

Шћепан С. Миљанић
Јелена Радић-Перић
Миљенко Перић

ДО ФИСИЈЕ, О ФИСИЈИ И О УРАНИЈУМУ

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

MONOGRAPHS

Volume DCXCI

DEPARTMENT OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL SCIENCES

Book 11

Šćepan S. Miljanić
Jelena Radić-Perić
Miljenko Perić

ON FISSION AND URANIUM

Accepted at the IX meeting of the Department of Chemical and Biological
Sciences on November 23rd, 2018, on the basis of reviews presented
by Professor Dr. Dušan Sladić and Dr. Zorka Vukmirović

Editor
Academician
VLADIMIR STEVANOVIĆ

BELGRADE 2019

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ПОСЕБНА ИЗДАЊА

Књига DCXCI

ОДЕЉЕЊЕ ХЕМИЈСКИХ И БИОЛОШКИХ НАУКА

Књига 11

Шћепан С. Миљанић

Јелена Радић-Перић

Миљенко Перић

ДО ФИСИЈЕ, О ФИСИЈИ И О УРАНИЈУМУ

Примљено на IX скупу Одељења хемијских и биолошких наука
23. новембра 2018, на основу реферата проф. др Душана Сладића
и др Зорке Вукмировић

Уредник

академик

ВЛАДИМИР СТЕВАНОВИЋ

БЕОГРАД 2019

Издаје
Српска академија наука и уметности

Коректор
Весна Шубић

Идејно решење корица
Никола Стевановић

Технички уредник
Никола Стевановић

Тираж
300 примерака

Штампа
ЈП Службени гласник

ISBN 978-86-7025-826-6

САДРЖАЈ

РЕЧ УРЕДНИКА	9
ПРЕДГОВОР.....	11
ИСТОРИЈСКИ УВОД	13
Могућа продукција елемената с атомским бројем већим од 92	23
О елементу 93	27
О радиоелементима насталим у уранијуму зраченом неутронима (II).....	31
О доказивању и понашању земноалкалних метала насталих озрачивањем уранијума неутронима	43
Дезинтеграција уранијума неутронима: нови тип нуклеарне реакције	53
Физички доказ дељења тешких језгара при бомбардовању неутронима	57
Доказ настајања активних изотопа баријума из уранијума и торијума озрачених неутронима; доказ других активних фрагмената цепања уранијума.....	59
Од природних трансмутација уранијума до његове вештачке фисије.....	71
ПЕДЕСЕТ ШЕСТ ГОДИНА НАКОН ОТКРИЋА ФИСИЈЕ.....	87
Трансурански елементи: Синтетички актиноиди	87
Пре фисије и фисија	87

НУКЛЕАРНА ФИСИЈА (Деоба атомских језгара)	91
Карактеристике фисије	92
Фисија неутронима	92
Фисиони фрагменти и фисиони производи	93
Енергија фисије	95
Неутрони фисије	96
Спонтана фисија	97
Када је фисија могућна	97
НУКЛЕАРНА ЛАНЧАНА РЕАКЦИЈА	101
Услови за одигравање ланчане реакције	101
Основно о нуклеарном фисионом реактору	104
Безбедност нуклеарних реактора	107
О УРАНИЈУМУ	109
Допринос уранијума природној радиоактивности на Земљи	111
Значај уранијума за будућност енергетике	115
Нови нуклеарни концепти	116
ФЕНОМЕН ОКЛО – Природни нуклеарни реактор	119
Шта је феномен Окло и како је откривен	119
Шта је узрок ове појаве и када се то десило	120
Кретање концентрације ^{235}U кроз геолошко време	123
НУКЛЕАРНА ОРУЖЈА	125
Конструкције фисионих бомби	128
Уранијумска бомба	128
Плутонијумска бомба	129
Конструкција термонуклеарне (водоничне) бомбе	130
Ефекти нуклеарне бомбе	132
Нуклеарно оружје у другим земљама	134
Уранијумска муниција	135
Токсичност	137

ДОДАЦИ.....	139
А. Основни појмови.....	139
Основно о хемијским елементима, атомима, изотопима итд.	139
Радиоактивност, нуклеарне реакције, доза зрачења.....	140
Б. Изотопи чија се историјска имена помињу у тексту.....	143
В. Природна радиоактивност уранијума.....	145
Г. Могући узроци неуспеха немачког <i>Уранијумског пројекта</i>	156
Д. Добитници Нобелове награде који су учествовали у прављењу атомске бомбе за време Другог светског рата	160
Ђ. Галерија	161
SUMMARY	171

РЕЧ УРЕДНИКА

Откриће нуклеарне фисије, тј. феномена који значи цепање атомског језгра, што је праћено ослобађањем огромне количине енергије, спада у ред највећих открића у историји науке. Током периода од овог задивљујућег открића, а до њега је дошло 1939. године, до данас, настали су небројени чланци, књиге, пројекти, постројења итд. Скоро да је о фисији све познато, но, то не значи да се о њој не може и даље говорити на начине на које није говорено.

Рукопис књиге са наведеним насловом је један од примера како се на ову тему може гледати из једног посебног угла. Ово је књига о научним истраживањима, у којој аутори имају намеру да једно компликовано питање буде приближено што ширем кругу читалаца, идући ка њему путем којим се не иде тако често. То је такође и израз жеље да се наука и научно мишљење истакну као потреба друштава која имају свест о неопходности сопственог развоја.

Наведено, између осталог, потврђује сама структура текста. Наиме, овде су кроз први део, који представља историјски увод, дати преводи (с коментарима) седам најбитнијих научних радова који су директно довели до открића фисије, као и нобеловско предавање Ота Хана. Један део тог текста скреће пажњу читалаца на чињеницу да је откриће фисије дошло као последица вишегодишњег трагања за нечим сасвим другим, за трансуранијумским елементима, тј. за хемијским елементима који су тежи од најтежег природног елемента – уранијума. Због свог значаја у томе, али и из других разлога, уранијум је у књизи добио посебно место, чак и у наслову. У овом делу је представљена и плејада понајвећих научника свога доба у овој области: Енрико Ферми, Ида Нодак, Ирена Жолио-Кири, Павле Савић, Лизе Мајтнер, Ото Хан, Фриц Штрасман, Ото Роберт Фриш.

Други део књиге садржи опис и тумачење фисије уранијума изазване неутронима, приказ ланчане реакције фисије, приказ примена фисије данас, посебно у енергетици, али је речено нешто и о нуклеарним оружјима, фено-

мену Окло, те о уранијуму, његовом доприносу природној радиоактивности, значају за будућност енергетике итд.

Трећи део садржи тзв. *Додатке*, у којима су дата основна објашњења важних појмова коришћених у књизи, јер читање неких делова захтева одређена стручна знања.

Ова књига говори о једном важном времену из прве половине XX века, односно о научницима који су тада радили и својим открићима припремили терен за више научних и технолошких револуција до којих је дошло након Другог светског рата, међу којима су доминирале нуклеарне и космичке науке.

Коначно, може се рећи да ова књига представља дело које је написано на релативно популаран начин, али које није банално и није без јаког научног упоришта.

Академик Владимир Стевановић

ПРЕДГОВОР

Ово је књига о научним истраживањима која су довела до открића фисије атомског језгра, и о фисији самој. Намера аутора је да ово откриће, које представља једно од највећих открића у историји науке и које је врло брзо доживело технолошку и практичну примену, на зло и на добро, и тако утицало на живот људи, буде приближено што ширем кругу читалаца. То је такође и израз жеље да се наука и научно мишљење истакну као потреба друштва која имају свест о неопходности сопственог развоја.

Нуклеарна фисија, тј. цепање атомског језгра под утицајем неке друге честице (најчешће неутрона) на два језгра сличних маса, уз емисију велике количине енергије, откривена је 1939. године, а за ово откриће Нобелова награда за хемију је додељена немачком научнику Оту Хану 1944. године. Томе су претходиле вишегодишње активности трију научних група, које су се бавиле истраживањима нуклеарних реакција неутрона са уранијумом: Италијанска група, коју је предводио Енрико Ферми, Берлинска група (окупљена око Хана), те Париска група, којом је руководила Ирена Жолио-Кири, са којом је, као асистент, непосредно сарађивао Павле Савић.

Први део ове књиге, поред историјског увода, садржи и преводе (с коментарима) седам најбитнијих научних радова који су директно довели до открића фисије, као и нобеловско предавање Ота Хана. У том предавању Хан каже да је „фисија била феномен у супротности са свим феноменима запаженим до сада у нуклеарној физици“, па су научници са много опреза и уздржаности прилазили тумачењу сопствених експеримената, чак и онда када би они и недвосмислено указивали на постојање фисије језгара. У наставку је приказан и текст америчког нобеловца Глена Сиборга, написан више деценија након открића фисије, у коме он описује на који начин га је то откриће инспирисало на истраживања везана за добијање трансуранијумских елемената. Ипак, претежан део текста говори о томе како је једно задивљујуће откриће (фисије) дошло као последица трагања за нечим сасвим

другим (трансуранијумским елементима), тј. за хемијским елементима који су тежи од најтежег природног елемента – уранијума. А свему је претходило откриће неутрона 1932. године, једне необичне честице, која својом масом, кад се угради у атомско језгро, омогућава да се праве ‘тежи’ елементи. Тако, у читавој игри око фисије кључни учесници су *уранијум* и *неуиџрон*, па је уранијум добио посебно место, чак и у наслову књиге. Узгред, уранијум је био и централни актер код открића феномена *радиоактивности* (1896), којим је започела нуклеарна ера у историји човечанства.

Други део књиге садржи опис и тумачење фисије уранијума изазване неутронима, приказ ланчане реакције фисије, те поглавље посвећено хемијском елементу уранијуму. Анализира се и допринос уранијума природној радиоактивности на Земљи као и његов значај за будућност енергетике. Упоредо с тим је дат приказ примена фисије данас, посебно у енергетици, али је речено нешто и о нуклеарним оружјима, феномену Окло итд.

Трећи део садржи тзв. *Додатке* у којима су дата основна објашњења важних појмова коришћених у ‘главном’ тексту, јер ће читање неких делова књиге захтевати одређена стручна знања.

Ова књига говори и о једном важном времену из прве половине XX века, односно о научницима који су тада радили и својим открићима припремили терен за више научних и технолошких револуција до којих је дошло након Другог светског рата, међу којима су доминирале нуклеарне и космичке науке. Револуције у свету заснованом на знању још увек трају, сада можда више у неким другим областима. Да на крају наведемо речи чувеног Фермија „да се сви искрено надамо да ће људи постати довољно зрели да моћ природе користе на добро човечанства“.

Аутори се захваљују рецензентима др Зорки Вукмировић и проф. Душану Сладићу на драгоценим сугестијама и запажањима. Посебну захвалност изражавамо гђи Вери Батини на њеном великом ангажовању око издавања ове књиге.

Београд, 2019.

Аутори

ИСТОРИЈСКИ УВОД¹

Откриће радиоактивности и посебно нуклеарне фисије представља једну од најзначајнијих прекретница у историји науке, па и цивилизације. До њега се дошло у релативно кратком времену, у неколико етапа које се могу упоредити са чиновима савршено конципиране драме. Протагонисти су били водећи научници свога доба.

До разумевања ових појава стигло се кривудавим путем којим су, често без оријентације, лутали и највећи, где је сваки други корак био вредан Нобелове награде, а она је доспевала и у руке оних који је нису заслужили више од других, и оних који су је заслужили, али за нешто друго, а није додељена онима који су на том путу направили одлучујуће кораке. Почело је на самом крају 19. века открићем радиоактивности [А. Бекерел (*Henri Becquerel*, 1852–1908), поделио Нобелову награду за физику 1903. са М. Кири (*Marie Skłodowska Curie*, 1867–1934), и П. Киријем (*Pierre Curie*, 1859–1906)],² у време када нико још није имао ни најгрубљу плаузибилну представу о томе како изгледа атом. Први разуман модел смислио је Е. Радерфорд (*Ernest Rutherford*, 1871–1937) 1910–1911. године на основу историјских експеримената са расејањем α -честица (1909). Њему је 1919. успело да бомбардовањем језгара атома азота α -честицама добије кисеоник и тиме изврши прву вештачку трансмутацију елемената, чиме је остварио вековни сан алхемичара да из једног елемента добију други (па и ако резултат није било злато!).³ Тим експериментом детектовао је протон, а исто-

¹ Да би читалац који није стручан у области нуклеарних наука лакше читао овај текст неопходно је да познаје основне појмове везане за ову област науке, као што су: атом, његови конституенти и појмови којима се то описује, појам изотопа, радиоактивност – радиоактивни распад, параметри распада, нуклеарне реакције, јонизујуће зрачење, доза зрачења итд. Ти су појмови описани у ДОДАТКУ – А. У сличне сврхе служе и ДОДАЦИ под Б, В и Г.

² Бекерел је први уочио ову појаву 1896. године. Он, Марија и Пјер Кири су за откриће радиоактивности поделили Нобелову награду за физику 1903. године. Марија Кири је 1911. добила другу Нобелову награду, овог пута за хемију, а за откриће елемената радијума и полонијума. Међутим, ни две Нобелове награде нису Марији биле довољне да постане члан Француске академије наука (била је номинована, али су место увек добијали мушкарци).

³ О величини Радерфорда може се судити и по томе што је Нобелову награду [за хемију (!), иако се хемијом (био је физичар) никада није бавио] добио пре ових епохалних открића, наиме 1908. „за истраживање дезинтеграције елемената и хемију радиоактивних супстанција“

времено предвидео постојање неутрона. Модел је усавршио дански физичар Нилс Бор (*Niels Bohr*, 1885–1962, Нобелова награда за физику 1922. за „његове заслуге у истраживању структуре атома и зрачења које они емитују“). Неутрон је експериментално доказао 1932. године Радерфордов млађи сарадник Чедвик (*Sir James Chadwick*, 1891–1974, добитник Нобелове награде за физику 1935). Као ненаелектрисана честица значајне масе, неутрон се показао веома погодним пројектилом за изазивање нуклеарних реакција, првенствено стога што се, будући неподложен дејству кулоновске баријере, лако може приближити језгру. Из тих разлога, откриће неутрона, које је међу ‘нуклеарним открићима’ дошло релативно касно, имало је огроман значај за даљи, веома бурни развој нуклеарних наука, који је убрзо уследио. Оно је довело прво до открића нуклеарне фисије, а онда и до открића трансуранијумских елемената. Ово последње је дало значајан допринос развоју систематизације елемената, тј. Периодног система.

Следећи важан корак направили су кћерка Марије и Пјера Кирија, Ирена Жолио-Кири (*Irène Joliot-Curie*, 1897–1956) и њен супруг Фредерик Жолио-Кири (*Jean Frédéric Joliot-Curie*, 1900–1958). Они су 1933. године бомбардовали α -честицама⁴ (природни) алуминијум (^{27}Al) и као резултат добили радиоактивни изотоп фосфора, ^{30}P (+ протон; ово фосфорово језгро се затим емисијом позитрона⁵ трансформише у неактивни ^{30}Si). Тиме су показали да се радиоактивни нуклиди могу произвести и у лабораторији, тј. открили су „вештачку радиоактивност“. За ово откриће су 1935. године добили Нобелову награду за хемију.⁶

Тридесетих година Е. Ферми (*Enrico Fermi*, 1901–1954), италијански физичар, један од ретких научника (пored нпр. Радерфорда) који су се показали подједнако великим и у експерименталном и у теоријском раду,⁷ а који

Радерфорд је, на име, на самом крају 19. и у почетку 20. века (са разним млађим сарадницима) увео хипотезу да се (многи) хемијски елементи радиоактивним распадима трансформишу у друге елементе, поделио је радиоактивне „зраке“ на α - и β -честице [γ -зраке открио је 1900. П. Вилар (*Paul Ulrich Villard*, 1860–1934)], доказао природу све три врсте „зрака“, открио закон радиоактивног распада, тј. увео појам времена полураспада.

⁴ Види ДОДАЦИ – А.

⁵ Позитрон је електрон (у смислу да имају исту масу и величину спина) с позитивним наелектрисањем. Његово постојање теоријски је предвидео 1928. године П. А. М. Дирак (*Paul Adrien Maurice Dirac*, 1902–1984; 1933. добио је Нобелову награду [тачније, поделио ју је са Ервином Шредингером (*Erwin Schrödinger*, 1887–1961); по мишљењу аутора, ово је без конкуренције најбољи нобеловски „двојац“]) „за откриће једне нове корисне форме теорије атома“. Позитрон је експериментално детектовао К. Д. Андерсон (*Carl David Anderson*, 1905–1991) 1932. године, за шта је 1936. добио Нобелову награду за физику [делио ју је са В. Ф. Хесом (*Victor Franz Hess*, 1883–1964), који је открио космичко зрачење].

⁶ Ирена и Фредерик Жолио-Кири су вероватно најмалерознији пар у историји науке: они су први „имали у рукама“ и неутрон, и позитрон, и нуклеарну фисију, али им је недоста- так нешто дубљег теоријског знања, храбрости и, највише среће онемогућио да се та открића припишу њима. А можда и превелика доза скромности: Ирена је, нпр. постала професор тек 1937, дакле две године након што је добила Нобелову награду.

⁷ Ферми је био чудо од детета, али једно од ретких чија је каснија научна каријера била у складу са очекивањима која су у њих полагана. Студије физике почео је у Пизи са 17 година,

је тих година предводио тзв. *Италијанску групу*, систематски је бомбардовао неутронима све елементе које је могао прибавити, њих око шездесет. Године 1938. добио је Нобелову награду захваљујући елементарној грешци учињеној на основу генијалног расуђивања. Бомбардовао је неутронима уранијум (редни број 92) и покушао да идентификује продукте реакције. Тражио их је, природно, међу елементима „лакшим“ од уранијума (јер тежих од уранијума у природи нема, и јер се очекивало да ће његово језгро емитовати α -честице). Када је стигао до места где је олово (редни број 82), дигао је руке од неуспешног трагања и закључио: „Овај негативни доказ ... са великим бројем тешких елемената указује на могућност да је атомски број елемента-продукта већи од 92“.⁸ У ствари, *Италијанска група* је објавила да се, бомбардујући уранијум неутронима, поред почетне, нормалне α -радиоактивности уранијума, добија и низ од пет β -радиоактивности, међу њима и једна с временом полураспада од 13 минута. Њу су приписали елементу с редним бројем 93, за који се сматрало да би требало да хемијски буде сличан ренијуму (Re), полазећи од тога да би он у Периодном систему тадашњег доба, слика 1⁹, требало да се налази испод ренијума. Слично, уранијум је сматран за хомолог волфрама (што данас знамо да није тако).

Ови у природи непознати елементи, чије је постојање Ферми постулирао, и веровао да их је индиректно и доказао, названи су трансуранима. Идеја је била исправна, јер се из уранијума који захвати неутрон, емисијом β -честица заиста могу добити елементи са редним бројем 93 (нептунијум) и 94 (плутонијум). Научни свет је био задивљен и Фермију је 1938. године додељена Нобелова награда за физику („за демонстрацију постојања нових радиоактивних елемената произведених озрачивањем неутронима и за откриће одговарајућих нуклеарних реакција изазваних спорим неутронима“).

Било је, међутим, и скептика. Ида Нодак [*Ida (Tack-) Noddack*, 1896–1978] је већ 1934. указала на то да Фермијев закључак није довољно основан и да је

завршио их са 21, одбраном докторске дисертације, са 24 је постао професор на Универзитету у Фиренци, а са 25 професор Теоријске физике на Универзитету у Риму. Његову луцидност, када је реч о експериментима, лепо илуструје следећи догађај. Када је у пустињи Новог Мексика у зору 16. јула 1945. изведена прва (пробна) експлозија атомске бомбе – Ферми је био неформални шеф тог пројекта – док су остали у неверици били омађијани сведоци настанка новог или потенцијалног нестанка старог света, Ферми је исцпао новине које су се нашле у његовој близини и испустио парчиће папира у ваздух да би на основу растојања на које су били одувани проценио енергетски ефекат новог оружја. Реч је очигледно била о чистој импровизацији, смишљеној у делићу секунде; да је раније планирао овај „експеримент“, Ферми би сигурно понео нешто што је погодније од парчића поцепаних новина [R. Berhorst, *Geokompakt*, Nr. 14 (2006) 108–117].

⁸ E. Fermi, *Nature* **133** (1934) 898–899.

⁹ У главном тексту, слике, табеле и једначине су нумерисане оним редом којим се појављују, изузев оних које се налазе у преводима радова, где су дати под бројевима под којима су наведени у тим радовима. У прилозима је коришћена посебна нумерација за сваки појединачни прилог, која испред броја слике/табеле/једначине садржи и словну ознаку прилога.

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	(43)	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo		Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	(85)	86
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po		Rn
(87)	88	89	90	91	92	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)	(100)				
	Ra	Ac	Th	Pa	U												
		57	58	59	60	(61)	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
		La	Ce	Pr	Nd		Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	

Слика 1. Периодни систем хемијских елемената какав је био пред Други светски рат. Бројеви у заградама означавају још неоткривене елементе

требало наставити са трагањем за лакшим језгрима међу продуктима реакције, све док се не зађе у област елемената са редним бројем и масом приближно упола мањом од уранијумових. Она је, дакле, предвидела могућност цепања језгра уранијума на два фрагмента приближно једнаке масе. Међутим, ову претпоставку није могла нити експериментално доказати, нити теоријски оправдати, и зато је њена идеја прошла релативно незапажено. Дакле, Ферми је добио Нобелову награду за трансуране које није открио {у ствари, међу продуктима реакције било је и њих, али у малој количини; нептунитијум је стварно откривен тек 1940. [Е. М. МекМилан (*Edwin Mattison McMillan*, 1907–1991), Нобелова награда за хемију 1951. (заједно са Гленом Сиборгом), П. Х. Ејбелсон (*Philip Hauge Abelson*, 1913–2004)], а плутонијум такође 1940. [Г. Т. Сиборг (*Glenn Theodore Seaborg*, 1912–1999), Џ. В. Кенеди (*Joseph William Kennedy*, 1916–1957), Е. М. МекМилан, М. Чефола (*Michael Cefola*, 1918–1983), А. Вал (*Arthur C. Wahl*, 1917–2006)]}, а није за прву успешно изведену нуклеарну фисију.

Рад на „трансуранима“ наставила је *Берлинска група* коју су чинили аустријска физичарка Лизе Мајтнер (*Lise Meitner*, 1878–1968),¹⁰ и немачки хемичари Ото Хан [*Otto Hahn*, 1979–1968, директор Кајзер Вилхелм (*Kaiser*

¹⁰ Лизе Мајтнер је била друга жена која је докторирала (1906) на Бечком универзитету (на студије Физике и Математике – у то време јако неуобичајено за жене – уписала се 1901). Најзначајнији професор био јој је Лудвиг Болцман (*Ludwig Boltzmann*, 1844–1906). Године 1907. упознала је у Берлину, на предавањима Макса Планка (*Max Karl Ernst Ludwig Planck*, 1858–1947, добитник Нобелове награде за физику 1918) хемичара Ота Хана с којим је непрекидно сарађивала следећих 30 година. У периоду 1912–1915. била је неофицијелна (као жена, официјелна у тадашњој Пруској није могла бити) асистенткиња Макса Планка. Од 1926. била је ванредни професор за Експерименталну физику на Берлинском универзитету (као прва њемачка професорка Физике).

Wilhelm) института у Берлину, KWI] и (од 1929) Фриц Штрасман (*Fritz Strassmann*, 1902–1980).¹¹ До пред крај тридесетих година прошлог века идентификовали су низ оваквих елемената и на крају објавили да је посао на том проблему завршен, тако да више нема смисла истраживати у том правцу.

Међутим, И. Жолио-Кири и П. Савић (1909–1994), који су се бавили истим стварима у Паризу, мислили су другачије. Они су, за разлику од свих других, продукте дезинтеграције уранијума таложили са елементима ретких земаља и установили да један од тих продуката, с временом полураспада од 3,5 сати, означен стога као $R_{3,5h}$, има особине идентичне лантану (с редним бројем 57). Нажалост, претерана савесност Павла Савића, коме није било довољно што је урадио девет, већ је извео и десето фракционо таложење које је дало нешто другачији резултат од претходних, и хир природе да један од изотопа итријума сасвим случајно има идентично време полураспада као лантан, навели су их на то да основни закључак формулишу нешто опрезније: “*Dans l'ensemble, les propriétés de $R_{3,5h}$ sont celles du lanthane, dont il semble jusqu'ici qu'on ne puisse le séparer que par fractionnement.*” (Све у свему $R_{3,5h}$ има особине лантана, од кога се, изгледа, може за сада одвојити само фракционим таложењем.).¹² Овде треба истаћи да је то фамозно десето таложење било у ствари додатно откриће (пored лантана), што се често занемарује, и да је оно искривило слику створену кроз претходних девет таложења. Истина, аутори тога нису били свесни. Оно је разјашњено знатно касније и допринело је да се лакше створи шира слика о феномену фисије. Мишљење аутора је да је оно за напредак науке и цивилизације ипак важније од тога да ли су његови аутори добили Нобелову награду. Шта би било кад би аутори били анонимни – остала би само открића у свом пуном значењу.

Међутим, и поред тога, овај рад представљао је кључни корак ка разрешењу проблема фисије. Поново је отворио већ запечаћен проблем: указао је на то да оно за шта се мислило да су трансурани, можда представља елементе из средине Периодног система, знатно лакше од уранијума.

Берлинска ируја је у међувремену остала без Лизе Мајтнер која је, као Јеврејка,¹³ била принуђена да напусти Немачку. Егзил је нашла у Шведској. Хан и Штрасман су рад Ирене Жолио-Кири и Павла Савића дочекали с неверицом. Покушали су да га оповргну. На своје изненађење, урадили су супротно. Показали су да су Кири и Савић били у праву (мада то нису експлицитно објавили). Затим су се саплели на баријуму (с редним бројем 56),

¹¹ Штрасман је из Хановера, где је управо био докторирао, прешао у Берлин чак и по цену тога што му је стипендија коју је добио била више него упола мања од плате коју је до тада имао.

¹² I. Curie, P. Savitch, *J. Phys. Radium* 9 (1938) 355–359.

¹³ Лизе у то време чак и није била Јеврејка! То је била пореклом, али је одгојена у протестантском духу. 1908. је и формално конвертирала у протестанткињу. Али Нирнбершки расни закони из 1935. су дозвољену количину неаријевске крви свели на ниво *pmt*-а. Заправо су дозвољавали 1/8 јеврејског порекла.

првом суседу лантана. Хан је очајнички очекивао да Штрасман, који је радио експерименте, ипак покаже да би то могао бити баријуму хемијски сродан, а уранијуму у Периодном систему знатно ближи радијум, али резултати су увек били исти. На крају је помоћ затражио од Лизе Мајтнер; 19. децембра 1938. писао је Хан Лизи: „Али увек поново долазимо до ужасног закључка: наши радијумови изотопи не понашају се као радијум, већ као баријум ... Можда Ти можеш да предложиш било какво фантастично објашњење. Ми знамо при томе сами да се (*Додатак преводиоца*: уранијум) у ствари не може распасти на баријум.“ Лизин одговор стигао је повратном поштом (иако то није било време интернета, писма су између Немачке и Шведске путовала дан, највише два); „Мени у овом тренутку тешко пада да претпоставим неки тако радикалан распад, али у нуклеарној физици смо већ доживели толико изненађења да се ни за шта не може без даљњег казати: немогуће је.“¹⁴ То је охрабрило Хана: Лизе се све време енергично супротстављала његовим покушајима да у продуктима распада уранијума види радијум (јер би то морао бити резултат практично немогуће истовремене емисије две α -честице), а, ето, била је спремна да настајање баријума види као изазов за теорију, а не да га одбаци као нешто што противречи физици тог доба.

22. децембра 1938. Хан је послао рад у штампу. Међутим, иако је имао резултате *Париске ирује*, као и своје сопствене, а посебно и Лизину потпору, закључак рада у *Die Naturwissenschaften* [27 (1939) 11–15] био је чак уздржанији него онај из претходне студије Кири–Савића: „*Als Chemiker müssten wir aus den kurz dargelegten Versuchen das oben gelegte Schema eigentlich umbenennen und statt Ra, Ac, Th die Symbole Ba, La, Ce einsetzen. Als der Physik in gewisser Weise nahestehende „Kernchemiker“ können wir uns zu diesem, allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden, Sprung nicht entschliessen. Es könnten doch noch vielleicht eine Reihe seltsamer Zufälle unsere Ergebnisse vorgetäuscht haben.*“ [„Као хемичари морали бисмо на основу укратко изложених експеримената преименовати горе наведену схему, и уместо Ra, Ac, Th ставити Ba, La, Ce. Као „нуклеарни хемичари“, блиски у извесном смислу физици, не можемо се одлучити на овај скок који противречи свим досадашњим искуствима нуклеарне физике. Ипак је могуће да низ неких чудних случајности води до заваревајућих (*Примедба преводиоца*: Или „обмањујућих“; немачки глагол „*vortäuschen*“ нема једнозначан еквивалент у нашем језику) резултата.“] Аутори су били: О. Хан и Ф. Штрасман. Дакле, не и Лизе Мајтнер.

Убрзо је било нађено и „фантастично“ објашњење механизма реакције. У току разговора, у шетњи шумом у околини Гетеборга, са својим нећаком Оттом Фришом (*Otto Robert Frisch*, 1904–1979), који је (такође емигрант) из Данске (радио је тада у институту Нилса Бора) дошао у Шведску да је посети, Лизе је схватила: након бомбардовања неутроном, уранијум се цепа у два лакша језгра, од којих је једно језгро баријума. Чак је и детаљно објаснила

¹⁴ R. L. Sime, „Lise Meitner und die Kernspaltung“, *Spektrum der Wissenschaft*, 5/2004.

механизам процеса и у глави израчунала енергију која се при том ослобађа. 16. јануара 1939. послали су у најпрестижнији научни часопис *Nature* чланак: L. Meitner, O. R. Frisch [заведен по штампању *Nature*, 143 (1939) 239–240] са јасним: “*It seems therefore possible that the uranium nucleus has only small stability of form, and may, after neutron capture, divide itself into two nuclei of roughly equal size.*” („Дакле, изгледа могуће да уранијумово језгро има само мало стабилну форму и да може, након захватања неутрона, да се распадне на два језгра приближно једнаке величине.“) Наравно, истовремено су манускрипт послали и Хану. Рад је изишао из штампе 11. фебруара 1939.

Међутим, већ 3. јануара известио је Фриш, у међувремену поново у Копенхагену, о свему Нилса Бора, који се управо спремао за пут на научну конференцију у САД. „О, какви идиоти смо сви били“, узвикнуо је Бор.¹⁵ „Дакле, наравно, мора бити само тако, ништа друго!“¹⁶

Бор је обећао Фришу да неће обзнанити идеју о фисији пре него што Мајтнер и Фриш публикују своје радове. Међутим, на путу је дискутовао о томе са физичарем Леоном Розенфелдом (*Léon Rosenfeld*, 1904–1974), пропустивши при томе да му саопшти своје обећању Фришу. Розентал је, дакле, одмах разгласио откриће кругу физичара. Након што су радови Мајтнерове и Фриша били послати у штампу (16. 1. 1939) Бор је јавно објавио откриће фисије 26. 1. 1939. на Петој вашингтонској конференцији из теоријске физике. Тако су о фисији сазнали и Енрико Ферми и Лео Силард (*Leo Szilard*, 1878–1964),¹⁷ обојица

¹⁵ Otto Frisch, *What Little I Remember*, Cambridge University Press, (1979).

¹⁶ P. Radvynyi, “Die Curies – Eine Dynastie von Nobelpreisträgern”, *Spektrum der Wissenschaft*, 2/2003.

¹⁷ Силард је, за разлику од методичног и педантног Фермија, био непоправљив боем. Успех у трци с Немцима ка атомској бомби Американци су постигли можда најпре захваљујући томе што су ова два човека, који су јако ценили али бескрајно нервирали један другог, успели да превазиђу несугласице и своје неспорне индивидуалне способности подреде заједничком циљу. Силард је, и поред тога што се гнушао експерименталног (мануелног) рада, решио два кључна практична проблема у реализацији пројекта. И поред енергичног противљења Фермија, успео је да издејствује јако скупу набавку екстремно пречишћеног графита (који служи за успоравање неутрона, неопходно при фисији $^{235}_{92}\text{U}$) јер је схватио да релативно значајне примесе бора у комерцијалном графиту изазивају паразитско заробљавање драгоцених неутрона и тиме инхибирају ланчану реакцију – суочивши се са истим проблемом, Немци [конкретно, будући нобеловац Валтер Боте (*Walther Bothe*, 1891–1957)] су дигли руке од графита и одлучили се за тешку воду, коју нису успели да накупе у довољној количини, иако су у том циљу заузели целу једну земљу (Норвешку, напад је почео 9. 4. 1940; Белгију, са тада највећим залихама уранијума у свету, већ су имали). Белгија је заузета 28. маја (напад је отпочео 10. маја), а Норвешка 10. јуна, дакле приближно у исто време. Иначе, уран је потицао из Белгијског Конга, који је остао под управом владе у изгнанству, тј. Лондона. И конструкција „гомила“ као основа првог нуклеарног реактора била је идеја Силарда [R. Berhorst, *Geokompakt*, Nr. 14 (2006) 108–117]. За разлику од атмосфере у америчком тиму, који је водио Роберт Опенхајмер (*Robert Oppenheimer*, 1904–1967), истакнути истраживач, али пре свега одличан организатор и познавалац прилика у немачкој науци и друштву, у немачком, окупљеном око неприкосновеног ауторитета у теоријској физици, али нестручњака за проблеме у вези са радиоактивношћу, Вернера Хајзенберга, владали су

недуго пре тога избегли у САД. Фермију, који је управо био добио Нобелову награду за, у ствари, прву успешно изведену фисију (чега у време открића није био свестан, а што нису слутили ни они који су му награду доделили) и искористио боравак у Стокхолму као одскачну даску за пут, са породицом, у Америку,¹⁸ и Силарду, који је још 1934. патентирао идеју ланчане реакције, није било тешко да схвате могуће импликације. Користећи ауторитет „трећег човека“, још 1933. пристиглог Алберта Ајнштајна (*Albert Einstein*, 1879–1958, Нобелова награда за физику 1921), покренули су одмах опсежан рад на атомској бомби – он је почео чувеним писмом Ајнштајна¹⁹ америчком председнику Рузвелту (*Franklin Delano Roosevelt*, 1882–1945) од 2. августа 1939: „Недавни радови *E. Fermi*-ја и *L. Szilard*-а ...“ У наставку се упозорава на могући интерес Немаца за атомско оружје и пледира да се таква истраживања изведу и у САД.

Хан и Штрасман су пожурили да имплементирају Лизину интерпретацију у своје, делимично нове експерименталне резултате (управо Лизе је инсистирала да се изведу детаљнији експерименти, да би се из игре искључио радијум). Рад који су 28. јануара (у суботу!) 1939. под насловом: „Доказ настајања активних баријумових изотопа при озрачивању уранијума и торијума неутронима; доказ других активних фрагмената при цепању уранијума (*“Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung”*)“ послали у реномирани немачки часопис *Naturwissenschaften*, појавио се у штампи у рекордно кратком року (9. фебруара 1939), чак два дана пре Лизиног и Отовог. Јасно је, међутим, ко у овом случају може да полаже право на приоритет: Хан и Штрасман су коректно (а други избор нису ни имали) навели да су пре слања свог рада добили манускрипт Лизиног.

Прва послератна (за 1944) Нобелова награда за хемију додељена је Оту Хану за откриће нуклеарне фисије.

сујета и узајамна подозреност, комбиноване са пасивним држањем највећег стручњака, Ота Хана, и отвореним противљењем пројекту Ота фон Лауеа. У америчком тиму несугласице су почеле тек када је бомба направљена и испробана, а Немачка већ капитулирала. Силард (као и Ајнштајн) био је против њеног бацања на Јапан, док је Ферми био за. Након рата су сви они били против конструкције још разорнијег оружја, водоничне бомбе, засноване на нуклеарној фузији. Али тада их више нико није слушао. Више детаља везаних за ову занимљиву тему је дато у поглављу НУКЛЕАРНА ОРУЖЈА, као и у делу ДОДАЦИ – Г.

¹⁸ За разлику од Силарда, Ферми није био Јевреј, али јесте његова супруга Лаура (патиме и деца).

¹⁹ У току лета 1939. Силард је сазнао да Немци скупљају уранијум. Претпоставио је да то значи истраживање цепања језгра, и хтео је да опомене америчку владу. С инстинктом стручњака за рад са јавношћу, обратио се свом пријатељу и ментору Ајнштајну, који се налазио око сто километара источно од Њујорка у једном летњиковцу на Лонг Ајленду (*Long Island*). Силард је информисао светски познатог физичара о ланчаној реакцији. „На то уопште нисам мислио“, одговорио је Ајнштајн; он је коначно пред собом видео механизам којим је могло да се оствари претварање масе у енергију на основу његове чувене једначине еквивалентности (*W. Lanouette, “Fermi, Szilard und der erste Atomreaktor”, Spektrum der Wissenschaft, 5/2004*).

Можда има смисла искористити већ написано да би се покушао наћи одговор на, у нашој средини, често постављано питање: да ли је Павлу Савићу неправедно ускраћена Нобелова награда за (су)откриће нуклеарне фисије? Читалац би о томе могао сам извести суд на основу већ изнесених чињеница и оригиналних научних радова који ће му бити презентирани у даљем тексту. Њима се може додати још неколико њих, који јасније осветљавају ситуацију у вези са овим епохалним открићем. Скептици ће рећи: а) Жолио-Кири и Савић нису уопште поменули могућност да је лантан, који су идентификовали, настао *фисијом* уранијума, б) они нису ни били сигурни да су детектовали лантан. Погледајте, међутим, формулацију Хана и Штрасмана у њиховом првом раду, који се сматра кључним.²⁰ Зар се исте замерке не би могле ставити и њима? Чак и Лизе Мајтнер, иначе бескрајно одана Хану, свој рад о фисији почиње тиме да је Берлинска група следила идеју својих париских „конкурентата“. Затим, Ирена Жолио-Кири је већ имала једну Нобелову награду, а ова се, осим сасвим изузетно, не додељује два пута (поготово не кћерци једног од укупно четири таква изузетна научника).

Следеће питање је зашто је награда додељена само Хану, а не и Штрасману и, поготово, Лизи Мајтнер.²¹ Штрасмана је било релативно лако елиминисати (иако је у ствари он урадио све експерименте) – он је био млади сарадник великог Хана. Стварна неправда учињена је, по мишљењу писаца овог текста, Лизи Мајтнер.²² Она је све до изнуђеног егзила директно учествовала у свему што се на овом проблему радило у Берлину, а и након одласка била је у сталном контакту са Ханом и Штрасманом и одлучујуће је допринела распетљавању кључног чвора. У њеном раду, објављеном истовремено са другим Хановим и Штрасмановим, механизам нуклеарне фисије описан је онако како се то данас чини у сваком уџбенику. Па зашто је онда искључена? Зато што се у погрешно време нашла на погрешном месту. И да је хтео (а после ће се показати да и није) Хан је није могао прикључити као коаутора на радове који су он и Штрасман објавили у немачком научном часопису на почетку рата. То би открило то да он никада није прекинуо везу са својом бившом најближом сарадницом, Јеврејком. И на крају рата су политичке околности ишле на руку Хану. Он се у њему није понашао херојски [није пружао активан отпор као П. Савић или подземни као И. и Ф. Жолио-Кири, није се одрекао домовине

²⁰ Као што је већ наведено, чак и пре слања другог рада у штампу свет је, захваљујући Бору, већ знао све најважније о фисији.

²¹ Неправда је делимично исправљена 1966. када су Хан, Мајтнер и Штрасман поделили престижну *Enrico Fermi Award*.

²² Без обзира на то што није добила Нобелову награду, а четири пута је била номинована за њу, Лизе Мајтнер је и за живота, а и касније, била славна и призната као један од највећих физичара у историји науке. Ипак, њеном имену је знатно после њене смрти „дописана“ највећа слава коју један научник може да има, која стоји знатно изнад оне коју доноси Нобелова награда – хемијски елемент који се налази на редном броју 109 Периодног система је назван по Лизи Мајтнер. То је елемент *мајјнеријум*.

као Ајнштајн, Ферми, Шредингер, Паули (*Wolfgang Pauli*, 1900–1955, Нобелова награда за физику 1945), Борн (*Max Born*, 1882–1970, Нобелова награда за физику 1954), Фриш и многи други, није натеран на бекство као Лизе Мајтнер нити је стрпан у кућни затвор као Бор, није јавно показивао гнушање према „новом поретку“ као фон Лаје (*Max von Laue*, 1879–1960, Нобелова награда за физику 1914) или кршио његове прописе као Штрасман²³], али јесте коректно [није био филозоф/опортунист као Хајзенберг (*Werner Karl Heisenberg*, 1901–1976, Нобелова награда за физику 1932) или Вајцзекер (*Carl Friedrich von Weizsäcker*, 1912–2007), ни патриот типа Иде Нодак,²⁴ да не трошимо превише речи на Ленарда (*Philipp Eduard Anton Lenard*, 1862–1947, Нобелова награда за физику 1905) и Штарка (*Johannes Nikolaus Stark*, 1894–1957, Нобелова награда за физику 1919)²⁵], био је, дакле, „добар“ Немац. О томе сведочи и чињеница да, иако највећи експерт на том пољу, није био (директно) укључен у пројект немачке атомске бомбе.

Мишљења смо, дакле, да су изгледи Павла Савића да добије Нобелову награду били минимални (иако су Ирена Жолио-Кири и он за њу били номинирани). Али да ли је заиста најважније то да ли вам је додељена та награда? Погледајте у каквом је „друштву“ Павле Савић био равноправан члан: ту су били Енрико Ферми, Ирена и (касније) Фредерик Жолио-Кири, Нилс Бор (он је смислио модел „течне капи“, којим се најсликовитије објашњава механизам фисије), Ото Хан, Лизе Мајтнер, индиректно чак и Алберт Ајнштајн, на основу чије формуле ($E = mc^2$; m – маса, c – брзина светлости) је Лизе израчунала енергију која се ослобађа при фисији.

²³ Штрасман је, поред осталог, све време прогона скривао у свом (и своје супруге) стану једну своју јеврејску колегиницу, а до слома Трећег рајха није долазило у обзир да добије било какву позицију на немачким универзитетима, иоле достојну његовим способностима.

²⁴ Од 1942. до 1944. била је професор у од Немаца окупираном прелепом Стразбуру, а после Рата завршила негде у Турској.

²⁵ У време када су имали мало шта ново да кажу у физици, ови бивши, тридесетак година раније чак веома цењени физичари имали су пуно тога да говоре о Теорији релативности и њеном јеврејском творцу Алберту Ајнштајну, у памфлету, „Сто (није их било баш сто, али не треба бити ситничар) аутора против Ајнштајна“. На што је Ајнштајн реаговао: „Да је нетачна (Теорија релативности), довољан би био само један од њих.“

Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92

E. FERMI

Nature, **133**, p. 898–899 (1934)

Могућа продукција елемената с атомским бројем већим од 92

Е. ФЕРМИ

Nature, **133** (1934) 898–899

Донедавно је било опште прихваћено да атом који настаје вештачком дезинтеграцијом нормално представља неки стабилан изотоп. Г. и гђа Жолио су први показали да то није неизбежно тако; у неким случајевима продукт може бити радиоактиван, са мерљивим средњим временом живота, који (продукт) прелази у стабилну форму тек након емисије позитрона.

Број елемената који се могу активирати сударом са α -честицом (Жолио), протоном [Кокрофт (*J. D. Cockcroft*), Гилберт (*C. W. Gilbert*), Волтон (*E. T. S. Walton*)] или деутероном [Крејн (*H. R. Crane*), Лаурицен (*C. S. Lauritsen*), Хендерсон (*M. C. Henderson*), Ливингстон (*M. S. Livingston*), Лоренс (*E. O. Lawrence*)] неизбежно је ограничен чињеницом да се због јаког кулоновског одбијања²⁶ могу дезинтегрисати само лаки²⁷ елементи.

Ово ограничење отпада у случају бомбардовања неутронима. Висока ефикасност ових честица у продукцији дезинтеграција добро компензује слабост²⁸ доступних извора неутрона у поређењу са онима за α -честице и протоне. Показано је у ствари да се велики број (47 од 68 до сада испитиваних) елемената било које атомске масе може активирати коришћењем мале гасне цеви испуњене прахом берилијума и радоном као извора неутрона до 800 миликирија.²⁹ Овакав извор даје око милион неутрона по секунди.

Нађено је да сви елементи активирани на овај начин, у количини довољној за магнетну анализу знака наелектрисања емитованих честица, емитију само негативне електроне. То је теоријски разумљиво, јер апсорпцијом

²⁶ Примедба њеводиоца: Између атомских језгара и тих честица.

²⁷ Примедба њеводиоца: Прецизније, „елементи мање атомске масе“; у даљем тексту без упозорења ћемо често мењати израз „(атомска) тежина“, који користи Ферми, у исправан „(атомска) маса“.

²⁸ Примедба њеводиоца: „Слабост“, енгл. *weakness*, у смислу „низак интензитет“.

²⁹ Примедба њеводиоца: С том активношћу.

упадног неутрона настаје вишак неутрона унутар језгра; стабилна форма тада у општем случају настаје трансформацијом једног неутрона у протон, што је праћено емисијом једне β -честице.

У неколико случајева било је могуће извести хемијско одвајање β -активног елемента следећи уобичајену технику додавања озраченој супстанцији малих количина суседних елемената. Ови елементи се тада раздвајају хемијском анализом и засебно тестирају на β -активност помоћу Гајгер–Милеровог (*H. Geiger, W. Müller*) бројача. Активност је увек потпуно следила одређени елемент, што је омогућавало идентификацију испитиваног узорка.

