаване на тяхната стабилност. Например енергията на свързване на ядрото ${}^8\text{He}$ е с 1,5 MeV по-голяма от енергията на свързване на ${}^6\text{He}$. Този резултат беше наречен “хелиева аномалия”. (Аномалии в природата няма; така наричаме обикновено непривичните неща и явления).

Същата ситуация се наблюдава и при “несвързаните” изотопи на хелия - ${}^5\text{He}$ и ${}^7\text{He}$ (по-горе посочихме, че “аномално” се държи и двойката ${}^4\text{H}$, ${}^6\text{H}$). Това откритие дава основание да се предположи, че в областта на най-леките ядра могат да съществуват райони с повишена стабилност за ядра, притежаващи голям “излишък” от неутрони. В това

отношение изключителен интерес представлява търсенето на ядро ^{10}He ($N/Z = 5!$). За системата ^{10}He е открито квазистационарно състояние, което свидетелства, че ѝ липсва “само” 1 MeV енергия, за да бъде свързана.

Посочените факти и изказаните съображения са илюстрирани на Фиг. 7. На нея са показани зависимостите на енергията на свързване на neutronите в ядрата на водорода и хелия, като функция от neutronния “излишък”, $(N - Z)/A$. С пунктир са показани теоретичните пресмятания.

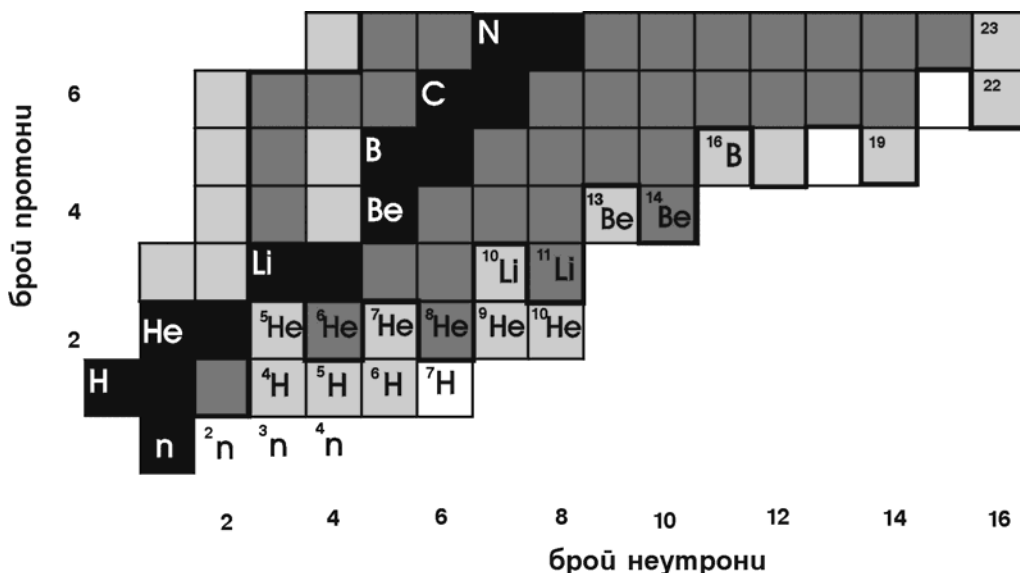


Фиг. 7

По-пълна представа за постиженията в синтеза на леки ядра зад границите на бета-стабилността дава neutronно-протонната диаграма на Фиг. 8. Смята се, че в показаната област (до $Z = 7$) са получени последните възможни ядра до предсказаната граница и са синтезирани няколко системи в квазистационарно състояние. На диаграмата стабилните ядра са изобразени с изцяло почернени квадратчета, бета-радиоактивните - със силно замрежени, а ядрата в квазистационарно състояние - със слаботамрежени квадратчета.

За кислорода, който има 8 протона в ядрото си, е предсказано, че с голяма вероятност съществуват стабилни или квазистационарни състояния на изотопите ^{26}O и ^{28}O . Особено интересна е системата ^{28}O , която има магически брой неутрони и протони ($N = 20, Z = 8$).

