

Трансмутацията – зелена светлина за ядрената енергетика

Христо Протохристов, Чавдар Стоянов

Методите на „ядрената алхимия“, приложени в новите реакторни и ускорителни системи, предлагат днес един напълно различен подход. Чрез изкуствено превръщане на елементите или *трансмутация*, дългоживеещите радиоактивни отпадъци

могат да бъдат трансформирани в безвредни вещества. В допълнение, съдържащият се в ОЯГ потенциално опасен оръжеен плутоний, може да бъде бързо унищожен, като процесът се съпътства от значителен енергосдобив. Рязко увеличащата се в световен мащаб консумация на енергия, ограничените запаси от фосилни горива и най-вече глобалните

Едно от най-големите препятствия пред по-нататъшното развитие на ядрената енергетика е свързано с проблема за преработката и съхранението на отработеното ядрено гориво (ОЯГ), в което се съдържат значителни количества силно радиоактивни и радиотоксични вещества, т. нар. радиоактивни отпадъци (РАО). До неотдавна, погребването на РАО за „вечни времена“ в надеждно изолирани хранилища се разглеждаше като единствено възможно решение.

изменения в климата, карат много правителства да обръщат отново поглед към практически неограничените ресурси от енергия, заключени в атомното ядро от самото възникване на материята. Трансмутацията на ОЯГ, съчетана с въвеждане

на нови реакторни системи с повишена сигурност биха осигурили едно чисто бъдеще за ядрената енергетика.

„Ядрената алхимия“ – превръщането на един елемент в друг – стана реалност през XX век. През 1869 г. големият руски химик Дмитрий Менделеев (1834 – 1907) предлага Периодична система на елементите като ги подрежда по въз-

ходящ атомен номер, с периодичност, съответстваща на техните химични свойства. Вътрешната закономерност, която управлява тази периодичност, останала загадка и била разкрита няколко десетилетия по-късно, след откриването на рентгеновите лъчи. Енергията на рентгеновите лъчи е съизмерима с енергията на връзка на електроните от най-вътрешните слоеве на атома. През 1914 г. младият британски физик Хенри Мозли (Henry Moseley), загинал като войник през 1915 г. в злополучния десант при Галиполи, изследва характеристиките на рентгеново лъчение на различни химични елементи и открива зависимост между дължината на вълната и поредния номер в Периодичната система. Атомният номер представлява броя на протоните в ядрото, които определят неговия положителен електрически заряд. Гениалното прозрение на Менделеев намерило своето обяснение на атомно и субатомно ниво. Откритието на Мозли се превръща в един от фундаментите на популярния атомен модел на датчанина Нилс Бор (Niels Bohr). Става ясно, че химичните свойства на елементите се определят от валентните електрони в най-външния електронен слой, а повтарящите се периоди са свързани с постепенното запълване на отделните слоеве и подслоеви, което се подчинява на принципа на Паули и зависи от общия брой на електроните. Последният, обаче, се определя еднозначно от заряда на атомното ядро Z . Следователно превръщане на един елемент в друг може да стане само чрез промяна на броя на протоните в ядрото.

За да проникнем във вътрешността на ядрената структура, трябва да преодолеем силното електростатично отблъскване на атомното ядро, което е пропорционално на неговия заряд и се



Доц. д-р Христо Протохристов е сред изтъкнатите български специалисти в областта на ядрената спектроскопия. Изследва свойствата на късоживеещи, екзотични ядра с многодетекторни системи във водещи международни ядрени центрове. Участва в разработването на иновативни методи за преобразуване на радиоактивни отпадъци от АЕЦ, чрез облъчване с неутрони, т. нар. трансмутация. Доцент Протохристов е автор на повече от 100 научни труда и има пет патента.

увеличава с приближаване към ядрото. Това са чудовищните сили, които се освобождават при деленето на уран-235 и плутоний-239 в атомната бомба. Електростатичното отблъскване, или в терминологията на ядрената физика *„височината на Кулоновата бариера“* достига, дори за леките ядра, няколко милиона електронволта (MeV). Още през 1903 г., Ърнст Ръдърфорд (Ernest Rutherford), създател на Планетарния модел на атома и пионер на ядрената физика, отбелязва, че освободената при ядрените превръщания енергия е „най-малко двадесет хиляди, може би

дори милиони пъти по-голяма от енергията на молекулните реакции“. Откриването на естествената радиоактивност, и по-специално на радия (1898) от Пиер Кюри (Pierre Curie, 1859 – 1906) и Мария Склодовска-Кюри (Marie Curie, 1867 – 1934) дава на учените първия „снаряд“, който може да пробие Кулоновата бариера и да проникне във вътрешността на ядрата. Освен гама- и бета-лъчи (електрони) радият, по-специално RaC, излъчва алфа-частици с енергия 7,7 MeV, достатъчна за преодоляване на Кулоновата бариера на леки ядра. Височината на Кулоновата бариера може да се пресметне с простата формула $E = 0,24 (Z \times z) \text{ MeV}$, където Z е зарядът на ядрото, или номерът в Периодичната система на елементите, а z е зарядът на „снаряда“ (за алфа-частици $z = 2$).