У три случаја (алуминијум, хлор, кобалт) активни елемент формиран при бомбардовању елемента с атомским бројем Z има атомски број $Z-2$. У четири случаја (фосфор, сумпор, гвожђе, цинк) атомски број активног продукта је $Z-1$, а у два случаја (бром, јод) активни производ је један од изотопа бомбардованог елемента.

Ови подаци изгледа да указују на то да су могућа три главна процеса: (а) захватање неутрона уз тренутну емисију α -честице; (б) захватање неутрона праћено емисијом протона; (в) захватање неутрона уз емисију γ -кванта који са собом носи вишак енергије. С теоријске тачке гледишта, вероватноће процеса (а) и (б) веома много зависе од енергије емитоване α - или H -честице; што је ова већа, то је већа и атомска маса елемента.³⁰ Вероватноћа процеса (в) може се само веома грубо израчунати при тренутном стању теорије језгра, па ипак изгледа да је она мања за фактор 100 или 1000 од мерене вредности.

Изгледа да је вредно труда обратити посебну пажњу на тешке радио-активне елементе торијум и уранијум јер би генерална нестабилност језгара у тој области атомских маса могла условити сукцесивне трансформације. Из тог разлога аутор је извео истраживања ових елемената у сарадњи са Ф. Разетијем (*F. Rasetti*) и О. Д'Агостином (*O. D'Agostino*).³¹

Експеримент је показао да се оба елемента, претходно ослобођена активних нечистоћа, могу интензивно активирати бомбардовањем неутронима. Почетна индукована активност била је у нашим експериментима око 1000 импулса по минути у Гајгеровом бројачу начињеном од алуминијумске фолије дебљине 0,2 mm. Криве распада ових активности показују да је феномен прилично комплексан. Груб преглед активности торијума показао је за тај елемент бар два периода.³²

Истраживање је било исцрпније³³ у случају уранијума; поуздано³⁴ је установљено постојање периода од 10 s, 40 s, 13 min, а поред тога бар два додатна периода од 40 минута до једног дана. Велика неодређеност кривих распада услед

³⁰ *Примедба њеводиоца*: Прецизније би било: „Што је већа атомска маса елемента, потребна је већа енергија упадне честице.“

³¹ E. Fermi, *Ricerca Scientifica* 5 (1), (1934) 283, 330, *Nature* 133, May 19 (1934), 757; E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, F. Rasetti, E. Segre, *Ricerca Scientifica* 5(1), (1934) 452.

³² *Примедба њеводиоца*: Под „периодом“ се подразумева „време полураспада“.

³³ *Примедба њеводиоца*: У оригиналу стоји „better“, „боље“.

³⁴ *Примедба њеводиоца*: У оригиналу, „well“, „добро“.

статистичких флукуација учинила је веома тешким установљивање да ли та два периода представљају сукцесивне или паралелне процесе дезинтеграције.

Учињени су покушаји хемијске идентификације β -активног елемента с периодом од 13 min. Општа схема овог истраживања састојала се у додавању озраченој супстанцији (уранијум-нитрат³⁵ у концентрованом раствору очишћеном од продуката распада) такве количине неког β -активног елемента да да око стотину импулса по минути. Ако би било могуће доказати да индикована активност, препознатљива по свом карактеристичном периоду, може да се хемијски одвоји од додате активности, било би разумно претпоставити да те две активности нису од изотопа истог елемента.

Следећа реакција омогућава да се тринаестоминутни продукт одвоји од већине најтежих елемената. Озрачени раствор уранијума разблажи се у 50-процентној азотној киселини, дода се мала количина неке манганове соли и након тога се додатком натријум-хлората манган таложи (преципитује) из кључајућег раствора као диоксид (MnO_2). Талог манган-диоксида носи велики проценат активности.

Ова реакција доказује одмах да тринаестоминутна активност није изотоп уранијума. Да би се испитала могућност да ли би то могао бити елемент 90 (торијум) или 91 (протактинијум), поновили смо реакцију бар десет пута додајући извесну количину уранијума $X_1 + X_2$ ³⁶ којој кореспондира око 2000 импулса у минути; такође је додато нешто цера и лантана да би се идентификовао уранијум X. У тим условима реакција са манганом давала је само тринаестоминутну активност; у талогу нису пронађени никакви трагови ни 2000-импулсног уранијума X_1 (период 24 дана) ни уранијума X_2 иако је операција изведена мање од две минуте након таложења манган-диоксида, тако да би било лако детектовати неколико стотина импулса који потичу од уранијума X_2 (период 75 sec).

На основу сличне провере искључена је могућност настајања елемената са атомским бројевима 88 (радијум) и 89 (актинијум). У тим случајевима коришћен је мезоторијум-1 и -2³⁷ уз додатак баријума и лантана; резултат је био потпуно негативан као и у претходном случају. Евентуално таложење уранијума- X_1 и мезоторијума-1, који не емитују β -зраке довољно продорне да би се могли детектовати у нашим бројачима, било би откривено на основу каснијег формирања, респективно, уранијума- X_2 односно мезоторијума-2.

На крају смо раствору озраченог уранијума додали неактивне олово и бизмут и доказали да се реакција манган-диоксида може тако подесити да се добије талог манган-диоксида са тринаестоминутном активношћу, и да тај талог не садржи ни олово ни бизмут.

³⁵ *Примедба њеводиоца:* Тачније, „уранил-нитрат“ $[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2]$ – могуће је да је велики физичар Ферми багателисао „педантерију“ хемичара аналитичара.

³⁶ *Примедба њеводиоца:* „Уранијум X_1 “ и „уранијум X_2 “ су редом историјска имена изотопа $^{234}_{90}\text{Th}$ и $^{234}_{92}\text{Pa}$.

³⁷ *Примедба њеводиоца:* Мезоторијум-1 је историјско име за $^{228}_{89}\text{Ra}$, а мезоторијум-2 за $^{228}_{89}\text{Ac}$.

На тај начин изгледа да смо искључили могућност да се тринаестоминутна активност припише изотопима уранијума (92), протактинијума (91), торијума (90), актинијума (89), радијума (88), бизмута (83) и олова (82). Њено понашање искључује и екацезијум (87)³⁸ и еманацију (86).³⁹

Ови негативни резултати идентификације активности од 13 min са великим бројем тешких елемената сутеришу могућност да би атомски број елемента могао бити већи од 92.⁴⁰ Ако би то био елемент 93, био би хемијски хомолог мангана и ренијума. Та хипотеза је у извесној мери подржана чињеницом да се тринаестоминутна активност таложи са ренијум-сулфидом, нерастворним у хлороводоничној киселини. Како се, међутим, неколико елемената лако таложи у том облику, овај доказ⁴¹ се не може сматрати претерано убедљивим.

Идентификација могућих елемената са атомским бројевима 94 или 95 није лака јер би им хемијска својства вероватно била прилично слична онима елемента 93. Вредне информације о процесима у које су они укључени могле би се добити истраживањем евентуалне емисије тешких честица. До сада није изведена пажљива потрага за таквим тешким честицама, јер би она захтевала да активни продукти буду у форми веома танких слојева. Изгледа, дакле, да је у овом тренутку прерано за стварање било какве коначне хипотезе о стварном ланцу дезинтеграција.

³⁸ *Примедба преводиоца:* Екацезијум је историјско име за францијум.

³⁹ *Примедба преводиоца:* Латински “*emanatio*”, у овом случају испарење/гас, радон, које/и се ослобађа у нуклеарним реакцијама.

⁴⁰ *Примедба преводиоца:* На енглеском оригиналу ова чувена реченица, вредна Нобелове награде, гласи “*This negative evidence about the identity of the 13 min-activity from a large number of heavy elements suggests the possibility that the atomic number of the element may be greater than 92.*”

⁴¹ *Примедба преводиоца:* Енгл. “*evidence*”.

Über das Element 93

Von Dr. Ing. Ida Noddack, Berlin

(Eingeg. 10. September 1934)

Angewandte Chemie

47. Jahrg. 1934. Nr. 37, 653–655

О елементу 93

Др инг. Ида Нодак, Берлин

(Примљено 10. септембра 1934)

Angewandte Chemie

47. годиште, 1934. Бр. 37, 653–655

Пре око четири месеца публикувано је у овом часопису о празнинама у Периодном систему.⁴² На крају рада указано је на могућност открића транс-урана (тј. елемената који у Периодном систему следе уранијум).

Неколико недеља након тога објављено је, прво у дневној штампи, а затим и у стручној литератури, да је двојици истраживача, проф. Фермију у Риму и инжењеру Коблицу (*Odolen Koblic*) у Јахимову (*Joachimsthal*), успело, независно једном од другог, да открију елемент с редним бројем 93.

Прво ћемо се посветити наводима *Фермија*.⁴³ Ферми је истраживао питање да ли тзв. индукована радиоактивност коју су открили Кири и Жолио, а која настаје при бомбардовању атомских језгара α -зрацима, може бити изазвана и дејством неутрона.

Он је у један стаклени суд унео берилијумов прах и радијумску еманацију. Еманација емитује α -зраке, ови погађају језгра атома берилијума и ослобађају из њих неутроне. Неутрони продиру кроз зидове стакленог суда и могу деловати на супстанције које се налазе у близини суда. Ферми је у близину извора зрачења сместио низ елемената у елементарној форми или у облику једињења, пустио да неутрони делују на њих и поставио затим озрачене супстанције пред Гајгер–Милеров бројач. Многи елементи су након озрачивања неутронима емитовали извесно време β -зраке, манифестујући тако заиста индуковану радиоактивност.⁴⁴ Овде се нећемо бавити хипотезама које је Ферми увео да би објаснио делом заиста компликоване појаве,⁴⁵ јер нас интересује само један

⁴² I. Noddack, *Angewandte Chemie* 47 (1934) 302.

⁴³ E. Fermi, *Nature* 133 (1934) 898.

⁴⁴ Наравно да нису сви атоми озрачене супстанције радиоактивни, већ само нека једва мерљива количина, у овом случају неколико стотина атома.

⁴⁵ E. Fermi, *Nature* 133 (1934) 757.

случај, наводно настајање елемента 93. За проучавање индуковане радиоактивности уранијума Ферми је у близину извора неутрона сместио раствор уранил-нитрата, претходно очишћен од радиоактивних продуката распада. Помоћу Гајгер–Милеровог бројача успело му је да покаже да је раствор постао радиоактиван услед озрачивања и да је емитовао β -зраке. Евалуација криве опадања показала је да није настао само један, већ бар пет радиоактивних елемената са различитим временима полураспада, при чему за сада, како је нагласио Ферми, још није сигурно да ли ти елементи настају сукцесивно или паралелно.

Фермију је успело да хемијским путем издвоји један од новонасталих *радиоелемената са временом полураспада* од 13 минута. При томе је поступио тако што је у озрачени концентровани раствор уранил-нитрата додао нешто манганове соли, смешу загрејао до кључања и након тога додао натријум-хлорат. У исталоженом манган-диоксиду налазио се највећи део β -активности с временом полураспада од 13 минута. Ферми сада покушава да докаже да радиоелемент од кога потиче ова β -активност није изотоп ниједног познатог елемента из близине уранијума. С тим циљем он додаје у раствор озраченог уранил-нитрата у азотној киселини један за другим следеће елементе: протактинијум (91), торијум (90), актинијум (89), радијум (88), бизмут (83) и олово (82), и таложи тада манган-диоксид натријум-хлоратом. Према Фермију, ниједан од наведених β -активних елемената се не таложи. Како, међутим, непознати радиоелемент прелази у манганов талог, и како он по својим особинама не може бити изотоп ни радона (86) ни екадизијума (87), Ферми извлачи закључак да би то могао бити непознати елемент 93 (можда, такође, 94 или 95).

Ово извођење доказа није основано. Чињеница, да Ферми свој нови β -емитер пореди не само са познатим непосредним суседом уранијума, протактинијумом, него и са више других елемената, све до олова, показује да он сматра могућим низ сукцесивних процеса распада (уз емитовање електронâ, протонâ и хелијумових језгара), који коначно воде до настајања радиоелемента с временом полураспада 13 min – ако он то, дакле, чини, није јасно зашто између уранијума (92) и олова (82) није узео у обзир и елемент полонијум (84) и зашто се зауставио баш код олова; јер старо гледиште да се непрекидни низ радиоактивних елемената завршава оловом или штавише талијумом (81) оборено је управо помоћу, на почетку поменутих, експеримената Кири и Жолиоа. Ферми је, дакле, морао свој нови радиоелемент упоредити са *свим* познатим елементима.

Како се зна из аналитичке хемије, бројни елементи прелазе у талог манган-диоксида када су присутни у азотној киселини као једињења, у атомском или колоидном стању.

Да бисмо испитали понашање елемената при *методи таложења* коју је применио Ферми, направили смо 100 cm³ 55% раствора азотне киселине који је садржавао скоро све стабилне елементе у количини од по једног mg у растворном или колоидном облику. У тај раствор додали смо 200 mg манган-нитрата и загрејали га до кључања, након чега смо додали 2 g (сувог) калијум-хлората. Манган-диоксидни талог који је при томе настао анализиран

је хемијски и спектроскопски на елементе који су се сталожили с манганом. Он је садржавао следеће елементе: Ti, Nb, Ta, W, Ir, Pt, Au и Si скоро квантитативно, Sb, Pb, Bi, Ni и Co делимично.

Ферми такође није – како је већ поменуто – проверио да ли полонијум (84) прелази у манганов талог. Експеримент изведен с полонијумом показао је да се овај елемент скоро квантитативно таложи с MnO_2 .⁴⁶ Доказ да нови радиоелемент има редни број 93 није, дакле, ни у ком случају успео, јер га је Ферми извео на основу непотпуно изведеног поступка искључивања.

Може се једнако оправдано претпоставити да се при овој новој врсти разбијања језгра неутронима догађају сасвим друге „нуклеарне реакције“ од оних које су до сада опажене под дејством протона и α -честица на језгра. При последње поменутих озрачивањима дешавају се само оне трансформације језгара које укључују емисију електрона, протона и хелијумових језгара, чиме се код тешких елемената маса језгра само мало мења јер настају суседни елементи. Било би замисливо да се при бомбардовању тешких језгара неутронима ова језгра распадају на више *већих* фрагмената који представљају изотопе познатих елемената, али не суседе озраченог елемента.⁴⁷

Ни налаз да нови радиоелемент у киселом раствору при таложењу ренијум-сулфидом прелази у овај талог не говори у прилог 93; јер, прво, ренијум-сулфид радо апсорбује друге супстанције, и, друго, предвиђање евентуалних својстава елемента 93 ни у ком случају не гарантује да би тај елемент наградио сулфид нерастворан у киселинама.⁴⁸

Даље, на основу Фермијевих експеримената би, када би његово објашњење било тачно, произлазио закључак који он (Ферми) није поменуо, да би из β -емитера 93 морао настати елемент 94. Овај елемент би требало да се може релативно лако хемијски одвојити од 93.

Мора се сачекати на даља истраживања пре него што се сме тврдити да је елемент 93 стварно откривен. И сам Ферми је с тим у вези, као што је већ поменуто, опрезан, (а) вера у сигурност резултата изражава се само у једном реферату⁴⁹ о његовим експериментима и у извештајима дневне штампе.

Други подаци о открићу елемента 93 потичу од Одолена Коблица.⁵⁰ Он је саопштио да је из воде за испирање зарђале пехбленде из Јахимова

⁴⁶ За слање препарата полонијума и мерење активности у том експерименту дужна сам да захвалим господину др Ј. Френцу (J. Fränz).

⁴⁷ *Примедба љевоводиоца*: На немачком, „*Es wäre denkbar, daß bei der Beschießung schwerer Kerne mit Neutronen diese Kerne in mehrere größere Bruchstücke zerfallen, die zwar Isotope bekannter Elemente, aber nicht Nachbarn der bestrahlten Elemente sind.*“

⁴⁸ *Примедба љевоводиоца*: Овај пасус је сасвим непотребан јер је већ Ферми написао, „Та хипотеза је у извесној мери подржана чињеницом да се тринаестоминутна активност таложи са ренијум-сулфидом, нерастворним у хлороводоничној киселини. Како се, међутим, неколико елемената лако таложи у том облику, овај доказ се не може сматрати претерано убедљивим.“

⁴⁹ *Nature* **133** (1934) 863.

⁵⁰ O. Kolbic, *Chemiker-Ztg.* **58** (1934) 581.

добрио у знатној количини чисте соли елемента 93 (пехбленда би требало да садржи око 1% овог елемента). Он је описао својства елемента и његових једињења, одредио његову атомску тежину, претпоставио да је тај елемент родитељ протактинијума и дао му име „бохемијум“ по својој отаџбини. И та вест пропраћена је изванредно великом и некритичном дистрибуцијом у дневној штампи целог света.

Посредовањем господина др М. Шпетера (*M. Speter*) послао ми је господин Коблиц две пробе свог препарата са жељом да их испитам на присуство елемента 93.

Хемијско и рендгенспектрографско испитивање су показала да препарати не садрже елемент 93 него *мешане соли сребро- и ванадијум-ванадата и -волфрамата* са вишком волфрамове киселине. Након саопштења овог налаза Коблиц се уверио у присуство волфрама и повукао своје саопштење о проналаску елемента 93.^{51, 52}

Сувишно је, дакле, осветљавати реакције које је Коблиц приписао претпостављеном новом елементу јер се све оне могу објаснити као *реакције смеше ванадијума и волфрама*.⁵³

Недавно (11. августа) стигла је из Америке вест да су у Њу Џерсију (*New Jersey*) Смит (*Smith*) и Стајнбах (*Steinbach*) успели да открију елемент веће атомске тежине од уранијума. Како о овом открићу до сада постоје само нејасне новинске вести, не може се утврдити о чему је реч.

⁵¹ O. Koblic, *Chemiker-Ztg.* **58** (1934) 683.

⁵² O. Koblic, *Österr. Chemiker-Ztg.* **37** (1934) 140.

⁵³ У свом демантију господин Коблиц је поменуо само волфрам, а не и ванадијум, иако му је писмом саопштена приближна заступљеност оба ова елемента у његовим препаратима и реакција претпостављеног бохемијума објашњена преко смеше ванадијума и волфрама.

LE JOURNAL DE PHYSIQUE
ET
LE RADIUM

Série VII, Tome IX, N° 9 (1938) 355–359

SUR LES RADIOÉLÉMENTS FORMÉS DANS L'URANIUM
IRRADIÉ PAR LES NEUTRONS. II

Par Irène Curie et Paul Savitch
Institut du Radium, Laboratoire Curie

Manuscrit reçu le 12 juillet 1938.

О радиоелементима насталим
у уранијуму зраченом неутронима (II) ⁵⁴

Серија VII, Том IX, N° 9 (1938) 355–359

Ирена Кири и Павле Савић
Институт за радијум, Лабораторија Кири
Рукопис примљен 12. јула 1938.

Резиме. У уранијуму зраченом спорим или брзим неутронима настаје један радиоелемент⁵⁵ периоде 3,5 сата⁵⁶ који има хемијске особине сличне лантану. Тај је елемент произведен у количини сличној већ познатим транс-уранским елементима; он је вероватно такође трансурански елемент, али не може за сада да се одреди редни број који би му одговарао.

Подсетили смо у једном претходном раду⁵⁷ на резултате које су добили Хан, Мајтнерова и Штрасман⁵⁸ о радиоелементима насталим у уранијуму

⁵⁴ Овај рад је са француског оригинала превео сам Павле Савић, за књигу *Наука и друштво* коју су приредили Милица Мужичевић и Владимир Дедијер (Српска књижевна задруга, Београд 1978). Најмање што су аутори овог текста могли да учине је да поштовање према нашем великом научнику искажу тиме што су његов превод оставили нетакнутим, осим што су дозволили себи да мало ускладе терминологију (нпр. уран → уранијум, апсорбент → апсорбер) са другим деловима чланка.

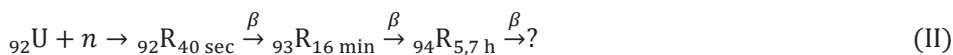
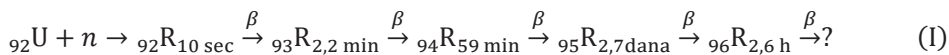
⁵⁵ Ради усаглашавања терминологије са остатком текста, аутори су систематски заменили реч „елеменат“ (што је такође исправно) са „елемент“.

⁵⁶ П. Савић уместо „сат“ користи синоним „час“.

⁵⁷ I. Curie et P. Savitch, *Le journal de physique et le radium*, Série VII, Tome VIII, N° 10 (1937) 385–387.

⁵⁸ O. Hahn, L. Meitner und F. Strassmann, *Chem. Ber.* **70**, 1374 (1937); L. Meitner, O. Hahn und F. Strassmann, *Z. f. Physik* **106**, 249 (1937); L. Meitner, *Ann. Physik* **29**, 246 (1938).

зраченом неутронима, резултате које смо једним делом проверили. Ти аутори сврставају добијене елементе у три низа⁵⁹ изомерних језгара. Ми их овде означавамо словом R са знаком претпостављеног редног броја и периодом.



Процес (III) производе спори неутрони: термички и неутрони резонантног нивоа од 25 eV⁶⁰. Процесе (I) и (II), чија је важност истог реда, производе спори неутрони и брзи неутрони, што је доста неуобичајено. Вероватно је, ипак, да се увек ради о процесу апсорпције неутрона.

Подсетимо да је рад са радиоелементима насталим у уранијуму врло тежак из следећих разлога; 1⁰ настајање UX,⁶¹ који намеће пречишћавање уранијума пре сваког експеримента; 2⁰ велики број насталих радиоелемената; 3⁰ немогућност да се фаворизује један низ елемената на рачун других, пошто су услови постанка свих трансуранијумских елемената исти; 4⁰ тешкоће да се између тих елемената виших хомолога ренијума изврши потпуно раздвајање од елемената платинске групе, чије се хемијске особине мало разликују.

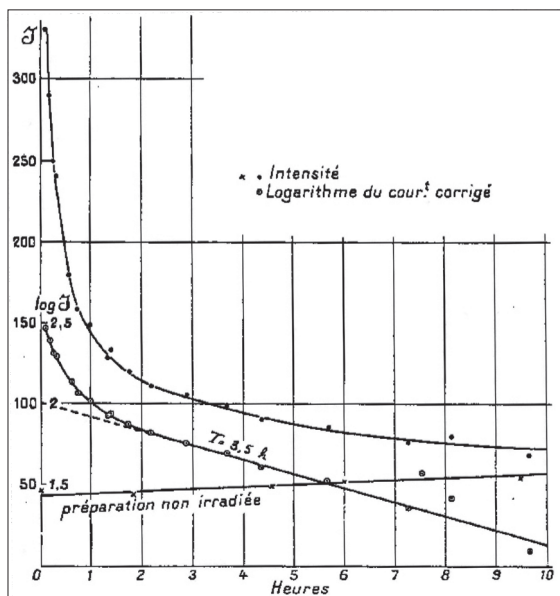
Употребили смо као апарате за мерење Гајгер–Милерове бројаче⁶² са танким алуминијумским зидовима од око 0,15 mm дебљине и једну јонизациону комору везану за Хофманов електрометар, затворену алуминијумским листом дебљине 0,1 mm.

⁵⁹ П. Савић уместо „низ“ користи реч „серија“.

⁶⁰ eV (електронволт) је јединица за енергију. Дефинише се као кинетичка енергија коју слободан електрон који се креће у вакууму добије приликом убрзавања у електричном пољу при разлици потенцијала (напону) од 1 V. То је веома мала јединица, 1 eV = 1,602×10⁻¹⁹ J, која се, посебно у нуклеарним наукама, користи за изражавање енергија појединачних честица. Веће јединице су keV (килоелектронволт) = 1000 eV, MeV (мегаелектронволт) = 10⁶ eV итд.

⁶¹ *Примедба преводиоца*: Уранијум X је заједничко име за уранијум X₁ (²³⁴₉₀Th) и уранијум X₂ (²³⁴₉₁Pa).

⁶² *Примедба аутора*: Професор Савић је био пословично поносан и скроман човек. Када се прочита ова реченица, могао би се стећи утисак да је лабораторија добитнице Нобелове награде, Ирене Кири, била препуњена свим инструментима овог света. Ситуација је била управо супротна. Како је то проф. Савић са пуно самоироније, а без трунке самобољивости описао у поменутој књизи *Наука и друштво*, на располагању му је био само један Г-М бројач и то онај који је сам направио од алуминијумске патроне за хаванску цигару. Да наведемо још само да је једном, када му је од изгладнелости и неиспаваности позлило, па је испустио из руке суд с раствором озраченог уранијума, одмах отишао и својим новцем купио и нови суд и уранијум, потрошивши на то петину своје ионако мизерне стипендије од које су живели његова супруга, он и тек рођена кћерка.



Сл. 1. Мерење на бројачу кроз апсорбер од бакра $0,48 \text{ g/cm}^3$

У нашем претходном раду показали смо да се, ако меримо зрачени уранијум кроз апсорбере довољне дебљине да зауставе β -зрачење UX, примећују само после изумирања⁶³ елемената врло незнатних периода два радиоелемента: $R_{16 \text{ min}}$ и један други, периоде 3,5 сата, који није познат.

Слика 1 представља криву добијену мерењем једног узорка од 4 грама пречишћеног уранијума који се у дебелом слоју зрачи 15 сати у парафину, близу неутронског извора ($Rn + Be$ 650 mC). Мерење је извршено кроз апсорбер од бакра $0,48 \text{ g/cm}^2$, који скоро потпуно апсорбује β -зрачење UX. Благодарећи томе било је могуће да се изврши дуготрајно озрачивање, а да се не добије претерано зрачење UX. У почетку се види опадање $R_{16 \text{ min}}$; 2 сата по свршетку озрачивања опажа се још знатна јачина од $R_{3,5 \text{ h}}$. 24 сата по престанку озрачивања, активност озраченог узорка поново је постала једнака активности исте количине незраченог узорка.

Ако се сталожи платина помоћу H_2S из киселог раствора озраченог уранијума, оборе се сви елементи хомолози Re, Os, Ir, Pt.

Међутим, ако се мере сулфиди кроз претходно употребљене апсорбере, примећује се само слаб остатак активности после деструкције $R_{16 \text{ min}}$ β -зрачења

⁶³ *Примедба аутора:* На француском оригиналу: „destruction“. Овде се сусрећемо с проблемом да не можемо користити на први поглед природну реч „дезинтеграција“, јер њу резервишемо за означавање самог процеса смањења почетне количине радиоелемента услед зрачења честица (α , β , протона ...) и тиме трансформације у друге елементе. Реч „изумирање“ [алтернатива би могла бити, поред дословног превода, „деструкција“ (која се јавља понегде у наставку превода), и „потпуна дезинтеграција“], коју користи П. Савић, означава онај тренутак када се количина супстанције-родитеља сведе на тако малу меру да се више не може детектовати.

свих трансурана дугих периода, која су наведена у табели, заустављена су у апсорберима и $R_{3,5h}$ не таложи се као сулфид.

Утврдили смо да нови елемент $R_{3,5h}$ може да се сталожи као хидрат кад се елиминишу елементи које таложи H_2S у киселом раствору и одвоје се од уранијума. Веровали смо, у почетку, да се ради о једном изотопу торијума, који је настао апсорбовањем неутрона и избацивањем једне α -честице.

Хан и Мајтнер саопштили су нам писмом да се не слажу са нама о постојању једног таквог изотопа торијума.⁶⁴

Наши су експерименти показали, даље, да $R_{3,5h}$ није изотоп торијума, већ има особине сличне ретким земљама.⁶⁵

После великог броја експеримената, веома тешких у почетку, док нисмо имали добар метод за одвајање $R_{3,5h}$ од уранијума и UX, ево хемијских особина које смо установили за тај радиоелемент.

$R_{3,5h}$ се не таложи помоћу H_2S из $2N-HCl$ ⁶⁶ раствора или чак $0,5 N$ раствора. Таложи се помоћу NH_3 , помоћу $(NH_4)_2S$, помоћу оксалне киселине из киселог раствора, помоћу амонијум-карбоната. Таложи се флуороводоничном киселином, а не таложи се помоћу H_2O_2 у слабо киселом раствору (разлика од протактинијума). Помешан са лантаном може се скоро потпуно одвојити од торијума таложењем торијум-јодата у јако киселом раствору азотне киселине, или поновним таложењем лантана додавањем воде у раствор оксалата у оксалату амонијума. Он се такође одваја од церијума кад се тај елемент таложи са $KMnO_4$ у неутралном раствору. Таложи се помоћу K_2SO_4 у скоро неутралном раствору који је засићен том сољу.

Укупно узев, особине $R_{3,5h}$ су особине лантана, од кога, изгледа, може за сада да се одвоји само фракционирањем.⁶⁷

⁶⁴ *Примедба аутора:* У књизи *Наука и друштво*, П. Савић је тај догађај описао овако: „Поменуо сам да Ф. Жолио није имао у то време никакве везе са радовима на уранијуму, које смо Ирена Жолио и ја изводили у Институту за радијум, да бих објаснио Ханово писмо упућено Ф. Жолиоу. Наиме, негде пред крај 1938. године, у пуном јеку наших мука да идентификујемо елемент $R_{3,5h}$ добије Ф. Жолио писмо од Хана у коме га моли да утиче на своју жену и мене да демантујемо своје резултате, јер смо у заблуди, пошто не одговарају резултатима које су он и Штрасман дотле објавили. Обраћа се Ф. Жолиоу као незаинтересованом и, према томе, објективном у тој ствари. У противном, он, Хан, биће принуђен да нас демантује, а то би му било непријатно.“ Вероватно је то писмо било послато мало раније (Рад И. Кири и П. Савића изишао је из штампе у лето 1938, и сигурно је да је Хан на њега одмах реаговао. Ова корекција се сасвим уклапа у наставак приче. Наиме, 25. октобра 1938. писао је Хан Лизи Мајтнер: „Управо смо на путу да их (резултате Ирене Кири и Павла Савића) репродукујемо и сада верујемо да су тачни.“ (Pierre Radvanyi, “Die Curies – Eine Dynastie von Nobelpreisträgern”, *Spektrum der Wissenschaft*, 2/2003)

⁶⁵ I. Curie, Savitch, *Comptes Rendus* **206** (1938) 906.

⁶⁶ *Примедба аутора:* П. Савићу се при превођењу омакла типографска грешка – уместо „ $2N$ “ („двонормална“) на овом месту стоји „п“. Уједно користимо прилику да нормалитет означимо великим словом, како се то данас чини. Данас је нормалитет углавном напуштен за изражавање концентрације.

⁶⁷ *Примедба преводиоца:* У француском оригиналу: „ , од кога, изгледа, може за сада да се одвоји само фракционисањем. “ *Dans l'ensemble, les propriétés de $R_{3,5h}$ sont celles du lanthane, dont il semble jusqu'ici qu'on ne puisse le séparer que par fractionnement.*“ Некада је кобно бити претера-

Таложeње двојног сулфата, помоћу K_2SO_4 је реакција за коју смо нашли да је много повољнија за одвајање $R_{3,5h}$.

Поступа се на следећи начин: уранијум се ослободи од UX (таложeњем више пута помоћу натријум-ацетата из ацетатног раствора), талози се помоћу H_2O_2 и суши. Тако добијени хидрат се зрачи. После озрачивања раствори се уранијум у сумпорној киселини, затим се раствору дода лантан да се повуче $R_{3,5h}$ и платина да олакша одвајање виших хомолога Re, Os, Ir, Pt. Неутралише се калијум-хидроксидом и додају се кристали K_2SO_4 . Лантан се талози у облику двогубог сулфата, који се врло лако филтрује. Поново се раствори у HCl, неутралише помоћу NH_3 и талози $(NH_4)_2S$, да се одвоји од калијум-сулфата (може се такође таложити помоћу NH_3 , али је филтрирање спорије).

При тој операцији одвоји се уранијум и сви трансурани слични платини, али UX иде са $R_{3,5h}$.

Да се одвоји UX, изотоп Th, најбољи метод који смо нашли до сада састоји се из вишеструког таложeња мањих количина Th помоћу H_2O_2 из слабо киселог раствора. Незгода тог метода је у томе што торијум садржи увек радиоторијума⁶⁸ и, према томе, торијума X и активног талогa који треба елиминисати погодним пречишћавањем пре него што се тај елемент употреби као носач. Завршава се таложeњем лантана амонијум-карбонатом уз додатак амонијум-сулфохидрата, чиме се одвајају остаци уранијума од UX и трансурана.

Идвајање и пречишћавање трају око 1,5 сата.

На слици 2 приказана је крива опадања активности таквог узорка мерена кроз апсорбер.

Пошто су аналогije хемијских особина $R_{3,5h}$ са особинама ретких земаља добро утврђене, важно питање које се поставило јесте да се сазна да ли је у питању изотоп актинијума (редни број 89).

У ту сврху смо извршили фракционирање тог радиоелемента, слично ономе које је послужило Марији Кири⁶⁹ за концентрацију активности актинијума помоћу лантана. Та се операција састоји из фракционог таложeња оксалата из раствора у азотној киселини. Актинијум се врло јако концентрише на репу у односу на лантан.

Извршили смо таложeње те врсте са $La + R_{3,5h}$, затим смо поновили експеримент са $La + R_{3,5h} + Ac$; актинијум, унет у облику слабог препарата лантана са актинијумом, очишћеног од RAc^{70} и AcX ,⁷¹ остаје инактиван скоро 2 дана. Мери се опадање $R_{3,5h}$ главе и репа фракционисања одмах после операције, а нагомилавање активног талогa Ac преко RAc и AcX открива

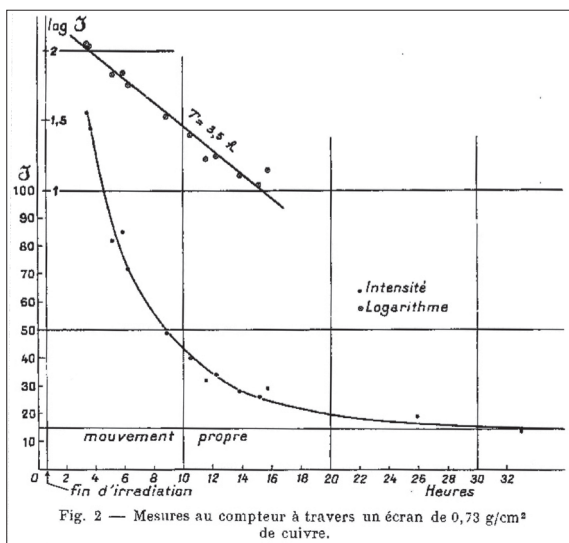
но савестан – да је реченица гласила „Укупно узев, особине $R_{3,5h}$ су особине лантана.“ – само то, Кири и Савић би вероватно добили Нобелову награду (за додатна објашњења погледајте Поговор овог рада).

⁶⁸ *Примедба аутора:* Радиоторијум је радиоактивни изотоп торијума $^{228}_{90}Th$. У вези с истим пасусом треба напоменути да је амонијум-сулфохидрат у ствари амонијум-хидрогенсулфид.

⁶⁹ Mme P. Curie, *J. Chim. Phys.* **27** (1930) 1.

⁷⁰ *Примедба преводиоца:* Радиоактинијум, RAc, је радиоактивни изотоп актинијума $^{227}_{89}Ac$.

⁷¹ *Примедба преводиоца:* AcX је историјска ознака за изотоп $^{223}_{88}Ra$.



Сл. 2. Мерење на бројачу кроз апсорбер од бакра $0,73 \text{ g/cm}^3$

после неколико дана присуство актинијума. $R_{3,5h}$ се јасно одваја од Ас, идући са главом фракционирања, док Ас остаје на репу.⁷²

Експеримент са непотпуним таложењем помоћу амонијака $\text{La} + R_{3,5h}$ показује такође да се $R_{3,5h}$ концентрише у првом делу талога и био би, дакле, мање базан од лантана. Међутим, зна се да је актинијум базнији. Изгледа, дакле, сигурно да $R_{3,5h}$ није изотоп актинијума.

Констатовали смо да, кад се мери узорак $R_{3,5h}$ преко апсорбера од $0,73 \text{ g/cm}^2$ бакра, не остаје никаква активност после распада тог елемента (сл. 2). Ако се изврше мерења преко апсорбера много тањег или без апсорбера, остаје увек доста значајна активност. Прво смо мислили да она потиче од мало UX. У ствари, ради се о вештачким радиоелементима дужег живота. Нисмо још могли да утврдимо периоде тих радиоелемената ни да установимо да ли потичу од $R_{3,5h}$ или не зависе од њега.

Услови формирања $R_{3,5h}$. Доста је лако да се проуче услови формирања $R_{3,5h}$ у поређењу са R_{16min} мерећи као горе зрачене узорке кроз довољно дебеле апсорбере да би активност тих елемената била једнако мерљива на бројачу. Нисмо могли да откријемо никакву разлику у условима настајања та два елемента.

На пример, зрачена су два идентична узорка од 4 g уранијума у блоку парафина од неколико центиметара дебелих зидова. Узорци су стављени симетрично врло близу извора $\text{Rn} + \text{Be}$, али је један био затворен у кутију од кадмијума $0,5 \text{ mm}$ дебљине. После озрачивања од 15 сати, оба су узорка мерена преко апсорбера од $0,73 \text{ g/cm}^2$ бакра. Добијене криве оба узорка су сличне у границама експерименталних грешака, интензитет је умањен за фактор 2,5

⁷² I. Curie, P. Savitch, *Comptes Rendus* **206** (1938) 1648.

услед апсорпције неутрона у кадмијуму и за периоду 16 min и за периоду 3,5 h. Апсорбер од бора,⁷³ доста дебео, дао је исти резултат.

Интересантно је, дакле, да се оцени принос $R_{3,5\text{ h}}$ према оном $R_{16\text{ min}}$, пошто однос приноса изгледа да не зависи од експерименталних услова.

Да се оцене ти приноси зрачен је један узорак уранијума 16 min пречишћен и из кога су извучени елементи које таложи H_2S да би се измерили. Затим је зрачен сличан узорак у истим условима у току 3,5 h, издвојен је и пречишћен $R_{3,5\text{ h}}$.

Нађено је да је однос активности $R_{3,5\text{ h}}$ и $R_{16\text{ min}}$ при засићењу око 2/3 (мерено на бројачу, без апсорбера). Тај ће се однос мало разликовати ако се узме у обзир дебљина зидова бројача као апсорбер зрачења. Производња $R_{3,5\text{ h}}$ је, дакле, појава значаја сличног процесима I и II. Може се узети да, ако се зрачи пречишћен уранијум у најповољнијим условима, уз извор и у парафинском блоку, производња на сат $R_{3,5\text{ h}}$ је двоструко већа од природне производње UX (периода 24,5 дана), ако је извор од 1000 mC Rn + Be. Од производње $R_{3,5\text{ h}}$ половина, отприлике, припада термичким, а друга половина брзим неутронима.

Ако се истим извором зрачи скоро до засићења, у току 12 сати, количина UX која се награди за време озрачивања је истог реда величине са $R_{3,5\text{ h}}$. Практично, постоји доста већа количина UX за издвајање, прво што пречишћавање уранијума није савршено, затим што протекне увек извесно време између последњег таложења при пречишћавању и момента таложења уранијума, сушења и стављања на озрачивање и, најзад, што је извор обично мањи од 1000 mC.

Проверили смо, такође, озрачивањем различитог трајања (0,5 h; 1 h; 3,5 h; 15 h), а затим одвајањем $R_{3,5\text{ h}}$, да се тај елемент формира изгледа директно из уранијума; ти експерименти нису врло прецизни. Они су, међутим, довољни да потврде да нема међупродуката дужих периода од око пола сата између преображаја уранијума и настанка $R_{3,5\text{ h}}$.

Природа зрачења. Проучавали смо зрачење $R_{3,5\text{ h}}$ помоћу апсорпције и на обичном бројачу. И поред извршене поправке због дејства γ -зрачења ти су нам експерименти дали максималне енергије⁷⁴, за које сматрамо да су сувише велике.

Проучавајући домет β -зрачења методом коинциденције, нашли смо да је максимални домет β -зрачења (у алуминијуму или бакелиту), водећи рачуна о дебљини бројача:

UX	0,7 g/cm ²
ThB + C + C''	0,75 g/cm ²
$R_{16\text{ min}}$	2,5 до 1,6 g/cm ²
$R_{3,5\text{ h}}$	~ 1,2 до 1,3 g/cm ²

⁷³ *Примедба аутора:* Кадмијум и бор врло ефикасно апсорбују неутроне. Ова њихова особина користи се нпр. у нуклеарним реакторима за кочење ланчане реакције.

⁷⁴ *Примедба аутора:* Мисли се на „максималне енергије“ β -честица, којима се ова зрачења уобичајено карактеришу.

Узевши 2100 keV за горњу границу енергије $U(X_1 + X_2)^{75}$ или 2250 keV за $Th(B + C + C'')^{76}$ налази се максимум енергије зрачења

$3\alpha R_{16 \text{ min}}$	4,5 до 4,8 MeV
$3\alpha R_{3,5 \text{ h}}$	3,6 до 3,9 MeV

Спектар $R_{3,5 \text{ h}}$ испитиван је такође на Вилсоновој комори у магнетном пољу. Ти експерименти вршени су у сарадњи са М. да Силвом (*M. da Silva*) у сагласности са том проценом. Спектар $R_{3,5 \text{ h}}$ састоји се углавном из негативних електрона, али има такође неки проценат позитивних електрона.

Према експериментима помоћу трохоидне методе, уз сарадњу М. Монаџемија (*M. Monadjémi*), коме овде захваљујемо, део позитивних електрона је реда 6 до 100. Можда се ради о нарочито јакој унутарњој конверзији γ -зрачења.

Дискусија. Репродукујемо овде три последња реда Мендељејеве табеле указујући на места која Хан и Мајтнер приписују радиоелементима које су испитивали. Видимо да се ти елементи налазе на местима која нормално настављају ту табелу. За места 92, 93, 94 постоји више радиоелемената, вероватно пре изомера него изотопа.

I	II	III	IV	V	VI	VII	0		VIII	
55 Cs	56 Ba	57–71 ретке земље	72 Hf	73 Tl	74 W	75 Re		76 Os	77 Ir	78 Pt
79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85	86 Rn			
87	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U 10 sec 40 sec 23 min	93 Eka Re 2,2 min 16 min		94 Eka Os 59 min 5,7 h	95 Eka Ir 2,7 dana	96 Eka Pt 2,5 h

Одмах примећујемо тешкоће које постоје да се $R_{3,5 \text{ h}}$ стави у ту табелу.

Место актинијума, $Z = 89$, било би место где се могао сместити радиоелемент чије су особине аналогне ретким земљама и насталим у уранијуму. То би захтевало, истина, избацавање три позитивна наелектрисања (једне α -честице и једног протона на пример). Али, видели смо да $R_{3,5 \text{ h}}$ није изотоп актинијума.

Ако се систем Мендељејева наставља нормално, не би требало да се нађе ниједан елемент сличан ретким земљама на целом продужењу система.

Али ако се усвоји да се правила мењају после $Z = 96$, објашњење није због тога лакше.

⁷⁵ LECOIN *Jour. de Phys. et Rad.* 7 (1938) 81.

⁷⁶ *Примедба преводиоца:* ThA, ThB, ThC и ThC'' су историјска имена за изотопе $^{216}_{84}\text{Po}$, $^{212}_{82}\text{Pb}$, $^{212}_{83}\text{Bi}$ и $^{208}_{81}\text{Tl}$, респективно.

Знамо, уосталом, да $R_{3,5h}$ настаје од уранијума директно или преко елемената кратког живота. У сваком случају, он не настаје од елемената периода 59 min или 5,7 h. Према томе, ако је тај елемент редног броја већег од 96, треба усвојити да постоји већи број непознатих елемената кратког живота.

Покушајмо да припишемо елементу $R_{3,5h}$ редни број ближи уранијуму. Може се замислити, на пример, да тај елемент има редни број 93 и да елементи које су испитивали Хан, Мајтнерова и Штрасман имају редне бројеве од 94 до 97 (виши хомолози Os, Ir, Pt, Au), и да сви настају преко елемената редног броја 93 кратког живота (изотопи или изомери $R_{3,5h}$) које ти аутори нису приметили због њихових особина ретких земаља. Слична се претпоставка може учинити приписујући $R_{3,5h}$ редни број 94 и познатим трансуранима редне бројеве 93, 95, 96, 97. Не изгледа да се садашње познавање противи таквој претпоставци, али она укључује доста изузетне неправилности хемијских особина.⁷⁷

Може се такође запитати да ли се $R_{3,5h}$ не налази, упркос ономе што се манифестује, на месту које већ заузима неки трансурани, као виши хомолог Re или неког елемента платинске групе, налазећи се у нижем валентном стању и нарочито стабилном. То изгледа доста невероватно, јер нисмо никад приметили да се тај елемент понаша као други трансурани и Хан, Мајтнер и Штрасман не наводе ни за један трансурани неко изузетно понашање слично ретким земљама.

Остаје нам још хипотеза да је $R_{3,5h}$ изотоп или изомер уранијума или неког познатог трансурани, али чије је стање ниже валенце стално⁷⁸ због различитог распореда електрона између периферних и унутарњих слојева у атому. Претпоставимо да за неки редни број постоји нестабилност електронског система, тако да више електрона имају скоро исту вероватноћу да заузму место валентних електрона или неки нижи слој; нека мала разлика у структури језгра имаће можда за резултат одређивање једног или другог распореда, тако да два изотопна или изомерна језгра могу да имају радикално различите хемијске особине. Такву је хипотезу тешко усвојити, али не изгледа да је треба унапред одбацити.

Проучавање остатка активности која се опажа после деструкције $R_{3,5h}$ даће можда неке нове податке, који ће допустити да се изврши избор између разних претпоставки.

Овај рад је извршен у Институту за радијум у Паризу, у Лабораторији Кири.