Масираните опити, проведени през 80-те години, за синтезирането на ^{26}O (GANIL-Франция, Мичигански университет - САЩ и ОИЯИ - Русия) показаха, че такъв изотоп не съществува. Този резултат не означава автоматично, че не е възможно съществуване на по-тежък изотоп ^{28}O . Двата магически слоя на тази система могат да повишат нейната стабилност в сравнение със съседните ядра.



Фиг. 8.

В проведените досега експерименти ^{28}O не е наблюдаван. Този отрицателен резултат има обаче и положителен ефект. Теоретиците са принудени да коригират параметрите на своите модели, защото разбират, че не само “магичността” играе решаваща роля в стабилизирането на ядрата.

При изследване на свойствата на леките екзотични ядра са наблюдавани и

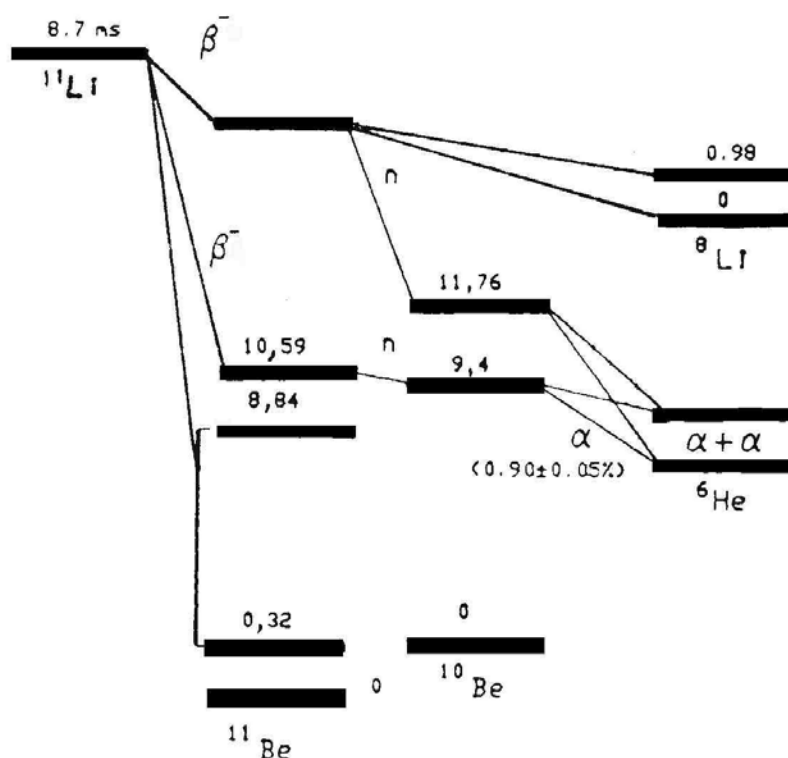
ДРУГИ ИНТЕРЕСНИ ЕФЕКТИ.

Едно от любопитните явления, открито при силно обогатените с неутрони ядра, е съществуването на т.н. “неутронно хало”. Явлението е наблюдавано при слабо свързани ядра, които се намират на границата на стабилност: ^8He , ^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B . При тези ядра са измерени големи стойности на нуклеонния радиус. Например докато за ядрото ^9Li радиусът е 2,5 fm (1 fm = 10^{-15} m), то за ^{11}Li той е неколkokратно по-голям – 12 fm.

Необичайната структура на посочените ядра се проявява по най-различен начин, но особено ярко - при ядрените реакции, в които те участват. Ефективното сечение за тези процеси е значително увеличено, тъй като то е пропорционално на радиуса на ядрата. Може да се каже, че ядрата ^8He , ^{11}Li и др. имат рехавя структура и при взаимодействие с други ядра лесно отдават свои неутрони от ронливата си повърхност. Вероятността за залавяне на слабо свързани неутрони от периферията на посочените ядра е значително по-голяма. Именно при измерване сеченията на взаимодействие на леките ядра е установено и потвърдено съществуването на хало от слабо свързани неутрони.

Тези резултати откриват нови възможности за получаване на екзотични ядра в областта на леките елементи. Използвайки снопове от ядра на ^{11}Li , японските физици успяха да получат информация за стабилността на ^{10}He . Сега се провеждат аналогични опити за получаване и изучаване свойствата на по-тежки изотопи, като ^7H , ^8H , ^{12}He и др.