Ърнст Ръдърфорд (1871-1937), пионер на ядрената „алхимия“

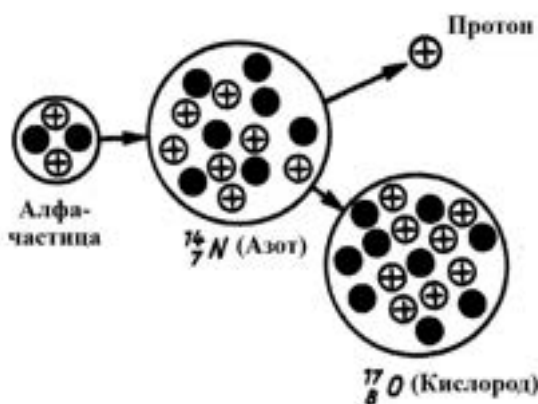
През 1919 г. Ръдърфорд и неговият ученик Марсден (Ernest Marsden) успяват да осъществяват отколешната мечта на алхимиците – тайнственото *transmutatio elementae* (превръщане на елементите). Забележителен е също фактът, че в тази реакция е била открита първата съставна частица на ядрото – протонът. Като обстрелват азот с алфа-частици, учените получават изотопа кислород-17, който има един неутрон повече от най-разпространения изотоп на кислорода с маса 16. Алфа-частиците с висока енергия, излъчени от полониев препарат, преодоляват Кулоновата бариера на ядрото на азота и проникват в него. Образуваното съставно ядро изхвърля един протон и се получава изотопът кислород-17. От азот се е получил кислород. Тази ядрена реакция може да се напише и като химическа: хелий + азот = кислород + водород. С нея е поставено началото на „ядрената алхимия“.

Естествените радиоактивни източници остават задълго единствените „оръдия“ за обстрелване на атомните ядра. Докато обаче, Кулоновата бариера на азот ($Z=7$) има височина 3,36 MeV и може да бъде преодоляна сравнително лесно, енергията на естествените алфа-емитери не е достатъчна за преодоляване на Кулоновата бариера на ядра по-тежки от сяра ($Z=16$). За бомбардиране на калай ($Z=50$) са необходими алфа-частици с минимална енергия 24 MeV. За успешна бомбардировка на уран ($Z=92$) са необходими проектили с енергия над 40 MeV. При увеличаване на заряда, височината на бариерата нараства пропорционално.

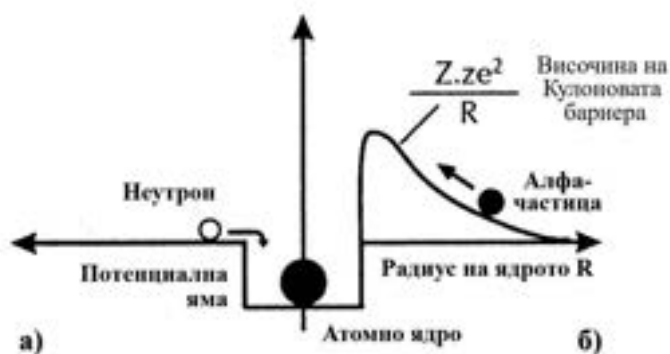
Тъй като максималната енергия на алфа-частиците, излъчвани от радиоактивни източници е около 10 MeV, в началото на тридесетте години на помощ идват високите напрежения. Елек-

простатично поле с високо напрежение може да ускори „снарядите“ – протони или алфа-частици до енергии, които значително превишават Кулоновата бариера на най-тежките ядра. Започва голямата надпревара на ускорителите, продължаваща и днес, когато тези колосални машини се конкурират по размери с пустите на „Формула 1“.

Още няколко години атомното ядро крие ревниво тайните си, докато неговата втора съставна частица – неутронът, е открита от Джеймс Чагуик (James Chadwick, 1891-1974) през 1932 г. Още през 1913 г. Чагуик забелязва, че при облъчване на различни вещества с алфа-частици се получават „твърди“ (силно проникващи) лъчи. В своята книга „Ядреното устройство на атомите“, отпечатана през 1920 г., Ръдърфорд изказва предположение за съществуването на две неизвестни дотогава ядра: едното с маса 2 и заряд единица (ядро на тежкия водород, или деутрон), второто – с маса единица и без електрически заряд, т. е. неутрон. За хипотетичния неутрон той пише: „Един такъв атом би притежавал съвсем необикновени свойства. Неговото външно поле трябва да бъде нулево, освен в непосредствена близост до ядрото. Вслед-



Превръщане на елементи е осъществено чрез бомбардиране с алфа-частици на ядро на азот, от който се получава кислород



Електростатичната (Кулонова) бариера (а) отблъсква положително заредените частици. Кулоновата бариера на урановото ядро ($Z = 92$) за алфа-частици ($z = 2$) има височина 30 MeV. Електронеутралните частици – неутроните ($z = 0$) могат да проникнат безпрепятствено в ядрото (б), да попадат в потенциалната яма и да променят структурата на ядрото, образувайки друг изотоп

ствие на това той ще може да премине свободно през материята. Да се установи съществуването на такъв атом със спектроскоп би било навярно трудно и той не ще може да се съхранява в затворен съд.“ Наистина, поради липсата на електрически заряд, неутронът не взаимодейства с електрични полета и има голяма проникваща способ-



За откриването на неутрона английският учен Джеймс Чадуик е удостоен с Нобеловата награда по физика за 1935 г.