Рукопис примљен 12. јула 1938. године.

⁷⁷ *Примедба аутора:* Ово је важно запажање, јер се касније, након открића већег броја трансурани и постојања серије актиноида, заиста утврдило да елементи на почетку те серије (Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am), који се називају ураниди, показују знатне неправилности у односу на ретке земље, али и у односу на елементе који се налазе у другој половини те серије, а који се зову кириди.

⁷⁸ *Примедба аутора:* Француски „*permanent*“; у овом контексту вероватно је боље превести са „стабилно“.

ПОГОВОР АУТОРА

Да би се разумео настанак контроверзне реченице коментарисане у фусноти 67, наводимо шта о томе пише П. Савић у књизи *Наука и друштво*: „Помињем те сусрете с истакнутим људима и истраживачима у овој области, где сам с много напора чинио прве кораке, да нагласим колико је непосредни и људски контакт с њима био велика морална подршка једном почетнику и аутодидакту. Друго што желим да нагласим, због доцнијег развоја рада на овом проблему (добивање елемената из зраченог уранијума), јесте: да ни у једној прилици, ни од једног од њих, нисам чуо о некој хипотези о цепању уранијумовог језгра, а сам о томе нисам нигде наишао у литератури. За доцнији спор између Хана и Иде Нодак о њеној сугестији да можда настаје цепање уранијумовог језгра дознао сам доста дуго по завршетку Другог светског рата, када су већ и фисионе бомбе с уранијумом и плутонијумом одиграле своју улогу. Вероватно су Ирена и Ф. Жолио за ту хипотезу Иде Нодак можда и знали, али нико то мени није помињао. Тако сам наставио да са Иреном и даље покушавам да раздвојим $R_{3,5h}$ од лантана (у чијим се фракцијама тај елемент налазио), где смо на репу фракција налазили више активности него што одговара количини лантана. Раздвајање $R_{3,5h}$ од La употребом других елемената као носача активности није успевало, а већа активност последње фракције с лантаном није допуштала да тврдимо да је $R_{3,5h}$ изотоп лантана. Када се има у виду да је укупна почетна активност $R_{3,5h}$ била при нашим експериментима око 200 распада у минути (просечно) и да је подељена на 10 фракционих таложења са око 10 mg LaF_3 , што је свакој фракцији давало активност око 20 откуцаја на Г-М бројачу у Институту за радијум, где је паразитна (*mouvement propre*) активност била прилично висока, онда није тешко уочити са коликим тешкоћама се борило. Једанпут, кад сам присуствовао једном састанку у Институту за радијум по завршетку Другог светског рата (1947. године), било је дискусије о овом нашем раду из 1937–38. године. Неко је питао како то да већ тада нисмо утврдили да се ради о фисији, то јест да је $R_{3,5h}$ изотоп лантана. Хајсински (*M. Haïssinsky*) је одговорио показујући прстом на мене: “*Parceque cet imbécile a trop bien travaillé*” („Зато што је тај безумник сувише добро радио“). Мислио је на увек активнију последњу фракцију при нашим операцијама, а да би се та систематска разлика видела требало је установити неколико удара на бројачу више од одговарајуће активности првих 9 таложења $R_{3,5h} + La$. Тек сам доцније, читајући пажљиво Смитов (*H. D. Smyth*) извештај⁷⁹ написан пошто су Американци произвели фисионе бомбе и развили индустријску производњу изотопа, видео у чему се састојала наша тешкоћа. Наиме, међу фисионим продуктима у уранијуму је настајао и изотоп елемента итријума (Y), који је имао исто време полураспада 3,5 сати и исту енергију зрачења као $R_{3,5h}$. Тај се изотоп Y повлачио на

⁷⁹ H. D. Smyth, *Atomic Energy for Military Purpose*, New York, 1945.

репу фракционог таложења са лантаном. Да смо се сетили да таложимо само првих 9 фракција La, а последњу оставили као носач остатка активности, ми бисмо већ средином 1938. утврдили да су $R_{3,5h}$ и La изотопи – али нисмо се сетили, након толиких Хан–Штрасманових трансурана.“

Да резимирамо. Павле Савић је дошао у Париз 1935. У тадашњој (сиромашној) Југославији нису се могли наћи научни часописи у којима је писало о открићу неутрона (1932), позитрона (1932), вештачке радиоактивности (1934) или хипотези нуклеарне фисије (1934) – о свему томе он није имао појма када је стигао у Француску. Сместили су га у библиотеку, слабо је знао француски, па је релативно дуго мало ко с њим комуницирао. У то време није било уобичајено да велики/е шефови/шефице (каква је била Ирена Кири) превише времена губе делећи своја (са)знања са асистентима (овде је сасвим прикладно превести ову реч као „помагач“) – није то увек чинила ни, иначе веома коректна Ирена. Идеја Иде Нодак заборављена је и пре него што је већина сазнала о њој – Ида се, наиме, била ухватила у коштац са превеликим научним ауторитетима (Ферми, Хан, Мајтнер ...). Дакле, Павле Савић је брзо научио шта су неутрон, позитрон и вештачка радиоактивност, али за могућност нуклеарне фисије није чуо на време. Да се бар сетио приповетке „Баш Челик“, па да му не падне на памет да уради ни девето, а камоли десето фракционо таложење! И онда, поврх свега, тај злокобни итријум, баш изнад лантана у Периодном систему и, које ли невероватне случајности, с истим временом полураспада. Ово је добар пример поштеног односа истраживача према својим истраживањима.

Самокритичност, скромност и принципијелност Павла Савића често је граничила с мазохизмом. Наведени текст написао је 1975, дакле скоро 40 година након објављивања рада. Зашто у њему толико инсистира на томе да му није падала на памет могућност нуклеарне фисије и да није рекао да је $R_{3,5h}$ лантан, штавише да је тада закључио да то *није* лантан? Упоредите то са накнадном памећу Хана: након што је добио Нобелову награду, тврдио је да је откриће нуклеарне фисије искључиво дело хемичара (тј. њега), а да су физичари (тј. Лизе Мајтнер) при томе више сметали него помагали. А свој кључни рад не би ни послао у штампу да му Лизе Мајтнер, у одговору на његово очајничко писмо, није за то дала зелено светло. Кири и Савић су јасно рекли да су сигурни да нису добили виши хомолог лантана, актинујум, Хан и Штрасман се у свом кључном раду нису усудили да искључе виши хомолог баријума, радијум; урадили су то тек након што су добили манускрипт рада Мајтнер и Фриша у којем (им) је било потанко објашњено како функционише фисија. Кири и Савић заиста нису експлицитно написали да је $R_{3,5h}$ лантан, али јесу сасвим експлицитно да се добија директно из уранијума и скоро експлицитно су показали да то не може бити ништа друго него лантан. Зато сматрамо да је мало рећи да је рад Кири и Савића преусмерио истраживање трансурана на трагање за фисијом. Онај ко заиста чита научни рад, неће превидети значај његових резултата због једне бојажљиве реченице (у конкретном случају

она је чак била пре последица претеране научне строгости, него недостатка храбрости ауторâ). Он ће, дакле, у том раду видети прву експерименталну детекцију нуклеарне фисије. Оно што чуди је то да се након објављивања овог рада није огласила нпр. Ида Нодак. Како бар њој није одмах постало јасно да је то директна потврда њене хипотезе?

Али такав је био Павле Савић. Отишао је пре времена из Института у Винчи који је створио, у прерану пензију из Института за физичку хемију Природно-математичког факултета у Београду, који је својим делом и научним реномеом обележио, својом вољом је напустио најугледнији положај који се може имати у овој земљи, положај председника Српске академије наука и уметности.

Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle

Von O. HAHN und F. STRASSMANN, Berlin-Dahlem

Naturwiss. 27, 11–14 (6. 1. 1939)

О доказивању и понашању земноалкалних метала насталих озрачивањем уранијума неутронима⁸⁰

О. ХАН и Ф. ШТРАСМАН, Берлин-Далем

Naturwiss. 27, 11– 14 (6. 1. 1939)

У једном провизорном⁸¹ саопштењу објављеном недавно на овом месту⁸² наведено је да се при озрачивању уранијума неутронима осим трансурана – елемената 92 до 96 – које су детаљно описали Мајтнер, Хан и Штрасман, јавља још читав низ других трансформационих продуката који се очигледно формирају сукцесивним двоструким α -распадом интермедијарно насталог уранијума 239. Таквим распадом из елемента са наелектрисањем језгра 92 мора настати елемент с наелектрисањем језгра 88, дакле, радијум. У поменутом саопштењу наведена су у једној схеми распада, означеној као још увек провизорној, три изомерна радијумова изотопа те врсте са приближно процењеним временима полураспада и продуктима њихових трансформација, наиме три изомера актинијума, који са своје стране очигледно прелазе у изотопе торијума.

Истовремено је указано на испрва неочекивано опажање да ови радијумови изотопи, који се формирају α -распадом преко торијума, настају озрачивањем не само брзим, већ и успореним неутронима.

Закључак да су почетни чланови та три изомерна низа изотопи радијума заснивао се на томе што се ове супстанције могу одвојити помоћу баријумових соли и што оне показују све реакције типичне за баријум. Сви други познати елементи, почев од трансурана преко уранијума, протактинијума, торијума

⁸⁰ Из Кајзер Вилхелм Института за хемију у Берлин-Далему (*Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin-Dahlem*). Стигло 22. децембра 1938.

⁸¹ *Примедба преводиоца*: Нем. “vorläufig”; може се превести и као „привремено“ или „прелиминарно“.

⁸² O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.* 26 (1938) 756.

до актинијума имају другачија хемијска својства од баријума и могу се лако одвојити од њега. Исто се односи и на елементе испод радијума, дакле, нпр. бизмут, олово, полонијум, екацезијум.⁸³

Преостаје дакле, само радијум, ако се из разматрања изузме сам баријум.

У тексту који следи биће описано раздвајање изотопске смеше и добијање појединачних компонената. Из развоја активности појединачних изотопа добијају се њихова времена полураспада и могу се одредити њихови продукти. Ови последњи, међутим, у овом саопштењу неће још бити детаљно описани, јер због веома комплексних процеса – реч је о најмање три, вероватно четири низа са по три супстанције – времена полураспада свих потомака до сада нису могла бити једнозначно одређена.

Као супстанција–носач за „изотопе радијума“ служио је, по природи ствари, увек баријум. Најлогичније је изгледало таложење баријума у виду баријум-сулфата, поред хромата најнерастворније баријумове соли. На основу претходних искустава и неких предексперимената одустало се, међутим, од одвајања „радијумових изотопа“ баријум-сулфатом; ови талози повлаче, поред незнатних количина уранијума и незанемарљивих количина актинијумових и торијумових изотопа, такође и очекиване продукте трансформације радијумових изотопа и тиме онемогућавају изоловање полазних чланова. Уместо квантитативног сулфатног талога, који се одликује јако раширеном површином, изабран је стога као средство таложења баријум-хлорид, веома тешко растворан у јакој хлороводоничној киселини – ова метода се показала у најбољем светлу.

При енергетски не лако разумљивом формирању радијумових изотопа бомбардовањем уранијума спорим неутронима било је неизбежно посебно темељито одређивање хемијског карактера новонасталих вештачких радиоелемената. Одвајањем појединачних аналитичких група елемената из раствора озраченог уранијума нађена је, поред велике групе трансурана, увек и нека активност код земноалкалних метала (супстанција–носач Ва), ретких земаља (супстанција–носач Ла) и елемената четврте групе Периодног система (супстанција–носач Zr).⁸⁴ Детаљније су истраживани прво талози баријума, који су очигледно садржавали почетне чланове опажених низова изомера. Биће

⁸³ *Примедба љреводииоца:* Ека(-)цезијум је историјско име за елемент францијум (₈₇Fr).

⁸⁴ *Примедба љреводииоца:* На немачком оригиналу ова реченица гласи: „Durch die Abtrennung einzelner analytischen Gruppen von Elementen aus der Lösung des bestrahlten Urans wurde außer der großen Gruppe der Transurane **eine Aktivität** stets bei den Erdalkalien (Trägersubstanz Ba), den seltenen Erden (Trägersubstanz La) und bei Elementen der vierten Gruppe des Periodensystem (Trägersubstanz Zr) gefunden.“ Није јасно да ли то значи а) активност, б) нека активност, в) једна активност, или г) по једна активност. г) би било најлогичније, али се мора одмах искључити из граматичких разлога – „по једна активност“ би на немачком било „je eine Aktivität“. в) је дословни превод, али би се могло схватити као „иста активност“, што са хемијског становишта није логично. а) и б), што значи отприлике исто, је највероватније, тј. да су све поменуте групе биле активне. Међутим, то звучи као када се каже: Ана Ивановић је некада давно имала **један** страшан сервис.

показано да се трансурани, уранијум, протактинијум, торијум и актинијум могу увек лако и потпуно одвојити од активности сталожене са баријумом.

1. У ту сврху из озраченог уранијума сталожени су помоћу водоник-сулфида трансурани заједно са платина-сулфидом, и растворени у царској води. Из овог раствора је помоћу хлороводоничне киселине исталожен баријум-хлорид. Из филтрата баријумовог талога још једном је помоћу водоник-сулфида исталожена платина. Баријум-хлорид је био неактиван, платина-сулфид је још увек имао активност од ~500 честица по минути. Одговарајући експерименти са дуже живућим трансуранима су дали исти резултат.

2. Талог баријум-хлорида добијен од 10 g неозраченог уранил-нитрата који је био у равнотежи са $UX_1 + UX_2$ (торијумов и протактинијумов изотоп)⁸⁵ и имао активност од ~400 000 честица по минути, показао је активност од ~14 честица по минути, дакле, био је практично неактиван; то значи да се ни уранијум, ни протактинијум, ни торијум не талоче са кристалишућим баријум-хлоридом.

3. На крају је из раствора једног актинијумовог препарата ($MsTh_2$)⁸⁶ од ~2500 честица по минути исталожен баријум-хлорид који је показивао само ~3 честице по минути и био, дакле, такође практично неактиван.

На сличан начин пажљиво је испитиван јако активни баријум-хлорид исталожен из озраченог уранијума; сулфидни талози из неутралних, слабо сирћетнокиселих или слабо минералнокиселих раствора активног баријума били су практично неактивни, док су талози лантана и цирконијума садржавали само оне активности за које се лако могло доказати да потичу од активности баријумовог талога.

Једноставно талочење са $BaCl_2$ из јако хлороводонично киселих раствора не омогућава, наравно, разликовање баријума од радијума. На основу ових, овде само сумарно набројених реакција, активност талога добијеног помоћу баријумових соли може потицати само од радијума, ако се сам баријум као исувише невероватан, за почетак искључи из разматрања.

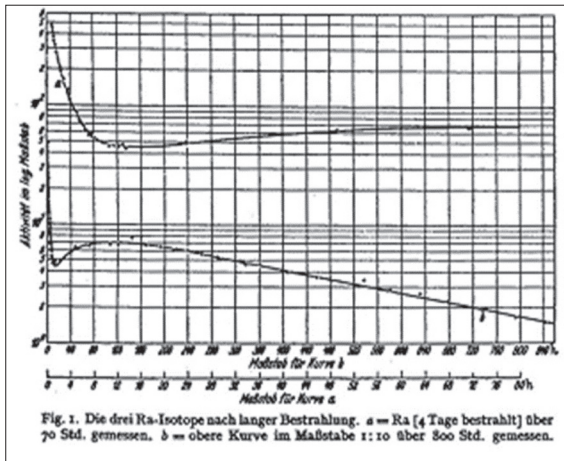
Сада прелазимо укратко на криве активности добијене са баријум-хлоридом – оне, с једне стране, дају исказе о броју „радијумових изотопа“, а осим тога омогућавају да се одреде њихова времена полураспада.

Сл. 1 показује развој активности активног баријум-хлорида после четвородневног озрачивања уранијума.

Крива *a* даје мерења у првих 70 сати; крива *b* показује мерене вредности за исти препарат у току 800 сати. Скала доње криве је десет пута грубља него она горње криве. Испочетка брзо опадање се постепено успорава и након око 12 сати прелази у лагани раст. После отприлике 120 сати почиње опет врло постепено смањивање активности; оно је експоненцијално са полувременом од округло 13 дана.

⁸⁵ Примедба преводиоца: $UX_1 = {}^{234}_{90}Th$, $UX_2 = {}^{234}_{91}Pa$.

⁸⁶ Примедба преводиоца: $MsTh_2 = {}^{298}_{89}Ac$.



Сл. 1. Три Ra-изотопа после дужег озрачивања. а = Ra (озрачен 4 дана) мерен у току 70 сати. b = горња крива у мерилу 1 : 10, мерена 800 сати

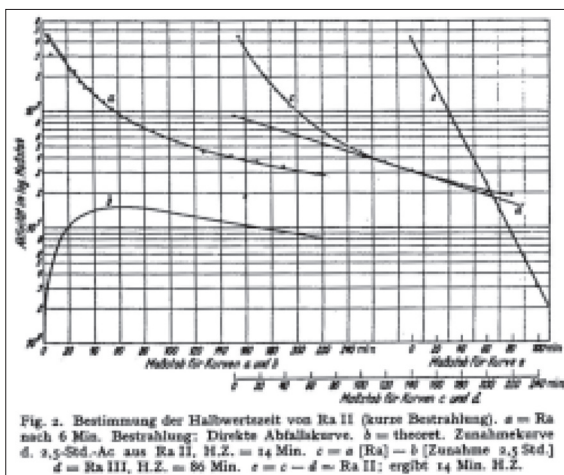
Ток кривих јасно показује да овде мора бити присутно више супстанција. Не може се, међутим, без даљњег рећи о каквим се врстама ради: да ли ток активности одређује више „изотопа радијума“ или један „изотоп радијума“ са низом својих потомака.

Прејудуцирајмо овде одмах оно што је већ било назначено у првом саопштењу, да је, наиме, реч о три изомера „радијумовог изотопа“. Нека они буду на почетку означени као Ra II, Ra III и Ra IV (о могућем Ra I, касније).

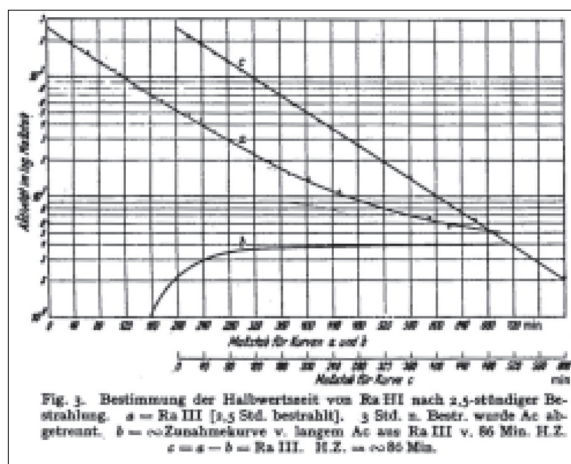
Њихово доказивање и одређивање њихових времена полураспада представљено је на следећим сликама.

Сл. 2 показује евалуацију једне „радијумове“ криве опадања интензитета након 6 минута озрачивања уранијума.

Крива а даје директно измерену активност, мерену у току 215 минута. Она се састоји од активности двају „радијумових“ изотопа, Ra II и Ra III (упоређи са



Сл. 2. Одређивање времена полураспада Ra II (краткотрајно озрачивање). а = Ra после 6 min озрачивања: директна крива опадања активности. b = теоријска крива повећања активности d. 2,5-сатни Ac из Ra II, $t_{1/2} = 14$ min. c = a (Ra) - b (паст 2,5 сати). d = Ra III, $t_{1/2} = 86$ min. e = c - d = Ra II; даје $t_{1/2} = 14$ min.

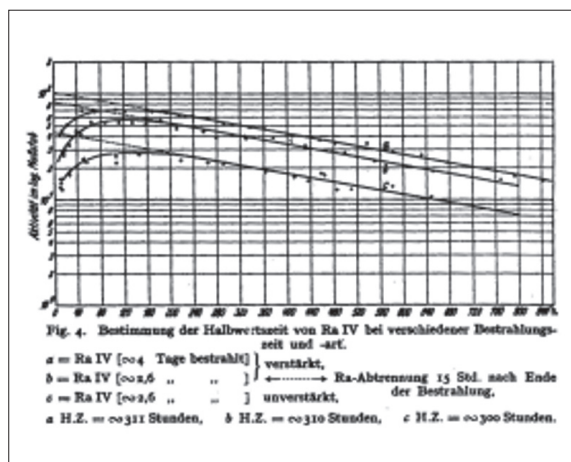


Сл. 3. Одређивање времена полураспада Ra III после 2,5-сатног озрачивања. $a = \text{Ra III}$ (озрачен 2,5 сати). 3 сата након озрачивања одвојен је Ac. $b = \sim$ крива раста дугоживућег Ac из Ra III с $t_{1/2} = 86$ min. $c = a - b = \text{Ra III}$. $t_{1/2} \approx 86$ min.

сл. 3) и једне мале активности актинијума који настаје од Ra II. Ова супстанција, означена као Ac II, има, како су то показали други експерименти, којима се овде нећемо бавити, време полураспада од око $2\frac{1}{2}$ сата. Теоријска крива раста за један такав изотоп актинијума који је настао од Ra II означена је на слици словом b . При томе је за Ra II већ прејудуцирано полувреме од 14 минута. Ако се од криве a одузму вредности криве b , добија се крива c са слике. Ова активност потиче сада практично само од радијумових изотопа и то доминантно од краткоживућег Ra II, а само у мањој мери у дужеживућег Ra III. Последњи има, како следи из сл. 3, даље доле, полувреме од отприлике 86 минута. Ток активности Ra III показује крива d на сл. 2. Ако се d одузме од c , добија се коначно из криве e активност чистог Ra II. Опадање је експоненцијално са полувременом од 14 минута. Ова вредност би требало да је тачна до на ± 2 минуте.

Долазимо сада до доказивања постојања и одређивања полувремена Ra III. Ако је препарат уранијума озрачен један сат или пар сати, тада се детектује, осим почетног брзог смањења активности, друга знатна активност која после око 100–110 минута опадне на половину и на крају још спорије опада. Да би се доказало да и ову активност треба у битноме приписати неком изотопу радијума, поступило се на следећи начин. Из озраченог уранијумовог препарата издвојен је помоћу баријум-хлорида „радијум“; $2\frac{1}{2}$ сата касније баријум-хлорид је опет растворен и поново сталожен. У том времену се краткоживући Ra II потпуно распао, а Ac II (полувреме $2\frac{1}{2}$ сата), који је настао из Ra II у баријум-хлориду, се при прекристализацији одстрањује. Баријум-хлорид је још знатно активан; постоји, дакле, још један „радијумов изотоп“. Овде се, дакле, поступа онако како су то Мајтнер, Штрасман и Хан већ учинили приликом разјашњења вештачких продуката трансформације торијума.⁸⁷ Развој овако добијене активности приказан је на сл. 3, крива a .

⁸⁷ L. Meitner, F. Strassmann, O. Hahn, Z. Phys. **109** (1938) 538.



Сл. 4. Одређивање времена полураспада Ra IV при различитим временима и врстама озрачивања.
 a = Ra IV (појачано зрачен ~ 4 дана),
 b = Ra IV (појачано зрачен ~ 2,6 дана) ↔ Одстрањивање Ra 15 сати након почетка озрачивања,
 c = Ra IV (непојачано зрачен ~ 2,6 дана),
 $a t_{1/2} \sim 311$ сати, $b t_{1/2} \sim 310$ сати, $c t_{1/2} \sim 300$ сати.

Смањење активности је у току првог сата скоро сасвим експоненцијално са временом полураспада од ~86 минута; преостаје једна мала додатна активност. Она без сумње потиче од једног дугоживућег „актинијумовог изотопа“, који настаје од Ra III и чији се вероватни ток активности може отприлике проценити на основу одступања криве a од чисто експоненцијалне форме. Крива активности добијена при томе репродукована је као крива b на сл. 3. (И хемијски је доказано да при распаду Ra III настаје „актинијумов изотоп“ са релативно дугим временом полураспада.) Ако се од a одузме b , добија се крива c за сада чисти Ra III. Она показује леп експоненцијални пад, с временом полураспада од 86 минута. Ова вредност требало би да буде тачна унутар граница од ± 6 минута.

Сада долазимо до трећег „радијумовог изотопа“, који овде означавамо као Ra IV. Каснији ток криве b на сл. 1 указао је на једну супстанцију са временом полураспада од 12 до 13 дана. На сасвим сличан начин као у случају Ra III, показано је да ово спорије опадање активности потиче у битном од једног „радијумовог изотопа“. Ако се пусти да дуго озрачени уранијум након удаљавања извора неутрона стоји, рецимо, један дан, тада се изотопи Ra II и Ra III потпуно распаду. Ако се сада изведе таложење са баријумом и за сваки случај још једном прекристалише, тада активност нађена у баријум-хлориду може потицати само од још једног „радијумовог изотопа“. Такве активности увек су нађене и после вишедневног стајања. Промена те активности је веома карактеристична. Активност се у току више дана постепено повећава, достиже максимум и ишчезава тада са временом полураспада од око 300 сати (12,5 дана).

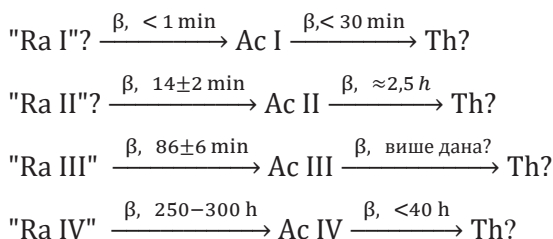
На сл. 4 приказане су неке од таквих кривих. Препарат криве c био је издвојен из једног непојачано⁸⁸ озраченог препарата уранијума, остале криве

⁸⁸ Примедба преводиоца: Аутори уводе термин „непојачано“, у смислу „стандардно“, као антипод „појачаном“ зрачењу о коме ће бити реч у даљем тексту.

односе се на одговарајуће талогe баријума из појачано озраченог уранијума. (На основу кривих се не може ништа рећи о фактору појачања, јер се овде није радило под истим геометријским условима. При истим условима, истој количини уранијума итд. установили смо да је фактор појачања око 7.) Ток трију кривих веома је сличан. Повећање активности следи са полувременим мањим од 40 сати, опадање са око 300 сати. Време полураспада овог дугоживућег „Ra IV“ је, међутим, несумњиво нешто краће од 300 сати, јер осим настајања Ac IV из Ra IV, у суштини одговорног за почетни раст, из Ac IV настаје још и један дугоживући „торијумов изотоп“, тако да време полураспада Ra IV није утврђено сасвим тачно. Вредност 250–300 сати требало би, међутим, да буде блиска стварности. На основу кривих *a*, *b* и *c* јасно се види да се β -зрачење Ra IV знатно боље апсорбује од зрачења његових потомака; иначе не би следило тако брз раст.

Ако резимирамо претходно приказане резултате, установили смо, дакле, постојање три изомера земноалкалних метала, означена као Ra II, Ra III и Ra IV. Њихова времена полураспада су 14 ± 2 минута, 86 ± 6 минута, 250–300 сати. Пашће у очи да 14-минутна врста није означена као Ra I, а даљи изомери не као Ra II и Ra III. Разлог за то је што верујемо у постојање једног још нестабилнијег „Ra“, иако он до сада није доказан. У нашем првом саопштењу о новим продуктима трансформације навели смо један актинијум с временом полураспада од око 40 минута и учинили логичну претпоставку да је то најнестабилнији актинијумов изотоп, који настаје из најнестабилнијег радијумовог изотопа. У међувремену смо, међутим, установили да „актинијум“ који настаје из 14-минутног радијума (раније 25-минутног) има време полураспада од 2,5 сата (раније су наведена 4 сата). Горе поменути нестабилни актинијумов изотоп је, међутим, такође присутан. Његово време полураспада нешто је мање него што је то раније наведено – зацело испод 30 минута. Како овај „изотоп актинијума“ не може настати ни из 14-минутне ни из 86-минутне врсте, нити из дугоживућег „Ra“, и како се овај „актинијумов изотоп“ може доказати већ након петоминутног озрачивања уранијума, најједноставнија претпоставка за његов настанак јесте један „изотоп радијума“ чије време полураспада мора бити краће од једне минуте. Ако би он имао време полураспада веће од једне минуте, морали бисмо га моћи доказати; за њим смо интензивно трагали. Стога означавамо ову до сада непознату родитељску супстанцију, која би без сумње могла бити доказана када бисмо радили с јачим извором зрачења, као „Ra I“.

Тиме наша схема приказана у првом саопштењу мора да доживи извесне корекције. Следећа схема их укључује и даје сада тачније одређена времена полураспада почетних чланова низова:



Група „трансурана“ није за сада ни у каквој приметној вези са овим низовима.

Низови трансформација представљени овом схемом су без сумње коректни у својим *јенетичким* релацијама. Неке од коначних чланова ових изомерних низова, означене као „торијум“, већ смо упели да докажемо. Како се, међутим, још увек не могу дати тачни подаци о њиховим временима полураспада, у овом тренутку не дајемо никакве.

Сада, међутим, морамо да говоримо о нашим новијим истраживањима која, због необичних резултата, објављујемо јако оклевајући. Да бисмо дошли до несумњивог доказа хемијске природе почетних чланова низова сталожених с баријумом, а означених као „радијумови изотопи“, извели смо фракциону кристализацију и фракционо таложење активних баријумових соли на познати начин, који се користи за обогаћивање (или осиромашење) радијума у баријумовим солима.

Баријум-бромид јако обогаћује радијум при фракционој кристализацији, баријум-хромат при не исувише брзом настајању кристала још више. Баријум-хлорид то чини слабије него бромид, баријум-карбонат донекле осиромашује. Одговарајући експерименти које смо урадили са активним препаратима баријума очишћеним од продуката *шекли су без изузетка не-јактивно: активност је остала равномерно расподељена на све баријумове фракције*, бар до на сасвим незнатне грешке мерења. Затим је изведено још неколико фракционих експеримената са изотопом радијума ThX^{89} и изотопом радијума MsTh_1^{90} . Они су текли тачно тако како се могло очекивати на основу свих ранијих искустава са радијумом. Након тога је на смешу очишћеног дугоживућег „Ra IV“ и чистог, без примеса (неактивног?) радијума,⁹¹ MsTh_1 примењена „метода индикатора“: смеша је фракционо искристалисана са баријум-бромидом као носачем. *MsTh₁ је био обојан, „Ra IV“ не, већ је његова активност при истој количини баријума остала једнака као у фракцији.* Долазимо до закључка: наши „изотопи радијума“ имају својства баријума;

⁸⁹ Примедба преводиоца: $\text{ThX} = {}^{224}_{88}\text{Ra}$.

⁹⁰ Примедба преводиоца: $\text{MsTh}_1 = {}^{228}_{88}\text{Ra}$.

⁹¹ Примедба преводиоца: Или је реч о типографској грешци – аутори употребљавају термин „*radiumfrei*“, што значи „без присуства радијума“; како је MsTh_1 управо изотоп радијума, могуће је да је требало да стоји „*bariumfrei*“, тј. без присуства баријума.

као хемичари морали бисмо у ствари рећи да код нових врста није реч о радијуму, него о баријуму; јер други елементи осим радијума и баријума не долазе у обзир.

На крају смо извели индикаторски експеримент с нашим чистим исталоженим „Ас II“ (време полураспада око 2,5 сата) и чистим изотопом актинијума MsTh_2 . Ако наши „Ра изотопи“ нису радијум, тада ни „Ас изотопи“ нису актинијум већ би требало да буду лантан. По поступку гђе Кири⁹² извели смо фракционисање лантан-оксалата, који је садржавао обе активне супстанције, из азотне киселине. Нађено је, као што је навела гђа Кири, да је у коначној фракцији MsTh_2 јако обогаћен. У случају нашег „Ас II“ није примећено никакво обогаћење. У сагласности са Кири и Савићем⁹³ у вези њихове, додуше не јединствене врсте од 3,5 сата, налазимо и ми да ретки метал⁹⁴ који настаје β -емисијом из нашег активног земноалкалног метала није актинијум. Налаз који су навели Кири и Савић, да су у лантану обогатили активност, што, дакле, говори против идентичности са лантаном, намеравамо да експериментално тачније проверимо јер је могуће да је у њиховој смеши обогаћење само привидно.⁹⁵

Још није проверено да ли се за коначне чланове наших низова који настају из „Ас-La препарата“, означене као „торијум“, показује да су цер.

Што се тиче „трансурана“, ти елементи су додуше хемијски сродни њиховим нижим хомолозима, ренијуму, осмијуму, иридијуму, платини, али не и идентични. Још није испитано да ли су они хемијски једнаки још нижим хомолозима, мазуријуму,⁹⁶ рутенијуму, родијуму, паладијуму. На то се раније није могло мислити. Сума масених бројева Ва + Ма, дакле 138 + 101, даје 239!⁹⁷

⁹² Mme Pierre Curie, *J. Chim. physique etc.* 27 (1930) 1.

⁹³ I. Curie, P. Savitch, *C. r. Acad. Sci. Paris* 206 (1938) 1643.

⁹⁴ *Примедба љеводиоца*: У ствари, реч је о „реткој земљи“ (лантану), а не о „ретком металу“.

⁹⁵ *Примедба љеводиоца*: Ово није фер – Кири и Савић пишу: „Укупно узев, особине $\text{R}_{3,5h}$ су особине лантана, од кога, изгледа, може за сада да се одвоји само фракционисањем“. Учите да је идентичност особина непознатог елемента са лантановим изражена без икакве сумње, а исказ о могућности одвајања/разликовања тог елемента од лантана почиње са „...изгледа, може за сада...“. Како су утврдили да није реч о вишем хомологу лантана, актинијуму (с редним бројем 89), њихова реченица се такође може схватити тако да „морају да говоре о својим необичним резултатима, јако оклевајући“.

⁹⁶ *Примедба љеводиоца*: 1925. су Валтер Нодак (Walter Noddack), његова будућа супруга Ида Таке (Ida Tacke), касније Нодак, и Ото Берг (Otto Berg) објавили откриће новог елемента с редним бројем 43 и у патриотском заносу дали му име мазуријум (хемијски симбол Ма) по источнопруском завичају Валтерових предака. Њихово откриће није се, међутим, могло репродуковати све до самог краја 20. века. Елемент с редним бројем 43 први су једнозначно изоловали 1937. Италијани Емилио Сегре (Emilio Segrè) и Карло Перјер (Carlo Perrier) и назвали га технијум (симбол Тс), по грчкој речи са значењем „вештачки“.

⁹⁷ *Примедба љеводиоца*: Ова реченица, очигледно додата у последњи час, потпуно ван контекста и везе са осталим деловима рада, уједно и нетачна, јер се при фисији не одржава број нуклеона, већ протона, па је парњак Ва (с редним бројем 56) не Ма (тј. Тс, редни број 43)

Као хемичари морали бисмо на основу укратко представљених експеримената у ствари преименовати горе наведену схему и уместо Ra, Ac, Th увести симболе Ba, La, Ce. Као физици у извесном смислу блиски „радиохемичари“, не можемо се одлучити на тај скок који противречи свим досадашњим искуствима нуклеарне физике. Ипак би могло бити да је можда низ чудних случајева довео до варљивих/заваравајућих резултата.⁹⁸

Планира се извођење даљих индикаторских експеримената са новим продуктима трансформација. Нарочито треба да се покуша заједничко фракционисање радијумових изотопа који настају из торијума озрачивањем брзим неутронима, а које су добили Мајтнер, Штрасман и Хан,⁹⁹ са земноалкалним елементима насталих из уранијума. То би требало да је лакше изводљиво тамо где на располагању стоје јаки вештачки извори зрачења.

На крају захваљујемо гђици К. Либер (*Cl. Lieber*) и гђици И. Боне (*I. Bohne*) на њиховој делотворној помоћи при веома бројним таложењима и мерењима.

већ Kr (редни број 36), очигледно је уступак Лизи Мајтнер, која је одмах схватила да није реч о радијуму и покушала да то утуви Хану у главу.

⁹⁸ *Примедба преводиоца:* На немачком оригиналу овај чувени пасус гласи: “*Als Chemiker müßten wir aus der kurz dargelegten Versuchen das oben gebrachte Schema eigentlich umbenennen und statt Ra, Ac, Th, die Symbole Ba, La, Ce einsetzen. Als der Physik in gewisser Weise nahestehende “Kernchemiker” können wir uns zu diesem, allen bisherigen Erfahrungen der Kernphysik widersprechenden, Sprung noch nicht entschließen. Es könnten doch vielleicht eine Reihe seltener Zufälle unsere Ergebnisse vorgetäuscht haben.*” Па зар ово није једнако одрицање од барујума као Кири/Савићево (погледајте фусноту 67) од лантана? А при томе су Хан и Штрасман знали за рад Кири/Савића и имали објашњење Лизе Мајтнер.

⁹⁹ L. Meitner, F. Strassmann, O. Hahn, *Z. Phys.* **109** (1938) 538.

Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction

Lise Meitner and Otto R. Frisch

Nature, **143**, 239–240, (Feb. 11, 1939)

(Submitted 16. 1. 1939)

Дезинтеграција уранијума неутронима: нови тип нуклеарне реакције

Лизе Мајтнер и Ото Р. Фриш

Nature, **143**, 239–240, (11. фебруар 1939)

(Послато 16. 1. 1939)

Бомбардујући уранијум неутронима, Ферми и сарадници¹⁰⁰ су открили да се формирају бар четири радиоактивне супстанције, од којих су двама приписани атомски бројеви већи од 92. Даља истраживања¹⁰¹ су показала постојање најмање девет радиоактивних периода од којих је шест приписано елементима иза уранијума, а за објашњење њиховог хемијског понашања и генетичких релација морала је бити претпостављена нуклеарна изомерија.

При извођењу хемијске асигнације увек је претпостављано да ове радиоактивне врсте имају атомски број близак ономе бомбардованог елемента, јер је било познато да језгра емитују само честице са једним или два наелектрисања.¹⁰² За једну врсту, нпр. са својствима сличним осмијуму претпостављено је да је ека-осмијум ($Z = 94$),¹⁰³ а не осмијум ($Z = 76$) или рутенијум ($Z = 44$).

Следећи опажања Киријеве и Савића,¹⁰⁴ Хан и Штрасман¹⁰⁵ су нашли да су најмање три радиоактивне врсте формиране из уранијума после бомбардовања неутронима хемијски сличне баријуму и тиме вероватно изотопске са радијумом. Даља истраживања¹⁰⁶ показала су, међутим, да је било немогуће одвојити те врсте од баријума (иако је мезоторијум, један од изотопа

¹⁰⁰ Fermi, E., Amaldi, F., D' Agostino, O., Rasetti, F., and Segré, E., *Proc. Roy. Soc. A*, **146** (1934) 483.

¹⁰¹ L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, *Z. Phys.* **106** (1937) 249.

¹⁰² *Примедба преводиоца*: Прецизније, „с једном или две јединице наелектрисања“.

¹⁰³ *Примедба преводиоца*: Историјско (привремено) име за плутонијум.

¹⁰⁴ I. Curie, P. Savitch, *C.R.* **208** (1938) 1643.

¹⁰⁵ O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.* **26** (1938) 756.

¹⁰⁶ O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.* **27** (1939) 11.

радијума, лако одвојен у истом експерименту), тако да су Хан и Штрасман били принуђени да закључе да се *као последица бомбардовања уранијума ($Z = 92$) неутронима формирају изотопи баријума ($Z = 56$)*.¹⁰⁷

На први поглед, овај резултат је веома тешко разумети. Формирање елемената тако далеко од уранијума разматрано је и раније, али увек одбацивано из физичких разлога, све време у којем хемијски докази нису били потпуно једнозначни. Емисија великог броја наелектрисаних честица у току кратког временског интервала може се сматрати искљученом због мале вероватноће пробијања „кулоновске баријере“, као што следи из Гамовљеве теорије α -распада.

Међутим, на основу савремених идеја о понашању тешких језгара¹⁰⁸ намеће се сама по себи потпуно другачија и суштински класична слика ових нових процеса дезинтеграције. Услед густог паковања и интензивне измене енергије, очекује се да се честице тешког језгра крећу колективно на начин који подсећа на кретања у капи воде. Ако се то кретање додатком енергије учини довољно енергичним, таква кап се може поделити у две мање капи.

У дискусији о енергији укљученој у деформацију језгра коришћен је концепт површинског напона¹⁰⁹ и његова вредност је процењена једноставним разматрањима која су у вези са нуклеарним силама. Мора се, међутим, имати на уму да је површински напон наелектрисане капи умањен услед њеног наелектрисања, и да груба процена показује да површински напон језгара, који опада са порастом наелектрисања језгра, може постати нула за атомске бројеве реда 100.

Према томе, изгледа да је могуће да језгро уранијума има веома мало стабилну форму и да може после захватања неутрона да се подели у два језгра грубо једнаке масе (прецизан однос величина зависи од финих структурних својстава и можда делимично од случаја). Ова два језгра ће се одбијати и требало би да имају укупну кинетичку енергију од око 200 MeV, како се израчуна на основу радијуса и наелектрисања језгра. Може се заиста очекивати да ће овај износ енергије бити доступан као разлика у фракцијама паковања између уранијума и елемената из средине Периодног система. Процес „фисије“ може се, дакле, у целини описати на суштински класичан начин, без потребе за разматрањем квантномеханичког „тунелског ефекта“ који би у ствари био екстремно мали¹¹⁰ када се узме у обзир да су укључене велике масе.¹¹¹

¹⁰⁷ *Примедба преводиоца:* Лизина лојалност Хану није имала граница: овом реченицом практично се одриче Нобелове награде коју је заслужила бар колико и он. Хан се у ствари *није* усудио да каже да је реч о баријуму (погледати фусноту 98). Иако му је она приликом њиховог тајног састанка (Хан се плашио последица које би имао након повратка у Немачку због сусрета са Јеврејком) 13. 11. 1938. у Копенхагену, где су обоје били гости Н. Бора, енергично изразила своју скепу у вези настајања радијума након озрачивања уранијума.

¹⁰⁸ N. Bohr, *Nature* **137** (1936) 344–348.

¹⁰⁹ N. Bohr, F. Kalckar, *Kgl. Danske Vis. Selskab, Math. Phys. Medd.* **14**, Nr. 10 (1937).

¹¹⁰ *Примедба преводиоца:* Прецизније „мало вероватан“.

¹¹¹ *Примедба преводиоца:* Ово је формулисано онако како стоји у сваком модерном уџбенику: “It seems therefore possible that the uranium nucleus has only small stability of form, and

После дељења, велики однос броја неутрона и протона из језгра уранијума тежиће да се бета распадима адаптира мањим вредностима, примереним језгрима лакших елемената. Вероватно ће сваки фрагмент на тај начин изазвати ланац дезинтеграција. Ако је један од фрагмената изотоп баријума, други ће бити криптон¹¹² ($Z = 92 - 56$), који би се могао распасти преко рубидијума, стронцијума и итријума до цирконијума. Могуће је да су један или два претпостављена баријум–лантан–цер ланца у ствари ланац стронцијум–итријум–цирконијум.

Могуће је,¹¹³ и нама се чини доста вероватно, да периоди који су били приписани елементима иза уранијума такође потичу од лакших елемената. На основу хемијских доказа, два кратка периода (10 s и 40 s), до сада приписана U^{239} , могли би бити изотопи мазуријума ($Z = 43$) који се преко рутенијума, родијума, паладијума и сребра дезинтегрише у кадмијум.

Могуће је да у свим овим случајевима не мора да се претпостави нуклеарна изомерија; различити радиоактивни периоди који припадају истом хемијском елементу могу се придружити различитим изотопима тог елемента, јер два фрагмента распада уранијумовог језгра могу имати варијабилне пропорције неутрона.

Бомбардовањем торијума неутронима добијене су активности приписане изотопима радијума и актинијума.¹¹⁴ Неки од тих периода су приближно једнаки периодима изотопа баријума и лантана, који су резултат бомбардовања уранијума. Сугерисали бисмо, дакле, да су ови периоди последица „фисије“ торијума сличне уранијумовој, са делимично истим продуктима. Наравно, било би веома интересантно ако би се могао добити један од тих продуката из неког лаког елемента, нпр. помоћу захвата неутрона.

Могло би се поменути да је врста са временом полураспада од 24 min,¹¹⁵ хемијски идентификована као уранијум, вероватно заиста U^{239} , а да он затим прелази у ека-ренијум,¹¹⁶ који се јавља као неактиван, али је могуће и да се споро распада, вероватно емисијом алфа-честице. (Разматрањем природно радиоактивних елемената не може се очекивати да би U^{239} дао више од два бета распада; дуг низ опажених распада нам је увек био загонетан.) Формирање

may, after neutron capture, divide itself into two nuclei of roughly equal size (the precise ratio of sizes depending on finer structural features and perhaps partly on chance). These two nuclei will repel each other and should gain a total kinetic energy of c. 200 MeV., as calculated from nuclear radius and charge. This amount of energy may actually be expected to be available from the difference in packing fraction between uranium and the elements in the middle of the periodic system. The whole 'fission' process can thus be described in an essentially classical way, without having to consider quantum-mechanical 'tunnel effects', which would actually be extremely small, on account of the large masses involved."

¹¹² Примедба преводиоца: упоредите ово са фуснотом 97.

¹¹³ L. Meitner, F. Strassmann, O. Hahn, *Z. Phys.* **109** (1938) 538.

¹¹⁴ L. Meitner, F. Strassmann, O. Hahn, *Z. Phys.* **109** (1938) 538.

¹¹⁵ L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, *Z. Phys.* **106** (1937) 249.

¹¹⁶ Примедба преводиоца: Привремено име за до тада неидентификовани виши хомолог ренијума, боријум (Bh, атомски број 107).

те врсте је типичан резонантни процес;¹¹⁷ настало стање мора имати време живота милион пута дуже од времена које је потребно језгру да се распадне. Можда то стање кореспондира неком високо симетричном типу кретања нуклеарне материје које не фаворизује „фисију“ језгра.