Подобно явление е наблюдавано и при силно неутронодефицитни ядра, които притежават малка енергия на свързване на протоните ($f_p \approx 0$). В такива ядра може да възникне протонно хало, аналогично на неутронното. Действително, при изследване на еластичното разсейване на неутронодефицитното ядро ^8B ($Z = 5$, $N = 3$) е установено, че радиусът на разпределение на протоните е по-голям от този на неутроните. Това е указание за съществуване на протонно хало.



Фиг. 9.

Изучаването на леките ядра спомогна и за откриването на нови, неизвестни по-рано видове радиоактивни разпадания. При тях бяха наблюдавани редица двустадийни или т.нар. “закъсняващи” радиоактивности - след предварително бета-разпадане (първи стадий), новополученото ядро може да изпусне един или два протона, един, два или три нейтрона, ядра на трития или да претърпи делене (“закъсняващо делене”). Като илюстрация на Фиг. 9 е показан радиоактивният фойерверк, характерен за добре познатото ни вече ядро ^{11}Li .

Изследванията на подобни разпадни процеси при някои силно неутронообогатени ядра, напр. ^{17}B ($Z = 5$, $N = 12$) показаха, че с относително голяма вероятност протича емисия на 2, 3 и 4 нейтрона. С това възниква много интересна и важна задача - установяване на корелация между изпусканите нейтрони и по-специално - възможностите за изпускане на неутронни системи, състоящи се от четири нейтрона (тетранеутрон).

Един от най-ефикасните подходи за получаване на екзотични леки ядра е реакцията с фрагментация. В тези реакции, които протичат при енергия на бомбардиращото ядро над 30 MeV/нуклеон, мишените се разбиват на множество леки ядрени системи в широк диапазон на масите, електричните заряди и енергията. Времето на живот на фрагментите е $\sim 10^{-20} \div 10^{-21}$ секунди.

В реакциите с фрагментация могат да се образуват сравнително големи количества ядра, силно обогатени с неутрони, а също и с голям неутронен дефицит. Добивът на тези реакции силно зависи от съотношението N/Z в бомбардиращото ядро. В този смисъл много подходящ снаряд се оказва изотопът на калция ^{48}Ca . Това е двойно магическо ядро ($Z = 20$, $N = 28$) и е най-богатият на неутрони изотоп, срещащ се в природата. Йони на ^{48}Ca с успех се използват за получаване на супернеутронообогатени ядра в областта $4 < Z < 20$. В тези реакции са синтезирани няколко десетки изотопа, разположени до самата граница на ядрената стабилност: бор-18, въглерод-22, азот-23, кислород-24 и др. В реакциите с фрагментация успешно се използва като снаряд и изотопът на сярата ^{36}S ($N = 20$).

Както се вижда специалистите по ядрена физика, въоръжени с ускорителна техника, откриха обширен свят от “изотопи - призрази” около границите на стабилността. Установено е също, че ядрата на един и същи елемент, с “излишък” или “недостиг” на неутрони или протони, съвсем не си приличат - изменят се техните размери, структура, свойства. В новите области бяха открити нови видове радиоактивности, нови ядрени форми и т.н.

Използвайки различни подходи, физиката организира масирано настъпление към границите на ядрената стабилност, които са грубо очертани от сегашните ядрени модели. Това ще даде възможност да се получи качествено нова информация за свойствата на ядрената материя. Предвиждайки се към все по-тежките елементи, експериментаторите и теоретиците в ядрената физика още дълго време няма да останат без работа.

* От гр. οἰκουμένη – населената част на Земята.

** Перифраза на първото изречение в романа “Магелан”: “В началото бяха подправките”.

Л итература

1. БСЭ, М., изд. “Сов. энц.”, 1971, т.6, стр.187.
2. Флѳоров Г. Н., А. С. Илинов, По пътя на свръхелементите, ДИ “Н. просвета”, София, 1981.
3. Хофман К., Може ли да се прави злато, “Наука и изкуство”, Соф., 1984.