ност. По същата причина неутронът не „чувства“ Кулоновата бариера и се оказва идеалния „снаряг“ за проникване в атомното ядро, както се вижда от схемата на стр. 7, за трансмутация и за синтез на нови елементи. Този процес на неутронно захващане (захват на руски или capture на английски) променя ядрената структура – получават се различни изотопи на началния елемент, а след бета-разпад и на напълно различни елементи. С откриването на неутрона се създават нови големи възможности за трансмутация.

Пионер в използването на неутрони за синтез на нови елементи е големият италиански учен Енрико Ферми (Enrico Fermi, 1901 – 1954). През 1934 г. той и неговите сътрудници от университета в Рим започват да облъчват с неутрони редица елементи, от най-леките до най-тежките като уран. След няколко успешни експеримента Ферми стига до заключението, че е получил елементи, по-тежки от уран, т. нар. трансуранови елементи, за което е удостоен с Нобелова награда. Избраният път е принципно верен, но в действителност велики-

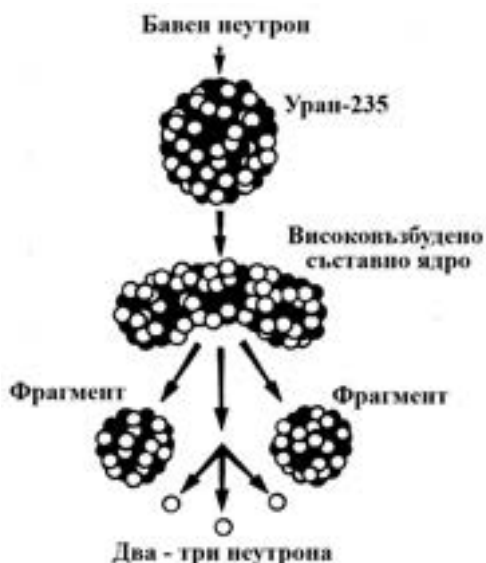
ят физик се е натъкнал на напълно ново и непознато явление – деленето на урана, открито няколко години по-късно, в края на 1938 г. от германския радиохимик Ото Хан (Otto Hahn). След осъществяване на трансмутация с алфа-частици (1919) и неутрони (1934) деленето се оказва третият способ, чрез който тежките ядра могат да се превърнат в значително по-леки.

Чрез залавяне на неутрони са получени редица трансуранови елементи и техни изотопи, които не съществуват в природата. Елементите, по-тежки от желязо, във Вселената се получават в горещата „неутронна сауна“, при избухвания на свръхнови звезди. Мечтата на средновековните алхимици е сбъдната – превръщането на груди метали в злато днес не е проблем за ядрените лаборатории, но интересът на учените е насочен по-скоро към производство на свръхрежки или нови, непознати досега елементи, които намират приложение във висшите технологии.

Верижната реакция даде на човечеството достъп до огромна енергия, но създаде и проблема с ядрените отпадъци. Ядрената енергетика се основава на деленето на уран-235 (в един акт на делене се освобождават около 200 MeV), което протича в ядрените реактори (Вж схемата на стр. 9). След захват на един бавен неутрон, съставното ядро уран-236 се възбужда и започва да извършва силни колебания, в които силите на електростатичното отблъскване между протоните превишават ядрените сили. Ядрото се разделя на два фрагмента, като се излъчват два до три неутрона, които се използват за поддържане на верижната реакция. За да предизвикат делене на нови ядра уран-235 тези неутрони трябва да се забавят. Вероятността за залавяне на неутрон и следователно – за

делене, зависи до голяма степен от скоростта на неутрона. Ядрените сили, за разлика от гравитационните, действат на късо разстояние, от порядъка на геометричните размери на нуклоните. Вероятността за залавяне се увеличава с удължаване на времето на пребиваване на неутрона в близост до ядрото. Ако неутронът има голяма скорост, той ще „профучи“ покрай ядрото; обратно, ако се движи бавно вероятността да попадне в обсега на ядрените сили (подобно на топка за голф в дупката), да бъде заловен от ядрото на уран-235 и да го „разцепи“ се увеличава. Вероятността за захващане (σ) е обратно пропорционална на скоростта (v) т.е. $\sigma \sim 1/v$. Затова деленето се осъществява с по-голяма вероятност от бавни или още топлинни неутрони със скорости около 2×10^5 см/с и енергии от 0,005 до 0,05 еВ. Неутроните от деленето се забавят най-ефективно чрез сътресения с леки ядра, например водород, когато поради еднакви маси става пълен обмен на импулса – при централен удар на билиардни топки, движещата се топка спира, а ударената започва да се движи със скоростта на първата. Във водно-водните енергийни реактори (ВВЕР) за забавител се използва обикновена вода H_2O , която съдържа два протона (маса 1).