¹¹⁷ А. Н. Bethe, G. Placzec, *Phys. Rev.* **51** (1937) 405.

Supplement to Nature, 276 (Feb. 18, 1939)

O. R. Frisch

Institute of Theoretical Physics, University Copenhagen

(Submitted 16. 1. 1939)

Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment

Supplement to Nature, 276 (18. фебруар 1939.)

О. Р. Фриш

Институт за теоријску физику, Универзитет у Копенхагену

(Послато 16. 1. 1939)

Физички доказ дељења тешких језгара при бомбардовању неутронима

На основу хемијских доказа, Хан и Штрасман¹¹⁸ су закључили да након бомбардовања уранијума ($Z = 92$) неутронима настају радиоактивна језгра баријума (атомски број $Z = 56$). Указано је на то¹¹⁹ да би се ово могло објаснити као резултат „фисије“ уранијумовог језгра, слично дељењу једне капи у две. На основу дефекта масе и одбијања два језгра настала „фисијом“ оцењено је да би енергија ослобођена у таквом процесу била око 200 MeV.

Ако је ова слика коректна, очекивало би се да из слоја уранијума бомбардованог неутронима излете веома брза језгра атомског броја 40–50, атомске тежине 100–150 и енергије до 100 MeV. Упркос своје велике енергије,¹²⁰ ова језгра би, због високог ефективног наелектрисања (процењеног на око 20), које имплицира врло интензивну јонизацију,¹²¹ требало да у ваздуху имају домет од само неколико mm. Свака таква честица би требало да произведе укупно око три милиона јонских парова.

Коришћењем јонизационе коморе у коју је био смештен уранијум, а која је била повезана с линеарним амплификатором, успело ми је да демонстрирам

¹¹⁸ O. Hahn and F. Strassmann, *Naturwiss.* 27 (1939) 11.

¹¹⁹ L. Meitner and O. R. Frisch, *Nature* 143 (1939) 239.

¹²⁰ *Примедба преводиоца*: Јасније би било да је написано „ $E = mv^2/2$. Упркос своје велике брзине ...“. Наравно, (кинетичка) енергија и брзина су међусобно повезане релацијом, па је и реченица у раду коректна, али смисао је тај да би се очекивало да честице које имају велику брзину (као β -честице у односу на α -честице) не дају нарочито велику специфичну јонизацију (број јонских парова створених по јединици пута у средини у којој се крећу).

¹²¹ *Примедба преводиоца*: Мисли се на „јонизацију средине“.

појаву таквих јонизационих експлозија. Амплификатор је био повезан с тиратроном¹²² који је био тако подешен да броји само пулсеве које изазива бар 5×10^5 јонских парова. Када је 300 mg радијума, измешаног са берилијумом било смештено један cm далеко од уранијума, регистровано је око 15 честица у минути. Ниједан пулс није био регистрован у току поновљених тестова изведених у укупном времену од неколико сати, када је био склоњен било уранијум, било извор неутрона. С неутронским извором на растојању четири cm од уранијума, облагање извора парафинским воском повећало је ефект за фактор два.¹²³

Проверено је да број пулсева линеарно зависи од јачине извора неутрона; ово је учињено да би се искључила могућност да су пулсеви настали случајним сумирањем малих пулсева. Када је амплификатор био повезан с осцилоскопом, велики пулсеви су се могли веома јасно видети на шуму/позадини много мањих пулсева изазваних алфа-честицама уранијума.

Варирањем нагиба/волтаже (бајес) тиратрона, нађено је да максимална величина пулсева кореспондира бар двама милионима јонских парова, или губитку енергије од 70 MeV честица унутар коморе. Како је најдужи пут честице у комори био 3 cm, а комора је била напуњена водоником при атмосферском притиску, честице мора да тако интензивно јонизују, упркос својој енергији од бар 70 MeV, да могу да направе два милиона јонских парова на путу еквивалентном 0,8 cm у ваздуху, или мање. На основу тога, претпостављајући разуман однос између атомске тежине и атомског наелектрисања, може се проценити да јонизујуће честице морају имати атомску тежину од бар око 70. Ово изгледа да је убедљив физички доказ за цепање језгара уранијума у делове упоредиве величине, као што индицирају експерименти Хана и Штрасмана.

Експерименти са торијумом уместо уранијума дали су сасвим сличне резултате, осим што обмотавање извора неутрона парафином није повећало, већ мало смањило ефект. Ово је подршка сугестији¹²⁴ да и у случају торијума неке, ако не све активности произведене бомбардовањем неутронима, треба да се припишу лаким елементима. Треба се сетити да за активности произведене торијумом (осим једне која је изотопска са торијумом и која је скоро сигурно настала једноставним захватањем неутрона) није било установљено никакво појачање помоћу парафина.¹²⁵

Проф. Мајтнер је предложила други интересантан експеримент. Ако се нека метална плоча постави близу слоја уранијума бомбардованог неутронима, очекивало би се на плочи формирање активног депозита/наслаге лаких атома емитованих током „фисије“ уранијума. Надамо се да ћемо ускоро моћи да изведемо такве експерименте коришћењем моћних извора неутрона.

¹²² *Примедба њеводиоца*: Тиратрон је један тип цеви испуњене гасом, која се користи као електрични прекидач и контролисани исправљач велике снаге.

¹²³ *Примедба њеводиоца*: Парафин успорава неутроне и тиме их чини ефикаснијим за изазивање фисије уранијума 235.

¹²⁴ L. Meitner and O. R. Frisch, *Nature* **143** (1939) 239.

¹²⁵ Види, L. Meitner, F. Strassmann, O. Hahn, *Z. Phys.* **109** (1938) 538.

Die Naturwissenschaften, 27, 89–95 (10. Februar 1939)

Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Uranspaltung

Von OTTO HAHN und FRITZ STRASSMANN, Berlin-Dahlem.

(Eingegangen am 28. Januar 1939)

Die Naturwissenschaften, 27, 89–95 (10. фебруар 1939)

Доказ настајања активних изотопа баријума из уранијума и торијума озрачених неутронима; доказ других активних фрагмената цепања уранијума

ОТО ХАН и ФРИЦ ШТРАСМАН, Берлин-Далем

(Примљено 28. јануара 1939)

А. Коначан доказ за настајање баријума из уранијума.

У недавном саопштењу објављеном у овом часопису¹²⁶ навели смо да почетне супстанције нових радиоактивних низова, настале при озрачивању уранијума неутронима, за које (супстанције) смо испрва мислили да су изотопи радијума,¹²⁷ по свом хемијском понашању очигледно нису радијумови, већ баријумови изотопи. У ономе што следи извешћемо доказ те претпоставке¹²⁸ и наш исказ истовремено проширити и на торијум. У схеми распада нашег последњег саопштења навели смо за уранијум четири таква „Ra“-изотопа, од којих су три доказана са сигурношћу и одређена су њихова времена полу-распада, док су закључци о четвртом, веома краткоживућем, означеном као „Ra I“, изведени на основу једног вероватног продукта трансформације.¹²⁹

¹²⁶ O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.* 27 (1939) 11.

¹²⁷ O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.* 26 (1938) 755.

¹²⁸ *Примедба преводиоца*: Аутори су у заиста незгодној ситуацији – они пишу нови рад, а при томе не могу да се одлуче како да се односе према претходном (цитираном у фусноти 125). Кажу прво да је већ на основу претходног рада *јасно* (*“offensichtlich”*) да елемент о коме је реч није радијум већ баријум, а у следећој реченици да ће ту *претпоставку* (*“Annahme”*) *доказати* у овом раду. Они се, дакле, упуштају у немогућу мисију да истовремено спасу први, а оправдају публикавање другог рада.

¹²⁹ *Примедба преводиоца*: Крај ове реченице није лако разумети/превести: *“... während auf ein viertes, als “Ra I” bezeichnetes, sehr kurzlebiges aus einem vermutlichen Umwandlungsprodukt geschlossen wurde.”*

У случају три доказана земноалкална елемента могла је бити реч само о радијуму или баријуму; стронцијум и калцијум су такође били искључени. Како фракциона кристализација са разним солима баријума није давала обогаћење или осиромашење које би се очекивало за радијум, извели смо за наше супстанције низ индикаторских експеримената са беспрекорним¹³⁰ изотопима радијума да бисмо коначно установили понашање земноалкалних метала насталих од уранијума.

Ови индикаторски експерименти су у даљем појединачно представљени и нумерички евалуирани. Они су изведени с једне стране са 86-минутном супстанцијом до сада званом „Ra III“ и 300-сатном супстанцијом коју смо означили као „Ra IV“, а с друге стране са већ дуго познатим радијумовим β -активним изотопом Msth I¹³¹ и α -активним ThX.¹³² Уместо „Ra III“ и „Ra IV“ пишемо сада Ba III и Ba IV.

Испитиване су следеће комбинације:

1. Ba III + Msth I, фракционисани са баријум-бромидом,
2. Ba III + ThX, фракционисани са баријум-хроматом,
3. Ba IV + ThX, фракционисани са баријум-хроматом,
4. осим тога изведен је још један „кружни/циклични процес“ са низом искристалисаних баријумових соли.

У експерименту 1, око 15 g прочишћеног уранијума било је појачано зрачено 12 сати Ra-Be-неутронима.

Након прекида зрачења чекало се 2½ сата да се распадне „Ba II“ са временом полураспада од 14 минута. Сада је углавном била присутна 86-минутна супстанција Ba III и мала количина Ba IV (време полураспада око 300 сати). Тада је из раствора озраченог уранијума било сталожено 2 g баријума у облику хлорида, а баријум је затим сталожен као карбонат. Осим тога, један препарат мезоторијума без примеса (неактивног) радијума, познате јачине, очишћен је од својих продуката распада и такође сталожен с баријумом као карбонат. Оба карбоната су заједно растворена у бромоводоничној киселини и након тога су бромиди фракционо искристалисани на начин који је уобичајен за добијање радијума. При овој кристализацији увек су били одвајани продукти активних баријумових изотопа, као и Msth 2 који настаје из Msth 1, тако да су остале присутне само чисте баријумове и радијумове соли. Услед опадања концентрације Ba III (86 минута) вредности активности те супстанције морају се увек односити на заједничку нулту вредност – почетак прве кристализације. Формирање Msth 2 из константно активног Msth 1 мора се односити на кристализацију одговарајућих појединачних фракција.

¹³⁰ *Примедба њеводиоца:* У недостатку боље идеје, дословни превод немачке речи „einwandfrei“.

¹³¹ *Примедба њеводиоца:* Мезоторијум I (Msth 1) је историјско име за изотоп ²²⁸Ra, а мезоторијум II (Msth 2) за ²²⁸Ac.

¹³² *Примедба њеводиоца:* Торијум X је историјско име за изотоп ²²⁴Ra.

На сл. 1 приказани су и евалуирани резултати за по 500 mg баријум-бромид без воде. Криве I, II и III дела А слике дају директно нађене активности мерене у времену од преко 70 сати, дакле до равнотеже Msth 1 + Msth 2. Расподела радијумовог изотопа Msth I у фракцијама I, II и III је 77,6 : 25 : 11. Прва фракција је, дакле, 6 пута јача од треће.

На делу В сл. 1 представљен је на увећаној скали почетак кривих опадања активности у првих 500 минута. Поред тога, за сваку криву сваког од три препарата исцртано је означен пораст Msth 2, одређен на основу максимума из дела А слике. Коначно, део С слике приказује уједначене криве опадања за Ва III, као разлике кривих I, II и III и одговарајућег пораста Msth.

Нагиб правих одговара 86-минутном распаду Ва III. Права за фракцију II лежи мало испод I и III; одступање је, међутим, сигурно испод границе грешке. Све три криве постепено постају нешто хоризонталније јер је при 12-сатном озрачавању уранијума настало већ и нешто 300-сатне супстанције Ва IV. Ако се криве екстраполирају на нулту вредност времена, тада добијамо за активности фракција I, II и III вредности 81, 72 и 81. Оне су, дакле, до на 10% једнаке. Дакле, у поређењу с обојаћењем 6 : 1 са радијумовим изотопом Msth 1, Ва III не показује никакво обојаћење: то је доказ његове различитости од радијума и јака индикација за његову идентичност са баријумом.

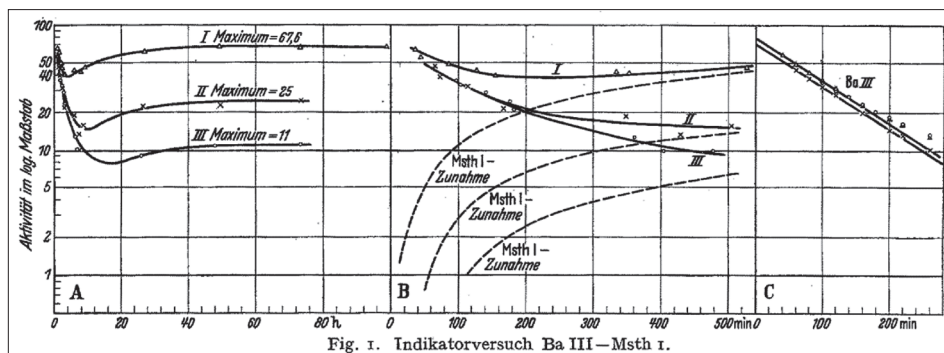


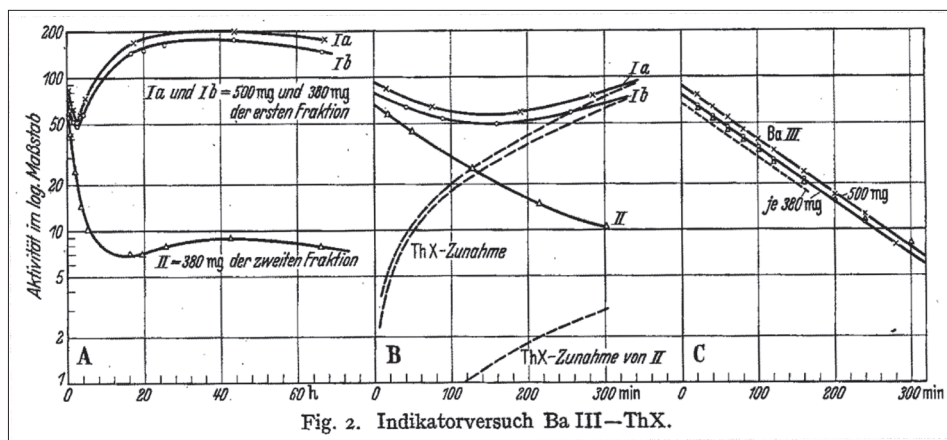
Fig. 1. Indikatorversuch Ba III - Msth I.

Сл. 1. Индикаторски експеримент Ва III – Msth I

У експерименту 2, 11 g пречишћеног уранијума три сата је појачано озрачивано неутронима. После 2,5-сатног стајања (распад Ва II!) сипа се у раствор уранијума 1 g Ва у облику ВаCl₂, ВаCl₂ се таложи помоћу 37% HCl, раствара и поново таложи. Чисти баријум-хлорид се тада третирао раствором радијумовог изотопа торијум X, непосредно пре тога очишћеним од свих продуката распада, и из заједничког раствора таложио се активни Ва + ThX као баријум-карбонат. Након тога је талог растворен у разблаженој азотној киселини, додата је неопходна количина амонијум-хромата да би се већи део баријума издвојио у виду хромата, па је затим додавањем амонијум-ацетата у капљицама изазвано таложење хромата. ThX је помоћу амонијака одвојен од

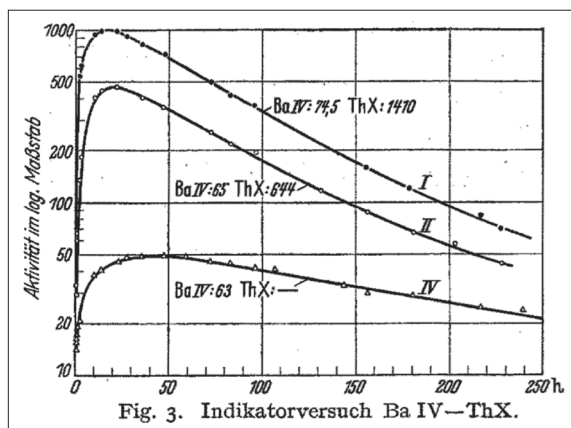
(једног) чистог радиоторијумског препарата и сталожен с баријумом у виду карбоната. При амонијачном таложењу радиоторијума помоћу соли гвожђа, и ThV + ThC иду у талог; ThC је сасвим чист. Након што је сталожен главни део баријума у виду хромата, извршено је филтрирање и остатак баријума је сталожен новим додавањем амонијум-хромата и амонијум-ацетата. Од прве главне фракције узете су 2 пробе за мерење, једна са 500, а друга са 380 mg BaCrO₄. Од мање, друге фракције мерено је само 380 mg.

Сл. 2 показује резултате и њихову евалуацију. Део А поново даје директно добијене вредности активности, мерене све до знатног опадања торијума X. Почетни пад представља распад 86-минутне супстанције, чије апсолутне почетне вредности треба да буду одређене. Максималне активности кривих Ia и Ib нису сасвим пропорционалне тежинским вредностима од 380 и 500 mg. Тањи слој 380-милиграмске пробе емитовао је у бројач нешто мекше ThV- β -зраке него дебљи слој. Да би се поуздано добило обogaћивање фракције I у односу на фракцију II, морају се, дакле, међусобно поредити једнаке количине Ib и II. Максималне активности су округло 179 и једва 9; обogaћење радијумовог изотопа ThX у првој, великој фракцији хромата у поређењу са мањом, другом је, дакле, 19,5 : 1, и тиме је необично добро успело.



Сл. 2. Индикаторски експеримент Ba III – ThX

Део В сл. 2 поново показује почетни ток кривих са опадајућим 86-минутним Ba III и растућим ThX. Искрткане криве одговарају чистом расту торијума X. Ако се ове одузму од одговарајућих кривих укупне активности, добија се ток активности чистог 86-минутног Ba III. Резултати су приказани на делу С слике. Уједначене (нормиране) криве за једнаке тежинске количине фракција I и II скоро се сасвим поклапају. То значи да су њихове укупне активности, када се посматрају у односу на исто почетно време, идентичне. Због краћег озрачивања није још присутан 300-сатни Ba IV, па се овог пута не примећује савијање.



Сл. 3. Индикаторски експеримент Ba IV – ThX

Горња крива је за супстанцију од 500 mg. Када се прерачуна на 380 mg добија се доњи, исцрткани пад који поново показује да се у дебљем слоју апсорбује релативно нешто више β -зрачења. Насупрот обogaћењу радијумовог изотопа ThX од 19,5 : 1 у баријум-хромату, у фракцијама нема никаквих промена активности Ba III; *дакле, доказ за његову различитост од радијума, а за хемијску идентичност са баријумом.*

Случај 3. У индикаторском експерименту 3 примењени су дугоживући Ba IV и радијумов изотоп ThX, супстанције које имају, када се ослободе продуката трансформација, времена полураспада од 300 сати и 3,64 дана. Ba IV је добијен на следећи начин: 5,4 g уранијума, који је био озрачиван неутронима месец дана, остављена су да након прекида озрачивања стоје до следећег дана. Ba II и Ba III се тада квантитативно распадну. Ba IV је након тога издвојен из уранијумског раствора помоћу баријум-хлорида, талог је растворен и преталожен и затим је баријум сталожен као карбонат. ThX је одвојен из чистог радиоторијума на раније описани начин. Оба карбонатна талоба, који садрже Ba IV и ThX – око 2–3 g – су заједно растворена у хлороводоничној киселини, сигурности ради још једном сталожена као баријум-хлорид, а овај је поново преко карбоната растворен у разблаженој азотној киселини. Након тога је поступљено слично као у индикаторском експерименту 2, баријум је, наиме, фракционо таложен као хромат. Добијене су следеће фракције:

- I. фракција = 200 mg хромата.
- II. фракција = 500 mg хромата.
- III. фракција: око 1 g хромата.
- IV. фракција = 500 mg хромата.

Од ових су за систематска мерења коришћене фракције I, II и IV.

Прво смо посматрали образовање активног талоба из торијума X и образовање продуката трансформације дугоживућег Ba IV. Максимум за ThX достиже се после око 40 сати, а за Ba IV након округло 100 сати. После једног месеца торијум X се потпуно распада, од Ba IV плус продуката транс-

формације присутно је још око 20%, и тада се непосредно добија расподела Ва IV на поједине фракције. Међутим, како показује сл. 3, у овом случају уопште није било потребно чекати тако дуго. Крива I даје ток активности прве фракције (200 mg). Добијене вредности су помножене са 2,5 да би се односиле на исте тежинске количине као у фракцијама II и IV (по 500 mg). После преласка максимума активност сваке криве састоји се од торијума X, који се експоненцијално распада са полувременом од 3,64 дана, и Ва IV с временом полураспада од око 300 сати. Из нађених вредности за активности могу се тада без тешкоћа израчунати појединачне активности обе компоненте. Резултати су за фракцију I: 74,5 јединице за Ва IV и 1410 за торијум X; за фракцију II: 65 за Ва IV и 644 за торијум X; за фракцију IV: 63 јединице за Ва IV и практично ништа за торијум X. У фракцији I било је, како је већ речено, мерено само 200 mg па прерачунато на 500 mg, дакле, прерачунат је релативно јачи допринос зрачења тањег слоја. Вредност 74,5 за Ва IV фракције I мора, дакле, бити превисока. *Ако се то узме у обзир, њада за све три мерење фракције имамо исту активност Ва IV и веома различите активности торијума X.* Укључивањем веће, немерене треће хроматне фракције, четврта хроматна фракција више уопште не садржи торијум X.¹³³ *Резултат је, дакле, ове истине као је: Ва IV је баријум и сујурно не радијум.*

Види се, да узгред поменемо, да добро изведено фракционисање смеше радијума и баријума у форми хромата несумњиво води много брже до добијања чистог радијума него до сада још опште уобичајено фракционисање бромида или чак хлорида.

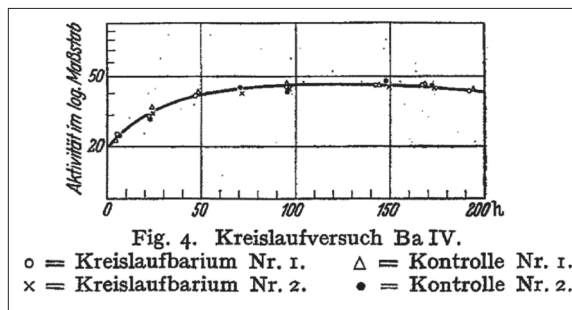
Случај 4. Описаћемо сада последњи експеримент с циљем хемијске идентификације активног Ва IV као баријума, наиме следећи „кружни/циклични процес“. Активни баријумови изотопи су додатком 3,5 g баријум-хлорида на уобичајени начин издвојени из дуже зраченог уранијума, након распада Ва II и Ва III преталожени, једна четвртина укупне количине је склоњена на страну, а с главном количином је изведен следећи циклус таложења баријума:

1. баријум-хлорид → 2. баријумова со ћилибарне киселина → 3. баријум-нитрат → 4. баријум-карбонат → 5. баријум-хлорид → 6. баријум-фери-манит¹³⁴ → 7. баријум-хлорид. Након што је наш баријум прошао кроз та многобројна кристална једињења, још једном је прекристалисан с циљем коначног пречишћавања, а истовремено је прекристалисан и раније склоњени и некоришћени баријум-хлорид, који је требало да служи као упоредни препарат. По две пробе од по 250 mg „циклусног“ и контролног препарата мерене су на истом бројачу. Резултат је приказан на сл. 4. „Циклусни“ и контролни

¹³³ *Примедба преводиоца:* Ова реченица делује прилично несувисло; у оригиналу: „Durch das Einschalten der großen, nicht gemessenen, dritten Chromatfraktion enthält die vierte praktisch überhaupt kein Thor X mehr.“

¹³⁴ Хтели бисмо да захвалимо господину професору Вил. Траубеу (Wilch. Traube) зато што нам је указао на ово интересантно комплексно органско баријумово једињење које је он први произвео.

препарати су унутар неизбежних варијација потпуно једнаки. Ва IV је ири свим кристализацијама остајао са својим неактивним изоџојом, баријумом.



Сл. 4. Кружни/циклички експеримент Ва IV

Б. Доказ да баријумови изоџоји настају и ири озрачавању њоријума неутронима.¹³⁵

В. Нека њиџања у вези нових резулџаџа; доказивање даљих фраџменџа уранијума.

Доказивање баријумске природе земноалкалних метала насталих након озрачивања уранијума и торијума отвара читав низ питања. Поменућемо сада нека од њих.

1. Да ли се нешто може рећи о атомским тежинама вештачких изотопа баријума?
 2. Да ли су баријумови изотопи из торијума исти као они из уранијума?
 3. Да ли је могуће једнозначно идентификовати продукте трансформација баријумових изотопа као изотопе лантана и церијума?
 4. Задржавају ли „трансурани“ свој досадашњи статус?
 5. Који су други фрагменти распада језгара уранијума и торијума?
1. Нашли смо да је време полураспада Ва III из уранијума 86 минута. При озрачавању неактивног елемента баријума неутронима детектован је један β-емитујући изотоп с временом полураспада од 85 минута и вероватном атомском тежином 139.¹³⁶ Потврдили смо настајање овог радиоизотопа баријума са наведеним временом полураспада из уранијума. Међутим, чак ни после шестодневног озрачивања није било сигурног доказа о појави неког активног продукта трансформације тог радиоактивног баријума. Ако је податак о атомској тежини радиоактивног баријума (139) тачан, тада се од њега не би могао очекивати никакав активан лантанов изотоп. Наиме, лантан с атомском тежином 139 представља стабилну атомску врсту. Ако је

¹³⁵ Део оригиналног текста под овим насловом је изостављен из превода јер он, с обзиром на то да се ради о озрачивању торијума, не доприноси битно „рашчишћавању пута“ ка открићу феномена фисије.

¹³⁶ Diebner u. Grassmann, *Künstliche Radioaktivität*, Leipzig: S. Hirzel 1939.

наш Ва III идентичан радиоактивном баријуму, у прилог чему јако говоре времена полураспада која се слажу, тада би наша, с резервом учињена претпоставка о изотопу лантана с временом полураспада од више дана, морала бити заблуда, настала као резултат неизбежног присуства дужеживућег Ва IV са својим поуздано доказаним продуктом трансформације. Ми сада сматрамо врло вероватним да је Ва III идентичан радиобаријуму,¹³⁷ тј. да вероватно има *ајомску ѿежину* 139. Ту претпоставку изгледа да сасвим потврђују неки нови експерименти.

Што се тиче других изотопа баријума, може се можда прихватити хипотеза да је Ва IV супстанција–родитељ у литератури описаног радиолантана с временом полураспада од 31–46 сати и вероватном атомском тежином 140.¹³⁸ Наиме, лантанов изотоп који настаје из нашег Ва IV има време полураспада од око 36 сати. Ако је наша претпоставка тачна, тада би се дугим озрачивањем обичног баријума јаким изворима неутрона, могло покушати, поред већ познатог 85-минутног радиобаријума, произвести и наш Ва IV, и затим истражити његову трансформацију у неки активни лантанов изотоп.

Још увек не можемо дати никакве исказе о могућим атомским тежинама краткоживућих баријумових изотопа, од којих је „Ва I“ још хипотетичан. Да бисмо искључили неспоразуме, још једном наглашавамо да су сва три изотопа које смо описали као Ва II, Ва III и Ва IV баријум, а не, рецимо, да би неки од њих могао бити стронцијум.

2. Ако се упореде времена полураспада која су Лизе Мајтнер и ови аутори утврдили за одређене „Ra“ – сада Ва-изотопе и њихове потомке из торијума, са Ва-изотопима и њиховим производима трансформација из уранијума, тада пре свега пада у очи сличност првих двају група.

Наведене схеме су:

За супстанције из уранијума:



За супстанције из торијума:



Код III. групе слагање је лоше; Ва III има време полураспада од 86 минута; за трећи баријум из торијума нађена су $3\frac{1}{2}$ – 4 сата. Упркос јако малих интензитета код непојачаних торијумових продуката, било би нам јако тешко да се одлучимо за претпоставку да време полураспада за трећи баријум из торијума може бити тако погрешно.

¹³⁷ *Примедба ѿреводиоца:* „Радиобаријум“ је помало нес(п)ретно изабрана скраћеница за „радиоактивни баријум“; основно питање у историји открића фисије било је да ли је продукт распада уранијумовог језгра радијум или баријум – (полу)речи „радио“ и „радијум“ су исувише сличне да не би изазвале евентуалну забуну, а та сличност је, што би рекао *Heinrich Böll* (Хајнрих Бел), „ни случајна ни намерна али/већ неизбежна“.

¹³⁸ Diebner u. Grassmann, I. c.

Интересантан и не тешко изводљив био би експеримент у којем би се помоћу јаких, дуже време употребљивих извора зрачења и код торијума тражио баријум који кореспондира дугоживућем Ва IV. Озрачивање радиоторијума, које би се изводило низ дана, сваки пут по неколико сати, морало би дати довољно дугоживуће супстанције. Велика активност радијумових изотопа ThX и Msth, који би за то време настали из торијума, могла би се потпуно или бар највећим делом одстранити помоћу низа баријум-хроматских фракционисања, као што је горе показано. Веома карактеристично понашање Ва IV могло би се тада лако препознати.

3. Још нисмо детаљно разматрали питање да ли се продукти трансформација активног баријума насталог из уранијума и торијума могу једнозначно идентификовати као изотопи лантана и церијума. Али, као што је наведено у нашем последњем саопштењу, активни продукт трансформације Ва II (у том раду названог Ра II) сигурно није актинијум и показује општа својства која се очекују од лантана. Овде треба извести даља систематска истраживања.
4. Важна тачка је питање о „трансуранима“ које су аутори детаљно истраживали заједно с Лизом Мајтнер. Задржавају ли они и даље свој досадашњи статус или су то елементи нижих редних бројева? У нашем последњем саопштењу опрезно смо указали на то да атомска тежина једног изотопа баријума и једног мазуријума, дакле, рецимо $138 + 101$, даје атомску тежину уранијума, 239. Уместо трансурана ека-ренијума до ека-платине¹³⁹ могло би се мислити на елементе од мазуријума до паладијума. Након неколико експеримената које смо учинили и према општем хемијском понашању трансурана ека-осмијума до ека-платине с једне, а нижих хомолога платине с друге стране, изгледа нам, међутим, искљученим да су ови нижи хомолози платинских метала присутни у „трансуранима“. Специјално, директно проверавање „ека-платине“ на паладијум дало је негативан резултат. Ни извесно померање супстанција ка нижим или вишим редним бројевима, као на молибден с једне, и сребро, с друге стране, не чини нам се прихватљивим. Што се сребра тиче, у директним експериментима је показано да ниједан од „трансурана“ не може бити сребро.

Могао би се тада замислити још низ галијум, германијум, арсен и селен. Од ових су, међутим, арсен, селен и германијум искључени на основу неких директних експеримената и њиховог општег понашања.

Стога смо сада опет мишљења да „трансурани“ треба да опстану. При томе можда морамо да уведемо ограничење када је реч о 60-дневној супстанцији коју су пронашли Хан, Мајтнер и Штрасман.¹⁴⁰ Код те супстанције још нисмо извели асигнацију, али смо по аналогiji мислили да је најлогичније

¹³⁹ *Примедба преводиоца:* Ека-ренијум је историјско име за трансурански елемент боријум (симбол Bh, атомски број 107), а ека-платина за дармштатијум (Ds, 110).

¹⁴⁰ O. Hahn, L. Meitner, F. Strassmann, *Naturwiss.* 26 (1938) 465.

сматрати да би то могао бити неки изомер ека-иридијума.¹⁴¹ Овде, међутим, треба извести посебне експерименте, јер је после доказивања цепања уранијума постало могуће да је 60-дневна супстанција нешто сасвим друго.¹⁴²

5. Ако сада „трансуране“ не видимо као фрагменте уранијумовог језгра, поред баријума, тада морамо да се питамо: који су то други фрагменти? Како се цепање очигледно не догађа по критеријуму атомских тежина, дакле рецимо образовањем мазуријума и суседних елемената, могло се мислити о цепању по критеријуму атомских бројева, при чему би истовремено могао бити емитован одређени број неутрона. Када се од уранијума с редним бројем 92 отцепи баријум с редним бројем 56, преостаје под наведеним претпоставкама елемент с редним бројем 36, дакле криптон. Овај би се могао трансформисати у рубидијум, стронцијум, итријум и можда још даље. *Од ових очекиваних елемената могао се удобно и сигурно идентификовати стронцијум.* Раствор озраченог уранијума третиран је са 150 mg стронцијума, таложењем водоник-сулфидом пажљиво је одвојен од трансурана и коначно сталожен амонијаком. Талог уранијума растворен је у 65-процентној азотној киселини и из раствора је додатком кључајуће азотне киселине исталожен стронцијум-нитрат. Стронцијум-нитрат је растворен у води, третиран са 60–70 mg баријума и одвојен од баријума из слабо сирћетно-киселог раствора помоћу амонијум-хромата. Ово раздвајање је потребно јер стронцијум-нитрат повлачи баријум настао при озрачивању. Стронцијум је исталожен из филтрата баријум-хромата као стронцијум-карбонат, растворен у хлороводоничној киселини, овај раствор је третиран са 10 mg итријума, и итријум је исталожен амонијаком без примеса карбоната. У филтрату је стронцијум сталожен као карбонат и затим мерен. Овај процес раздвајања искључује трансуране, уранијум, UX, UZ, баријум, из њега настали лантан, цер итд. као и итријум, цирконијум итд. који могу настати од стронцијума, а од земноалкалних метала такође и калцијум. Активност стронцијума добијеног из 4 g уранијума озрачиваног више дана, износила је увек више стотина јединица а опадање активности могло се пратити данима.

Тиме је доказано присуство стронцијума.

Из β -активног стронцијума мора настати итријум; с лакоћом смо успели да таложењем амонијаком без примеса карбоната издвојимо итријум настао распадом стронцијума. Затим је итријум очишћен поновним таложењем у присуству неактивног стронцијума. Итријумови талози настали на тај начин

¹⁴¹ *Примедба љеводиоца:* Ека-иридијум је историјско име за трансуран мајтнеријум (Mt, 109); Лизе није добила Нобелову награду, али је добила „свој елемент“.

¹⁴² *Примедба љеводиоца:* у овом делу текста (4.) има исувише кондиционала и речи као „можда“, „вероватно“, „није искључено“ да би се могао избећи утисак да је ауторима било јако стало да спасу своје „трансуране“ које су у низу ранијих година „откривали“ као на текућој траци. Данас су датуми открића свих наведених ека-елемената лоцирани у самом крају XX века.

имали су увек добро мерљиве активности чије су криве опадања праћене такође неколико дана, тако да се настајање итријума може сматрати сигурним.

Најзад је изведен и једноставан доказ за настајање племенијоог гаса и алкалног метала. Прво је 2–5 сати појачано озрачиван концентровани раствор 50 g уранил-нитрата у води. У току тог времена кроз раствор је продувана струја ваздуха различитих брзина. Та струја је после проласка кроз уранијумски раствор стизала у 20 cm дуги филтер од вате а затим у апсорпциони суд са слабо закисељеном водом. Након прекида озрачивања садржај апсорпционог суда третиран је са 50 mg цезијум-хлорида (рубидијум се није могао користити због своје природне β -активности), а затим је цезијум исталожен као цезијум-платина-хлорид и мерен. У филтрату цезијум-платина-хлорида је додатком стронцијума формиран карбонатни талог. И цезијумови и стронцијумови талози имали су добро мерљиве активности. У оба случаја радило се о прилично краткоживућим супстанцијама. Одговарајући раствори из експеримената без озрачивања неутронима били су потпуно неактивни. Очигледно је да је и у овим низовима трансформација реч о изотопским смешама, међутим још не можемо дати тачне исказе о њиховом броју и временима полураспада.

Осим директног доказа за настајање једног алкалног метала, помоћу ове апаратуре доказана је и појава једног племенитог гаса. Нисмо могли са сигурношћу установити да ли се при томе ствара криптон са из њега насталим рубидијумом–стронцијумом или ксенон са цезијум–баријумом. Нови, детаљнији експерименти треба да одлуче да ли се цепање уранијума примарно врши у баријум и криптон или у стронцијум и ксенон.

За време описивања наших последњих експеримената добили смо манускрипте два рада која ће бити објављена у *Nature*, а која су нам најљубазније послали аутори, Лизе Мајтнер и О. Р. Фриш, односно О. Р. Фриш. Мајтнер и Фриш су у њима дискутовали распад уранијумовог и торијумовог језгра у два приближно једнака фрагмента, нпр. у баријум и криптон, и на основу новијег Боровог модела капи за језгро установили могућност таквог процеса. О. Р. Фриш је већ извео и експериментални доказ за појаву таквих високо-енергетских фрагмената при озрачавању уранијума и торијума неутронима.

На крају бисмо желели да се опет захвалимо гђици К. Либер и гђици И. Боне за помоћ при бројним експерименталним истраживањима.

ЗАКЉУЧАК

1. Настајање баријумових изотопа из уранијума коначно је доказано.
2. Образовање баријумових изотопа установљено је и код торијума.
3. Учињени су искази о атомским тежинама неких од насталих баријумових изотопа.
4. Очигледно је да су неки од изотопа баријума из торијума идентични са онима из уранијума.
5. По нашем мишљењу „трансурани“ задржавају свој досадашњи статус.

6. Као други фрагменти распада до сада су идентификовани стронцијум и итријум.
7. Коришћењем погодне апаратуре доказана је и појава једног племенитог гаса, који са своје стране образује један алкални метал. Није могла да се донесе одлука да ли је при томе реч о ксенону–цезијуму или криптону–рубидијуму. У сваком од тих случајева би се затим образовали већ доказани продукти баријум–лантан.

Горе описани нови бројни продукти трансформација могли су се – тако ми мислимо – установити у релативно кратком времену са знатном сигурношћу само на основу искуства које смо, заједно са Лизом Мајтнер, стекли у ранијим систематским експериментима са трансуранима и производима трансформација торијума.

OTTO HAHN

From the natural transmutations of uranium to its artificial fission

Nobel Lecture, December 13, 1946

ОТО ХАН

Од природних трансмутација уранијума до његове вештачке фисије

Нобеловско предавање, 13. децембар 1946.

Година 1946. јубиларна је у историји хемијског елемента уранијума. Педесет година раније, у пролеће 1896, Анри Бекерел је открио необичне радијационе феномене овог елемента, који су тада названи општим именом „радиоактивност“.

Више од 100 година, уранијум, који је открио В. Х. Клапрот (*W. H. Klaproth*) 1789. године, имао је мирну егзистенцију као донекле редак али не нарочито интересантан елемент. После његовог укључивања у Периодни систем Менделејева и Лотар Мајера (*J. Lothar Meyer*), издвајао се од свих осталих елемената у једном посебном аспект: заузимао је у њему највише¹⁴³ место. То, међутим, само по себи тада још није било од неког нарочитог значаја.

Данас знамо да је баш такав положај уранијума на највишем месту од тада познатих хемијских елемената оно што му даје значајна својства по којима се он разликује од свих других елемената.

Одјек Бекерелових фундаменталних открића радиоактивности уранијума био је на почетку у научним круговима прилично слаб. Две године касније, она су, међутим, добила изузетан значај када су Киријеви успели да издвоје из уранијумових минерала две активне супстанције, полонијум и радијум, од којих се друга показала неколико милиона пута јачом од исте тежине уранијума.

Било је то само неколико година пре него што је објашњено прво изненађујуће својство ове „супстанције која зрачи“. Радиоактивни елементи распадају се у складу са одређеним правилима у друге активне елементе с различитим хемијским и физичким својствима, симултано емитујући честице, α - и β -зраке. Радерфорд је окарактерисао α -зраке као позитивно наелектрисана

¹⁴³ *Примедба преводиоца:* Ми бисмо уместо „највише“ рекли „последње“ место.

хелијумова језгра, након што је раније било показано да се β -зраци састоје од негативних елементарних честица, тзв. електрона.

Хипотезом о распаду атома, коју су сугерисали Радерфорд и Соди (*F. Soddy*) 1902. године, морао је бити одбачен постулат о недељивости хемијских елемената¹⁴⁴.

Паралелно с проучавањем радиоактивних дезинтеграционих процеса уранијума, који производе радијум, радијумову еманацију, тзв. активне депозите (талог), и полонијум, изведена су истраживања на торијуму, у то време другом највишем елементу Периодног система. Из торијума су добијени, на потпуно сличан начин, веома активни продукти распада: радиоторијум, мезоторијум, торијум Х итд. Постојао је и трећи низ продуката распада, актинијумов низ, који је, међутим, такође полазио од уранијума.¹⁴⁵

Систематским проучавањем продирања α -честица кроз танке слојеве материјала, Радерфорд је 1911. године могао да предложи модел језгра атомâ хемијских елемената. Према том гледишту, атоми елемената састоје се од позитивно наелектрисаног језгра, које садржи практично целокупну масу атома, а око којег (језгра) се крећу на релативно великим растојањима електрони, који неутралишу његово наелектрисање. Наелектрисање језгра једнозначно одређује место елемента у Периодном систему.

Реакције¹⁴⁶ радиоактивног распада су, дакле, промене језгара на које не утичу уобичајени физички или хемијски процеси.

Ми смо толико сигурни у непроменљивост ових природних закона радиоактивног распада, да на основу брзине промена можемо конструисати неку врсту „геолошког сата“. У ствари, крајња супстанција која настаје од уранијума, преко низа активних интермедијарних продуката, је стабилно олово; на основу његове количине настале из првобитно чистог минерала уранијума, могуће је израчунати старост минерала па према томе и геолошког депозита у којем је искристалисао. Исто важи и за торијум, који такође има као крајњи продукт једну врсту олова, иако различиту од „уранијумовог олова“.

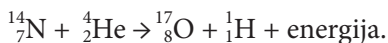
Истраживања су се даље наставила. И даље су се за решавање проблема у нуклеарној физици користиле α -честице. На основу Радерфордовог модела језгра схваћено је да су ове честице слободна хелијумова језгра. Са својом релативно великом масом од 4 (у поређењу са релативно малом електронском масом од око 1/1800) и са почетном брзином и до 15000 km/s оне чине пројектиле којима би било могуће продрети до језгара атомâ, неприступачних на други начин. И опет је генијални Радерфорд био тај који је направио следеће откриће које је

¹⁴⁴ *Примедба љреводиоца:* Тачније би било „атома“, а још прецизније „атомских језгара“, него „елемената“.

¹⁴⁵ *Примедба љреводиоца:* Овде, дакле, није реч о елементу актинијуму, већ о „актино-уранијуму“, ²³⁵U.

¹⁴⁶ *Примедба љреводиоца:* Дословно преведено, мада може изазвати забуну: (нуклеарне) реакције су сударни процеси, а то подразумева постојање сударних партнера тј. реактаната, а овде је реч о радиоактивном распаду, што је у ствари спонтана дезинтеграција језгара.

довело до изванредно важних резултата. У 1919. години он је успео да покаже да при бомбардовању азота високоенергетским α -честицама радијума-С,¹⁴⁷ језгро азота захвата једну алфа честицу, тј. језгро хелијума, док језгро водоника – протон – напушта новоформирано језгро. Процес се приказује једначином:

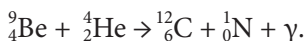


У овој једначини доњи индекси представљају нуклеарна наелектрисања, а горњи нуклеарне масе (атомске тежине). Преостала енергија дата је у форми кинетичке енергије ослобођеног протона, што показује да овај потиче из језгра.

Овде се први пут догодила вештачка трансмутација атомâ, у ствари изградња атомâ, јер је кисеоник масе 17 добијен од азота масе 14.

У наредним годинама откривен је велики број реакција које су следиле исту схему. Овај тип реакција са α -честицама није довео до трансмутација тешких елемената, јер је њихово велико нуклеарно наелектрисање позитивног знака довољно одбијало α -честицу да спречи њено продирање у језгро.

Година 1932. донела је даља важна открића: позитрона, тешког водоника и на крају – нипошто мање важног¹⁴⁸ – неутрона.¹⁴⁹ Откриће неутрона било је резултат детективског рада изведеног у три земље. Почетни импулс дали су Боте (Walther Bothe) и Бекер (Herbert Becker) у Немачкој; они су успели да детектују изузетно продорно зрачење за које су веровали да представља γ -зрачење настало при излагању берилијума α -честицама. Затим су у Француској Жолио-Киријеви доказали да „ γ -зраци“ који се јављају у експериментима Ботеа и Бекера ослобађају из једињења која садрже водоник језгра водоника (протоне) великих енергија, што γ -зраци не би могли да чине. Коначно је Чедвик у Енглеској дао коначно објашњење ових резултата: поред γ -зрака јављају се и ненаелектрисана неутрална атомска језгра с масом 1, која је назвао неутронима. Ток реакције је:



Након открића неутрона могао се лако објаснити већ низ година познат феномен изотопије. Хемијски елементи¹⁵⁰ се састоје од протона и неутрона. Број наелектрисаних протона одређује хемијску природу елемента: збир протона и неутрона одређује његову атомску тежину. Према томе, већи или мањи број неутрона не утиче на хемијску природу елемента, већ само одређује изотопске врсте атомâ, као оне које су биле познате дуго времена: различити изотопи олова, многи изотопи живе, два изотопа хлора, итд. Слично, тешки водоник, откривен 1932, изотоп је обичног водоника. Он у језгру има један протон и

¹⁴⁷ *Примедба преводиоца:* „Радијум С“ је у ствари изотоп бизмута, ²¹⁴Bi (атомски број 83).

¹⁴⁸ *Примедба преводиоца:* Енгл.: “last but not least”.

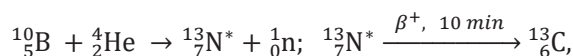
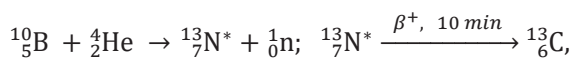
¹⁴⁹ *Примедба преводиоца:* Поново је Радерфорд био тај који је већ 1920. претпоставио постојање неутрона.

¹⁵⁰ *Примедба преводиоца:* Тачније, атомска језгра.

један неутрон па има масу 2 уместо 1. Највиши хемијски елемент познат у то време, уранијум, није једноставан елемент,¹⁵¹ већ садржи изотопе од којих је ^{238}U језгро–родитељ радијумовог, а ^{235}U протаكتинијумовог и актинијумовог низа.

Ускоро се показало да ће неутрони бити веома погодни пројектили за трансмутације атома: они нису наелектрисани па стога не трпе одбијање позитивних језгара елемената. Док се код Радерфордовога (α, p) распада – (α, p) је ознака за реакцију у којој се захвата α -честица а емитије протон – готово увек формирају стабилни облици атома какви се јављају у природи, код (α, n) промена – захватања α -честице и емисије неутрона – Жолио-Киријеви су уочили потпуно нов феномен. Током 1934. године они су открили да се при озрачивању неких елемената α -честицама појављују не само неутрони него и позитрони, тј. позитивни електрони, који се емитију чак и по престанку озрачивања α -честицама. Емисија позитрона опадала је на исти начин какав је већ био уочен при распаду природних радиоактивних елемената. Створени су вештачки радиоактивни елементи. Први елементи код којих је запажена та „вештачка“ радиоактивност после озрачивања били су бор и алуминијум.

Од бора је настао радиоактивни азот; од алуминијума радиоактивни фосфор; ови су се даље трансформисали редом у угљеник односно силицијум уз емисију позитрона, а према реакцијама:



(* означава радиоактивни изотоп).

Овим је отворено ново и велико поље даљих истраживања. У исто време суштински су проширене експерименталне могућности за испитивања у нуклеарној физици.

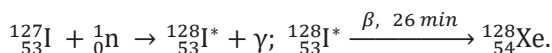
Док су до тада једино средство за изазивање вештачких нуклеарних реакција биле честице из природно радиоактивних елемената, сада су се могли додатно користити високонапонски уређаји – Ван де Графов (*Van de Graaff*) генератор и циклотрон. Могло се извести све више и више интензивних озрачивања и реализовати све више и више нових реакција.

У то време, међутим, наставило се са коришћењем радијум-берилијумових смеша, јер су оне биле веома погодан, иако можда не нарочито интензиван извор неутрона за даља истраживања, посебно недуго пре тога откривене вештачке радиоактивности. Овакви извори неутрона припремани су мешањем добро осушене фино спрашене соли радијума са најфинијим могућим прахом берилијума, и уношењем смеше у евакуисану стаклену или челичну цев која се затим затапала. Сам уранијум био је важан само због тога што се из њега добијао радијум.

¹⁵¹ *Примедба преводиоца:* Енгл.: *simple element*, у смислу да садржи само једну врсту језгара.

Посебно треба истаћи италијанског научника Фермија који је први схватио велики значај неутрона за изазивање нуклеарних реакција: Ферми је са сарадницима озрачивао неутронима практично све елементе Периодног система, стварајући тако мноштво вештачких радиоактивних елемената.

Генерално, а нарочито онда када се радило са спорим¹⁵² неутронима, реакција је почињала захватањем неутрона језгром. При томе је у многим случајевима настајао нестабилан изотоп озраченог елемента, који је прелазио у следећи елемент уз емисију β -зрака. Овај последњи је по правилу био неки стабилан атом, какви се јављају међу познатим хемијским елементима, нпр.



Ферми је са сарадницима наставио с експериментима кроз цели Периодни систем, све до уранијума. При томе су открили много трансмутација насталих неутронима, укључујући и неке веома брзе. Они су пошли од очигледне претпоставке да примарно настају вештачки, радиоактивни, краткоживући уранијумови изотопи; како ови емитују β -зраке, Ферми је извео закључак о стварању тзв. „трансурана“ чији су представници елемент 93, непознат у природи, а вероватно и још виши елемент 94.

Фермијеви докази нису били опште прихваћени. Указано је на то да се нпр. у случају тзв. 13-минутног елемента – који је детектован са највећом сигурношћу – не може искључити могућност да је реч о изотопу елемента 91, тј. протактинијума.¹⁵³

У таквом тренутку, Лизе Мајтнер и ја смо решили да поновимо Фермијеве експерименте да бисмо решили питање о томе да ли је или није 13-минутни елемент протактинијумов изотоп. На то смо се одлучили тим пре јер смо, с обзиром на откриће протактинијума (1917), били упознати са његовим хемијским својствима. Штавише, β -радиоактивни изотоп елемента 91 био нам је добро познат као уранијум Z, који сам ја открио, а који је имао погодно време полураспада од 6,7 h, и био доступан из уранијумових соли.

Уз помоћ „методе индикатора“ могли смо да докажемо без сумње да Фермијев 13-минутни елемент није ни протактинијумов, нити уранијумов, актинијумов или торијумов изотоп. У складу са научним ставовима тог времена, Фермијево становиште да је 13-минутни елемент представник елемента 93, тј. да је „трансуран“, требало је да буде коректно.

¹⁵² Како је Ферми први показао, такви спори неутрони, мале енергије, могу се добити пропуштањем примарно високоенергетских неутрона кроз супстанције које садрже велику количину водоника. Кинетичка енергија неутрона се тада предаје језгрима водоника путем еластичних судара.

¹⁵³ Из другог правца (Ида Нодак) стигао је приговор да би прво морали бити искључени сви елементи Периодног система, пре него што би било могуће поставити закључак да је добијен елемент 93. Ова примедба није била схваћена озбиљно пошто је изгледало да противречи свим поставкама нуклеарне физике.

Овде треба да истакнемо да у то време нико није разматрао друге могућности. Од открића неутрона и примене вештачких извора зрачења, откривен је велики број најнеобичнијих нуклеарних реакција; производи су увек били или изотопи озрачене супстанције, или њени најближи, или највише за два места удаљени суседи у Периодном систему; могућност распада тешких атомских језгара атома у различита лакша, сматрана је потпуно искљученом.

У експериментима са Фермијевим 13-минутним елементом и проверавајући друге, мање сигурне резултате Фермија, нашли смо (касније у сарадњи са Ф. Штрасманом) да су феномени повезани са озрачивањем највишег елемента у Периодном систему много компликованији него што се у почетку претпостављало. Ферми је са сарадницима већ у првом саопштењу описао две краткоживуће β -радиоактивне врсте атома (полуживот¹⁵⁴ 10 s и 40 s) које су они природно сматрали вештачким изотопима уранијума насталим од оригиналног уранијума захватом неутрона. Лизе Мајтнер и ја смо нашли још и супстанцију са полуживотом од 23 минута, коју смо поуздано идентификовали као један од вештачких радиоактивних изотопа уранијума. Код Фермијевих супстанција кратког живота, изотопија с уранијумом се може само претпоставити, али не и доказати. 23-минутни елемент јављао се у тзв. „резонантном процесу“ без било каквих других радијационих услова.¹⁵⁵

Као резултат вишегодишњег рада ми (Хан, Мајтнер, Штрасман) смо коначно добили велики број вештачких радиоактивних врста атома, које су све, како је изгледало, биле формиране директно или индиректно β -распадом од, како се претпостављало, краткоживућих уранијумових изотопа, и које би све, према томе, морале представљати тзв. „трансуране“ – елементе више од уранијума.

Према свом хемијском понашању, они су се могли разврстати у различите групе, и како су у многим случајевима могле бити директно детектоване узастопне трансформације из β -радиоактивних родитељских супстанција, изведене су схеме распада све до елемената 95 и 96. Резултати су увек потврђивани у поновљеним експериментима које су извели други истраживачи.

Независно од управо поменутих истраживања трансурана које су извели Хан, Мајтнер и Штрасман, током 1937. и 1938. године Кири и Савић су описали тзв. 3,5-сатну супстанцију коју су добили озрачивањем уранијума неутронима, и чија се хемијска својства нису могла лако одредити. Према Кири и Савићу, супстанција је, изгледа, припадала ретким земљама, али то није био актинијум; показивала је више сличности са лантаном и могла се од њега раздвојити само „фракционом кристализацијом“. Уз мало оклевања, Кири и Савић су одлучили да супстанцију укључе у трансурански низ, али су могућности које су они предложили изгледале тешко разумљиве и незадовољавајуће.

¹⁵⁴ *Примедба њеводиоца:* Уместо „полуживот“ касније се одомаћио термин „време полураспада“.

¹⁵⁵ *Примедба њеводиоца:* Крај реченице, „... без икаквих других радијационих услова.“ је нејасан.

Како је 3,5-сатни елемент укључен у трансурани, покушао сам, заједно са Штрасманом, да га добијем. После пажљивих експеримената дошли смо до необичних/значајних¹⁵⁶ резултата, који се могу формулисати приближно на овај начин: „Поред трансурани које су описали Хан, Мајтнер и Штрасман, као резултат две сукцесивне α -емисије настају три вештачка β -активна радијумова изотопа са различитим временима полураспада, која (изотопа) се даље трансформишу у вештачке β -активне актинијумове изотопе“. Закључак да настају радијумови изотопи био је једино могућ јер су, према хемијским својствима, могли доћи у обзир само радијум и баријум. Баријум је био, са гледишта физике у том тренутку, искључен, па је преостао само радијум.

Раздвајање ове активне групе извршено је баријумовим таложењем; не, међутим, у облику баријум-сулфата, који својом великом површином јако апсорбује друге елементе, већ, на сугестију Штрасмана, у облику баријум-хлорида, који врло добро кристалише из концентроване хлороводоничне киселине и који се таложи неконтаминиран другим супстанцијама.

У исто време, настајање радијума при овим условима озрачивања било је веома чудно: α -распади нису никада били запажени код неутрона ниске енергије, а овде, као и код трансурани, јављао се симултано знатан број изотопа.

Експерименти су настављени у различитим правцима. Препарати су били, међутим, увек врло слаби и α -зраци најстабилнијег од нових изотопа били су тако јако апсорбовани да су дебљи слојеви показивали само слаб принос радијације. Зато је учињен напор са циљем што је могуће потпунијег одвајања вештачког „радијума“ од баријума који је био додат као носач, да би се добио узорак лакши за мерење. Ово је учињено фракционом кристализацијом, коришћењем методе госпође Кири, методе коју смо добро познавали већ низ година. Неких 30 година раније сам са Лизом Мајтнер фракционом кристализацијом био одвојио радијумов изотоп мезоторијум од баријума. Касније, уз асистенцију низа сарадника, били су систематски испитивани закони који се односе на формирање мешовитих кристала радијумових и баријумових соли.

Покушаји да се наш вештачки „радијумов изотоп“ на овај начин раздвоји од баријума били су неуспешни; није постигнуто никакво обогаћење „радијума“. Природно је било да неуспех припишемо изузетно малим интензитетима наших препарата. Увек је у питању било само неколико хиљада атома, који су се Гајгер–Милеровим бројачем могли детектовати само као појединачне честице. Овако мали број атома могао се повући великим вишком неактивног баријума, а да се не запази ни повећање ни смањење,¹⁵⁷ чак и у случају када је баријум таложен у облику баријум-хлорида, који се таложи у врло чистој форми.

Да бисмо ово проверили, поновили смо исти експеримент с природним изотопима радијума, мезоторијумом и торијумом X, слабог интензитета зрачења. Ове супстанције су биле најпажљивије ослобођене сваког трага родитељске супстанције и продуката распада, и систематским разблаживањем узорци су припремљени тако да се могу детектовати Гајгер–Милеровим бројачем.

¹⁵⁶ *Примедба преводиоца:* Енгл. “remarkable”.

¹⁵⁷ *Примедба преводиоца:* Мисли се на повећање и смањење радиоактивности.

Кристализације су изведене хлоридима, бромидима и хроматима, увек са одговарајућом баријумовом соли као носачем.

Резултат је био онакав какав се очекивао за радијум, мезоторијум и торијум Х који су били концентрисани у првој фракцији поменутих соли, и то у количинама какве смо очекивали на основу нашег претходног искуства. Овим је доказано да се неколико атома природних изотопа радијума понашају на исти начин као интензивни препарати.

Коначно смо прешли на директне „индикаторске експерименте“. Измењали смо чисте природне радијумове изотопе са нашим вештачким „радијумовим“ изотопима, претходно такође ослобођеним од њихових продуката распада, а смешу фракционисали на исти начин као пре. Резултат је био такав да су се природни радијумови изотопи могли одвојити од баријума, док се вештачки није могао одвојити.

Проверили смо резултат на још један начин. Ако су вештачки изотопи земноалкалног типа били радијум, тада би продукти распада настали директно β -емисијом требало да садрже актинијум: из елемента 88 требало би да настане елемент 89. Ако је с друге стране то био баријум, тада би требало да настане лантан: следећи виши елемент у односу на 56, је елемент 57. Помоћу чистог актинијумовог изотопа мезоторијума-2 извели смо „индикаторски експеримент“ тако што смо мезоторијум-2 измешали са једним од познатих примарних продуката распада вештачких изотопа радијума, и затим извршили хемијско одвајање актинијума од лантана помоћу методе госпође Кири. За време фракционисања лантан-оксалата са актинијумом, последњи се акумулира у крајњој фракцији. Ово се заиста догодило са актинијумовим изотопом мезоторијумом-2. Продукти распада нашег тзв. „радијумовог изотопа“ остали су, међутим, са лантаном. Тако је утврђено да је земноалкални изотоп, за који смо веровали да је радијум, био у ствари вештачки радиоактивни баријум; лантан је могао настати само од баријума а не од радијума.

Да бисмо били сасвим сигурни, извели смо тзв. „циклус“ са баријумом. Најстабилнији од активних изотопа, сада идентификован као баријум, ослобођен је од активних продуката распада и других нечистоћа рекристализацијом са неактивним баријумом; једна четвртина укупне количине задржана је за поређење, а три четвртине су подвргнуте следећем циклусу таложења баријума: Ва-хлорид $\rightarrow$ Ва-сукцинат¹⁵⁸ $\rightarrow$ Ва-нитрат $\rightarrow$ Ва-карбонат $\rightarrow$ Ва-фери-манит $\rightarrow$ Ва-хлорид. Резултујући Ва-хлорид, настао проласком кроз овај низ једињења од којих су многа лепо кристалисала, и рекристалисани препарат за поређење мерени су алтернативно, коришћењем истог бројача, при истим тежинама и истим дебљинама слојева. Почетна активност и њен пораст као резултат настајања активног лантана били су, у оквиру граница грешке, исти код оба препарата: кристализација тако много и тако различитих соли није довела до одвајања активног баријума од носача. Могло се једино закључити да су активни продукт и носач хемијски идентични, тј. да је то баријум.

¹⁵⁸ Примедба преводиоца: Енгл. „succinate“ – со ђилибарне киселине, $\text{HOOC-CH}_2\text{CH}_2\text{-COOH}$.

У време првог објављивања ових експеримената, који су „били у супротности са свим феноменима запаженим до сада у нуклеарној физици“, (6. јануар 1939) поменути индикаторски експерименти нису били у потпуности завршени, и ми смо се зато били опрезно изразили. Као другог партнера у новом процесу претпоставили смо елемент са атомском тежином од око 100, јер би у том случају збирна атомска тежина била она уранијума, „на пример, $138 + 101$ (нпр. елемент 43) даје 239!“

Након што смо имали у руци комплетна мерења, као и „циклус“, могућност грешке била је још више искључена.

Комплетиран тестови и горепоменути „циклус“ објављени су у другом саопштењу (10. фебруар 1939). Ту се такође описује цепање елемента уранијума и докази за то су изведени помоћу индикаторских тестова аналогних горе описаним. Указано је на детекцију једног инертног гаса и алкалног метала насталог од њега; установљена је природа гаса и његово одвајање од уранијума постигнуто је помоћу струје ваздуха која је прелазила преко уранијума током озрачивања. У самом уранијуму идентификовани су активни стронцијум и активни итријум.

Непосредно после прве публикације о настанку баријума из уранијума, објављен је као прво саопштење, рад Лизе Мајтнер и О. Р. Фриша у коме је могућност распада тешког атомског језгра у два лакша, са тоталним наелектрисањем једнаким ономе код оригиналног језгра, била објашњена помоћу Боровог модела оригиналног језгра.¹⁵⁹ Мајтнер и Фриш су на основу криве дефекта масе елемената у Периодном систему такође проценили изузетно велику количину ослобођене енергије која се очекује од ове реакције. Прво Фриш, а мало затим Ф. Жолио експериментално су верификовали велику кинетичку енергију одбијања фрагмената насталих цепањем. Мајтнер и Фриш су ускоро доказали да активни продукти цепања, претходно сматрани трансуранима, нису у ствари били трансурани, него фрагменти настали цепањем. Пошло им¹⁶⁰ је за руком да акумулирају ове фрагменте „одбијањем“ изван озраченог уранијума.

Убрзо је следио читав низ публикација из европских и америчких института нуклеарне физике које (публикације) су потврђивале и проширивале описане експерименте.

Дакле, процес тече тако да се језгро уранијума са наелектрисањем 92 дели на два језгра средње величине.¹⁶¹ Ако је једно од њих баријум, који има нуклеарно наелектрисање 56, тада мора бити произведен у исто време и криптон са нуклеарним наелектрисањем 36. Заједно ова два језгра дају збир 92. Оба имају, међутим, као што се лако може видети из маса уранијума и стабилних изотопа баријума и криптона који се јављају у природи, сувише велику масу, па тако и вишак неутрона. Због тога они треба да пређу у стабилне елементе са већим нуклеарним наелектрисањем уз емисију β^- -зрака; и, у ствари, како су

¹⁵⁹ *Примедба љреводиоца:* Реч је о „моделу течне капи“; „оригинално“ = „почетно“ = „уранијумово“ језгро.

¹⁶⁰ *Примедба љреводиоца:* Фришу и Жолиоу.

¹⁶¹ Израз “nuclear fission” (*Kernspaltung; fission nucléaire*) потиче од Мајтнерове и Фриша.

наши каснији експерименти показали, они понекад постижу стабилност преко великог броја нестабилних интермедијерних продуката распада.

Највиши стабилни изотоп криптона има масу 86. При фисији уранијума, производи се, између осталих атома, нестабилни криптон са масом 88. Уранијум 235 одговоран је за фисију индуковану термалним неутронима, као што је то први схватио Бор; ова фисија има далеко највећи удео. Ако нема споредних реакција, тада маса другог фисионог продукта који кореспондира криптону 88, тј. баријума, треба да је $236 - 88 = 148$. Како највиши стабилни изотоп баријума има масу 138, првопоменути продукт је за бар 10 јединица тежи. Штрасман и ја смо већ поменули, у нашем другом саопштењу, могућност стварања слободних неутрона у фисионом процесу. Да је то заиста и случај први је експериментално установио Ф. Жолио.

Истраживања су настављена у брзом темпу, и са хемијске и са физичке стране. Само годину дана после првог саопштења о добијању баријума из уранијума, објављена је у *Reviews of Modern Physics* (САД) библиографија о цепању тешких језгара (*Nuclear Fission*, L. A. Turner-a) у којој је поменуто готово 100 публикација из ове сфере.

За време Другог светског рата, у Кајзер Вилхелм институту за хемију систематски су истраживане веома збуњујуће фисионе реакције с циљем њиховог хемијског разјашњења, а откривене су и бројне нове реакције. Јапански истраживачи нашли су да се фисија уранијума одвија много симетричније када се користе брзи неутрони уместо спорих. На почетку 1945. били смо у стању да направимо табелу (табела 3) која садржи, као директне или индиректне продукте фисије уранијума, 25 различитих елемената, почев од 35 (бром) до 59 (празеодим), у облику од око 100 активних врста атома. Активни атоми, за које смо до 1939. године веровали да су трансурански, били су сви фисиони продукти и њихови активни следбеници, а не елементи са атомским бројем већим од уранијума!

Табела 1. Атомске тежине неких природних изотопа и вештачких изотопа произведених нуклеарном фисијом, када вишак неутрона није отпуштен

Елементи	Природни изотопи	Изотопи који се јављају у фисији уранијума
54 Ксенон	124, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136	139 (нестабилан) заједно са
³⁸ Стронцијум 92	84, 85, 87, 88	⁹² (нестабилан) 236
36 Криптон	78, 80, 82, 83, 84, 86	88 (нестабилан) заједно са
⁵⁶ Баријум 92	130, 132, 134, 135, 136, 137, 138	¹⁴⁸ (нестабилан) 236

92 = нуклеарно наелектрисање уранијума = сума нуклеарних наелектрисања фрагмената

236 = масени број уранијума 235 + 1 неутрон

Због природе проблема, рад физичара одвијао се у различитим правцима. Нарочито је важно с тим у вези горе поменуто истраживање Жолиоа у којем је у пролеће 1939. експериментално доказано да се у фисионом процесу појављују уз нове елементе (увек два) и неутрони.

Како се деловањем неутрона на уранијум ослобађају нови неутрони, ови, ако погоде атоме уранијума, производе даље фисије итд. Ако се производи више од једног новог неутрона, а процес се подеси тако да сви новонастали неутрони погађају уранијумове атоме, имамо тада ланац поновљених фисионих реакција, које слично снежној лавини иницираној грудвом, може достићи енормне димензије. Тек тиме је практична примена атомске енергије дошла у домен могућности. Први који је указао на то био је С. Флиге (*S. Flügge*), који се касније придружио Кајзер Вилхелм институту за хемију.

Табела 2. Фисиони продукти уранијума, елементи у опсегу између 35 и 42 (s – секунда, min – минут, h – сат, d – дан, a – година)

	Br 35	Ar 36	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42
83	140 ^{min} →	113 ^{min} ↓ стаб.						
84	30 ^{min} →	стаб.						
85	3 ^{min} →	4,6 ^h	стаб.					
86	•	стаб.						
87	50 ^s →	75 ^{min} →	6·10 ^{10a} →	стаб.				
88		175 ^{min} →	18 ^{min} →	стаб.				
89		2,5 ^{min} →	15 ^{min} →	55 ^d →	стаб.			
90		? →	? →	5 ^a →	60 ^h →	стаб.		
91		? →	? →	10 ^h →	50 ^{min} ↓ 57 ^d	стаб.		
92		? →	80 ^s →	2,7 ^h →	3,5 ^h →	стаб.		
93						65 ^d →	55 ^d ↓ стаб.	
94		? →	? →	2 ^{min} →	20 ^{min} →	стаб.		
95						17 ^h →	75 ^{min}	
96		? →	? →	7 ^{min} →	11,6 ^h →	стаб.		
97		? →	? →	~8 ^h →	>100 ^d →	26 ^d →	• →	стаб.

Око десет година раније, Жолио је своје нобеловско предавање закључио следећим речима: „Ако, окрећући се прошлости, бацимо поглед на све убрзанији прогрес остварен науком, дужни смо да мислимо о томе да ће научници, изградњом и разградњом елемената по својој вољи, бити способни да изведу трансмутације експлозивног типа, праве хемијске ланчане реакције. Ако пође за руком да се овакве трансмутације прошире на велику количину материје, може се замислити енормно ослобађање употребљиве енергије. Али,

Табела 3. Сумарни приказ фисионих продуката уранијума који су познати у Кајзер Вилхелм институту за хемију с почетка 1945. године (s – секунда, m – минут, h – сат, d – дан, a – година)

$Z \rightarrow$ $M \downarrow$	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	--	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
83		$140^m \rightarrow$	$113^m \downarrow$ стаб.												170^m
84		$30^m \rightarrow$	стаб.		стаб.										
85		$3^m \rightarrow$	$46^h \rightarrow$	стаб.											
86		.	стаб.		стаб.										
87		$50^s \rightarrow$	$75^m \rightarrow$	$6 \cdot 10^{10} d$	стаб.										
88			$175^m \rightarrow$	$18^m \rightarrow$	стаб.										
89			$2,5^m \rightarrow$	$15^m \rightarrow$	$55^d \rightarrow$	стаб.									
90			$? \rightarrow$	$? \rightarrow$	$5^d \rightarrow$	$60^h \rightarrow$	стаб.								
91			$? \rightarrow$	$? \rightarrow$	$10^h \rightarrow$	$50^m \downarrow$ $57^d \rightarrow$	стаб.								
92			$? \rightarrow$	$80^s \rightarrow$	$2,7^h \rightarrow$	$3,5^h \rightarrow$	стаб.		стаб.						
93							$65^d \rightarrow$	$55^d \downarrow$ стаб.							
94			$? \rightarrow$	$? \rightarrow$	$2^m \rightarrow$	20^m	стаб.		стаб.						
95							$17^h \rightarrow$	$75^m \rightarrow$	стаб.						
96			$? \rightarrow$	$? \rightarrow$	$7^m \rightarrow$	$11,6^h \rightarrow$	стаб.		стаб.		стаб.				
97			$? \rightarrow$	$? \rightarrow$	$6 \cdot 10^h \rightarrow$	$100^d \rightarrow$	$2,6^d$	.	стаб.						
98							.	.	стаб.		стаб.				
99									$67^h \rightarrow$	$66^h \downarrow$ long $\rightarrow$	стаб.				
100							.	.	стаб.		стаб.				
101									$14,6^m \rightarrow$	$14^m \rightarrow$	стаб.				
102									$12^m \rightarrow$	.	стаб.		стаб.		
103											$15^d \rightarrow$	$50^m \downarrow$ стаб.			
104										.	стаб.		стаб.		
105									$5^m \rightarrow$	$15^m \rightarrow$	$4^h \rightarrow$	$34^h \rightarrow$	стаб.		
106											$100^d \rightarrow$	$45^s \rightarrow$	стаб.		стаб.
107												.	(13^h)	стаб.	
108											$4^m \rightarrow$	$25^m \rightarrow$	стаб.		стаб.
109												.	(13^h)	стаб.	
110												.	стаб.		стаб.
111													$26^m \rightarrow$	$7,5^d \rightarrow$	стаб.
112													$17^h \rightarrow$	$32^h \rightarrow$	стаб.
113														.	$50^m \downarrow$ стаб.
114														$20^m \rightarrow$	стаб.
115															$56^h \rightarrow$
116														.	стаб.
117															$170^m \rightarrow$
118															
119															
120															
121															
	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	--	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd

In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	--	Sm	Eu	← Z ↓ M
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	
117 ^m →	стаб.														117
•	стаб.														118
•	стаб.														119
•	стаб.		стаб.												120
	11 ^d →	стаб.													121
•	стаб.		стаб.												122
	80 ^h →	стаб.	стаб.												123
•	стаб.		стаб.		стаб.										124
	70 ^m →	•	стаб.												125
	20 ^m →	•	стаб.		стаб.										126
		80 ^h	(90) ^d (93) ^h →	стаб.											127
		•	стаб.		стаб.										128
		42 ^h →	32 ^d ↓ 72 ^m →	•	стаб.										129
		•	стаб.		стаб.		стаб.								130
			1,2 ^d ↓ 2,5 ^m →	8 ^d →	стаб.										131
		5 ^m →	77 ^h →	24 ^h →	стаб.		стаб.								132
		10 ^m →	60 ^m →	20 ^h →	5 ^d →	стаб.									133
			43 ^m →	54 ^m →	стаб.		стаб.								134
			15 ^m →	6,6 ^h →	10 ^m ↓ 9,5 ^h →	5 ^a →	стаб.								135
				1,8 ^m →	стаб.		стаб.		стаб.						136
			2 ^m →	30 ^a →	3,8 ^m →	long	стаб.								137
					17 ^m →	33 ^m →	стаб.		стаб.						138
					45 ^a →	7 ^m →	87 ^m →	стаб.							139
					?→	40 ^a →	13 ^d →	40 ^h →	стаб.						140
					?→	?→	6 ^m →	70 ^m →	15 ^d →	стаб.					141
					?→	?→	18 ^m →	3,5 ^h →	стаб.		стаб.				142
								15 ^m →	40 ^h →	13 ^d →	стаб.				143
								•	310 ^d →	17 ^m →	стаб.		стаб.		144
								•	4 ^h →	100 ^d →	стаб.				145
	стаб.							•	15 ^m →	25 ^m →	стаб.				146
стаб.												•	стаб.		147
	стаб.										стаб.				148
272 ^m ↓ стаб.	стаб.												стаб.		149
	стаб.										стаб.		стаб.		150
117 ^m →	стаб.													стаб.	151
•	стаб.												стаб.		152
•	стаб.													стаб.	153
•	стаб.		стаб.										стаб.		154
	11 ^d →	стаб.													
In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	--	Sm	Eu	

нажалост, кад би се ово проширило на све елементе наше планете, могле би се само са страхом посматрати последице неконтролисања такве катаклизме. Астрономи понекад запажају да се звезда средње величине изненада повећа; звезда невидљива голим оком може постати врло сјајна и видљива и без телескопа – то је појава *Nova*-е. Тај изненадни бљесак звезде можда је последица трансмутација експлозивног карактера сличних онима које наша разиграна машта поима сада – процес који ће истраживачи, ван сваке сумње, покушати да реализију, предузимајући, надамо се, неопходне мере опреза!“

Оно што је десет година раније било само делић наше „разигране маште“, већ је постало у извесном степену претећа стварност. Енергија нуклеарних физичких реакција је стављена у руке човека. Хоће ли она бити искоришћена као дело слободне научне мисли за друштвени напредак и побољшање животних услова човечанства? Или ће бити злоупотребљена да разори оно што је човечанство градило хиљадама година? Одговор мора бити дат без оклевања, и несумњиво је да ће се научници света борити за прву алтернативу.

ПОГОВОР

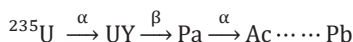
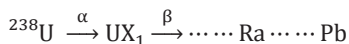
У претходним параграфима дали смо општи приказ тога како је истраживање природне радиоактивности уранијума довело до вештачког цепања тог елемента. Али то није исцрпilo могућности уранијума. Уранијум се претежно састоји од два изотопа атомских тежина 235 и 238. Први је у смеси присутан само у односу 1/140; међутим, горе описани фисиони процес, који је изазван нарочитом продорношћу „спорих“ неутрона, треба углавном да се припише његовом ретком изотопу. Већ је поменуто да су Лизе Мајтнер и аутор овог текста били у стању да идентификују, после озрачивања уранијума неутронима, супстанцију са временом полураспада од 23 минуте као несумњиво изотоп уранијума. (Краткоживући изотопи, које смо, прво Ферми, а после и ми, сматрали вештачким уранијумовим изотопима, били су у ствари фисиони продукти.) 23-минутни уранијум произведен је у тзв. резонантном процесу неутронима одређене брзине. Како ова супстанција емитује β -зраке, *морао* би бити произведен представник елемента 93, а то је стварни трансуран. Иако смо га тражили, нисмо били у могућности да га детектујемо у врло слабирепаратима које смо имали у то време. Касније је он идентификован у САД као β -емитер са временом полураспада од 2,3 дана. Према томе, он има атомску тежину 239. Како овај истински трансуран 93 такође емитује β -зраке, мора се закључити да се формира и елемент 94, следећи трансуран. Ово је релативно дугоживући α -емитер (време полураспада 24000 година). Амерички научник Сиборг му је дао име плутонијум, док је елемент 93 назвао нептунијум¹⁶². Јавља се и други изотоп елемента 93; он је произведен на други

¹⁶² *Примедба преводиоца*: Предложено је да елемент *нейптунијум* добије име по планети Нептун, који је прва планета иза Урана (по којој је елемент *уранијум* својевремено добио име).

начин од уранијума ^{238}U , на име у тзв. (n,2n) процесу помоћу неутрона велике енергије: један неутрон, тако да кажемо, пролазећи кроз уранијумово језгро избацује други. Резултат је β -емитујући изотоп уранијума масе 237, који се према томе трансформише у други нептунијумов изотоп са временом полураспада од неколико милиона година.

Табела 4. Трансмутације уранијума;
(s – секунда, m – минут, h – сат, d – дан, a – година)

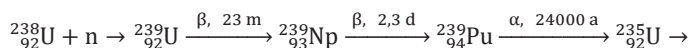
I Природни



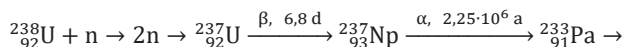
II Вештачки

(i) Фисиони процеси са спорим и брзим неутронима, до (према ономе што је до сада познато) 25 елемената у око 100 врста атома.

(ii) Захвaт неутрона:



(iii) Губитак неутрона:



Дакле, понашање уранијума при озрачивању неутронима различитих брзина, како брзих тако и спорих, веома је компликовано (погледати табелу 4). Поред природног процеса цепања, које се одвија у току озрачивања, брзином независном од свих осталих реакција, дешава се следеће:

(1) Нуклеарна фисија с формирањем бројних вештачких атома свих елемената између 30 и 64.

(2) Емисија вишка неутрона током фисионог процеса, што чини могућом ланчану реакцију.

(3) Резонантни захват неутрона одређене енергије уранијумом ^{238}U , с формирањем уранијума ^{239}U који се даље трансформише у елементе нептунијум и плутонијум.

(4) Отпуштање вишка неутрона из ^{238}U и настајање ^{237}U , који такође формира један изотоп нептунијума.

Тако у процесу (1) спори (термални) неутрони углавном погађају ретки изотоп ^{235}U ; процес (3) је конкурентан процесу (1), јер се приликом резонантног процеса (3) неутрони захватају пре него што се успоре и достигну брзину термалног кретања. Ствар је експерименталне технике да се овај за-

Слично, *илујонијум* је назван по Плутону, који долази из Нептуна.

хват спречи што је више могуће да би се олакшала ланчана реакција. С друге стране, додатни неутрони, произведени у фисионом процесу (2) потпомажу резонантни процес, а тиме и настајање плутонијума. Ако је овај последњи елемент добијен у довољној количини помоћу споре контролисане ланчане реакције изведене на широкој скали [у тзв. „гомили“ (“*pile*”)] и одвојен од уранијума, тада он такође служи као покретач ланчане реакције. Исто важи и за чисти ^{235}U након што је одвојен од изотопа 238, јер се са ^{235}U не дешава резонантни процес који спречава ланчану реакцију.

Оба изотопа, уранијум 235 и плутонијум 239 произведена су у Сједињеним Државама. Резултат је био бомбардовање Хирошимае и Нагасакија.

ПЕДЕСЕТ ШЕСТ ГОДИНА НАКОН ОТКРИЋА ФИСИЈЕ

Radiochimica Acta 70/71 (1995) 69–90.
(Special issue – One Hundred Years after the Discovery of Radioactivity)

Transuranium Elements: the Synthetic Actinides By Glenn T. Seaborg

Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California 94720, USA

Radiochimica Acta 70/71 (1995) 69–90.
(Посебно издање – Сто година након открића радиоактивности)

Трансурански елементи: Синтетички актиноиди Глен Т. Сиборг

Лабораторија Лоренс Беркли, Беркли, Калифорнија 94720, САД

(Извод из чланка, део који се односи на откриће фисије)

ПРЕ ФИСИЈЕ И ФИСИЈА

Чланке који су долазили из Италије и Немачке, а у којима су описивани синтеза и идентификација неколико елемената за које се мислило да су трансурански елементи, почео сам да читам приближно пет година пре него што је откривена фисија, као студент прве године последипломских студија у Берклију 1934. године. Енрико Ферми, Едуардо Амалди, Оскар Д'Агостино, Франко Расети и Емилио Сегре су у свом оригиналном раду из 1934. бомбардовали уранијум неутронима и добијали низ бета-емитујућих радиоактив-

ности. На основу тадашњег Периодног система (сл. 1¹⁶³) они су веровали да би први трансурански елемент, са редним бројем 93, требало да буде сличан ренијуму (тј. ека-ренијум, Ека-Re), елемент 94 сличан осмијуму (Ека-Os) и тако даље. Тако су они једну 13-минутну активност приписали елементу 93. Наводим цитат из једног класичног чланка [1]¹⁶⁴ који је написао Ферми, чији је наслов „Могућна производња елемената чији су атомски бројеви већи од 92“, за који се сећам да сам га читао у то доба:

Овај негативни доказ везан за идентитет 13-минутне активности међу великим бројем тешких елемената указује на могућност да атомски број тог елемента може бити већи од 92. Ако је то био елемент 93, он би био хемијски хомолог мангана и ренијума. Ова је хипотеза донекле подржана чињеницом која је запажена, да је 13-минутна активност повучена талог ренијум-сулфида који је нерастворан у хлороводоничној киселини. Међутим како се у овој форми лако таложи неколико елемената, овај се доказ не може посматрати као много убедљив.

Присећам се како сам убрзо након тога читао чланак Иде Нодак [реф. 2 – I. Noddack, *Angew. Chem.* 47, 653–655 (1934)], чији је наслов „Über das Element 93“ [On Element 93 – О елементу 93], која се није слагала са овом интерпретацијом, указујући да би радиоактивности које су посматрали Ферми и сар. могле потицати од елемената средњих¹⁶⁵ атомских бројева:

Могло би се мислити да се у бомбардовању тешких језгара неутронима ова језгра дезинтегришу у неколико већих фрагмената који, иако су изотопи познатих елемената, нису суседи озрачиваних елемената.

Међутим, овај чланак, који је наговестио могућност нуклеарне фисионе реакције, није био узет озбиљно у обзир.

Изгледало је као да су експерименти у Немачкој, које су током наредних година извели Ото Хан, Лизе Мајтнер и Фриц Штрасман, потврдили италијанску интерпретацију, па су у току неколико година „трансурански елементи“ били предмет многих експеримената и дискусија. У једном типичном чланку Хана, Мајтнерове и Штрасмана [реф. 3 – O. Hahn, L. Meitner, F. Strassmann, *Berichte* 69, 905–919 (1936)], који сам прочитао, што је део серије коју су публиковали у току периода 1935–1938, они су известили о 16-минутном ⁹³Ека-Re²³⁷, 2,2-минутном ⁹³Ека-Re²³⁹, 12-сатном ⁹⁴Ека-Os²³⁷, 59-минутном ⁹⁴Ека-Os²³⁹, 3-дневном ⁹⁵Ека-Ir²³⁹ и 12-сатном ⁹⁶Ека-Re²³⁹.

Године 1938. Ирена Кири и Павле Савић [реф. 4 – I. Curie, P. Savitch, *Comptes Rendus* 206, 1643–1644 (1938)], радећи у Паризу, открили су производ са временом полураспада од 3,5 сата, који је подсећао на ретке земље, међу-

¹⁶³ Мисли се на слику 1 дату у „Историјски увод“.

¹⁶⁴ E. Fermi, *Nature* 133 (1934) 898–899. (Превод овог рада је дат у овом тексту (горе)).

¹⁶⁵ Мисли се на елементе из средине Периодног система.

тим, они нису успели да интерпретирају ово запањујуће откриће¹⁶⁶. Њихов чланак, који сам тада такође читао, имао је наслов (оригинал на француском) „On the Nature of a Radioactive Element with 3.5 Hours Half-Life Produced in the Neutron Irradiation of Uranium [О природи радиоактивног елемента са временом полураспада од 3,5 сати произведеног озрачивањем уранијума неутронима], а укључивао је следеће:

[Показали смо да се при озрачивању уранијума неутронима ствара радиоактивни елемент са временом полураспада од 3,5 сати, са хемијским особинама сличним онима које имају ретке земље. У наставку ћемо га називати $R_{3,5h}$.

$R_{3,5h}$ се потпуно одваја од Ас тако што иде у „главу“ (почетак) фракционисања док Ас иде у „реп“ (крај). Изгледа, дакле, да ова врста може бити само трансурански елемент који има својства веома различита од оних које имају други познати трансурански елементи, што је хипотеза која само отежава интерпретацију].

Преокрет је дошао почетком 1939. године, кад су Хан и Штрассман [реф. 5 – O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwissenschaften* 27, 11–15 (1939)], на темељу експеримената изведених у децембру 1938. године, а уз помоћ интерпретације Лизе Мајтнер, која је била приморана да напусти Немачку, описали експерименте у којима су посматрали изотопе баријума који су настали као резултат бомбардовања уранијума неутронима. Историјски чланак, који сам такође читао у то доба, имао је наслов (оригинал на немачком) „On the Identification and the Behavior of Rare Earth Metals Produced in the Neutron Irradiation of Uranium“ [О идентификацији и понашању метала ретких земаља произведених бомбардовањем уранијума неутронима], а садржавао је следећи закључак:

(оригинал на немачком) [Ми, као хемичари, на основу кратко описаних експеримената, би требало да преименујемо горенаведену схему и заменимо Ra, Ac, Th симболима Ba, La, Ce. Као нуклеарни хемичари, који су на одређени начин блиски физици, још нисмо били спремни (у могућности) да направимо овакав скок који противречи свим претходним искуствима у нуклеарној физици. Могућно је да је низ чудних подударности могао да имитира наше резултате].

Накнадни рад је показао да радиоактивности претходно приписане трансуранским елементима у ствари припадају фисионим производима уранијума, и стотине радиоактивних фисионих производа уранијума су након тога биле идентификоване.

¹⁶⁶ Овим је Глен Сиборг, свакако највећи нуклеарни хемичар свога времена, истакао значај открића до којег су дошли И. Жолио-Кири и П. Савић, и то скоро шест деценија након што се то десило.

Тако, поново се десило да почетком 1939. године, као и пет година пре тога, ниједан трансурански елемент није био познат. У току тих пет година код мене се развио растући интерес за трансуранску ситуацију. Кад сам као дипломирани студент имао свој обавезни годишњи семинар (talk – говор) на недељној Истраживачкој конференцији на Колеџу за хемију 1936. године, изабрао сам трансуранске елементе као своју тему, описујући гореразматрани рад Хана, Мајтнерове и Штрасмана.

У току две године након мог семинарског говора 1936. године, а пре открића фисије, моја заинтересованост за неутроном изазване радио-активности у уранијуму се наставља без смањења, заправо повећана је. Читао сам и поново читао сваки чланак који је био публикован на ову тему. Био сам збуњен ситуацијом, истовремено интригиран концептом трансуранске интерпретације експерименталних резултата и онеспокојен очигледним недоследностима у њиховој интерпретацији. Сећам се дискутовања проблема са Џозефом В. Кенедијем (Joseph W. Kennedy), колегом у истраживању, која су трајала сатима, често у послепоноћном периоду јутра у старој кафетини Варсити (Varsity), на углу авенија Телеграф и Банкрофт, близу Беркли кампуса, где смо често одлазили на шољицу кафе и неки залогај након вечери проведене у лабораторији.

Први пут сам сазнао за концепт интерпретације ових експеримената, да неутрони у реакцији фисије цепају уранијум на два велика дела, на недељном ноћном семинару из нуклеарне физике, које је понедељком увече водио професор Ернест О. Лоренс (Ernest O. Lawrence) у Ле Конт холу¹⁶⁷. Те узбудљиве ноћи у јануару 1939. године чули смо вести из Немачке о Хановим и Штрасмановим дивним хемијским експериментима. Присећам се како је на почетку знатан број оних који су били присутни интерпретацију фисије дочекао са скепсом, али, као хемичар који је особито ценио Ханове и Штрасманове експерименте, осећао сам да ова интерпретација мора бити прихваћена. Сећам се како сам сатима шетао улицама Берклија после овог семинара у стању које је било комбинација веселости у цеђењу лепоте овог рада и одвратности због моје неспособности да дођем до те интерпретације упркос томе што сам годинама разматрао ову тему.

¹⁶⁷ Тако се на Калифорнијском универзитету у Берклију (University of California, Berkeley) означавају поједине зграде, нпр. Хилдебранд хол (Hildebrand Hall), Латимер хол (Latimer Hall) итд.

НУКЛЕАРНА ФИСИЈА (Деоба атомских језгара)

Фисија је врста нуклеарне реакције у којој се атомско језгро неког тешког елемента¹⁶⁸ под утицајем бомбардујуће честице дели на два лакша језгра уз емисију неколико неутрона. Како је већ речено на самом почетку овога текста, откривена је 1939. године и то на језгрима изотопа 235-уранијума бомбардованих неутронима. Уз откриће радиоактивности (1896) сматра се за једно од највећих научних открића у историји, а претходило му је откриће неутрона, до којег је дошло 1932. године (Чедвик). Научници су одмах схватили да ова неутрална а релативно масивна честица може веома лако да уђе у језгро и трансформише га у језгро другог изотопа истог елемента, које је за једну атомску јединицу масе теже од свог претка. На тај начин се смањи удео протона у укупном броју нуклеона у језгру. Тако настала језгра су, по правилу, склона β -распаду (емисији електрона), чији је резултат настанак новог изотопа, сада са редним бројем у Периодном систему увећаним за један, што значи да се добија изотоп новог елемента, јер се тако повећава број протона и компензује промена настала захватом неутрона. Тако су могли бити добијени и изотопи који до тада нису били познати. Није онда тешко разумети зашто су се највећи научници тога доба одмах „ухватили“ за неутрон са циљем да са њим истраже могућности добијања једног елемента из другог, што је био давнашњи сан алхемичара. Први је у тим истраживањима био Е. Ферми. Најинтересантније је било шта ће се добити ако се најтежи елемент (уранијум, редни број у ПС 92) бомбардује неутронима. Тиме су се поред Фермија, како је већ истакнуто и детаљније описано у претходном тексту, бавили и Ирена Жолио Кири са својим асистентом Павлом Савићем (Париска група), као и Берлинска група Ота Хана, у којој су још били Лизе Мајтнер и Фриц Штрасман. У складу са оним што су показали експерименти на другим елементима, очекивало се да ће настати елементи тежи од уранијума, тзв. трансурани, нпр. као у реакцији¹⁶⁹



¹⁶⁸ Фисија није позната код језгара лакших од платине.

¹⁶⁹ Ово је у сличном контексту већ поменуто у *појмову* нобеловског предавања Ота Хана.