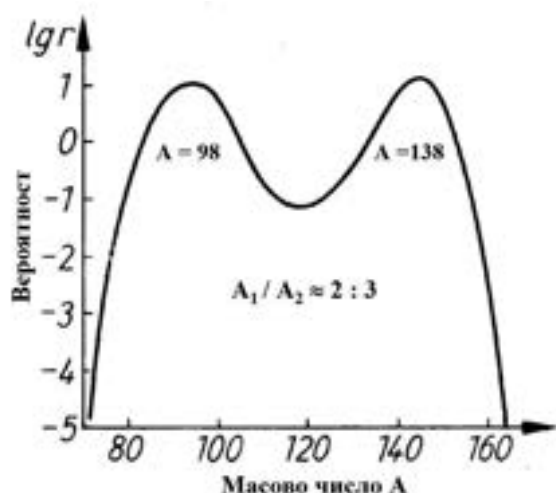
При делене на уран-235 се образуват над 200 ядра на елементи от цинк ($Z = 30$) до итербий ($Z = 65$), с масово число A (брой на протоните плюс неутроните) в областта $72 \leq A \leq 165$. Деленето е статистически процес и няколко особени фактори, които зависят от колективните и едночастичните свойства на ядрата, правят по-вероятно деленето на асиметрични фрагменти с отношение на масите 2 : 3. Както показва характерната „двузърба камила“ на разпределението по маси, с макси-



Реакция на ядрено делене. След захват на бавен неутрон, урановото ядро се възбужда и се разделя на два фрагмента с излъчване на бързи неутрони

мален гобив се образуват ядра с $A = 98$ и $A = 138$. В тези максимуми попадат и особено опасните за здравето технеций-99 и йод-129.

Ядрата – продукти на деленето, са силно възбудени с излишък на неутрони, който намалява постепенно при последователни бета-разпади, съпроводени с излъчване на гама-кванти. Това радиоактивно лъчение може да продължи от секунди до милиони години за различните продукти. Последните остават затворени в ОЯГ и именно те представляват главната опасност за хората и околната среда. Засега ОЯГ се остава да отлежи известно време за намаляване на общата активност, след което се преработва. От него се извлича образуваният плутоний-239, който може да се използва за ядрено гориво, а радиоактивните продукти се опаковат надеждно



Деленето е статистически процес, който води до образуване на повече от 200 ядра с различно масово число A като разпределението по маси има форма на двугърба камила

и се погребват за продължителен срок в специални хранилища, разположени в стабилни геологични формации. Въпреки мерките за сигурност, рискът от натрупване на големи количества радиоактивни вещества с дълъг период на полуразпадане, много от които са и силно токсични, се превръща в силен аргумент срещу по-нататъшното интензивно развитие на ядрената енергетика.

Трансмутацията става както чрез залавяне на неутрони, така и чрез делене. Ядреното гориво на класическия вид ядрен реактор, например ВВЕР-1000, представлява нискообогатен уран. В един тон уран се съдържат 44 кг от делящия се изотоп уран-235 и 956 кг уран-238. За приблизително тригодишен период на експлоатация, уран-235 изгаря до голяма степен, а в ОЯГ се натрупват 40 кг продукти на деленето. Най-голям дял в активността на ОЯГ имат изотопите: цезий-137 + барий-137m (24%), церий-144 + празеодим-144 (21%), стронций-90 +

итрий-90 (18%), рутений-106 + рений-106 (16%), прометий-147 (10%) и цезий-134 (7%). Двойките изотопи с еднакво масово число A представляват майчино и дъщерно ядро в радиоактивния разпад, а буквата m добавена след означението на даден изотоп означава изомер (възбудено състояние със значително време на живот) на същия изотоп.

В далечна перспектива най-опасни са изброените по-долу дългоживеещи изотопи, чиито периоди на полуразпад в години са дадени в скоби: стронций-90 (29), цезий-137 (30), калай-126 (10^5), селен-79 (6×10^4), цезий-135 ($2,3 \times 10^6$), цирконий-93 ($1,5 \times 10^6$), технеций-99 ($2,1 \times 10^5$), йод-129 (16×10^6). В ядрената спектроскопия

се приема, че активността на малки количества от даден изотоп изчезва след 10 периода на полуразпад – например цезий-137 от катастрофата в Чернобил ще се разпадне окончателно след 300 години, т. е. до 2286 г.

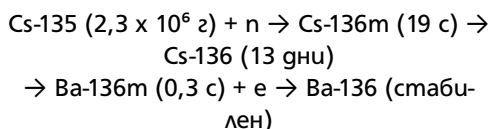
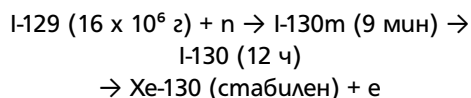
Освен продукти на деленето, в ОЯГ се синтезират следните дългоживеещи актиниди (обособена група тежки елементи с близки химически свойства): америций-241 (430), нептуний-237 ($2,1 \times 10^6$), кюрий-244 (18), плутоний-239 (24×10^6). В един тон ОЯГ се съдържат около 10 кг плутоний, 0,6 кг нептуний, 0,2 кг америций и 60 г кюрий. Актинидите са радиоактивни, но и силно токсични, а плутоният е особено опасен, поради възможно използване за терористични цели.