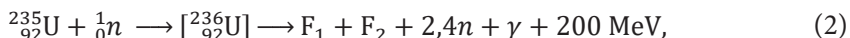
Након петогодишње потраге за трансуранима и необичних лутања свих трију група, десило се огромно изненађење – откривено је да се језгро уранијума под утицајем неутрона у ствари дели на два мања (радиоактивна) језгра. То је била фисија. Она је довела до праве научне и технолошке револуције, посебно у домену производње енергије. Све ово не значи да се у наведеним експериментима нису добијали и трансурани, али је њихова радиоактивност често била замагљена радиоактивношћу насталих фисионих фрагмената.

КАРАКТЕРИСТИКЕ ФИСИЈЕ

Фисија неутронима

Нуклеарна фисија може бити изазвана не само неутронима већ и другим врстама честица (протони, деутерони, α -честице итд. као и γ -фотонима веома велике енергије), али је неутронска фисија од највећег значаја, посебно са становишта њене примене. Убрзо по открићу, истраживања су показала следеће:

1. Језгро уранијума се након апсорпције неутрона дели на два неједнака дела, која се разилазе с веома великим брзинама. Енергија која се ослободи по једној фисији је огромна и износи око 200 MeV¹⁷⁰, што је за два реда величине изнад енергија до тада познатих нуклеарних реакција.
2. Свака фисија је праћена емисијом слободних неутрона, чији се број код ^{235}U креће од 0 до 5 са средњом вредношћу око 2,4, и неколико γ -кваната. Тако се процес фисије може представити као



где су F_1 и F_2 фисиони фрагменти – примарни фисиони производи.

3. Као и код многих других неутронских реакција, ефикасни пресек¹⁷¹ за реакцију фисије језгра ^{235}U нагло расте са смањењем енергије неутрона по „закону $1/\nu$ “, где је ν брзина неутрона. Парадоксално, што спорији неутрон то ефикасније изазива фисију.
4. Сложено језгро [^{236}U] распада се фисијом са вероватноћом од 85%, док од остатка настаје нормално језгро ^{236}U , које је α -радиоактивно.
5. Језгра тежег изотопа, ^{238}U , који се налази у природној смеши (99,3%), нису подложна фисији спорим неутронима. Она апсорбују термалне¹⁷² неутроне трпећи тзв. (n, γ) реакцију. Трпе само фисију брзим неутронима ($> 1 \text{ MeV}$), али са веома малом ефикасношћу.

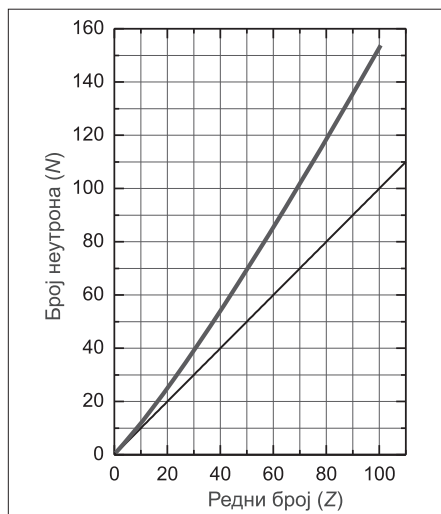
¹⁷⁰ 200 MeV = $3,20435 \cdot 10^{-11} \text{ J}$.

¹⁷¹ Ефикасни пресек је мера вероватноће дешавања неког (сударног) процеса. Има димензије површине и изражава се у *барнима* ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$).

¹⁷² Термални неутрони су неутрони који су, на датој температури, у термодинамичкој равнотежи са околином. На релативно ниским температурама спадају у споре неутроне.

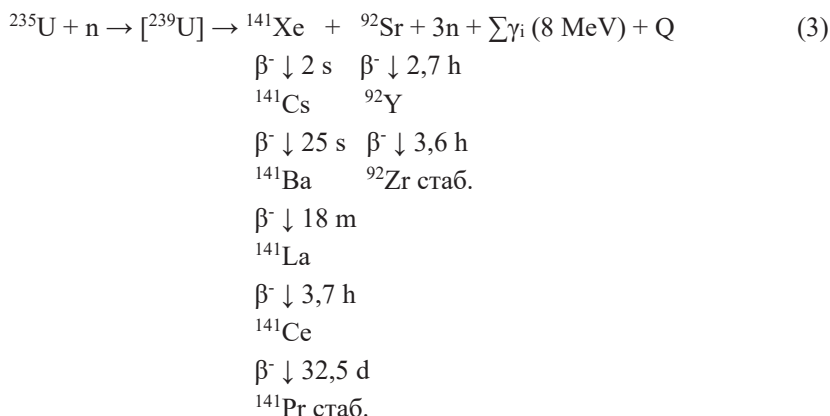
Фисиони фрагменти и фисиони производи

Примарни производи фисије називају се фисиони фрагменти. Они су веома нестабилна језгра јер поседују вишак неутрона у односу на криву стабилности језгара, слика 2. Тог вишка се углавном ослобађају нормалним β -распадом, а у ређим случајевима и директном емисијом неутрона.

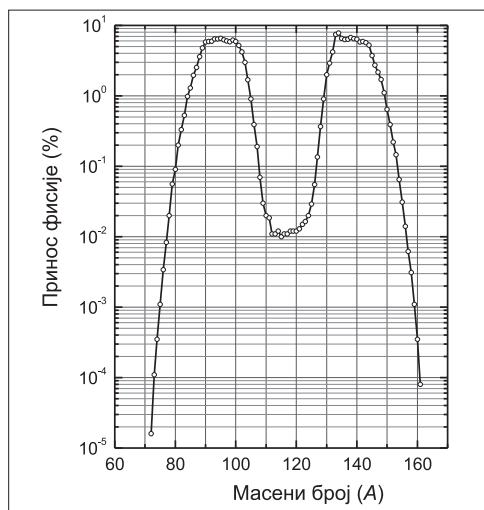


Слика 2. Крива стабилности језгара (дебља линија). Ако се фисијом једног језгра ^{235}U (које има 143 неутрона) добију нпр. фрагменти са $Z_1 \approx 40$ односно $Z_2 \approx 50$ протона, онда су њима одговарајући бројеви неутрона по криви стабилности ≈ 55 , односно ≈ 70 . То је укупно 125 неутрона, а расположиви број је 143. Због тог вишка добијени фрагменти су нестабилни

Фисија се може одиграти на најмање 90 различитих начина, дајући различите фрагменте и различит број неутрона по реакцији. Пример за једну од тих реакција је следећи (бројеви са десне стране стрелица означавају времена полураспада¹⁷³ одговарајућих изотопа):



¹⁷³ За дефиницију овог параметра видети ДОДАЦИ – А.



Слика 3. Приноси фисионих изобарних ланаца у функцији масеног броја за фисију ^{235}U термалним неутронима. Имати у виду да је скала приноса логаритамска

Први члан низа се зове фисиони фрагмент, док су остали фисиони производи, мада је могуће да исти изотоп буде и фрагмент и производ, зависно од реакције. Види се да су и фрагменти и производи изобарна¹⁷⁴ језгра (имају исте масене а различите редне бројеве).

Фисиони фрагменти у моменту разлетања нису у стању да задрже све електроне који би им припадали. Стога су то вишеструко јонизоване честице с наелектрисањима од +18 до +22, заправо тешки јони. Ако бисмо гледали само број електрона у омотачу, а не и његову структуру, на први поглед испада као да се ради о језгру једног елемента са електронским омотачем од другог. С друге стране, фисиони производи, који настају од фрагмената путем радио-активних распада, имају стабилизоване електронске омотаче, па се то узима као критеријум за разликовање. Високојонизовани фрагменти на свом путу кроз неку средину, захваљујући својој великој маси и огромном наелектрисању, изазивају њену веома интензивну јонизацију, па се стога и ефикасно успоравају и бивају брзо заустављени. Тако, не изненађује чињеница да су и поред великих почетних брзина, њихови домети мали: у ваздуху 1,5 до 2 cm, у кондензованом материјалу 5 до 10 μm . Овако интензивна интеракција на саму средину делује разорно. Истовремено, а као последица интеракције са средином, они се „облаче“ у своје електронске омотаче. Овде треба указати на чињеницу да разорно дејство фисије употребљене нпр. у атомској бомби, макроскопски гледано углавном потиче од огромне енергије која се том приликом ослобађа, док локално потиче од наведених интеракција.

Деоба атомског језгра се не врши увек на исти начин, тј. не добијају се у сваком акту фисије увек исти фрагменти нити исти број неутрона по фисији.

¹⁷⁴ Дефиниција дата у ДОДАЦИ – А.

То је статистички процес који зависи од многих фактора, као и од услова (енергија пројектила, тип језгра итд.). Расподела маса фрагмената се обично описује кумулативним приносом физије, који се дефинише као однос броја свих изобарних језгара датог масеног броја, било да су они фрагменти или производи физије, и броја физија.

Ако се тај принос представи графички у функцији масеног броја добиће се „двогрба крива“, коју приказује слика 3. Она је за физију ^{235}U спорим неутронима мање-више симетрична са минимумом на 117 (половина масе језгра уранијума које је претрпело физију) и максимумима на око 95 и 138. Слична слика се добија и после физије нуклида ^{233}U и ^{239}Pu спорим неутронима, као и код случајева спонтане физије.

Ако се физија изазива убрзаним честицама, у зависности од њихове енергије, расподела се мења. С порастом енергије средишњи минимум расподеле расте, тако да за веома брзе честице или фотоне настаје крива која има само један максимум, што значи да је сад симетрична физија највероватнија.

Енергија физије

Енергија ослобођена при физији 235-уранијума се распоређује на (i) енергију коју носе фрагменти – око 168 MeV, (ii) енергију емитованих неутрона – укупно око 5 MeV, или око 2 MeV по неутрону (то су, дакле, брзи неутрони), и (iii) енергију пратећих радиоактивних распада.

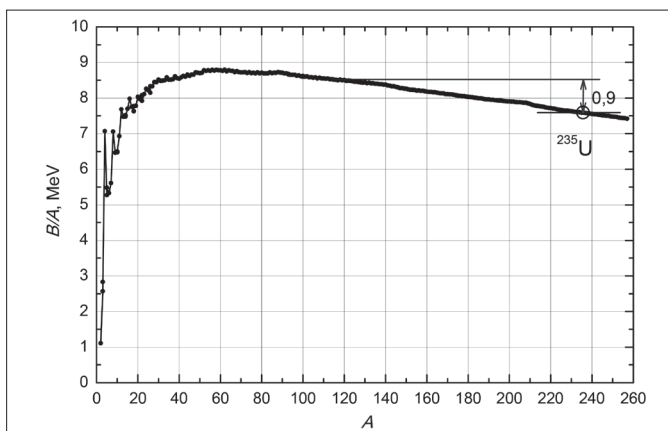
Зашто је енергија ослобођена при физији тако велика? Ако се погледа крива зависности енергије везе по нуклеону¹⁷⁵ од броја нуклеона (слика 4) види се да је та енергија за тешка језгра (нпр. ^{235}U) око 7,6 MeV/нуклеон. Ако се такво језгро дели на два фрагмента која у просеку имају 110–120 нуклеона (в. слику 2), одговарајућа енергија везе за те фрагменте је нешто испод 8,5 MeV/нуклеон. Разлика од око 0,9 MeV на укупан број нуклеона даје енергијски биланс од око 200 MeV по физији. Овако велика енергија је дала основ да се путем физије језгара производи енергија у индустријским размерама. Гориво које у те сврхе служи је најчешће изотоп ^{235}U , а њега има у природи.

Да би се стекао осећај колика је то енергија довољно је рећи да је она, по једном језгру уранијума, око педесет милиона пута већа од енергије ослобођене кад се један атом угљеника (угља) оксидује до угљен-диоксида¹⁷⁶. Ради даљег поређења, тзв. (*d-t*) фузија¹⁷⁷ даје 4,1 пута већу енергију од саме физије

¹⁷⁵ В. ДОДАЦИ – А.

¹⁷⁶ Изгарање угља у кисеонику из ваздуха је реакција која ослобађа релативно велику количину енергије (4,1 eV/атом C). То је данас један од основних начина добијања енергије у индустријским оквирима.

¹⁷⁷ То је термонуклеарна фузија водоникових изотопа, тј. тешког водоника – деутеријума ($\text{D} = {}^2_1\text{H}$) и супертешког водоника – тритијума ($\text{T} = {}^3_1\text{H}$): ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \text{n} + 17,6 \text{ MeV}$. Ослобођена енергија од 17,6 MeV је, ако се пореди са физијом по једном нуклеону, а то значи



Слика 4. Енергија везе по нуклеону у функцији броја нуклеона у језгру

по јединици масе. То је још једна могућност произвођења концентрисане енергије, која у пракси још није реализована.

Неутрони фисије

При фисији језгра се добијају и слободни неутрони. Постоје две врсте тих неутрона. (i) Промптни или тренутни неутрони, који се емитују истовремено са деобом језгра. Просечан број ових неутрона по фисији термалним неутронима за ^{235}U је 2,4. Њихов број расте са порастом редног броја елемента који трпи фисију. Тако, за изотоп 239-плутонијум он износи 2,9, а за 249-калфорнијум (^{249}Cf) чак 4,6. Даљи пораст је врло вероватан. (ii) Закаснили неутрони¹⁷⁸ се ослобађају по престанку фисије и њихов је удео у укупном броју неутрона свега око 0,65%, а кашњење у просеку око 13 s. То је довољно дуго да укупан просечни живот једне генерације неутрона који настану у фисији зависи само од те врсте неутрона. Потичу од неких фисионих производа с великим вишком неутрона, који се овог вишка, поред β -емисије, ослобађају и директном емисијом неутрона. Наиме, језгро Z које је богато неутронима може путем β -емисије дати језгро $(Z + 1)$ које је још увек побуђено, па се ослобађа енергије емисијом неутрона. Овај неутронски распад прати одговарајући β -распад језгра (по времену полураспада).

Из практичних разлога закаснили неутрони се деле на групе, којима се приписује одговарајуће време кашњења. Неутроне једне групе не морају сачињавати само неутрони који потичу из истог језгра већ они могу бити и

по јединици масе (фузија : фисија = $17,6/5 : 200/235$), 4,1 пута већа од оне код фисије $^{235}_{92}\text{U}$. „Термонуклеарна“ означава да се ова фузија, због постојања електростатичког (кулоновског) одбијања међу језгрима која се фузионишу, остварује на екстремно високим температурама.

¹⁷⁸ Играју веома важну улогу у регулацији рада нуклеарних реактора.

из различитих нуклида ако су им слична времена кашњења. Зато се, строго говорећи, времена кашњења не морају поклапати са временима полураспада за неутроне.

Спонтанa фисија

То је појава да се језгро дели само од себе, без утицаја споља. Открили су је 1940. године лењинградски физичари Петржак¹⁷⁹ и Фљоров¹⁸⁰ код језгара уранијума и торијума. Спонтана фисија је врста радиоактивног распада и понаша се по закону тог распада. Треба је разликовати од реакције фисије, која је сударни процес и подразумева два учесника. Код наведених елемената овај тип распада је знатно ређи догађај од α -распада, што се илуструје и односима њихових времена полураспада, табела 1. Види се да је нпр. код уранијума то процес који је мало вероватан. Уранијум показује само око 7 спонтаних фисија по килограму елемента у секунди (што није лако ни детектовати). Ипак, када се ради о тежим елементима, спонтана фисија постаје све вероватнији процес, па код најтежих језгара често чак доминира, тј. постаје бржа од нормалних распада α или β . Тако се, на пример, код ^{256}Fm 8,1% језгара распада α -распадом, а 91,9% спонтаном фисијом, са временом полураспада од 2,63 h.

Табела 1. Времена полураспада неких тешких изотопа за α -распад и спонтану фисију

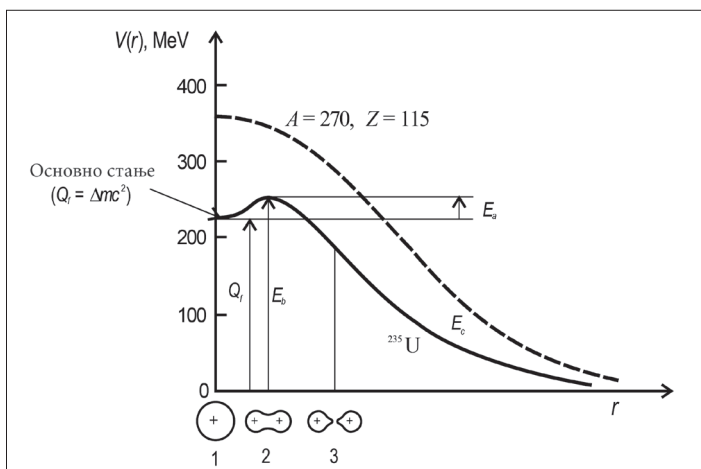
Изотоп	$t_{1/2}$ за α -распад [год]	$t_{1/2}$ за сп. фисију [год]
^{232}Th	$1,40 \cdot 10^{10}$	$>1,4 \cdot 10^{18}$
^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^{17}$
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$	$8,9 \cdot 10^{15}$
^{239}Pu	$2,4 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^{15}$
^{249}Cf	360	$1,5 \cdot 10^9$

Када је фисија моћућна

По тзв. моделу течне капи, по којем је атомско језгро представљено као кап униформно наелектрисане нестишљиве течности коју одржавају супротстављене силе (i) кулоновске интеракције међу протонима, које би језгро одвеле у деформацију и (ii) силе површинског напона, које нуклеоне држе на окуп, фисиона нестабилност неког језгра (A, Z) услед које би се добила два лакша фрагмента, окарактерисана са ($A1, Z1$) и ($A2, Z2$), јесте у ствари енергија језгра на располагању за фисију (Q_f), и дата је дефектом масе, слика 5.

¹⁷⁹ Константин Антонович Петржак (1907–1998), совјетски нуклеарни физичар.

¹⁸⁰ Георгий Николаевич Флоров (1913–1990), совјетски нуклеарни физичар, члан Академије наука СССР-а.



Слика 5. Потенцијална енергија пара фисионих фрагмената у функцији растојања међу њиховим центрима:

1 – недеформисано језгро, 2 – тачка критичне деформације, 3 – фрагменти који су се одвојили. Пуна линија се односи на ^{235}U , а црткаста на језгро са назначеним параметрима. Q_f – енергија недеформисаног језгра 'на располагању за фисију'

Из слике је јасно да је недеформисаном језгру ^{235}U неопходно довести енергију да би оно прескочило баријеру (E_b), у околини које је језгро у стању критичне деформације, и „склизнуло“ низ десну падину потенцијалске криве, тј. отишло у фисију. То је енергија активације (E_a) коју му у ствари доноси неутрон којим се бомбардује језгро. Дакле, стање у којем се два фрагмента разлећу због кулоновског одбијања могуће је достићи само ако тешко језгро добије додатну енергију побуде (E_p), која је најмање једнака енергији активације. За језгра нпр. ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu енергија активације је значајна и износи више од четири МеВ, али је у њима могуће изазвати фисију захватом веома спорих неутрона ($<1\text{ eV}$). Како?

Кад слободни неутрон уђе у неко језгро он се везује, при чему се његова маса смањује. Он један део своје масе 'улаже' у везивање. На основу тог 'дефекта масе', чији енергијски еквивалент, израчунат по већ споменутој Ајнштајновој релацији ($E = mc^2$) представља енергију везе неутрона у језгру, обезбеђује се енергија активације, табела 2.

Табела 2. Ефикасни пресеци за фисију (σ_f), енергије активације (E_a) и енергије побуђивања (E_p) захватом спорих (тзв. термалних) неутрона¹⁸¹, код најважнијих тешких језгара

Изотоп	Природна обилност (%)	σ_f (b)	E_a (MeV)	E_p (MeV)	$E_p - E_a$ (MeV)
²³³ U	вештачки	528	4,6	6,6	+2,0
²³⁵ U	0,71	580	5,3	6,4	+1,1
²³⁸ U	99,28	–	5,5	4,75	-0,75
²³⁹ Pu	вештачки	742	4,0	6,4	+2,4
²⁴¹ Pu	вештачки	1009			
²³² Th	100	–	6,5	5,1	-1,4
Природни U	–	4,2			

Узимајући у обзир ефикасне пресеке, енергије активације и енергије побуђивања за фисију, испада да су од највећег значаја за практичне примене изотопи ²³³U, ²³⁵U и ²³⁹Pu. Пракса је показала да је фисија тих језгара заиста могућна термалним неутронима, на супрот нпр. изотопу ²³⁸U.

У вези са феноменом фисије може се закључити да је то јединствена нуклеарна реакција јер:

- могуће ју је изазвати пројектилима (неутронима) веома малих енергија,
- ослобађа огромну количину енергије,
- ослобађа неколико неутрона, што омогућује да се она учини само-одрживом путем ланчане реакције.

¹⁸¹ Језгра која трпе фисију су фисибилна језгра, а она која трпе фисију спорим (термалним) неутронима се зову фисилна језгра.

НУКЛЕАРНА ЛАНЧАНА РЕАКЦИЈА

Убрзо након открића нуклеарне фисије почео је Други светски рат. Код зараћених сила то је зачело идеју о могућности остварења оружја на основу ланчане реакције фисије, која би ослобађала и до сто милиона пута већу енергију од хемијских експлозива. Последица оваквог интереса било је скоро потпуно нестајање научних публикација о фисији од краја 1939. до 1945. године. Идеја је била заснована на претпоставци да се од просечно 2,4 ослобођених неутрона по фисији једног језгра ^{235}U један утроши за просто обнављање процеса, а вишак од просечно 1,4 неутрона за додатне фисије околних језгара. Тако би се процес умножавао геометријском прогресијом и довео би до експлозије.

Ослањајући се на исту реакцију, која би била контролисана одређеним механизмима, ослобођену енергију је могуће континуирано извлачити из система, што даје велике могућности за производњу енергије на индустријској скали.

УСЛОВИ ЗА ОДИГРАВАЊЕ ЛАНЧАНЕ РЕАКЦИЈЕ

Горња идеја је сасвим основана, али да би се ланчана реакција могла одвијати, тј. да би се једном започета фисија могла преносити са једног језгра на друго, неопходно је задовољити одређене услове. Уређај у којем су ти услови остварени назива се *нуклеарним фисионим реактором*. У ужом смислу то је онај уређај који омогућује контролисано одвијање ланчане реакције. Међутим, и фисиона бомба је нека врста нуклеарног реактора, јер и она омогућује одвијање (неконтролисане) ланчане реакције.

У ширем смислу, реактор је уређај (простор, или објект, или суд) у којем се одвија нека реакција. Ако је то хемијска реакција онда говоримо о хемијском реактору. Ту нужно постоје реактанти и продукти реакције. Код нуклеарног реактора ради се о ланчаној реакцији фисије. Реактанти су језгра фисибилног¹⁸² изотопа, с једне стране и неутрони који омогућују фисију,

¹⁸² Као фисибилни материјал најчешће се користе *фисилни* изотопи, тј. они који трпе фисију спорим (термалним) неутронима, због великих вероватноћа фисије, па ће надале

с друге. Да би се ланчана реакција могла континуирано одвијати неопходно је да су концентрације реактаната довољно велике. Концентрација фисилног уранијума је она коју ставимо у реактор кад га пунимо горивом, док се концентрација неутрона који се стварају мора контролисати и регулисати одговарајућим механизмима. Ако постоји мањак неутрона ланчана реакција ће ићи ка гашењу, а ако су они у вишку, ова ће се убрзавати и може водити ка прегревању или чак експлозији.

У једном моменту, без обзира на регулацију, ланчана реакција ће стати, јер ће концентрација 235-уранијума, због трошења у реакцији фисије, пасти испод критичне границе, уз истовремено настајање многих фисионих производа, од којих неки апсорбују неутроне с великом вероватноћом и тако „трују“ реактор. Тада кажемо да је гориво исслужено. Оно се вади из реактора и, након што одређено време ‘одлежи’, да би се распали краткоживући фисиони производи који се у њему налазе, приступа се преради. Из њега се издвајају: преостали уранијум, који садржи 235-уранијума изнад природне концентрације, те је као такав употребљив за прављење новог горива, затим плутонијум, који је створен у неутронским реакцијама у реактору, а чији су неки изотопи употребљиви, посебно фисилни 239-плутонијум, те коначно фисиони производи и изотопи трансуранских елемената. Из ове последње две групе се издвоје они изотопи који имају практичну примену, а остатак представља радиоактивни отпад.

Фактор умножавања неутрона у реактору. Ланчана реакција се одвија захваљујући умножавању неутрона при фисији. Међутим, неће сви настали неутрони бити искоришћени за нове фисије, јер постоје губици путем (i) апсорпција у материјалима реактора и (ii) умицања из система. Неутрони фисије настају у реактору циклично, дакле буду створени, прођу кроз одређене процесе и нестану. Процеси кроз које прођу након настанка зову се неутронским циклусима, а неутрони једног циклуса представљају једну генерацију неутрона. Једноставније, неутрони се репродукују кроз генерације. У вези с тим дефинише се фактор умножавања неутрона у реактору (k)¹⁸³, који у ствари говори о могућности да се ланчана реакција оствари и одржи:

$$k = \frac{\text{брзина настајања неутрона}}{\text{брзина нестајања неутрона}} = \frac{\text{број неутрона у једном циклусу}}{\text{број неутрона у претходном циклусу}} \quad (4)$$

при чему ове две дефиниције нису сасвим идентичне, али дају сличне вредности k .

Фактор k дефинише стање реактора:

$k > 1$ – *најкрйћичан реактор* / процес ланчане реакције се убрзава;

углавном они бити спомињани. Међу њима далеко највећи значај има 235-уранијум. Највећи број реактора који су сада у погону су термални реактори.

¹⁸³ В. на пример књигу „Нуклеарна енергетика“ од Д. Поповића, Научна књига, Београд, 1978.

$k < 1$ – *нестабилан реактор* / процес се гаси или се онемогућава његово започињање;

$k = 1$ – *критичан реактор* / реактор је у стационарном стању, има константну снагу.

Дакле, од кључног значаја за рад нуклеарног реактора су концентрације реактаната, односно фисибилних језгара и неутрона.

Реактори се, у складу са различитим принципима поделе, могу класификовати на више начина.

- А. У односу на *енергију неутрона* који изазивају фисију реактори се деле на:
 - И. брзе реакторе или реакторе на брзе неутроне, у којима је највећи број фисија изазван брзим неутронима, чије су енергије неколико стотина keV. Код њих се не врши намерно успоравање неутрона из фисије, али они, да би уопште могли да раде, морају имати обogaћени уранијум као гориво (20% ^{235}U и више), јер је ефикасност фисије са таквим неутронима ниска.
 - II. термалне реакторе, код којих је већина фисија изазвана термалним (спорим неутронима, «1 eV»). Такви реактори у језгру имају модератор¹⁸⁴ за успоравање неутрона до термалних енергија. Највећи број данашњих енергетских постројења користи овакве реакторе.
 - III. интермедијерне реакторе, код њих је већина фисија изазвана неутронима прелазних енергија (између брзих и термалних). Неутрони се само делимично успоравају. Овакви реактори се више не граде.
- Б. У односу на *начине мешања нуклеарног горива и модератора* реактори се деле на:
 - И. хомогене реакторе, у којима је гориво фино измешано са модератором (нпр. раствор неке соли уранијума у обичној води или у тешкој води; смеша праха горива и праха чврстог модератора и сл.). Овакви реактори, иако изгледају једноставно, нису нашли већу практичну примену.
 - II. хетерогене реакторе у којима је гориво у облику дискретних структура распоређено у модератору. Термални реактори су углавном хетерогени и то је данас најраспрострањенији тип реактора у свету.
- В. У односу на *могућности производње нових фисибилних материјала* реактори се деле на:
 - И. конверторске и
 - II. оплодне.

¹⁸⁴ Модератори су материјали у којима се брзи неутрони успоравају у сударима са њиховим језгрима. Дobar модератор мора бити не само добар успоривач неутрона већ његова језгра не смеју ефикасно апсорбовати већ успорене неутроне, јер би на тај начин ови били изгубљени за нове фисије. Тако, најбољи успоривач неутрона је вода, али је најбољи модератор тешка вода.

Наиме, један од фисионих неутрона се користи за просто обнављање фисије, док други може бити употребљен за нуклеарне реакције у којима се праве нова, тежа језгра. Ако су она фисибилна, то представља конверзију горива. Тако, постоје реактори у које се поред горива ставља и тзв. оплодни (фертилни) материјал, ради конверзије. Најпознатије конверзије су конверзија $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}^{185}$ и конверзија $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}^{186}$. Оба изотопа добијена конверзијама су изузетно добро нуклеарно гориво, в. табелу 2. Ако се наведеним процесима гориво само делимично надокнађује такви реактори се зову *конверџорски*, а ако се добије више него што је уложено, реактори су *ойлодни* (*бридери*).

Г. У односу на *примену* реактори се деле на:

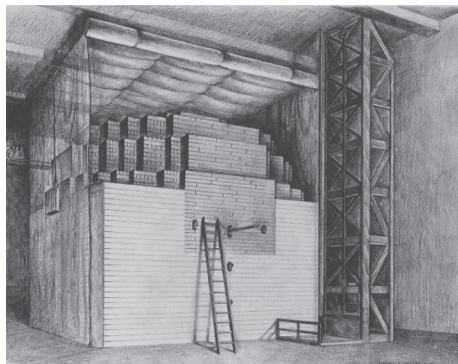
- I. експерименталне (нулти реактори – критични реактори мале снаге, демонстрациони реактори, прототипски реактори);
- II. истраживачке (реактори ниског, средњег или високог неутронског флукса, импулсни реактори итд.);
- III. реакторе за озрачивање (производња изотопа, утицај зрачења на материјале итд);
- IV. енергетске реакторе (за производњу електричне, односно топлотне енергије), у општем смислу нуклеарни реактор је извор топлоте.

ОСНОВНО О НУКЛЕАРНОМ ФИСИОНОМ РЕАКТОРУ

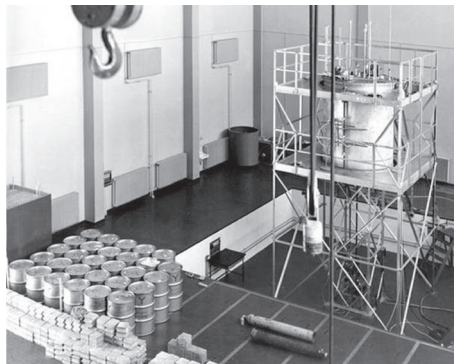
Први нуклеарни реактор који је човек створио је био хетерогеног типа и пуштен је у рад крајем 1942. године у Чикагу под руководством Е. Фермија. Носио је ознаку CP-1 (Chicago Pile-1). У њему су наизменично у сферној геометрији ређане кутије које су садржале уранијум природног изотопског састава у облику диоксида и коцке чистог графита, који је служио као модератор. Тако је формирана „гомила“ (енгл. *pile*) у којој је било 36,5 t UO_2 , 5,6 t металног U и 250 t графита. У њеном центру се налазио вештачки извор неутрона, а споља су били неутронски бројачи. Број регистрованих неутрона је био константан до пред достизање услова за додатну репродукцију ланчаном реакцијом. Процесом је управљано извлачењем и увлачењем трака од металног кадмијума, које су апсорбовале вишак неутрона. Кад је сложено око 2/3 прорачунатог материјала спољни бројачи неутрона су показали пораст броја импулса, што је био доказ да је започела ланчана реакција. Био је ово први доказ да је ланчану реакцију могуће контролисати. Израчунато је да је реакција текла с фактором репродукције неутрона $k = 1,0006$. Овај реактор је приказан на слици 6.

¹⁸⁵ $^{238}\text{U}(\text{n},\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow (\beta^-, 23,5 \text{ min}) ^{239}\text{Np} \rightarrow (\beta^-, 2,3 \text{ d}) ^{239}\text{Pu}$, ($t_{1/2} = 2,41 \cdot 10^4 \text{ god}$). Овакав процес се мање или више одиграва у свим реакторима с горивом од уранијума. Штавише, ако настали ^{239}Pu остаје релативно дуго у реактору он се, реакцијом с неутронима, добрим делом трансформише у ^{240}Pu .

¹⁸⁶ $^{232}\text{Th}(\text{n},\gamma)^{233}\text{Th} \rightarrow (\beta^-, 22,3 \text{ min}) ^{233}\text{Pa} \rightarrow (\beta^-, 27,4 \text{ d}) ^{233}\text{U}$, ($t_{1/2} = 1,59 \cdot 10^5 \text{ god}$).



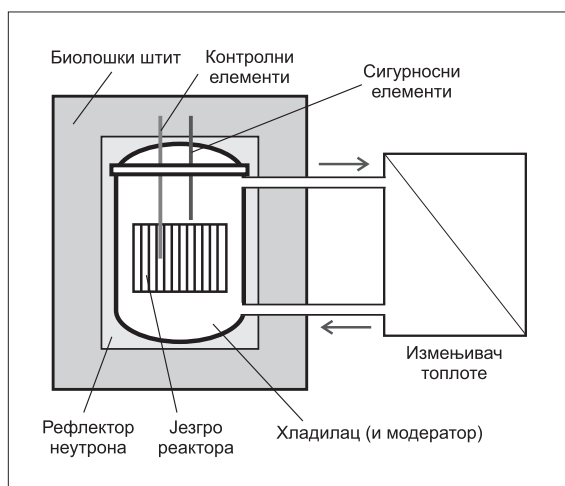
Слика 6. Изглед реактора CP-1
(преузето из Wikipedia-e)



Слика 7. Изглед реактора РБ, Винча

Педесетих година XX века је у ФНРЈ, у Институту за нуклеарне науке у Винчи крај Београда конструисан експериментални нулти (номиналне снаге 1 W) реактор (означен као РБ) модерисан тешком водом (D_2O). Приказан је на слици 7. РБ је пуштен у рад уочи Првог маја 1958. године, чиме је остварена прва контролисана нуклеарна ланчана реакција на Балкану. На њему су се стицала прва искуства пре пуштања у рад великог реактора (РА) совјетске производње 1959. године, снаге 6,5 MW.

Код хетерогеног реактора се полази од тога да изотоп ^{238}U практично не апсорбује термализоване неутроне већ да се апсорпција догађа на нешто вишим енергијама у тзв. резонантним максимумима. Њих има више а најизразитији се јавља код енергије неутрона од 7 eV. Идеја хетерогеног система се састоји у томе да се оделе гориво и модератор. Фисиони неутрони напуштају гориво као брзи, улазе у модератор, у њему се термализују, а онда дифузијом



Слика 8. Схематски приказ
нуклеарног реактора

враћају у гориво и изазивају нове фисије. Важно је да када неутрони приликом успоравања спадну на „опасне“ енергије (7 eV) буду ван домаћаја ^{238}U .

Нуклеарни фисиони реактор је релативно сложен уређај. Његово устројство је схематски приказано на слици 8.

Главни део реактора је његово језгро, у којем се одвија ланчана реакција. Састоји се од фисионог материјала, који заједно са материјалом у коме се налази представља нуклеарно гориво. Код термалних реактора у језгру се налази и модератор.

Као фисиони материјал најчешће се користи уранијум. Са горивом од природног уранијума ланчана реакција је могућа само уз добар модератор, а то су графит или тешка вода, јер мала концентрација фисилних језгара не би могла да обезбеди њено одржавање са нпр. обичном водом или без модератора. Међутим, ако се уранијум обогати у лакшем изотопу, 3% ^{235}U или више, и обична вода је добар модератор, што се данас користи код већине реактора. При обогаћењу од 20% или више модератор није ни потребан, јер је тада концентрација језгара ^{235}U довољно велика да и брзи неутрони могу одржати ланац фисије. То је случај у такозваним брзим реакторима.

Хладилац служи за одвођење топлоте из горивних елемената. Он циркулише између језгра реактора и измењивача топлоте у коме предаје енергију секундарном хладиоцу, одакле се она може користити за различите намене. Флуидни модератори, нпр. вода или тешка вода, могу уједно бити и хладиоци. Међутим, познати су и други типови хладилаца, као што су гасови или течни метали. Међу гасовима су најчешће коришћени угљен-диоксид и хелијум. Течни метали се користе као хладиоци реактора на брзе неутроне, а међу њима су познати натријум, смеша натријум-калијум, олово, смеша олово-бизмут, калај итд.

Рефлектор неутрона служи да део умаклих неутрона врати у језгро реактора, те тако умањи њихово умицање из система. Налази се око реакторског језгра. Код термалних реактора рефлектор је направљен од материјала модератора, који прво термализује умакле неутроне, а онда се они дифузијом делимично враћају у језгро реактора. Израз „рефлектор“ није баш најсрећније одабран јер овде нема дословне рефлексije.

Контролни елементи су системи за управљање нуклеарном ланчаном реакцијом. То су обично шипке које садрже изотопе који добро апсорбују термалне неутроне (изотопи бора – ^{10}B , или кадмијума – ^{113}Cd) и помоћу којих се, ураћањем мање или више у реакторско језгро, регулише ниво рада реактора. За случај акцидента постоје сигурносни елементи, такође саграђени од адекватних апсорбера неутрона, који се нагло зарањају у реактор и заустављају ланчану реакцију.

Биолошки штит служи за заштиту од зрачења које се емитује из реактора, а обично се састоји од 2 или више метара дебелих зидова од тешког бетона.

Безбедносћ нуклеарних реактора

Приликом пројектовања нуклеарних реактора разматрају се сви могући, па и екстремни случајеви удеса.

За спречавања ширења радиоактивности из горивних елемената предвиђене су три баријере: прва је заштитна кошуљица око горивног елемента, друга је суд самог реактора дебелих зидова а трећа је заштитни плашт око целокупног реактора. У току рада се стално мери велики број параметара рада реактора везаних за систем сигнализације и аутоматских интервентних акција. Већ је споменуто присуство сигурносних/хаваријских регулационих шипки, које су једна од њих.

У изузетним акцидентним ситуацијама се може десити да реакторско гориво у раду изгуби потребно хлађење и да се истопи. Том приликом је пропратна појава прегревање цирконијумских кошуљица горива и реакције метала с присутном водом: $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$. Гасовити водоник сада омета даљу циркулацију хладиоца или чак може произвести експлозију праскавог гаса. Најпознатији примери великих акцидената су реактори на Острву Три Миље у Пенсилванији (САД) 1979, када се језгро реактора делимично истопило због проблема са системима за хлађење, прецизније са пумпама за воду, затим у Чернобиљу (СССР – Украјина) 1986. и у Фукушими (Јапан) 2011. године. У Чернобиљу је дошло и до експлозије водоника, што је довело до разарања реактора. Поред ослобађања дела испарљивијих фисионих производа, истопљено гориво се слива на дно реакторског суда и остаје на високој температури дуго времена због апсорпције зрачења присутних фисионих производа. Може продирати у дубље слојеве темеља зграде (Чернобиљ). Рачуна се да у екстремном случају за око годину и по дана може достићи максималну дубину од 14 метара. Поправка оваквих реактора свакако не долази у обзир. Нуклеарна хаварија електрана у Фукушими је последица нехлађења реактора, услед тога што због разорног земљотреса није било напајања струјом, а резервни дизел агрегати, који су се исправно стартовали, ускоро након почетка рада су били потопљени огромним цунамијем. И ту је дошло до прегревања реактора, топљења, експлозије итд.

С обзиром на то да у свету постоји скоро пет стотина само енергетских нуклеарних реактора (в. ниже), као и више стотина реактора који служе у друге сврхе, разумљиво је да је долазило до (мањих) акцидената и на неким од њих. Узгред, и на реактору РБ у Винчи је октобра 1958. дошло до акцидента у којем је једна особа страдала, а њих пет је озрачено. Срећом, они су успешно излечени.

О УРАНИЈУМУ

Уранијум је полазиште скоро свих концепата нуклеарне енергетике, па и глобалне енергетике уопште, посебно након исцрпљивања фосилних горива. И не само то. Од почетка нуклеарне ере, а то значи од открића радиоактивности па све до данашњих дана, практично у свему што је нуклеарно уранијум има централну улогу. Тако, радиоактивност као појава је откривена баш на уранијуму 1896. године, када је констатовано да материјали који садрже овај елемент емитују врло продорне „уранијумске зраке“. Такође, елементе полонијум и радијум су 1898. године открили Пјер и Марија Кири прерађујући тоне уранијумове руде. Даље, откриће нуклеарне фисије, које је описано у уводу и до којег се случајно дошло при потрази за трансуранским елементима, десило се опет на уранијуму. Та открића, посебно фисија, отворила су врата за многе употребе уранијума, међу којима је најзначајнија примена за производњу енергије у нуклеарним реакторима, где се уранијум користи као гориво. Штавише, и нека друга нуклеарна горива, нпр. изотоп 239-плутонијум, производе се из уранијума. Улога уранијума у домену енергетике, посебно у даљој будућности, вишеструко ће порасти.

Уранијум је сребрнасти метал, слика 9, веома велике густине (око 19 g/cm^3). Као тешки метал хемијски је врло отрован. То је радиоактивни елемент, што



Слика 9. Метални уранијум
(преузето из Wikipedia-e)

значи да су сви његови изотопи радиоактивни. Постоје три природна изотопа уранијума: $^{234}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$, чије су концентрације и времена полураспада дати у табели 3. Сви су α -емитери.

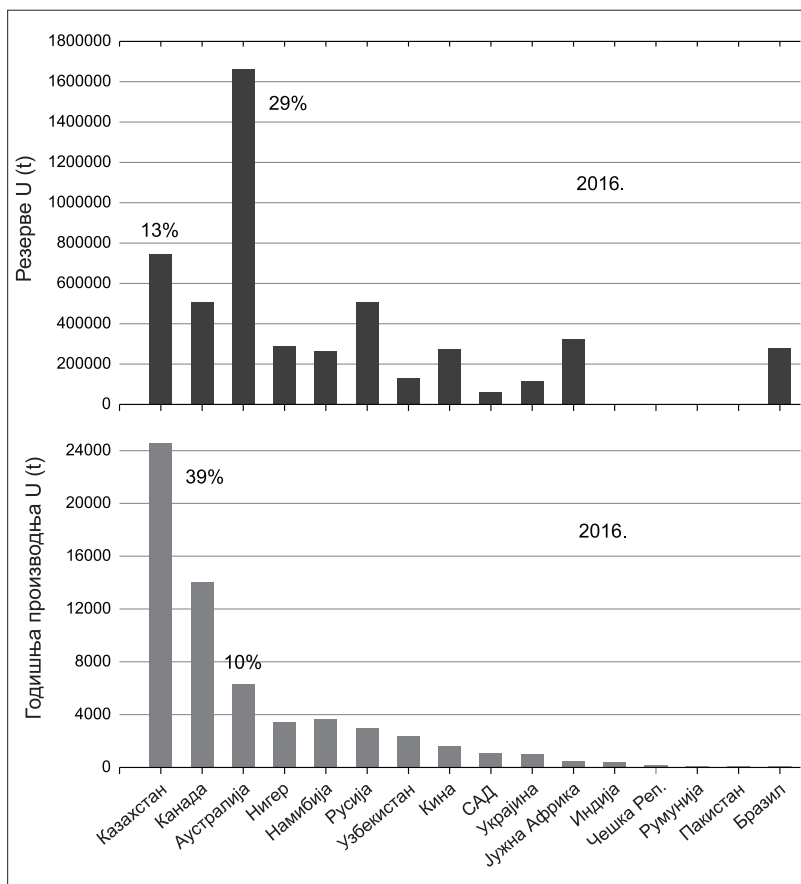
Табела 3. Концентрације и времена полураспада природних изотопа уранијума

Изотоп	Природна обилност (%) (ат.%)	Време полураспада (год)
^{234}U	0,0054	$2,455 \times 10^5$
^{235}U	0,7202	$7,038 \times 10^8$
^{238}U	99,2744	$4,468 \times 10^9$

Уранијум се у Периодном систему елемената налази на редном броју 92. Иза њега нема природних елемената, па се може рећи да је он 'најтежи' елемент у природи. Откривен је у Немачкој давне 1789. године и у XIX веку је био добро познат и описан елемент. Није тако редак елемент на Земљи, како се некада мислило. Његова просечна обилност је око 1,3 ppm¹⁸⁷, с тим да га у стенама, где се обично налази, има просечно 2,8 ppm, а у морској води свега 0,003 ppm. По обилности га има више него сребра, кадмијума или антимоноа, а отприлике колико молибдена, цинка или калаја. Такође, око петсто пута је обилнији од злата. Ипак, он спада међу расејане елементе, па су богата лежишта прилично ретка. Ако га у стенама има више од 1000 ppm (0,1%) онда је то руда која се може комерцијално експлоатисати. Најбогије руде га садрже у концентрацијама од око 100 000 ppm (10%). У природи се јавља у стотинак различитих минерала. На слици 10 су приказане утврђене резерве уранијума и његова годишња производња, разврстани по најважнијим земљама-произвођачима. Како се види, највеће резерве су доказане у Аустралији, око 29% укупних светских резерви, али је њен удео у светској производњи око 10%. Највећи актуелни произвођач је Казахстан.

Руде уранијума показују знатно већу радиоактивност од чистог уранијума, због присуства његових потомака, чланова радиоактивних низова: Pa, Th, Ac, Ra, Fr, Rn, At, Po, Bi, Pb и Tl.

¹⁸⁷ ppm – parts per million (делова на милион).