При трансмутация на ОЯГ се прилагат два основни метода: неутронен захват и делене. Посредством залавяне на неутрони, например, йод-129 и цезий-135 се трансформират в стабилни (нерадиоактивни) изотопи. По-долу са дадени съот-



Чл.-кор проф. Чавдар Стоянов е роден през 1944 година в Стара Загора. Средното си образование завършва в София (1961), а през 1968 година се дипломира като специалист по „Атомна физика“ в СУ „Св. Климент Охридски“. Специализирал е в Дубна (Русия), Мичиган (САЩ), Япония, Германия, Франция и Италия. От 1987 е професор, а от 2004 година е и член-кореспондент на БАН. Основна тема в научните му изследвания е развитието и приложението на Квaziчастично-фононния модел (КФМ) на атомното ядро.

ветните реакции и веригите на радиоактивните бета-разпади до стабилни ядра като в скоби са посочени периодите на полуразпад на междинните изотопи:



Както се вижда от горните примери, живеещите милиони години Iog-129 и

цезий-135 могат да се трансформират в стабилни ядра съответно за часове и дни. За унищожаване и „изгаряне“ на актинидите се използва трансмутация чрез делене. В това отношение най-важно е ликвидирането на големите количества оръжеен плутоний, натрупан през годините на Студената война, който в случая се използва за добив на енергия.

Spallation като източник на неутрони. За ефективна трансмутация на ОЯГ са необходими подходящи източници на неутрони. В ядрената физика са известни различни такива източници, като най-голяма интензивност имат т. нар. високопоточни реактори, които работят с чист уран-235 или плутоний-239. Значителен напредък в ядрените технологии бе постигнат със създаването на интензивни източници на неутрони, в които се използва т. нар. *процес на дълбоко ядрено разцепване* (spallation), иницииран с високоенергетични протони. Различните взаимодействия, които участват в процеса на дълбоко ядрено разцепване са показани на стр. 12. При енергия на протона над няколко стотин МеВ, преобладава т.нар. вътрешноядрен каскад. Падащият протон предизвиква поредица от състълкновения с еднични нуклони, при което от ядрото се излъчват нуклони, алфа-частици, мезони и др. Каскадът спира, когато средната енергия на взаимодействащите нуклони стане по-малка от енергията на връзка. Остатъчното ядро е силно възбудено, намира се в (предравновесно) състояние, което се разрежда чрез делене и/или емисия на нуклони. При достигане на равновесие по-нататъшното освобождаване на енергия става чрез изпарение на нуклони, делене и чрез излъчване на гама-кванти. Емисията на неутрони доминира във всички видове взаимодействия. От друга страна, ускорените

протони проникват дълбоко в мишената и нуклоните, възникнали в реакцията на дълбоко ядрено разцепване, могат да взаимодействат с околни ядра, посредством т. нар. междуядрен каскад, произвеждайки допълнителни неутрони. Големото многообразие от взаимодействия се моделира чрез статистически „Монте Карло“ симулации (изчислителни алгоритми, при които се разчита случайността да разкрие закономерности), в тях се произграват всички възможни варианти на реакцията. Извършените пресмятания и експерименти показват, че един протон с енергия 1-2 GeV (10^9 eV) може да произведе в мишена от тежки елементи от 20 до 50 неутрона. Тези именно неутрони се използват за трансмутация на ОЯГ и за инициране на верижна реакция в подкритични реакторни системи.

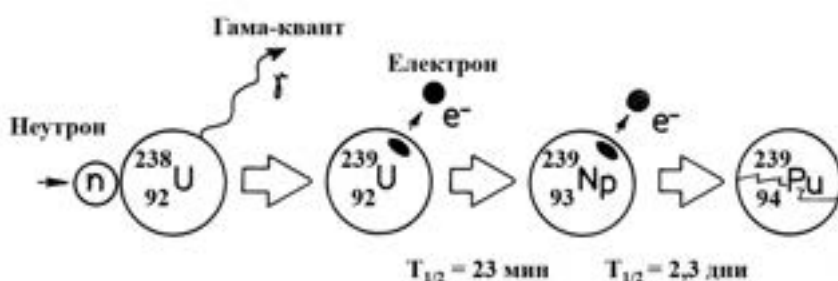
Реакторите на бързи неутрони (РБН) са нов етап в ядрената енергетика. В обикновените реактори с бавни неутрони за гориво се използва изотопът

уран-235, който съставлява едва 0,7 % от природния уран. За осъществяване на верижна реакция е необходимо минимално обогатяване на ядреното гориво до 3 – 4% съдържание на уран-235, което става с прилагане на сложни и скъпи технологични процеси. Изразени в количество енергия, световните запаси от този изотоп са приблизително равни на запасите от фосилни горива. Очевидно, поради нарастващите нужди от енергия, уран-235 не може да се разглежда като перспективен източник. Такъв обаче може да бъде най-разпространеният и недеящ се с бавни неутрони изотоп уран-238.

РБН използват за гориво плутоний-239, който може да се дели под действие на високоенергетични, бързи неутрони. За топлоносител вместо вода, която забавя неутроните, се използват втечнени метали. Активната зона на РБН е обградена с обвивка от уран-238, т. нар. бланкет. Част от неутроните, които се получават при деленето на плутоний-239



Схема на взаимодействията в процеса на дълбоко ядрено разцепване (spallation), при облъчване на ядро-мишена от тежък елемент с високоенергетични неутрони

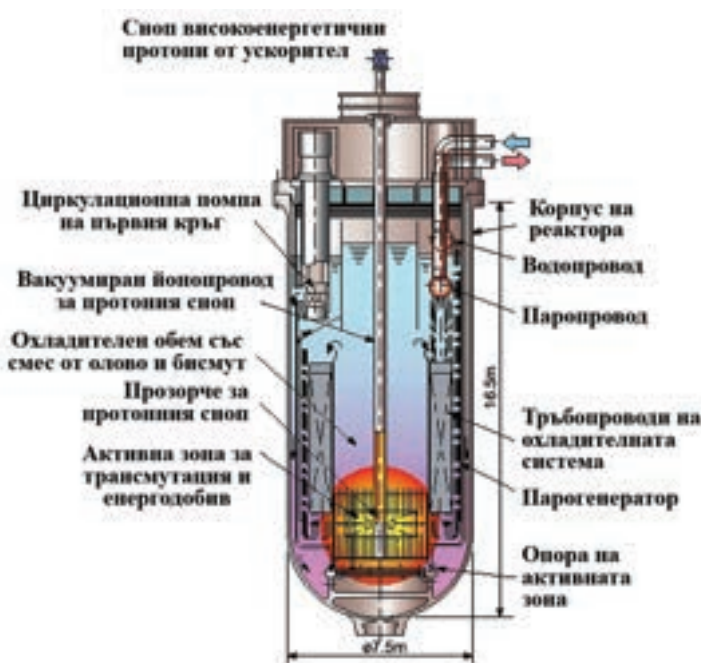


Плутоний-239 се получава при облъчване на уран-238 с неутрони и два последователни бата-разпади, съответно в уран-239 и в нептуний-239

поддържат верижната реакция, докато друга част се залавят от ядрата на уран-238. Разгледаният по-рано тристъпков процес на производство на плутоний-239 (виж схемата горе), включва образуване на уран-239 чрез залавяне на неутрон и следващ бета-разпад в нептуний-239, който от своя страна претърпява бета-разпад и се превръща в плутоний-239. Така в процеса на изгаряне на ценния плутоний-239, същият се възпроизвежда от евтиния уран-238. При ефективно управление на реактора, полученото количество нов плутоний-239 може да превишава многократно количеството на изгорелия. По тази причина, реакторите на бързи неутрони се наричат още реактори размножителни или бридери. Технологията на РБН е силно развита във Франция и Русия. Във френските РБН са проведени едни от първите експерименти по трансмутация на ОЯГ. Този вид реактори е много перспективен, тъй като, в комбинация с класически реактори, се осъществява затворен цикъл на ядреното гориво. Особено ценно допълнително преимущество на РБН е възможността за ефективна трансмутация на ОЯГ.

Реакторни системи, управлявани от ускорител – Accelerator Driven Systems

(ADS). В класическия тип ядрени реактори, верижната реакция протича спонтанно. Активната зона на реактора, т.е. обемът, в който протича реакцията, съдържа достатъчно количество ядрено гориво, значително повече от т. нар. критична маса, и е така конструирана, че да се гарантира известен излишък от неутрони за поддържане на реакцията. Неутронният баланс се характеризира с т. нар. коефициент на размножаване k , който при постоянна мощност е около 1, т. е. всеки заловен неутрон се замества от нов. При $k < 1$ реакцията затихва, а при $k > 1$ протича лавинообразно, т. е. става неуправляема. Управлението се осъществява чрез поглъщане на излишните неутрони от т. нар. регулиращи пръти от кадмий, които се въвеждат на различна дълбочина в активната зона. Основна причина за ядрените аварии, включително за катастрофата в Чернобил, е лавинообразното протичане на верижната реакция. Такава опасност не съществува в новите под- или субкритични системи, където реакцията се управлява посредством ускорител. ADS се състои от стоманен корпус, биологична защита и парогенераторна система, които не се различават съществено от тези



Вертикален разрез на реакторната част на подкритична хибридна система ADS (ускорител+реактор) за трансмутация на ОЯГ и за получаване на енергия (японски проект)

на класическите реактори. За охлаждане на активната зона се използва смес от олово и бисмут. Управлението на ADS се осъществява чрез сноп високоенергетични протони, които се инжектират в активната зона. Протоните предизвикват реакции на дълбоко ядрено разцепване с голямо възпроизводство на неутрони. Те, от своя страна, иницират верижната реакция. Едновременно с получаването на енергия, ADS се използват за трансмутация на ОЯГ, която е особено ефективна поради високата плътност на неутроните.