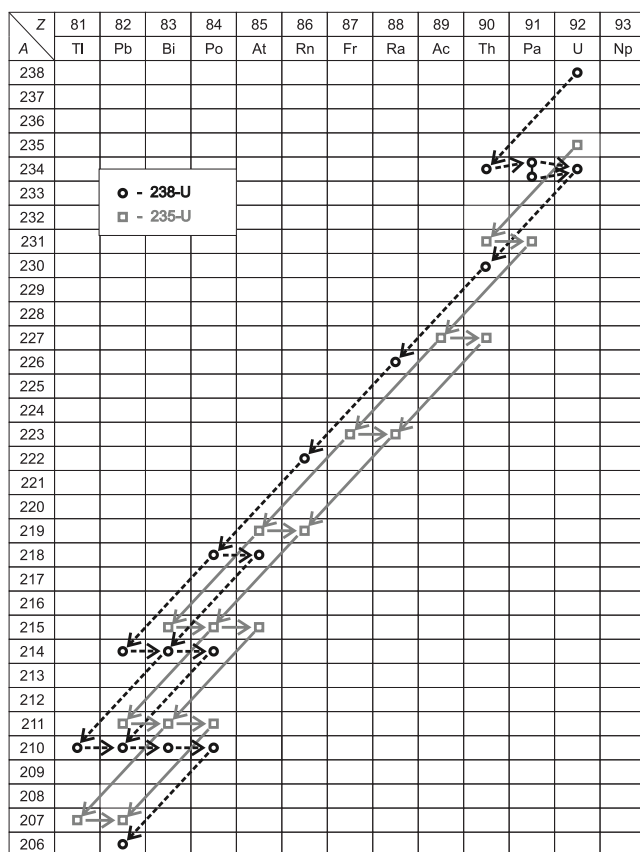


Слика 10. Преглед утврђених резерви и производње уранијума по најважнијим земљама-произвођачима

ДОПРИНОС УРАНИЈУМА ПРИРОДНОЈ РАДИОАКТИВНОСТИ НА ЗЕМЉИ

Види се да су ^{235}U -уранијум и ^{238}U -уранијум изразито дугоживући изотопи. Њихова времена полураспада су упоредива са старошћу Земље, која је процењена на 4,55 милијарди година. Процењује се на основу релативно поузданих прорачуна, да, ако је сав уранијум у сунчевом систему настао у једној *сујернови*, онда се то морало десити пре око 6,5 милијарди година. Врло спори распада његова два најважнија изотопа омогућили су да они и данас постоје на Земљи. Они су тзв. родоначелници одговарајућих радиоактивних породица, тј. из њих, узастопним радиоактивним распадима (алфа и бета), настају два велика низа, низ ^{238}U („низ уранијума“) и низ ^{235}U („низ актино-

уранијума“), природних радиоактивних изотопа различитих елемената, која се завршавају стабилним изотопима олова. Схеме распада у оквиру ових низова приказује слика 11. Ова два низа, заједно са низом ^{232}Th -торијума (^{232}Th), који је такође изразито дугоживући изотоп, дају највећи допринос природној радиоактивности на Земљи. Први производ распада у „низ уранијума“ је изотоп елемента торијума ^{234}Th , наравно с масеним бројем за четири мањим од језгра-родитеља. Из њега, како се види на схеми, настаје ^{234}U -уранијум, који је, дакле, један од потомака у низу ^{238}U -уранијума. Његова концентрација је веома ниска, а време полураспада релативно кратко (табела 3), па се у грубљим проценама његово присуство у природи може занемарити. Поред поменутих изотопа уранијума, у природи се у траговима налази и изотоп ^{235}U , а вештачки могу настати и практично сви изотопи (и неки изомери) између ^{215}U и ^{242}U . Осим ^{238}U , сви (вештачки) изотопи између ^{237}U и ^{242}U су β -активни. Више детаља о неким аспектима радиоактивности двају најобилнијих уранијумових изотопа је дато у ДОДАТКУ – В.



Слика 11. Схеме распада у оквиру уранијумових радиоактивних низова. Косе линије оријентисане наниже представљају α -распаде, а хоризонталне линије оријентисане удесно, β -распаде

Природни радиоактивни низови су независни један од другог, нигде се не укрштају, тј. немају заједничких изотопа. Сви чланови низова имају знатно краћа времена полураспада од родоначелника, и када се не би обнављали из родоначелника, са којима су иначе у тзв. *секуларној равнотежи* ($\lambda_1 \ll \lambda_2$), не би ни постојали на Земљи.

Истраживања радиоактивних материјала који се налазе у природи (NORM¹⁸⁸), која се уобичајено спроводе код мапирања одређених подручја, најчешће подразумевају мерења концентрација ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K. Ређе се мери ²³⁵U, јер је његов удео у природном уранијуму, као и удео његових потомака, мали, па тиме мали и допринос радиоактивности.

Са становишта природне радиоактивности и њених утицаја на животну средину, по свом значају се истичу изотоп радијума ²²⁶Ra ($t_{1/2} = 1577$ година) и изотопи радона. Први је члан низа 238-уранијума и важан је зато што има релативно дуго време полураспада у односу на остале чланове низа, па су његове количине значајне, али и зато што је α -емитер екстремне радиотоксичности. Према класификацији МААЕ¹⁸⁹ по радиотоксичности се налази при самом врху I групе – врло висока радиотоксичност.

И један и други низ уранијума садрже по један изотоп елемента радона. То су ²²²Rn ($t_{1/2} = 3,824$ дана), који припада низу 238-уранијума, а непосредно настаје из већ споменутог 226-радијума, и ²¹⁹Rn ($t_{1/2} = 3,96$ s), који припада низу 235-уранијума. Понекад се они називају еманацијама (од латинског *emanare* – извирати, потицати, испаравати; у хемији се то често односи на инертне гасове). То су гасовити продукти радиоактивних низова. Радон је инертни гас, што значи да се ни са чим не једини. У Периодном систему се налази на дну групе инертних гасова. Изузетно је важан са становишта заштите, где му се придаје посебан значај, јер представља $\frac{1}{2}$ ефективне дозе коју годишње прими просечан становник наше планете из свих природних извора, а годишња доза износи 2,4 mSv¹⁹⁰. Такође, изотопи радона својим зрачењем доприносе са $\frac{3}{4}$ укупној годишњој дози коју просечан човек прими из земаљских извора. Највећи удео у томе има ²²²Rn, који узрокује годишњу ефективну дозу од 1,15 mSv, јер знатно дуже живи од осталих природних изотопа радона.

Специфичност радона се, између осталог, састоји и у томе што је он једини гасовити и инертни производ у оквиру природних радиоактивних низова, те као такав најчешће еманира из средине у којој настаје и излази у околину. Има га свуда тамо где има уранијума или торијума, нпр. у стенама, песку, глини, гипсу итд., а како се ови материјали масовно користе у грађевинарству, то радон испуњава просторије у којима људи живе. О тој чињеници се мора водити рачуна. Незгода са њим је то што га удишемо. Као такав он уђе у плућа и ако се тамо распадне оставља чврстог потомка, који се тамо може

¹⁸⁸ NORM – Naturally Occuring Radioactive Materials.

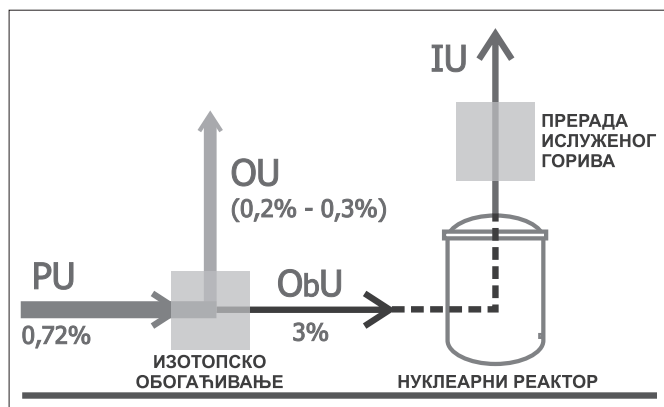
¹⁸⁹ МААЕ – Међународна агенција за атомску енергију, са седиштем у Бечу (IAEA – International Atomic Energy Agency).

¹⁹⁰ Јединица *сиверт* је дефинисана у ДОДАТКУ – А.

дуго задржати. Ситуација са нпр. рудницима је знатно озбиљнија. Све ово је последица присуства уранијума односно торијума у природи.

Има много непознавања чињеница, а често и заблуда, везаних за уранијум, посебно за његову употребу у нуклеарним технологијама. Да би се слика о томе разбистрила, овде ће кратко бити наведени најважнији подаци о овом елементу и описи појмова који су с њим у вези.

Прво, према класификацији МААЕ уранијум по радиотоксичности спада у IV (најнижу) групу – ниска радиотоксичност. Он је опаснији због своје хемијске токсичности него због радиотоксичности. Имајући у виду нуклеарни контекст, могло би се говорити о четири ‘врсте уранијума’: 1) *природни* – уранијум природног изотопског састава (PU), 2) *обогаћени* – уранијум обогаћен у изотопу ^{235}U (у односу на природни – ObU), 3) *осиромашени* – уранијум осиромашен у изотопу ^{235}U (OU), те коначно 4) *ислужени* – уранијум екстрахован из исслуженог реакторског горива (IU). Ово је илустровано на слици 12.



Слика 12. ‘Врсте уранијума’

У јавности највише пажње побуђује осиромашени уранијум, који је у ствари небитан (за сада) са становишта рада нуклеарних реактора. То је остатак од природног уранијума након његовог обогаћивања ради припреме реакторског горива. За сада нема значајнију примену¹⁹¹. Састоји се углавном од 238-уранијума и као такав је мање радиоактиван од природног уранијума. Ипак, стиче се утисак да многе лаике више ужасава придев „осиромашен“ (ваљда, јер „сиромаштво“ додатно појачава страх) него именица „уранијум“. Погрешно!

¹⁹¹ Данас се, нажалост, највише користи за израду тзв. поткалибарске муниције за противоклопна дејства. С обзиром на велику густину и запаљивост при удару, уранијум је ‘идеалан’ материјал за ове сврхе. Више детаља о овој примени OU је дато у поглављу НУКЛЕАРНА ОРУЖЈА.

ЗНАЧАЈ УРАНИЈУМА ЗА БУДУЋНОСТ ЕНЕРГЕТИКЕ

На овом месту је важно направити коментар који је од изузетног значаја за будућност нуклеарне енергетике, али и енергетике уопште. Наиме, у свету је данас (2017. година), према прегледу који редовно издаје Светска нуклеарна асоцијација – WNA¹⁹², у погону 446 нуклеарних енергетских реактора у 30 земаља, а у изградњи је нових 59. Поврх тога, поручено или планирано је још 160, а предложено 378 реактора. Сви су они мање-више реактори тзв. друге, врло мало треће генерације. То су, са садашњег становишта, конвенционални реактори. Њихова је карактеристика да им је рад базиран на фисији ²³⁵U, чија је концентрација у природном уранијуму веома ниска. Ако би се тако наставило, издашност уранијума, с обзиром на утврђене резерве и при постојећој потрошњи би била не више од двеста година, што није много више од издашности фосилних горива. По подацима WNA, пројектоване потребе за уранијумом (2017. година) су 65 000 t U, а доказане, сигурне резерве (у ценовној категорији од 80–130 \$/kg U₃O₈) око 5,7 Mt. То значи да је при употреби у конвенционалним реакторима издашност уранијума највише **90 година**. Очекивани пораст цена метала из конвенционалних извора¹⁹³, па тиме и цена уранијума, повећаће резерве за додатних 7,6 Mt, јер ће производња из сада неисплативих извора бити комерцијализована, што ће у укупном повећати издашност уранијума на око **200 година**.

Узгред, већ је наведено да термонуклеарна фузија ослобађа 4,1 пута већу енергију од фисије по јединици масе. Истовремено, она има упадљиво мањи радијациони ризик, па би се на први поглед могло помислити да је то знатно перспективнији извор енергије за будућност. Међутим, код ње постоје два важна ограничења: прво, фузија се остварује у екстремним условима, па су потенцијални фузиони реактори технички изузетно компликовани и захтевни уређаји, што ће вероватно бити превазиђено у наредних тридесетак година; друго, док деутеријума, као једне компоненте горива, на Земљи има у изобиљу, дотле тритијума нема у природи (ако се занемаре мале количине које настају дејством космичког зрачења), па се он мора производити из неке друге сировине. А сировина је литијум, чије су количине у природи, наравно, ограничене. Процена његове издашности сада, док се још не користи за фузију, каже да је она између 450 и 1450 година, зависно од тога да ли се у прорачун узимају утврђене резерве (14 000 000 t) или налазишта (47 000 000 t), при садашњој производњи (потрошњи) из рудника од 32 500 t. Кад отпочне употреба за фузију то ће се сигурно преполовити. Дакле, фузија је извор енергије значајног временског домета, који је, ипак, знатно мањи од онога за фисију.

¹⁹² WNA – World Nuclear Association.

¹⁹³ Конвенционални извори – то су они извори у којима је уранијум главни производ или главни нус-производ.

Вратимо се фисији. Ако би се кроз оплодњу горива увели у масовну употребу ^{238}U и ^{232}Th , човечанство би било опскрбљено енергијом у наредних преко десет хиљада година. Ова процена је направљена под претпоставком да се искористи само једна трећина постојећег ^{238}U , и не узимајући у обзир торијум, чија је обилност на Земљи три до четири пута већа од обилности уранијума, као ни перспективе које нуди фузија. Узгред, и сада постоје огромне залихе осиромашеног уранијума, који ће, захваљујући наведеном концепту, постати употребљив за производњу енергије. Све наведено је предмет нових нуклеарних концепата обједињених у 'нуклеарним системима четврте генерације', који ће бити актуелни након 2030. године и углавном базирани на уранијуму.

НОВИ НУКЛЕАРНИ КОНЦЕПТИ

Одрживи раст нуклеарне енергије у будућности подразумева:

- развој нових генерација реакторских технологија, као и развој напредних технологија прераде исслужених горива,
- развој напредних НГЦ¹⁹⁴ (НУКЛЕАРНИ ГОРИВНИ ЦИКЛУС).

Ови циљеви ће бити остварени кроз интеграцију три кључне иницијативе:

- *IV генерација нуклеарних система* (Generation IV Nucl. Energy Systems – GENERATION IV),
- *Нуклеарно-водонична иницијатива* (Nuclear Hydrogen Initiative – NHI),
- *Унапређени горивни циклус* (Advanced Fuel Cycle Initiative – AFCI), отпоран на пролиферацију нуклеарних оружја, са минимизованим нуклеарним отпадом.

ГЕНЕРАЦИЈА IV подразумева системе чији би циљ био да обезбеде примарни извор енергије за производњу топлоте, струје и водоника који је: **обилан, глобално доступан, поуздан, чист и сигуран.**

Детаљном анализом концепата, искустава и најновијих научних знања везаних за око стотинак типова нуклеарних реактора, одабрано је њих шест који ће бити развијани у оквиру нуклеарних система Генерације IV.

¹⁹⁴ *Нуклеарни горивни циклус* је један од кључних делова нуклеарних технологија, а подразумева обезбеђивање материјала неопходних за рад нуклеарних реактора. Данашње нуклеарне технологије се ослањају на *уранијумски горивни циклус*, који се састоји од више посебних технологија: Истраживање рудних налазишта уранијума и торијума; Производња уранијума и његових једињења; Изотопска обогаћивања; Специјални материјали (Zr, Be, ...); Производња горива ('горивних елемената'); Употреба горива у реакторима; Прерада исслуженог горива; Враћање уранијума и насталог плутонијума за нове употребе; Складиштење нуклеарног отпада (НО).

1. *Реактор хлађен водом која је под најкритичнијим условима* – висока ефикасност, погодни за производњу јефтине електричне енергије; почетна производња плутонијума.
2. *Изразито високотемпературски реактор* (хлађен гасом) – веома погодан за производњу водоника; радни век 60 година.
3. *Гасом хлађени брзи реактор* – ефикасна производња електричне енергије, минимизација НО.
4. *Оловом хлађени брзи реактор* – ређа замена горива (15–30 година), поуздан, сигуран, смањена могућност пролиферације нуклеарних оружја.
5. *Најријетом хлађени брзи реактор* – ефикасна производња нових фисилних материјала, ефикасно управљање НО.
6. *Реактори на тешке соли* – гориво је у течном стању, погодан за неутрализацију актиноида¹⁹⁵, производњу струје и водоника и оплодњу горива (стварање нових фисилних материјала).

Важно је напоменути да се мисли на јединствен систем реактора (и других нуклеарних постројења), који се користе у оквиру јединственог концепта, а не на појединачне уређаје. Први реактор ће бити иницијални, тј. производиће почетне количине плутонијума. Други ће такође бити иницијални, са основном улогом да обезбеђује производњу водоника¹⁹⁶. Трећи, четврти и пети би преваходно били бридери (увечање количине плутонијума у односу на његову потрошњу) и бернери (сагоревање фисионих производа и оплодња актиноида). Последњи тип би имао улогу трошења фисибилних и оплодних актиноида. Овакви системи би требало да обезбеде остварење наведених циљева Генерације IV. Што је најважније, били би скоро апсолутно безбедни и са много мањим обимом НО.

¹⁹⁵ То су углавном трансуранијумски елементи, који настају у неутронским реакцијама у реактору. Неки од њих имају времена полураспада реда милиона година и представљају велики проблем код дугорочног складиштења НО, а то је у ствари највећи проблем актуелне нуклеарне енергетике.

¹⁹⁶ Сматра се да ће (постфосилна) енергетика будућности бити заснована на водонику, као медијуму за манипулацију енергијом, и обновљивим и нуклеарним изворима, као примарним изворима за његову производњу. Наиме, слободног водоника скоро да нема у природи, па га је неопходно производити (из воде), а за то је потребна високотемпературна топлота (на око 1000 степени), што би требало да обезбеде реактори наведени под 2.

ФЕНОМЕН ОКЛО

Природни нуклеарни реактор

У природи има уранијума који се у неким рудницима јавља и у процентским концентрацијама. У природи, наравно, има и воде и то у огромним количинама. Да ли је у историји Земље на неком месту могла постојати таква комбинација уранијума (у смислу његове концентрације), његовог фисилног изотопа ^{235}U (у смислу обилности), воде и геолошких услова да би се могла сама од себе остварити ланчана реакција фисије, тј. да ли је могућан природни нуклеарни реактор?

ШТА ЈЕ ФЕНОМЕН ОКЛО И КАКО ЈЕ ОТКРИВЕН

Феномен Окло у ствари означава природни нуклеарни реактор који је постојао, тј. радио у прошлости, када је изотопски састав уранијума био такав да, у комбинацији са водом и погодним геолошким условима, може да се оствари нуклеарна ланчана реакција.

Феномен је откривен 1972. године у Републици Габон у западној Африци, у близини рудника уранијума Окло и Окелобондо. Међутим, Пол К. Курода (Универзитет Арканзаса) је још 1956. године у једном свом чланку¹⁹⁷ претпоставио да се такав догађај могао десити некада давно у историји Земље, ако би се створила погодна комбинација уранијума и воде. Шеснаест година касније је потврђена његова претпоставка.

У мају месецу 1972. године приликом рутинске изотопске анализе уранијум-хексафлуорида (UF_6)¹⁹⁸ који је потицао из уранијумских рудника у Габону (Западна Африка) путем спектрометрије маса, у фабрици за изотопско обогаћивање уранијума Пјерлат (Pierrelette) у Француској је запажена разлика у концентрацији ^{235}U у односу на уобичајену. Наиме, типична концентрација овог изотопа у природном уранијуму у свим деловима света је 0,7202 атом.%, а измерена је и у метеоритима и камењу с Месеца, с варијацијама које се

¹⁹⁷ P. K. Kuroda, "On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals", *J. Chem. Phys.* 25 (1956) 781–782.

¹⁹⁸ Гасовито једињење уранијума, које се користи у процесима сепарације његових изотопа.

јављају на трећој децимали, па је наведени налаз био немало изненађење. У споменутих узорцима из Габона нађено је да је садржај ^{235}U 0,7171 атом.%, што је у ствари мала, али значајна разлика, с обзиром на то да се у фабрикама за прераду строго води рачуна и о концентрацији и о укупној количини наведеног изотопа, посебно да би се спречила евентуална употреба за нуклеарна оружја, али и због процесних параметара. Зато је Француска нуклеарна комисија одмах покренула истрагу.

Најпре, мислило се да је тај изотоп разблажен случајним мешањем са осиромашеним уранијумом, али таква претпоставка није потврђена. Онда је вршено праћење састава уранијума у свим фазама, почев од рудника Окло у Габону, преко млина Мунана који се налази у близини, па све до споменутог постројења за обогаћивање у Француској. Откривено је да све количине које су стизале из рудника Окло показују нижи садржај од очекиваног, неке чак свега 0,44 атом. % ^{235}U . Касније су нађене и знатно ниже концентрације (0,29 атом. %).

ШТА ЈЕ УЗРОК ОВЕ ПОЈАВЕ И КАДА СЕ ТО ДЕСИЛО

Било је различитих хипотеза, а једна од њих је била да је уранијум из Окла осиромашен путем фисије, тј. да су у тој области некада у прошлости владали услови неопходни за рад нуклеарног реактора.

Ако је то тако онда би ваљало испитати који хемијски елементи су присутни у области рудника Окло и какав је њихов изотопски састав. Радио-активност фисионих производа или плутонијума овог реактора није уопште могла бити измерена, јер су се они били распали због великог протeka времена. Иначе, познато је да фисиони производи имају изотопске односе који се за већину елемената битно разликују од природних односа. Истраживања су показала присуство око тридесет стабилних елемената, и то не само на једном већ на шеснаест места у руднику Окло. Нађено је такође и да њихови изотопски односи одступају од природног састава, а одговарају саставу стабилних изотопа на крајевима изобарних низова фисионих производа. То је посебно очигледно код неодима (или неодимијума, Nd), који даје неколико стабилних производа значајне обилности и који недвосмислено указује да се фисија уранијума одвијала на истраживаним локацијама. Ово је био коначни доказ о постојању природних реактора. Табела 4 приказује неке од добијених резултата¹⁹⁹.

¹⁹⁹ M. Ragheb, Natural Nuclear Reactors, the Oklo Phenomenon, University of Illinois, Urbana, 11/13/2016.

Табела 4. Обилност изотопа неких елемената у природи, код фисије и у узорцима из Окла (at.%)

Изотоп	Природна обилност	Фисија ^{235}U термалним неутронима	Узорак (Окло)	Узорак (Окло) коригован на природни елемент
^{235}U	0,7202	–	0,4400	–
^{142}Nd	27,11	0,0	1,38	0,0
^{143}Nd	12,17	28,8	22,1	22,6
^{144}Nd	23,85	26,5	32,0	32,4
^{145}Nd	8,3	18,9	17,5	18,05
^{146}Nd	17,22	14,4	15,6	15,55
^{148}Nd	5,73	8,26	8,01	8,13
^{150}Nd	5,62	3,12	3,40	3,28
$^{151}\text{Eu}/^{153}\text{Eu}$	0,916	2,580	0,145	–
$^{140}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$	7,990	1,060	1,5700	–

Изотопски састав уранијума у природи није увек био онакав какав је данас. Његови природни изотопи се распадају различитим брзинама, табела 3, па је концентрација ^{235}U , који је од кључног значаја за фисију, а који се распада седам пута брже од доминантног ^{238}U , некада била знатно већа. Тиме су одбачене примедбе да се ланчана реакција не може остварити с природним уранијумом и обичном водом као модератором.

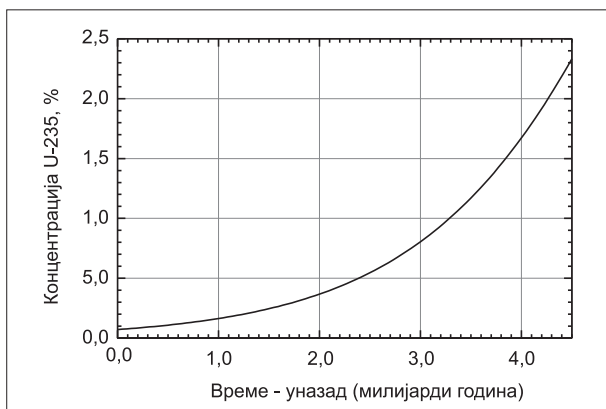
Фракција ^{235}U у укупном уранијуму²⁰⁰ у неком моменту геолошког времена означеном као $t = 0$, ако је та фракција у времену t (које је протекло након тог момента) једнака $\varepsilon(t)$, може се израчунати уз помоћ следеће једначине²⁰¹:

$$\frac{N_0^{235}}{N_0^{235} + N_0^{238}} = \left[1 + \frac{1 - \varepsilon(t)}{\varepsilon(t)} e^{(\lambda_{238} - \lambda_{235}) \cdot t} \right]^{-1} \quad (5)$$

Користећи ову једначину за садашњи садржај ^{235}U , тј. узимајући да је $\varepsilon(t) = 0,007202$, можемо израчунати одговарајућу фракцију за било коју вредност времена и тако сазнати какве су биле концентрације уранијумових изотопа (па и њихов однос) кроз геолошко време. Величине λ_{238} и λ_{235} су радиоактивне константе одговарајућих изотопа. Тај прорачун приказује слика 13.

²⁰⁰ То је вид изражавања концентрације неке врсте у узорку. Фракција је овде однос концентрације (или броја атома у датом узорку – N) изотопа ^{235}U према збиру концентрација свих изотопа у том узорку, конкретно према збиру концентрација ^{235}U и ^{238}U . Често се изражава у проценти (тако што се фракција помножи са 100). Присуство ^{234}U је занемарено.

²⁰¹ M. Ragheb, Natural Nuclear Reactors, the Oklo Phenomenon, University of Illinois, Urbana, 11/13/2016.



Слика 13. Концентрација изотопа ^{235}U као функција геолошког времена

Јасно се види да је пре нешто мање од 1,8 милијарди година концентрација ^{235}U била око 3 атом. % а то је концентрација са којом раде данашњи реактори који су модерисани лаком водом. Процене показују да је реактор у Оклу био активан у том периоду.

Дакле, ако је у Оклу било воде, уз задовољавање неких додатних услова, постојала је могућност да се одвија самоодржавајућа ланчана реакција фисије. Међу тим додатним условима важно је (i) да концентрација уранијума у руди буде довољна (најмање 10%), тј. да однос *модератор/гориво* буде оптималан; рудна тела у Оклу су понегде и неколико километара дуга, а у оквиру њих постоје локације у којима је концентрација уранијума, изразито висока, чак више десетина процената, (ii) да блокови такве руде, тј. тела реактора, буду што већи (дебели најмање пола метра), чиме се остварује тзв. критична маса реактора и смањује могућност умицања неутрона из система.

Рудник Окло је формиран у морско-мочварним условима и сматра се да су алге концентрисале овај метал. Такав уранијум је био измешан са глином и засићен водом која је служила као модератор. Процес се спонтано одвијао у дубини земље. Ако би ланчана реакција кренула да се развија у условима добре модерације то би водило ка њеном експлозивном ширењу. Међутим, пошто део воде испари због ослобађања топлоте, то реакцију доведе на услове оптималне модерације. Другим речима ово испаравање служи као контролни елемент реактора. Када се зона реактора „охлади“ вода се скондензује и враћа у систем итд. Нађено је петнаестак оваквих места у оквиру рудног тела у Оклу. Изглед остатака једног од њих приказује слика 14.

Колико је дуго реактор Окло био активан? У Оклу нису нађени кадмијум, бор, литијум нити индијум, за које је познато да веома ефикасно апсорбују неутроне, што је, наравно, веома повољно утицало на одвијање ланчане реакције и рад овог природног нуклеарног реактора.

Процењено је да је Окло радио око 150 000 година и том приликом трошио изотоп ^{235}U , додатно смањујући његову фракцију, па је она на тој

локацији данас нижа него на другим местима у свету, као и да је имао снагу између 10 и 100 kW. Наравно, није искључено да би се услови слични онима у Оклу могли стећи и на неком другом месту на Земљи. За сада о томе постоје само неке назнаке у Канади и Колораду.



Слика 14. Изглед остатака једног отвореног реактора у Оклу (преузето из Wikipedia-e)

Данас овакав догађај, наравно, није више могућан, због садашње ниске концентрације лакшег уранијумовог изотопа. У раним стадијумима формирања Земљине коре овакви процеси су могли бити значајни, посебно при стварању живог света, где се сматра да је јонизујуће зрачење играло важну улогу.

КРЕТАЊЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ ^{235}U КРОЗ ГЕОЛОШКО ВРЕМЕ

Формула за израчунавање концентрације ^{235}U кроз геолошко време се изводи на следећи начин. Ако се занемари садржај изотопа ^{234}U у природном уранијуму, а он износи 0,0054 атом. %, онда се за природни садржај ^{235}U у (нпр. садашњем) моменту времена t може писати:

$$\varepsilon(t) = \frac{N^{235}(t)}{N^{235}(t) + N^{238}(t)} = 0,007202 = \frac{1}{138,85} \quad (6)$$

По закону радиоактивног распада, број нераспаднутих атома неког изотопа у моменту времена t је у општем случају дат једначином (А.3).

Уврстивши за одговарајуће изотопе једначину (А.3) у једн. (6) добиће се:

$$\varepsilon(t) = \frac{N_0^{235} e^{-\lambda_{235}t}}{N_0^{235} e^{-\lambda_{235}t} + N_0^{238} e^{-\lambda_{238}t}} \quad (7)$$

Ако се ова једначина инвертује, добија се:

$$1 + \frac{N_0^{238} e^{-\lambda_{238}t}}{N_0^{235} e^{-\lambda_{235}t}} = \frac{1}{\varepsilon(t)} \quad (8)$$

Њено преуређивање даје однос бројева атома ^{238}U и ^{235}U у моменту $t = 0$:

$$\frac{N_0^{238}}{N_0^{235}} = \frac{1 - \varepsilon(t)}{\varepsilon(t)} e^{(\lambda_{238} - \lambda_{235})t} \quad (9)$$

Додајући јединицу на обе стране добијене једначине, затим њеним инвертовањем и преуређивањем, коначно се добија израз (5).

НУКЛЕАРНА ОРУЖЈА²⁰²

Природно је, с обзиром на концепт ове књиге, да је у овом одељку највише пажње поклоњено физионим оружјима, с посебним освртом на историјска и друштвена питања с тим у вези, нарочито она која се односе на II светски рат (чији почетак је коинцидирало с открићем фисије), када је све то и зачето. Ипак, додато је понешто и о хидрогенској (фузионој) бомби, као и о употреби (осиромашеног) уранијума за прављење тзв. поткалибарске муниције.

Идеја да се енергија фисије искористи као оружје, тј. за изазивање експлозије, јавила се одмах по сазнавању главних физичких параметара процеса. Како су се ова открића поклопила с почетком Другог светског рата, није никакво изненађење да је овај аспект нуклеарне енергетике исфорсиран пре но што би се у нормалним приликама одиграо. Нарочит подстицај је било одсуство информација код Савезника о томе до којег стадијума је у развоју овог оружја дошла хитлеровска Немачка (и делимично обрнуто) у оквиру свог *Уранијумској пројектиа*, започетог априла 1939. године, дакле у години почетка Другог светског рата. Наиме, Немци су први увидели велике ратне потенцијале реакције фисије чим је она откривена. На том пројекту, од низа знаменитих немачких научника тога времена нашла су се само два актуелна (Вернер Хајзенберг и Макс фон Лауе) и два будућа (Ото Хан и Валтер Боте) нобеловца. Руководилац пројекта постао је Хајзенберг (Нн. 1932),²⁰³ један од највећих научника у историји, али без икаквог искуства на пословима (из области нуклеарне физике/хемије) које је водио, без експерименталне вештине Фермија, и без организаторских способности какве су имали Опенхајмер и Лоренс у САД. То је представљало незанемарљив проблем пројекта.

²⁰² Део овог текста који се односи на физиона оружја је, највећим делом, пре петнаестак година написао проф. Слободан Рибникар, академик САНУ, и уступио га првом аутору овог рада. Овде је изворни текст осавремењен и делимично модификован и допуњен.

²⁰³ На месту директора KWI заменио је Петера Дебаја (*Peter Debye*) свежег нобеловца за хемију (1936). Холанђанину Дебају је стављено до знања да мора прихватити немачко држављанство или дати оставку на положај. Дебај је одбио обоје и након одласка на конференцију у САД у јануару 1940. није се више вратио у Немачку. Дебајев углед у Институту који је водио од 1909. био је толико велики да су Хајзенберга колоквијално означавали као „Директора у Институту“, а не „Директора Института“.

Додатни проблем је била његова расцепканост на неколико институција (као Кајзер-Вилхем-институт, KWI, у Берлину, Универзитети у Лајпцигу, Хајделбергу, Гетингену и Хамбургу, Војни експериментални завод у Кумерсдорфу (Kummersdorf)) и лоша координација између њих, као и између служби које су се смењивале у контроли над њима²⁰⁴.

Логичан пут је био, као што се касније десило и у САД, градња циклотрона, реактора и уређаја за раздвајање изотопа уранијума. Ипак, приликом избора модератора за реакторе начињена је одлучујућа грешка: закључено је да графит није погодан због превеликог ефикасног пресека за апсорпцију неутрона. Ово је потицало од недовољно чистих узорака. Тако је закључено да је тешка вода једини избор. Фабрика тешке воде у Норвешкој (коју је Немачка тада била окупирала) имала је тешкоћа да произведе довољне количине, па је рад на конструкцији реактора каснио²⁰⁵. Паралелно с тим, нацистичко руководство је било пред крај рата одустало од приоритета нуклеарне бомбе, уздајући се у своје ракетне бомбе V-1 и V-2. Тако је крај рата дочекао само један недовршени тешководни реактор. Срећа је да се пројект завршио неуспехом, а могући узроци тог неуспеха су детаљније разматрани у ДОДАЦИ – Г.

Теоријски прорачуни су показивали да би систем који се састоји од чистог ^{235}U или ^{239}Pu морао постати критичан у количини од 10-40 kg. После достизања ове масе, у њему би се спонтано развила ланчана реакција и у веома кратком времену ослободила енергија фисије. Резултујућа експлозија би морала бити десетинама хиљада пута разорнија од оних које користе хемијске експлозиве. Услов да се постигне ефикасна ланчана реакција је да се две поткритичне масе (или више њих) споје у критичну у врло кратком времену, реда 10^{-4} s.

Кључни фактор за испуњење горњег услова је да се оствари довољно брз прираштај броја неутрона у систему. Тај број (N) зависи од фактора умножавања неутрона (k) и просечног времена живота једне генерације неутрона (τ). Као функција времена се може израчунати помоћу једноставне формуле $N = N_0 e^{\frac{k-1}{\tau}t}$, где је N_0 почетни број неутрона. Тако, за нуклеарно гориво које се састоји од ^{239}Pu или високообогаћеног уранијума (у изотопу ^{235}U), величина τ је реда 10^{-8} s. Уз $k = 1,1$, један почетни неутрон ће за само 1 микросекунду створити око 22 000 нових неутрона, а чак 10^{26} неутрона после свега 6 μs , што производи веома ефикасну експлозију²⁰⁶.

У страху од немачких достигнућа у овом смислу, у САД је 1942. године предузет веома обиман тајни истраживачки и развојни програм познат под

²⁰⁴ Wikipedia: *German nuclear weapon project*.

²⁰⁵ Немци су преко својих обавештајаца били начули за амерички нуклеарни програм. У недостатку конкретних података, у два маха су из подморница, на обали Мексичког залива искрцане екипе које су планирале да се пробију до нуклеарних центара, али су похватане.

²⁰⁶ Ово је само идеална ситуација. У пракси, брз раст температуре испарава главнину фисилног материјала пре но што бива обухваћен ланчаном реакцијом. Процењено је да је прва нуклеарна бомба имала ефикасност од само 2%. Касније је ово сигурно „побољшано“.

именом Manhattan Project, под патронатом војске. У првих неколико година његовог функционисања ангажована су огромна материјална средства и, још важније, преко 100 000 физичара, хемичара, математичара и инжењера разних струка, међу којима и значајан број добитника Нобелове награде (в. ДОДАЦИ – Д). Ово је био највећи научно-технички подухват у историји до тада. Да су Американци знали за неуспех немачког пројекта, сигурно не би форсирали прескупци Manhattan²⁰⁷.

Основане су две тајне институције. Једна се налазила у пустињи Новог Мексика, на усамљеном и неприступачном планинском платоу званом Лос Аламос (Los Alamos), а друга у држави Тенеси, у пределу званом Оук Риџ (Oak Ridge). На рад су у добровољну потпуну изолацију доведени потребни стручњаци, међу којима неколико тадашњих и будућих нобеловаца. Ту је била и екипа из Енглеске, која је на овоме почела да ради пре Американаца, али је због ратних разарања бивала код куће ометана. Први центар је био намењен развоју бомби од уранијума и плутонијума, а други за обогаћивање изотопа уранијума.

Две се личности посебно истичу у овим активностима. Лабораторије у Лос Аламосу су биле под научним руководством реномираног теоријског физичара Роберта Опенхајмера, а активности у Оук Риџу су биле задужење Ернеста Лоренса. Опенхајмер је био високообразована личност, у слободном времену се бавио класичном музиком и поезијом на санскриту. (Будући из богате породице, чак није тражио ни плату за своје активности). Многе његове идеје су уграђене у прву плутонијумску бомбу. Због својих веза с Комунистичком партијом САД, после рата је био оптужен за издају и искључен из нуклеарног програма, али ништа није конкретно доказано па је рехабилитован. С друге стране, Лоренс је био до крајности практичан човек, типични амерички бизнисмен. Имао је добре везе с индустријом, знао је како да обезбеди новац за пројекте. Он је конструктор првог циклотрона (за шта је 1939. године добио Нобелову награду) и његово искуство и умеће је било веома значајно у конструисању и погону уређаја за електромагнетско одвајање изотопа уранијума у Оук Риџу. Тешко је наћи две тако различите личности!

Алберт Ајнштајн, који је 1939. године убедио председника Рузвелта да се с пројектом нуклеарног оружја започне, држао се после по страни. Касније је тајно доведен из Данске и Нилс Бор, али кад је добар део посла већ био урађен.

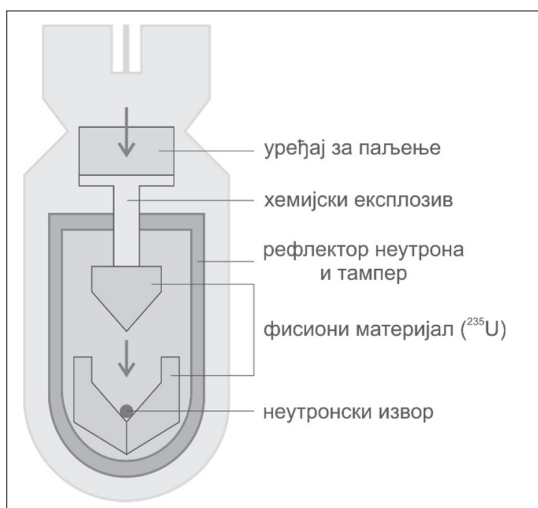
²⁰⁷ Трошкови за изградњу првих трију бомби износили су око 2 милијарде долара, што је у данашњим ценама бар око десет пута више. Тврди се да су данас трошкови израде једне фисионе бомбе само око 40 000 долара!

КОНСТРУКЦИЈЕ ФИСИОНИХ БОМБИ

Уранијумска бомба

Активности у институту у Оук Риџу, које су биле усмерене на обогаћивање изотопа ^{235}U , развијале су се у два смера. Један је био електромагнетско раздвајање изотопа, у коју сврху је изграђено неколико десетина таквих уређаја. За напајање струјом ових електромагнета био је ангажован добар део система хидроелектрана на реци Тенеси и њеним притокама²⁰⁸. Због ратног недостатка бакра за навоје електромагнета, искоришћено је 15 000 тона сребра из државног трезора. Истовремено је интензивно рађено и на развоју дифузионих метода раздвајања. Термодифузија у течном уранијум-хексафлуориду није показала задовољавајуће резултате, али се гасна дифузија кроз порозне мембране, с гасовитим UF_6 показала ефикасном. После развоја одговарајућих мембрана, изграђен је огроман комплекс за гасну дифузију.

Методима електромагнетског раздвајања и гасне дифузије, до 1945. године произведено је довољно обогаћеног уранијума за једну фисиону бомбу.



Слика 15. Схема уранијумске бомбе

Рачун показује да високообогачени ^{235}U (94% ²⁰⁹) треба да достигне критичну масу за брзу фисију у сферној геометрији при количини од око 40 kg.

²⁰⁸ Ради се о великом систему брана (50) и хидроелектрана које су саграђене у периоду 1933–1939. у оквиру јавних радова названих „њу дил“ (New Deal), које је иницирао председник Фр. Рузвелт да би умањио последице Велике депресије која је тада владала у САД.

²⁰⁹ Ако је раздвајање изотопа извођено гасном дифузијом, неизбежно је у лакој фракцији концентровање природног изотопа ^{234}U , који има повољнији фактор раздвајања од изотопа ^{235}U . Ово није случај с електромагнетски раздвојеним изотопима.

Ово представља сферу с пречником од 16 cm. Употреба погодних рефлектора може смањити критичну масу за фактор 2 до 3.

Показало се довољним да се две поткритичне половине, уз присутни неутронски извор²¹⁰, брзо споје у наткритични систем. Да би се већ поменути услов од 10^{-4} s задовољио, примењен је принцип испаливања једног дела уранијума у други, у шупљину остављену у другој половини (сл. 15). Оваква бомба је примењена приликом бомбардовања Хирошиме²¹¹ 6. августа 1945. године.

Плутонијумска бомба

Према сазнањима о особинама чистог ^{239}Pu (добијеног циклотронским озрачивањем уранијума) и код њега би требало да буде применљива иста техника, тј. брзо спајање поткритичких количина. Она се, ипак показала као непогодна.

Како је већ речено у поглављу „Нуклеарна ланчана реакција“, у нуклеарним реакторима се поред изотопа ^{239}Pu ствара и ^{240}Pu . Поред тога што није фисилан, овај изотоп показује знатну спонтану фисију с активношћу од 480 догађаја у секунди по граму. При томе се емитује преко 1000 фисионих неутрона у секунди. Иако се са ^{240}Pu не може остварити ланчана реакција, у току спајања двају половина бомбе, фактор k ланчане реакције ^{239}Pu нормално расте. Ипак, пре достизања његове максималне вредности за експлозију, фисиони неутрони са језгрима ^{240}Pu у повратној спреси производе још више неутрона, јер је праг за фисију овог нуклида релативно низак, 0,2 MeV. Тако би дошло до превремене термичке експлозије што би знатно умањило ефекте бомбе.



Слика 16. Схема плутонијумске бомбе

²¹⁰ Иако неутрона има стално у уранијуму због спонтане фисије, није извесно да ће их бити довољан број у одлучујућем кратком времену започињања реакције.

²¹¹ Та бомба, под надимком „дечко“, је била дуга 3 m, с пречником од 0,7 m и масом од 4 тоне. Њена експлозивна снага је била еквивалентна снази бомбе од 15 000 тона ТНТ.

Стога је по идеји физичара Недермајера пројектован оригинални уређај који функционише на принципу имплозије. Одређена (заједно поткритична) количина плутонијума стављена је у центар сфере и опкољена посебно распоређеним пуњењима веома бризантног експлозива. Иницирањем хемијске експлозије, детонациони талас се фокусира ка центру сфере. Том приликом се активира неутронска емисија вештачког неутронског извора, а метални плутонијум компримује све до на половину почетне запремине. Овиме је плутонијум доведен у критично стање и елиминисан је утицај преурањеног почетка фисије. Прва проба оваквог уређаја је изведена у пустињи названој Хорнада дел муерте (Jornada del Muerte, путовање смрти) у савезној држави Нови Мексико. Најближе насељено место (око 100 км) био је градић Аламогордо. Експеримент се одиграо 16. јула 1945. године, с пуним успехом. Бомба ове конструкције је бачена као друга на јапански град Нагасаки²¹² 9. августа 1945²¹³. Схема каснијих имплозионих конструкција је приказана на сл. 16. Принцип имплозије може бити примењен и на уранијумске бомбе, чиме се смањује потребна критична маса. Није јасно, тј. држи се у тајности, до којег је процента присуства ²⁴⁰Pu у плутонијумском гориву још могућно остварити нуклеарну експлозију. Свакако је боље располагати с горивом с минималним процентом.

КОНСТРУКЦИЈА ТЕРМОНУКЛЕАРНЕ (ВОДОНИЧНЕ) БОМБЕ²¹⁴

Пред сам крај Другог светског рата, када је већ било јасно да је овладана енергија фисије, почело се размишљати и о коришћењу фузионе енергије у сврху изградње бомбе, опет у Лос Аламосу. Иницијатор овог пројекта је био физичар Едвард Телер (чему се опирао Опенхајмер и многи други научници).

Под појмом *фузија* атомских језгара се у ширем смислу подразумева нуклеарна реакција у којој се два језгра стапају, дајући ново, теже језгро²¹⁵.

Термонуклеарна фузија је врста фузионе реакције у којој се два или више лаких језгара (с малим односом B/A , B – енергија везе, A – масени број језгра; в. слику 4 – дијаграм зависности енергије везе по нуклеону од броја нуклеона) спајају у језгро код којег је тај однос већи. Један такав тип фузије, ($d-t$), који је поменут у фусноти 177, искоришћен је за развој хидрогенске

²¹² Та бомба, под надимком „дебелко“, је била дуга 3,25 m, с пречником од 1,52 m и масом од 4,5 тона. Њена експлозивна снага је била еквивалентна снази бомбе од 21 000 тона ТНТ.

²¹³ Претње Америкаца да ће на Јапан бацити и трећу „атомску“ бомбу, био је чист блеф: тада још нису имали нову бомбу спремну, било којег типа. Јапан је ипак капитулирао, иако не само због тога.

²¹⁴ Често се користи и назив ‘хидрогенска бомба’.

²¹⁵ Изотопи најтежих данас познатих елемената (нпр. редних бројева у Периодном систему 110 и више) су добијени фузијом релативно тешких језгара.