Трансмутацията чрез ядрен фотоэффект е друг метод. Той се основава на използването на т.нар. ядрен фотоэффект. Когато атомните ядра се облъчват с гама-лъчи с енергия, по-висока от енергията на връзка на нуклоните

($E_{\text{гама}} \geq 8 \text{ меВ}$), се наблюдава реакция, при която възбуденото ядро излъчва един или два нуклона (неутрон, два неутрона, неутрон и протон). Това явление наподобява много фотоелектрическият ефект (накратко *фотоэффект*), при който атом от дадено вещество, облъчен със светлина, с дължина на вълната под определена граница (енергиен праг), освобождава електрон и по аналогия се нарича ядрен фотоэффект или фотоядрена реакция. Реакцията се усилва с увеличаване на енергията на гама-квантите, достига максимум

около 15 MeV и после намалява. Тъй като съответният спектър има много голяма ширина от 4 – 8 MeV, тя се нарича *гигантски резонанс*, отново по аналогия с фотоэффекта. При много по-високи енергии на гама-лъчите ($E_{\text{гама}} \approx 100 \text{ меВ}$) ядрото може дори да се раздели на две части чрез т. нар. фотodelене.

Първото обяснение на гигантския резонанс е дадено от съветския физик А. Мизгал през 1945 г. Той предполага, че под действие на външно електромагнитно поле в ядрото възниква колективно движение на всички протони спрямо всички неутрони. Тъй като групата на протоните има положителен електрически заряд и нейното преместване спрямо групата на неутроните представлява диполно колебание, явлението се нарича *гигантски дипол*

резонанс (ГДР). В ядрото колебанията имат много висока честота от порядъка на 10^{21} херца, с което се обяснява голямата енергия на ГДР.

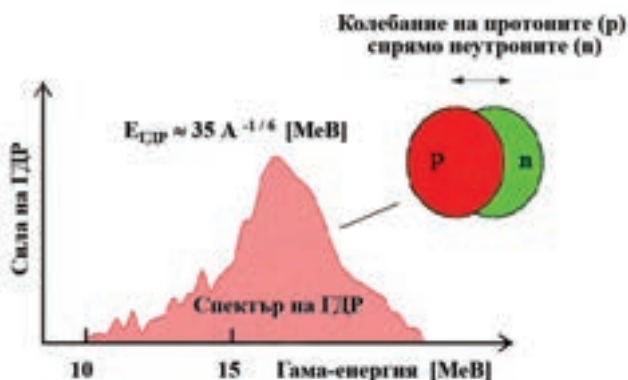
За получаване на високоенергетични гама-фотони се използват релативистички електрони, т. е. такива, движещи се със скорост, близка до скоростта на светлината. Когато релативистички електрони бомбардират мишена от вещество с висок атомен номер Z , например тежък метал, те се спират в материала и произвеждат т. нар. *спирачно лъчение*. Аналогичен механизъм се използва за възбуждане на лъчение в рентгеновите апарати, но в горния случай енергията е с няколко порядъка по-висока. ОЯГ се облъчва с високоенергетично спирачно лъчение. Вследствие на ядрения фотоефект се изби́ва неутрон и гългоживеещото начално ядро се трансформира в късоживеещ или стабилен изотоп. Този метод може да се приложи, например, за ^{129}I по следната схема:



Трансмутацията с използване на ядрен фотоефект е важно допълнение към облъчването с неутрони и деленето, особено в специални случаи, когато последните два метода не водят до получаване на късоживеещи или стабилни крайни ядра. Понастоящем се разработват методи за трансмутация с неутрони, получени при облъчване на мишени от тежки метали с мощно лазерно лъчение. Използваните в случая неутронни източници

са принципно нови и все още не съществуват точни оценки за ефективността на трансмутация, а също така за изразходваната и получена енергия.

А какви са перспективите? Бурното развитие на ядрените изследвания и технологии през 50-те и 60-те години на миналия век осигуриха основа за разработка на първите мащабни проекти за трансмутация. В началния период 1950 – 1970 г. в Националните лаборатории (НЛ) в Оук Ридж, Ливърмор и Бъркли (САЩ) започват да се използват ускорители за получаване на плутоний от обеднен уран. Във връзка с инициативата за неразпространение на ядрените оръжия, през 1975 – 1985 г., в НЛ Брукхайвън се разработва проект за регенерация на ОЯГ, а в Изследователския център Юлих (ФРГ) се работи по хибридна система за трансмутация на ОЯГ. След 1990 г. започва трети период, който се характеризира с включването на Япония (проект ОМЕГА) и Европейската общност. Най-видният апологет на идеята за трансмутация в Европа е Нобеловият лауреат проф. Карло Рубия (Carlo Rubbia), някогашен директор на



Диполно колебание на протоните спрямо неутроните в атомното ядро (а) при възбуждане на Гигантски диполен резонанс (ГДР) и спектър на ГДР (б)



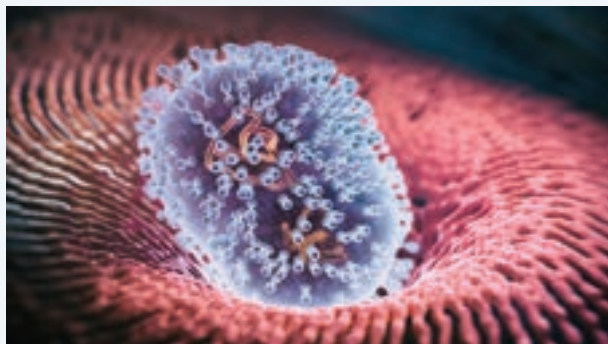
Карло Рубия, бивш директор на ЦЕРН, лауреат на Нобеловата награда по физика за 1984 г. и застъпник на идеята за трансмутация на ОЯГ

Европейския център за ядрени изследвания (ЦЕРН). През 1993 г. той лансира проект за създаването на хибридна система с подкритичен реактор (реактор на Рубия), използващ за гориво торий. При инжектиране на протонен сноп от 10 mA в активната зона, топлинната мощност на реактора трябва да достигне 300 – 400 MWt. Според Рубия най-важните физически и технически проблеми са вече решени в предхождащи експерименти и следва да се пристъпи към създаване на голям комплекс за трансмутация на ОЯГ, който да обслужва ползвателите на ядрена енергия в Европа. В момента водеща страна в използването на реактори на бързи неутрони за трансмутация е Франция. В Япония, Русия и други напреднали страни са създадени различни видове пилот-

ни системи. В България по проблемите на трансмутацията на РАО в ИЯИЯЕ при БАН работи изследователска група, която се занимава с моделиране и експериментално изследване на процесите на размножаване на неутрони в реакции на високоенергийни протони с мишени от тежки елементи, вкл. уран. Значителният интерес към проблема е свързан с постепенното завръщане на редица страни към ядрената енергетика като неизбежна и по-чиста (при спазване на най-строги правила за безопасност, разбира се) алтернатива на фосилните горива в един свят с бързо растяща консумация на енергия.

Ядрената енергия е стара като света. Преди около два милиарда години на Земята са заработили първите ядрени реактори, които са произвеждали енергия безаварийно в продължение на осемстотин хиляди години. Такъв е Урановият обект Окло (Габон), открит чрез наличието на радиоизотопи, които се образуват само в ядрени реактори. Пропорциите на различни радиоизотопи потвърждават, че това е бил естествен реактор. В онази епоха делът на уран-235 в рудата е бил много по-висок и е достигнал ниво, установено в сегашните конвенционални реактори. В същото време урановата руда е била залаята с вода, която е действала като модератор. По този начин Природата е изпреварила човека. Това е било ефективно формиране на естествен ядрен реактор. Днес, с осъществяването на вековната мечта на алхимиците за превръщане на елементите, човечеството има шанс да придобие контрол над практически неограничени енергийни ресурси, чрез трансмутация на ОЯГ и РАО и чрез синтез на редки и непознати до сега нови елементи. ■

Открити са инфузории, които предпочитат вируси в менюто си



Поглъщане на *Chlorovirus* от инфузорията *Chalteria*

Инфузориите, познати и под името ресничести едноклетъчни животни (Infusoria или Ciliata) са едноклетъчни организми, които населяват както сладководните, така и морските водоеми, влажните почви, мъховете и други влажни биотопи, а значителна част от тях са и паразити на човека и животните. Огромната част от свободно живеещите инфузории се хранят предимно с бактерии и се означават като бактериовори, други поемат едноклетъчни водорасли и гъбни хифи и се класифицират като хербивори, а има и такива, които нападат и поглъщат и по-дребни от тях едноклетъчни организми като голи и черупчести амеби, камшичести, дребни инфузории и пр. и с право се считат за хищници или карнивори. Огромната част от познатите в света инфузории са всеядни организми и се отнасят към категорията омнивори.

В началото на 2023 г. в научното списание *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS – САЩ) бяха публикувани резултати от изследване на американски учени, в които се доказва, че и между инфузориите съществуват тясно специализирани в хранително отношение видове или монофаги. За такива

монофаги авторите на изследването определят инфузориите от рода Халтериа (*Chalteria*), които имат космополитно разпространение и обитават най-разнообразни сладководни водоеми. Авторите на изследването доказват, че те се хранят основно с вируси от рода *Chlorovirus*, които се срещат често в сладководни водоеми (езера, блатата, разливи, реки и гр.) с разнообразни водорасли в

тях. Вирусите заразяват и в крайна сметка се размножават в клетките на водораслите, а това довежда до разпукване на заразените клетки и освобождаване на въглерод и органични вещества в околната среда. По такъв начин във водоемите се натрупва значително количество въглерод и органични вещества, които нормално биха били изядени от другите водни организми, използващи водораслите за храна. А това влияе негативно върху екологичния баланс във водоема.

Според д-р ДеЛонг (Dr DeLong), един от изследователите на този проблем, инфузориите *Chalteria* могат за едно генерационно да поглъщат и унищожават до 10 трилиона вируси, което представлява сериозна промяна в динамиката на въглерода във водоема. Авторите на изследването считат още, че този начин на хранене на инфузориите с вируси трябва в бъдеще да се означава и с ново понятие – вирофагия, а организмите, които се хранят с вируси да се класифицират като вировори, подобно на съществуващите вече понятия в науката като бактериовори, омнивори, карнивори и пр.

По PNAS и Live Science