бомбе. У тој фузуји се два изотопа водоника, код којих је средња вредност наведеног односа око 2 MeV по нуклеону, спајају дајући 4-хелијум, код којег тај однос има вредност од око 7 MeV по нуклеону.

Први амерички експеримент у том смислу је изведен 1952. године на пацифичком атолу Ениветок (Eniwetok или Enewetak) и састојао се у следећем. Одређена количина од више килограма смеше тритијума, ^3H , и деутеријума, ^2H , у течном стању, стављена је у оквир обичне фисионе бомбе. По активирању ове бомбе, смеша се загрејала до температуре довољне за већ поменути реакцију: $^3\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + ^1\text{n} + 17,6 \text{ MeV}$.

Ово и није била проба бомбе у дословном смислу: до експлозије је течна смеша (на температури испод 14 K) доведена у лабораторији с низом пратећих уређаја и зграда (минимална потребна маса уређаја је била 92 t). Резултати су ипак били спектакуларни: снага експлозије је била 500 пута већа од бомбе бачене на Хирошиму, а четвртина атола је нестала.

И овде је коришћен принцип имплозије, с разликом што је уместо хемијског експлозива за постизање компресије, коришћен притисак зрачења фисионе експлозије. Концепт потиче од Е. Телера²¹⁶ и С. Улама²¹⁷.

Велико изненађење је код Американаца изазвала вест да су Совјети већ следеће године испробали своју термонуклеарну бомбу, која је била бомба у правом смислу (могла се преносити авионом). Они су прескочили дуготрајну и мукотрпну фазу производње тритијума, која се састоји од озрачивања литијума неутронима у нуклеарним реакторима реакцијом $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{T}$. Као медијум је код њих коришћено чврсто једињење ^6LiD рачунајући да ће неутрони фисионог упаљача произвести довољно тритијума, што се у микросекунди и збило. Вероватно допринос даје и директна фузија $^6\text{Li} + ^2\text{H} \rightarrow 2^4\text{He} + 22,4 \text{ MeV}$ (Аутори А. Сахаров²¹⁸ и И. Там²¹⁹).

За разлику од фисионих бомби које имају горњу границу повећања снаге, овде ове границе нема. Свака количина фузионог горива доприноси снази, јер овде критична маса не постоји.

Термонуклеарна реакција се данас користи и као „помагач“ (енгл. booster) код фисионих бомби. У центар фисионог експлозива се ставља мања количина фузионог горива. У моменту експлозије се једновременно одиграју

²¹⁶ Edward Teller (1908–2003, рођен у Будимпешти, Мађарска), мађарско-амерички теоријски физичар, ‘отац’ америчке водоничне бомбе. Био је суоснивач и дугогодишњи директор Националне лабораторије Лоренс у Ливермору (Lawrence Livermore National Laboratory – LLNL).

²¹⁷ Stanisław Marcin Ulam (1909–1984, рођен у Лембергу, Галиција, данашњи Лавов у Украјини), пољско-амерички научник у области математике и физике.

²¹⁸ Андреј Дмитријевич Сахаров (1921–1989, рођен у Москви, Русија), совјетски нуклеарни физичар, творац идеје ТОКАМАК-а, као реактора за контролисану фузију, али и творац совјетске водоничне бомбе. Добитник је Нобелове награде за мир 1975. године! Такође, добитник је и Стаљинове награде 1953. и Лењинове награде 1956. године.

²¹⁹ Њгорь Евгеньевич Тамм (1895–1971, рођен у Владивостоку, Руска Царевина), совјетски физичар, добитник Нобелове награде за физику 1958. године за откриће Черенковљевог ефекта.

оба процеса, фисија и фузија. Ова друга ослобађа обиље неутрона и тако повећава принос фисије присутног уранијума или плутонијума.

ЕФЕКТИ НУКЛЕАРНЕ БОМБЕ

Цео процес брзе ланчане реакције фисије траје око $1 \mu\text{s}$, при чему температура порасте до више милиона К. Без икаквих додатака, нуклеарно гориво би се брзо испарило и ланчана реакција прекинула. Да би се принос реакције повећао, тј. омогућило одигравање бар 40 генерација фисије, гориво се прво опкољава рефлектором неутрона (што доводи и до смањења критичне масе) и тешким оклопом (тзв. тампер) који својом инерцијом успева да одржи реагујући систем на окупу још неку микросекунду дуже, пре но што се и он испари²²⁰. Овај оклоп, тампер, може бити и природни или осиромашени уранијум; брзи неутрони овде произведу додатне фисије, што доприноси снази бомбе. (Било је и експеримената када је оклоп био од металног кобалта, који се неутронским реакцијама претварао у радиоактивни ^{60}Co ; ово је пример „прљаве бомбе“).

Непосредни ефект нуклеарне експлозије се састоји прво од емисије γ -зрака, друго од брзих неутрона и треће, од термалне емисије практично целог електромагнетског спектра: од Х-зрака до радиоталаса. Што се тиче овог последњег, емисија је веома различита од онога што се подразумева као „термално“. Због изузетно високе почетне температуре извора, максимум зрачења²²¹ ће бити у области меких Х-зрака. Ово зрачење, уз ултраљубичасто, бива апсорбовано у околном ваздуху, доводећи атоме азота и кисеоника до високог степена јонизације. Накнадна неутрализација и деексцитација ових атома даје емисију спектралних линија ових атома и доприноси стварању тзв. ватрене лопте, која се шири до пречника од 200 m до 5 km, што зависи од снаге експлозије. Из времена светљења се може приближно одредити снага експлозије. Како се ватрена лопта диже и хлади, помера се и максимум емисије према већим таласним дужинама.

Примарно γ -зрачење опада с растојањем по нормалном експоненцијалном закону. Од снаге бомбе зависи до које даљине ће ово зрачење бити летално. За бомбу од 10 kt ово растојање је око 1,1 km а за бомбу од 10 Mt је оно око 5,5 km.

²²⁰ Почев од првих експлозија у Другом светском рату, снага експлозије се изражава у поређењу с тада најјачим хемијским експлозивом, тринитротолуеном (ТНТ). То је било згодно јер је добар део становништва зараћених земаља имао представу шта, на пример, чини бомба од једне тоне. Снага прве бомбе бачене на Хирошиму процењена је на еквивалент од 20 хиљада тона ТНТ (20 kt), па је то узето као „номинална“ снага. Егзактно говорећи, ово износи $8,8 \times 10^{13}$ J. Данас се „асортиман“ нуклеарних бомби креће од 0,01 kt или мање па до десетина мегатона (Mt).

²²¹ Према Виновом закону, који гласи $\lambda_{\text{max}} T = 0,0029 \text{ m K}$, где је λ_{max} таласна дужина на максимуму криве.

Брзи неутрони допиру до око 900 m од центра експлозије независно од снаге бомбе. Поред тога што активирају елементе већег ефикасног пресека, они могу бити изузетно штетни за живе организме због избацивања водоникових атома из сложених биомолекула у еластичним сударима с тим атомима²²².

Ваздушни ударни талас као последица експлозије разара грађевине. Бомба од 10 kt изазваће непоправљива оштећења на растојањима од око 1,5 km од центра експлозије, док ће 1000 пута јача бомба (10 Mt) ово растојање проширити на око 18 km. Последице топлотног зрачења ватрене лопте су шире, али зависе од стања атмосфере. Опекотине и пожари ће при ведром времену у првом случају бити изазвани на растојању од 2,4 km, док је у другом ово удаљење око 32 km.

Ако је експлозија приземна, знатна количина тла се испарава и диже се конвекцијом заједно с испареним компонентама саме бомбе. Елементи високог ефикасног пресека на реакцију (n,g) бивају уз то активирани (највероватније од стране закаснелих неутрона). Све се диже до 30 km у висину, градећи познату „атомску печурку“. Кондензате који садрже фисионе производе и активирани елементи висински ветрови потом разносе на велика пространства (тзв. радиоактивне падавине).

Нуклеарна експлозија индукује и врло јако електромагнетско поље око себе, до 50 kV/m. Ово омета пријем радио-емисија па може и да уништи отпремне и пријемне уређаје. Полупроводничке компоненте у електронским уређајима тако могу претрпети неповратну штету. Ако се експлозија изведе у стратосфери, може изазвати глобалне поремећаје у радио-комуникацијама, које на већим удаљењима могу трајати и данима.

Подземне нуклеарне експлозије закратко у стенама стварају шупљине пречника 60 до 300 метара (у зависности од снаге бомбе). Фисиони производи се углавном растварају у стопљеном материјалу зидова. Овај се растоп брзо слива на дно шупљине а таваница се после попуштања створеног притиска водене паре, најчешће урушава и пуни празан простор. Ако је проба изведена на довољној дубини, до површине не допире никаква радиоактивност (што није увек био случај).

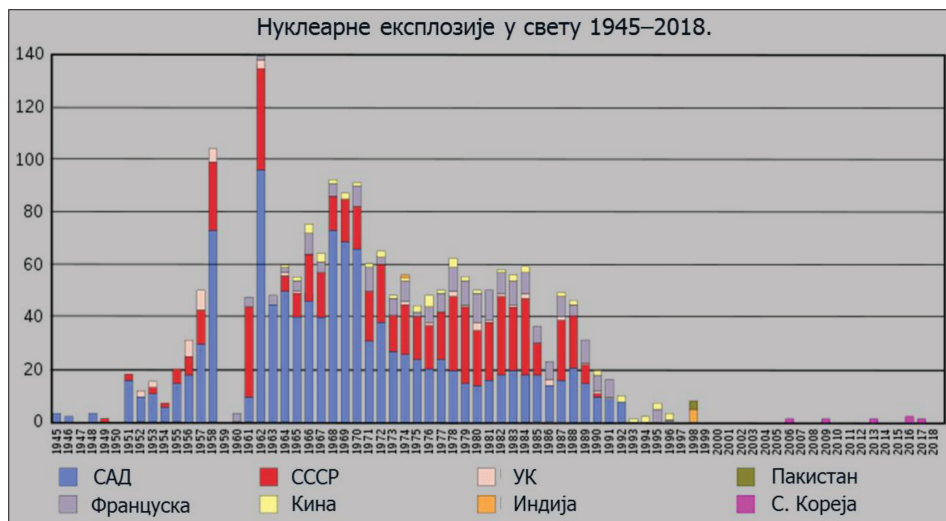
Посебан случај је тзв. неутронска бомба. То је термонуклеарна бомба релативно мале снаге, код које доминира емисија неутрона. Упаљач за ову бомбу је, претпоставља се, фисиона бомба малог приноса фисије, до 1 kt, у вези са смешом $D + T$ уместо ${}^6\text{LiD}$. Дobar део енергије се овде ослобађа у облику зрачења, поглавито неутронског. Ове бомбе су наводно „чисте“, јер остављају малу количину фисионих производа и не изазивају разарања. Главна је њихова сврха уништавање живог света и заузимање практично нетакнутих положаја или градова.

²²² Предаја енергије у еластичним сударима је ефикаснија уколико сударни партнери имају сличне масе. У конкретном случају, језгро водоника (протон) има (скоро) исту масу као неутрон.

НУКЛЕАРНО ОРУЖЈЕ У ДРУГИМ ЗЕМЉАМА

У Совјетском Савезу, далеко од линија фронта, текла је у тишини такође убрзана активност, непозната Савезницима. Знатно време и средства им је уштедела „кооперација“ с Лос Аламосом преко обавештајаца добровољаца који су цело време слали важне податке. Огромно изненађење Американаца су изазвали подаци да су Совјети испробали своју прву фисиону бомбу само 4 године после њих (иако су рачунали да су они још веома далеко од тога).

Своје прве бомбе су испробали Британци 1952, Французи 1960, Кинези 1964, Индијци 1974. и Пакистанци 1998. године. У овом столећу се појављује и Северна Кореја, која је извела неколико проба својих нуклеарних бомби. Преглед свих досадашњих проба је дат на слици 17.



Слика 17. Преглед изведених проба нуклеарних бомби по државама у периоду 1945–2018. године. (Преузето из Wikipedia-e)

*

Поуке из ових историјских података су следеће.

- 1) Велике силе су временом изгубиле примат над нуклеарним оружјем, иако се грчевито труде да га одрже. Данас се са сигурношћу тврди да с нуклеарним оружјем располажу још Израел (најмање 200 јединица укључујући и термонуклеарне), Индија (20–50), Пакистан (до 10), Јужна Африка (6), као и Северна Кореја с непознатим бројем јединица. С друге стране, Немачка, Италија, Јапан, Канада и Швајцарска могу произвести нуклеарно оружје за годину дана ако то одлуче да

ураде. Ово су, ипак, скромне бројке ако се упореде с арсеналом којим располажу САД и земље бившег Совјетског Савеза, који располажу, процењује се, с најмање по 50 000 јединица.

- 2) Велики број земаља има данас у погону енергетске реакторе (сопствене конструкције, произведене по лиценци или купљене) који су стални извори плутонијума.
- 3) С изузетком (тешководних) реактора типа CANDU – CANadaDeuteriumUranium, сви ови реактори данас раде с мало обогаченим горивом (3–4% ^{235}U), што није случајно. Ово су реактори високог флукса неутрона, па настали плутонијум има велики садржај изотопа ^{240}Pu и виших. Од оваквог плутонијума, како је изложено горе, не може се формирати критична маса за бомбу, или је она веома велика. Излаз је вађење горивних елемената из реактора далеко пре пуног искоришћења, уз резултујуће чуђење што је нуклеарна струја скупа²²³. Ово су тзв. „сиротињске“ нуклеарне бомбе.

Од свог самог почетка, истраживање разних типова и конструкција нуклеарних бомби је очигледно било врло интензивно. Зашто би се иначе упропашћавао драгоцени фисиони материјал у стотинама пробних експлозија?

Обесхрабрујућа је чињеница да би употреба свих данашњих нуклеарних бомби била довољна за вишеструко уништавање целокупног живота на Земљи! Активирање и мањег дела расположивих залиха убацило би у високу атмосферу велике количине прашине и дима, што би спречило пролазак сунчевог зрачења и изазвало тзв. „нуклеарну зиму“ с несагледивим последицама.

Постоји низ пројеката за употребу нуклеарних експлозија у мирнодопске сврхе, нпр. за прокопавање канала, скретање речних токова, стварање подземних резервоара за петролеј и др., али се изгледа од тога одустало, нарочито после међународне забране надземних експлозија 1963. године²²⁴.

УРАНИЈУМСКА МУНИЦИЈА

Како јој само име говори, уранијумска муниција се производи од (металног) уранијума, најчешће од оног који је изотопски осиромашен (OU, в. слику 12 и одговарајући текст који иде уз њу). Сматра се да је овакву муницију развијало неколико десетина земаља, али су је само САД користиле у ратним дејствима, и то у Заливском рату 1991. године, у бомбардовањима СР Југославије, посебно на Косову, 1999. године, те у инвазији на Ирак 2003. године.

²²³ Плутонијум који садржи ^{240}Pu ипак је сасвим употребљив као реакторско гориво у брзим реакторима. Овај изотоп, додуше, није фисилан али је подложен фисији брзим неутронима (праг 0,2 MeV), за шта је средина брзог реактора погодна.

²²⁴ Уговор о забрани проба нуклеарног оружја у атмосфери, у Свемиру и под водом су 5. августа 1963. године у Москви потписале владе Совјетског Савеза, Сједињених Држава и Велике Британије.



Слика 18. Изглед пројектила од ОУ. (Преузето из Wikipedia-e)

Најчешће се користе гранате пречника 30 mm и масе 300 g, чији изглед приказује слика 18, и то углавном у антиоклопним дејствима, нпр. у борби против тенкова. Наравно, могуће је направити и друге форме. Овакви пројектили, захваљујући првенствено веома великој густини уранијума комбинованој с пирефорношћу при удару, имају знатне предности над конвенционалном антиоклопном муницијом од волфрама. Својства ова два ‘муницијска’ материјала су поређена у табели 5.

Табела 5. Поређење својстава уранијума и волфрама

СВОЈСТВО	УРАНИЈУМ (са 0,7% Ti)	ВОЛФРАМ
Густина (g/cm^3) ²²⁵	19,1	19,3
Тврдоћа	средња	велика
Тачка топљења (°C)	1132	3410
Пирефорност при удару	да	не
Промена при удару	испаривање-самошићење	печурк. деформација
Цена	веома ниска	висока

Пробојност антиоклопне муниције се остварује концентрисањем велике силе удара на што мању површину, слично као код стреле. То се обезбеђује великом масом гранате при што мањим димензијама, тј. великом густином материјала. ТО ЈЕ ПОТКАЛИБАРСКА МУНИЦИЈА.

Предности уранијумске муниције се састоје у следећем:

- пирефорност уранијума при удару чини да се повишава температура оклопа до топљења, при чему површина гранате испарава и смањује своје димензије – самозашиљивање – оба ефекта симултано доприносе повећаној пробојности;
- волфрам је по густини сличан уранијуму, али није пирефоран, а при удару трпи пластичну деформацију, скуп је;
- развијене су методе отврдњавања уранијума његовим легирањем.

Имајући све наведено у виду јасно је да је уранијум „савршен материјал“ за прављење муниције за разбијање оклопа.

Што се тиче могућних утицаја употребе муниције од ОУ на животну средину и здравље људи треба знати да су највишем степену непосредне угрожености изложени:

²²⁵ Често се каже ‘тежак као олово’, а олово има густину која је свега $11,3 \text{ g/cm}^3$.

- посада оклопног возила које је погођено – удисање испарења која пројектил производи, шрапнели итд. чији остаци се могу задржати у организму;
- спасиоци који непосредно након удара долазе у помоћ, те људи у околини на војишту.

У питању је појава усијаних честица уранијумових оксида веома малих (до нано нивоа) димензија, када пројектил погоди тврду мету. О штетности таквих честица уопште има довољно доказа. Додатно, овде се ради о (слабо) радиоактивним и врелим честицама у моменту дејства.

Токсичносћ

Хемијска токсичност уранијума је знатно израженија од радиолошке. Он је тешки метал, посебно опасан за бубреге. Запажено је да особе у чијем организму има уранијума показују његово појачано излучивање, што је, између осталог, индикатор да су му биле изложене.

Радиолошка токсичност се своди на велику моћ јонизације алфа-честица које уранијум емитује, што доводи до разарања ћелија, али само ако се унесе у организам. Како је већ речено у поглављу „О УРАНИЈУМУ“, уранијум је, с обзиром на екстремно дуга времена полураспада његових природних изотопа и на релативно ниске енергије зрачења, елемент ниске радиотоксичности, али, без обзира на то што је његова радиоактивност веома слаба, треба имати у виду да нема „сигурне“ дозе радијације, тј. потребно је уважавати концепт ALARA²²⁶, као основни концепт радиолошке заштите.

²²⁶ „ALARA” је скраћеница од енгл. „As Low As Reasonably Achievable“, што значи *Онолико ниско колико је моћуће остварити*, мисли се на дозу.

ДОДАЦИ

A. ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

*Основно о хемијским елементима,
атомима, изоџоимима итд.*

Атоми хемијских елемената се састоје од атомског језгра и електрона који се око њега крећу, што се често назива електронски омотач. Наелектрисање омотача је једнако наелектрисању атомског језгра, само је супротног знака, што обезбеђује електронеутралност атома.

На основу хемијског понашања сви хемијски елементи су разврстани у Периодном систему, где је њихов положај у директној вези с тим понашањем. Хемијско понашање у ужем смислу се своди на то да ли елемент има могућност изградње хемијских веза и какав је њихов карактер. Та могућност претежно зависи од броја електрона у електронском омотачу и од његове структуре. Прецизније, периферни електрони у омотачу ступају у интеракције с електронима других атома, те су они стварно одговорни за изградњу и кидање хемијских веза.

Само атомско језгро се састоји од две врсте честица – протона и неутрона. Наелектрисање језгра је дефинисано бројем протона, који у ствари 'диктира' број електрона у омотачу, што даље значи да су хемијски елементи примарно окарактерисани наелектрисањем њиховог атомског језгра. Тај број се назива *атомски број* и он одређује њихов положај, тј. *редни број* елемента у Периодном систему. Следи да су атомски и редни број једно те исто. Редни број елемента се обично означава са Z .

Неутрон је неутрална честица која има масу сличну протону. Број неутрона се означава са N .

Општи назив за протоне односно неутроне у атомском језгру је *нуклеони*. Њихов број је дат збиром броја протона и броја неутрона. То је *масени број*. Обично се означава са A ; дакле, масени број $= A = Z + N$.

Нуклид је атом, односно атомско језгро које има одређене вредности A и N .

Изоџоими су атоми истог елемента који имају различите масе, што потиче од различитог броја неутрона у њиховим језгрима. Следствено томе, они се налазе на истом месту у Периодном систему ($Z = \text{const.}$), одакле потиче и

њихово име (на грчком ισος – исто, τοπος – место). Слично, *изобари* су атоми различитих елемената који имају исти масени број A .

Према конвенцији коју је предложио Ф. Жолио-Кири, у општем случају изотоп елемента E се означава као ${}^A_Z E = \frac{\text{масени број}}{\text{редни број}} E$. У пракси се редни број обично изоставља, пошто сâмо навођење хемијског знака говори и о његовом месту у Периодном систему.

Важна карактеристика елемената је њихова маса, која се изражава или као апсолутна или као релативна атомска маса. *Айсолуџна айџомска маса* (маса мировања) је маса атома изражена у килограмима. Она зависи од броја нуклеона у језгру и приближно је једнака збиру њихових маса умањеном за тзв. дефект масе²²⁷. У прецизним рачунима везаним за атомске масе потребно је узети у обзир и масу електронског омотача, мада она не утиче битно на укупну масу атома, пошто је нпр. маса једног протона око 1836 пута већа од масе електрона. *Релативна айџомска маса* се дефинише као број који показује колико је пута маса неког атома већа од $1/12$ масе атома угљеника, изотопа ${}^{12}\text{C}$. То је тзв. *айџомска јединица масе* (ајм), што је једнако $1,6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$. Наравно, атом наведеног изотопа угљеника на овој скали има релативну атомску масу једнаку тачно 12,00000 ајм. Истовремено, маса протона је 1,007276, маса неутрона је 1,008665, а маса електрона 0,00054860 ајм.

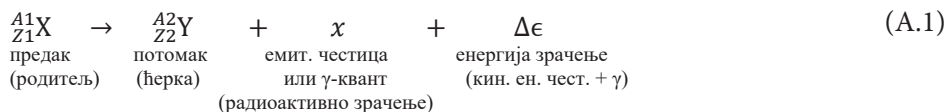
Мол је јединица за количину супстанције. То је она количина супстанције која садржи исти број честица као и 12,00000 g угљениковог изотопа ${}^{12}\text{C}$, тј. садржи Авогадров број честица – $N_A = 6,022 \times 10^{23}$. Тако, можемо говорити о ‘молу’, кад се ради о молекулима неког једињења, ‘мол-атому’, кад се ради о атомима, ‘мол-јону’, ‘мол-електрону’ итд. Штавише, понекад се користи и појам ‘мол-фотон’, што је јединица која се зове *ајнџиџајн* – $1 \text{ ајнџиџајн} = 1 \text{ мол-фотон}$.

Моларна маса (M) се дефинише као однос масе супстанције (m) и њене количине изражене кроз број мола (n): $M = m/n$, (јединица: g/mol). С обзиром на дефиницију мола, следи да је *моларна маса* бројно једнако *релативној маси*. Отуда произилази да се *мол* може дефинисати и као број грама неке супстанције који је једнак његовој релативној молекулској или атомској маси.

Радиоакџивносџ, нуклеарне реакџије, доза зрачења

Шта је радиоакџивност и зашто до ње долази. *Радиоакџивносџ* (или радиоакџивни распад) је спонтани процес путем којег нестабилна језгра прелазе у стабилно или стабилније стање, уз емисију честице или електромагнетског зрачења, ослобађајући се при томе вишка енергије. Тиме се постојећи број радиоакџивних језгара смањује са временом. Приказује се као:

²²⁷ Дефект масе је разлика масе неког атомског језгра и збира маса његових (слободних) конституената – протона и неутрона. У директној је вези са енергијом везе међу нуклеонима. Прецизније, конституенти везани у језгру имају мању масу у односу на слободне, јер су један део своје масе ‘уложили’ у стварање језгра, тј. у међусобно везивање.



Особености радиоактивног распада су да (i) постоји ограничен број типова распада без обзира на језгро, а најважнији су: 1) α -распад (емисија α -честице, тј. језгра хелијумовог изотопа ${}^4_2\text{He}^{++}$ из језгра), 2) β -распад (емисија електрона e^- , када се говори о β^- -распаду, или позитрона e^+ , када се говори о β^+ -распаду), 3) γ -распад (емисија електромагнетског зрачења велике енергије, тј. високе фреквенције), 4) захват електрона (кад језгро захвати електрон из електронског омотача атома) и 5) спонтана фисија језгра; (ii) да за све типове радиоактивног распада важи јединствен кинетички закон – закон радиоактивног распада.

Закон радиоактивног распада. Овим законом се квантитативно изражава кинетика радиоактивног распада. Полази се од тога да у процесу представљеном једначином А.1 брзина распада (нестајања) посматраног скупа идентичних језгара означених са X , зависи само од количине (броја) тих језгара у узорку (N) у моменту времена t (што се изражава преко одговарајуће константе λ), али не и од њихове прошлости или тренутног стања:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (\text{A.2})$$

где је λ тзв. *радиоактивна константа*, којом се карактеришу специфичности у погледу брзине распада одређеног нуклида, тј. његова „склоност ка распаду“, и њена вредност је константна у времену и у односу на спољне услове (температуру, притисак, хемијски облик у којем је дати нуклид везан итд.). Отуда и закључак да је брзина распада функција само количине материјала.

Горњи израз представља *диференцијални облик закона радиоактивног распада*. Ако се изврши његово интеграње на уобичајени начин и уз тзв. почетне услове, да је у моменту времена $t = 0$ број нераспаднутих атома био N_0 , добија се уобичајена форма овога закона

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{A.3})$$

Дакле, број нераспаднутих атома је експоненцијално опадајућа функција времена.

Радиоактивна константа (константа радиоактивног распада) λ је основни параметар распада. Очигледно је да она карактерише вероватноћу распада датог типа језгра и бројно је једнака делу атома који се распадају по јединици времена. Има димензије s^{-1} .

Други важан параметар је *време полураспада* $t_{1/2}$. Дефинише се као време у току којег се распадне половина радиоактивних језгара. Оно такође карактерише кинетику распада датог радионуклида и у директној је вези са радиоактивном константом – $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$, што је лако доказати. Времена

полураспада могу имати вредности у широком распону, од 10^{-10} секунди до 10^{15} година, па и више.

Активност (радиоактивност) узорка је апсолутна брзина распада и дефинисана је бројем распада у јединици времена, дакле једначином (А.2). Ако се та једначина комбинује с једначином (А.3) лако се показује да се *активност* мења са временом по закону који је аналоган закону радиоактивног распада:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{А.4})$$

Активност се у пракси знатно чешће користи за карактерисање радиоактивности неког узорка него број нераспаднутих језгара у одређеном моменту времена, јер се много лакше мери од овог потоњег.

Радиоактивно зрачење, тј. честице или γ -кванти који се емитују при радиоактивном распаду, носи релативно велике енергије и способно је да јонизује средину кроз коју пролазе и да тиме изазове значајне промене у тој средини. Дакле, оно спада у тзв. јонизујућа зрачења.

Нуклеарне реакције. Под нуклеарном реакцијом се подразумева процес при којем атомско језгро неког елемента интерагује са другим (обично лаким) језгрима, слободним неутронима или фотонима довољне енергије, и у току веома кратког времена се трансформише у друго језгро (или више језгара), емитујући при томе честице или електромагнетно зрачење, или, најчешће, и једно и друго. Другим речима, трансформација једног језгра у друго се изводи тако што се ово прво бомбардује пројектиlima велике енергије. Обично се представља једначином аналогној оној за хемијске реакције:



X – језгро мете, Y – језгро производа, а – пројектил којим се бомбардује полазно језгро, b – избачена честица или фотон (ејектил). У пракси се чешће користи скраћена, тзв. Бетеова (*Hans Albrecht Bethe*, 1906–2005) нотација:



У њој су у заградама дате скраћене ознаке пројектила и ејектила раздвојене зарезом, а са страна језгра мете односно производа.

Важно је запазити да нуклеарна реакција, за разлику од радиоактивног распада, није спонтан процес, већ је то индукована трансформација. Спада у сударне процесе.

Доза зрачења. Само онај део енергије зрачења који је апсорбован у материјалу може у њему изазвати промену. Да би се те промене успешно пратиле неопходно је пратити и апсорпцију енергије. Тиме се бави област радијационе хемије и физике која се зове дозиметрија зрачења.

Основни појам у дозиметрији је доза (грчки $\delta\acute{o}\varsigma\iota\varsigma$ – давање). Појам је преузет из медицине, где означава количину лека која се уноси у организам.

Радијациона доза је мера енергије зрачења апсорбоване у материји. С њом у вези се дефинише неколико величина које је ближе одређују у конкретним условима. Тако постоје:

- 1) *Апсорбована доза (D)* је количина енергије зрачења апсорбована по јединици масе материјала – $D = dE_{\text{aps}}/dm$. Јединица апсорбоване дозе у SI систему је *греј* ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$).
- 2) *Брзина дозе или јачина дозе* се дефинише као апсорбована доза по јединици времена. Изражава се у јединицама Gy s^{-1} (SI).
- 3) Када се ради о живој материји није свеједно која је врста зрачење апсорбована, јер последице по ту материју могу бити различите. Зато се апсорбована доза множи одређеним факторима чије се вредности крећу између 1 и 20, па се добија *еквивалентна доза H*, која се, у елементарној форми, дефинише као $H = wD$, где је *w* *фактор радијационе тежине* (или *релативна биолошка ефикасности* или *фактор квалитетног зрачења*, по неким ранијим концептима). Тај фактор има вредности од 1, за X- и γ -зрачење, затим 5, за споре неутроне, 10 за брзе неутроне, а 20 за α -честице и теже јоне. Ако је неки орган изложен зрачењима из различитих извора, онда се направи сума доприноса по свим изворима. У систему SI еквивалентна доза се изражава у *сивертима* ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$). Тако, *еквивалентна доза* од 1 Sv одговара *апсорбованој дози* од 1 Gy за X- и γ -зрачење. Међутим, за исту апсорбовану дозу α -зрачења еквивалентна доза износи 20 Sv.

Б. ИЗОТОПИ ЧИЈА СЕ ИСТОРИЈСКА ИМЕНА ПОМИЊУ У ТЕКСТУ

Историјско име	Историјски симбол	Савремено име	Модерни симбол
Баријум	Ba	Баријум	$^{56}_{56}\text{Ba}$
Лантан	La	Лантан	$^{57}_{57}\text{La}$
Мазуријум	Ma	Технецијум	$^{43}_{43}\text{Tc}$
Торијум C''	ThC''	Талијум	$^{208}_{81}\text{Tl}$
Торијум D	ThD	Олово	$^{208}_{82}\text{Pb}$
Торијум B	ThB	Олово	$^{212}_{82}\text{Pb}$
Радијум C		Бизмут	$^{214}_{83}\text{Bi}$
Торијум C	ThC	Бизмут	$^{212}_{83}\text{Bi}$
Торијум C'	ThC'	Полонијум	$^{212}_{84}\text{Po}$

Историјско име	Историјски симбол	Савремено име	Модерни симбол
Торијум А	ThA	Полонијум	$^{216}_{84}\text{Po}$
Ека-цезијум		Францијум	^{87}Fr
Актинијум X	AcX	Радијум	$^{223}_{88}\text{Ra}$
Торијум X	ThX	Радијум	$^{224}_{88}\text{Ra}$
Мезоторијум-1	MsTh ₁	Радијум	$^{228}_{88}\text{Ra}$
Радиоактинијум	RdAc	Актинијум	$^{227}_{89}\text{Ac}$
Мезоторијум-2	MsTh ₂	Актинијум	$^{228}_{89}\text{Ac}$
Радиоторијум	RdTh	Торијум	$^{228}_{90}\text{Th}$
Јонијум	Io	Торијум	$^{230}_{90}\text{Th}$
Уранијум Y	U Y	Торијум	$^{231}_{90}\text{Th}$
Уранијум X ₁	U X ₁	Торијум	$^{234}_{90}\text{Th}$
Уранијум Z	U Z	Протактинијум	$^{234}_{91}\text{Pa}$
Уранијум X ₂	U X ₂	Протактинијум	$^{234}_{91}\text{Pa}^m$
Уранијум II (или 2)	U II	Уранијум	$^{234}_{92}\text{U}$
Актиноуранијум	Ac U	Уранијум	$^{235}_{92}\text{U}$
Уранијум I (или 1)	U I	Уранијум	$^{238}_{92}\text{U}$
		Нептунијум	^{93}Np
(Ека-осмијум)		Плутонијум	^{94}Pu
Ека-ренијум		Боријум	^{107}Bh
Ека-осмијум		Хасијум	^{108}Hs
Ека-иридијум		Мајтнеријум	^{109}Mt
Ека-платина		Дармштатијум	^{110}Ds

Уранијум X = U X₁ + U X₂; Мезоторијум = MStH-1 + MsTh-2

Уранијум X је заједничко име за уранијум X₁ ($^{234}_{90}\text{Th}$) и уранијум X₂ ($^{234}_{91}\text{Pa}$).

уранијум 1 → уранијум X₁ → уранијум X₂ → уранијум Z → уранијум 2 → уранијум Y

В. ПРИРОДНА РАДИОАКТИВНОСТ УРАНИЈУМА

Уранијум и његови изотопи су делимично описани у поглављу „О УРАНИЈУМУ“. Овде ће бити говора о његовој радиоактивности, посебно с аспеката односа концентрација његових изотопа и изотопа (неких) његових потомака који настају у оквиру радиоактивних низова, као и концентрација појединих изотопа који настају приликом бомбардовања уранијума неутронима. Све ово с посебним освртом на најобилнији природни изотоп уранијума – ^{238}U , из кога, при бомбардовању неутронима, настаје његов најважнији вештачки изотоп – ^{239}U . Овај потоњи се с временом полураспада од 23,45 min трансформише у изотоп нептунијума ^{239}Np .

Уранијум се, дакле, и без озрачивања неутронима спонтано трансформише. Једна од најважнијих етапа у истраживању продуката озрачивања уранијума неутронима састоји се у одстрањивању продуката његовог природног распада. С једне стране, они би учинили још замршенијом ионако компликовану анализу резултата озрачивања; с друге стране, производи вештачке дезинтеграције језгара уранијума се по правилу јављају у екстремно малим количинама, јер велика већина неутрона уопште не погоди језгра уранијума, тако да би њихове слабе активности било тешко издвојити из активности целокупне смеше која садржи и производе природне дезинтеграције.

Како се види из слике 10, производ природне α -дезинтеграције ^{238}U јесте језгро ^{234}Th . Како оптималан однос броја неутрона и броја протона у језгрима (у смислу стабилности) генерално опада са смањењем редног броја елемента, а код ^{234}Th он је $(234 - 90)/90 = 1,600$, чак већи него код ^{238}U , $(238 - 92)/92 = 1,587^{228}$, језгро ^{234}Th је нестабилно и оно „поправља“, тј. смањује однос броја неутрона и броја протона емисијом β -честице, трансформишући се тако у језгро ^{234}Pa с односом броја неутрона и протона 1,571. И овај изотоп има превише неутрона у односу на протоне (средња атомска маса природног протактинијума је 231,04), па се језгро ^{234}Pa емисијом нове β -честице трансформише у ^{234}U . Ово језгро има, међутим, већ мање неутрона него што је оптимално за уранијум (однос бројева неутрона и протона је 1,543, дакле мањи од оптималног 1,587, или, другим речима, маса ^{234}U је мања од средње масе природног уранијума, 238,03). Зато се ^{234}U емисијом α -честице трансформише у ^{230}Th . Следи низ сукцесивних трансформација уз емисије α - или β -честица све док се не достигне коначни производ, стабилни изотоп олова ^{206}Pb (средња атомска маса природног олова је 207,2).

Ако је N_0 број језгара уранијума у тренутку $t = 0$, тада је, на основу закона радиоактивног распада, број језгара N у неком будућем тренутку t дат једначином А.3.

Представимо низ сукцесивних распада схемом

²²⁸ То се види и по томе што је средња атомска маса елемента торијума (у природи) 232,04.

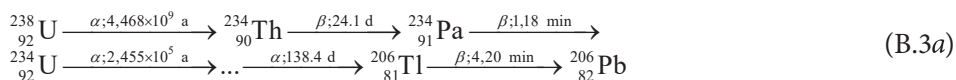
$$A_1 \xrightarrow{\lambda_1} A_2 \xrightarrow{\lambda_2} A_3 \xrightarrow{\lambda_3} A_4 \xrightarrow{\lambda_4} \dots \xrightarrow{\lambda_{n-2}} A_{n-1} \xrightarrow{\lambda_{n-1}} A_n \quad (B.1)$$

при чему је A_1 први члан низа (у нашем случају ^{238}U), а λ_1 његова константа распада у језгро–потомак A_2 , λ_2 је константа за распад језгра A_2 у A_3 , итд. A_n је коначни производ распада. Нека смо у тренутку $t = 0$ имали само језгра A_1 . У току времена ова језгра се постепено трансформишу у језгра A_2 , а ова тада почињу да се дезинтегришу у језгра A_3 итд. Када се језгра A_2 не би даље трансформисала у A_3 , њихов број би се стално повећавао. Међутим, како се језгра A_1 константно троше²²⁹, тај пораст је континуирано спорији [број језгара A_2 по јединици времена у тренутку t који настаје из A_1 једнак је $\lambda_1 N_{A_1}$, где је N_{A_1} број језгара у том тренутку, а овај је повезан са почетним бројем језгара ($N_{A_1,0}$ већ поменутом релацијом А.3; додуше, у конкретном случају када је језгро-родитељ екстремно дугоживући изотоп ^{238}U , брзина настајања првог потомка, ^{234}Th , је практично константна]. Трансформација језгара A_2 у A_3 води, с друге стране, до смањивања њиховог броја. То смањење ће (у јединици времена) бити све веће што је више језгара A_2 . После одређеног времена успоставља се равнотежа, када се број језгара A_2 која настају из A_1 изједначи са бројем језгара A_2 која се дезинтегришу у A_3 . То се преноси и на друге карике ланца дезинтеграција па у стању равнотеже имамо

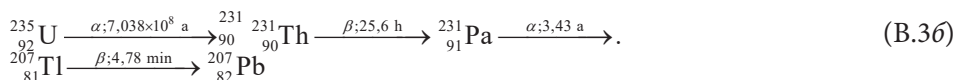
$$\lambda_1 N_{A_1} = \lambda_2 N_{A_2} = \lambda_3 N_{A_3} = \dots = \lambda_{n-1} N_{A_{n-1}} \quad (B.2)$$

где су N_{A_1} , N_{A_2} , ..., $N_{A_{n-1}}$ тренутни бројеви језгара A_1 , A_2 , ..., A_{n-1} , а $\lambda_{n-1} N_{A_{n-1}}$ представља повећање броја језгара коначног производа у јединици времена. После бесконачно дугог времена сва језгра почетне супстанције A_1 се преко ових сукцесивних трансформација претворе у језгра A_n .

У случају уранијумових низова схема (B.1) има конкретан облик



односно



Изнад стрелица су наведени типови дезинтеграција и времена полураспада. Ознаке min , h , d и a односе се респективно на минуте, сате, дане и године.

Ограничићемо се на схеме (B.3a) и (B.3b); када се узму у обзир времена полураспада и природна заступљеност изотопа ^{235}U и ^{238}U , налази се $[t_{1/2}(^{235}\text{U}) \times 99,27 / t_{1/2}(^{238}\text{U}) \times 0,72 = 21,7]$ да први од њих даје око 22 пута више потомка у јединици времена.

²²⁹ У конкретном случају утрошак језгара-родитеља (^{238}U) је, због огромног времена полураспада, занемарљив.

На основу конкретних вредности времена полураспада можемо извући следеће закључке. Ако пођемо од узорка који садржи искључиво ^{238}U , његова количина биће (због огромног времена полураспада, упоредивог са старошћу Земље) практично непромењена ма колико дуго у лабораторији вршили експерименте. Од потомака ће се појавити само смеша ^{234}Th (уранијум X_1), ^{234}Pa (уранијум X_2) и ^{234}U (уранијум Π), јер је време полураспада ^{234}U у следећи члан низа ^{230}Th (јонијум) јако велико. Следећи важан закључак је да због веома различитих времена полураспада, осим за ретке поједине карике ланца дезинтеграција, не можемо очекивати успостављање пуне равнотеже, па ће нам формула (B.2) генерално бити неупотребљива.

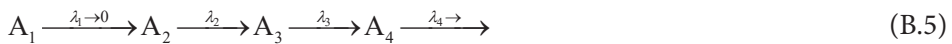
Само је по себи разумљиво да уранијум треба пречистити од његових продуката природног распада пре озрачивања. Поставља се, међутим, питање да ли је то потребно учинити и након озрачивања. На први поглед изгледа да је то, због великог времена полураспада ^{238}U , непотребно. Ипак, конкретни прорачун који следи показује да та мера предострожности може бити значајна.

Претпоставимо да смо имали 1 g уранијума. У 1 g уранијума има $1 \times 6,022 \cdot 10^{23} / 238 = 2,53 \times 10^{21} \equiv N_0$ језгара уранијума. Ако уранијум очишћен од продуката природног распада оставимо у лабораторији нпр. 1 сат, број природно дезинтегрисаних језгара ^{238}U биће на основу релације (A.3)

$$N_0 - N_{1h} = N_0 \left[1 - e^{-0,693 \frac{t}{t_{1/2}}} \right] \cong N_0 \frac{0,693 \times t}{t_{1/2}} = 4,48 \times 10, \quad (\text{B.4})$$

што значи око $7,5 \times 10^5$ распада по минути. Овај број знатно надмашује уобичајене активности продуката дезинтеграције уранијума настале озрачивањем неутронима.

Разматрамо, дакле, следећу схему распада



Количине нуклида у тренутку t се добијају решавањем система диференцијалних једначина

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \lambda_3 N_3 - \lambda_4 N_4 \quad (\text{B.9})$$

уз почетни услов

$$(N_1)_{t=0} = N_{10}, \quad (N_2)_{t=0} = 0, \quad (N_3)_{t=0} = 0, \quad (N_4)_{t=0} = 0. \quad (\text{B.10})$$

Ставићемо даље да је $\lambda_4 = 0$. На први поглед не изгледа логично урадити то, а не узети истовремено и да је $\lambda_1 = 0$, јер је $\lambda_1 < \lambda_4$. Међутим, због услова (B.10), у сваком разумном временском интервалу је $\lambda_4 N_4 \ll \lambda_1 N_1$, тако да је овај корак сасвим оправдан. Интеграцијом диференцијалних једначина (B.6–B.9) налазимо да је

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t} \quad (\text{B.11})$$

$$N_2 = N_{10} \lambda_1 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2} \right] \quad (\text{B.12})$$

$$N_3 = N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right] \quad (\text{B.13})$$

$$N_4 = N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{1 - e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_1 (\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{1 - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 (\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{1 - e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_3 (\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right]. \quad (\text{B.14})$$

Лако је проверити да је

$$N_{10} - N_1 = N_2 + N_3 + N_4 = N_{10} (1 - e^{-\lambda_1 t}), \quad (\text{B.15})$$

тј. да је број језгара ^{238}U који се дезинтегрисао у времену t једнак збиру бројева језгара–продуката.

Размотримо сада које бисмо количине производа природног распада ^{238}U имали у два случаја: а) након годину дана; б) после једног сата.

а) $t = 1$ година

Величине које ћемо користити у рачуну сврстане су у табелу B.1.

Табела B.1. Времена полураспада изотопа од интереса и из њих изведене вредности коришћене за прорачуне количина производа природног распада ^{238}U , очишћеног од продуката спонтаних дезинтеграција, које настану у току једне године.

	$t_{1/2}$	$(t_{1/2})_a$	$(\lambda)_{a^{-1}}$	$e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$
^{238}U	$4,51 \times 10^9 \text{ a}$	$4,51 \times 10^9$	$1,54 \times 10^{-10}$	1,0000000	$1,5400000 \times 10^{-10}$
^{234}Th	24,1 d	0,0660	10,5	$2,7536449 \times 10^{-5}$	0,99997246
^{234}Pa	1,18 min	$2,25 \times 10^{-6}$	$3,08 \times 10^5$	0,000000	1,0000000
^{234}U	$2,48 \times 10^5 \text{ a}$	$2,48 \times 10^5$	$2,79 \times 10^{-6}$	0,99999721	$2,7899950 \times 10^{-6}$

Бројеви у другој, трећој и четвртој колони написани су са три значајне цифре, они у петој и шестој са осам цифара. Апроксимације које ћемо увести базирају се на различитим временима полураспада чланова низа, као и на чињеници да је једна година много мања од времена полураспада ^{238}U и ^{234}U , знатно већа од времена полураспада ^{234}Th , а много већа од времена полураспада ^{234}Pa .

Број језгара ^{238}U која се распадну за годину дана је према једначини (B.11) и подацима из табеле B.1:

$$N_{10} - N_1 = N_{10}(1 - e^{-\lambda_1 t}) \cong N_{10}\lambda_1 t = 3,8962000 \times 10^{11}. \quad (\text{B.16})$$

Исту бројну вредност има и брзина распада после годину дана (у јединицама a^{-1}),

$$\frac{d(N_{10} - N_1)}{dt} = N_{10}\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} \cong N_{10}\lambda_1 = 3,8962000 \times 10^{11} a^{-1}. \quad (\text{B.17})$$

Просечан број распада у минути је

$$\frac{d(N_{10} - N_1)}{dt} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) = 7,4128615 \times 10^5. \quad (\text{B.18})$$

На основу једначине (B.12), број атома првог потомка у низу распада ^{238}U , ^{234}Th , је, тачан ($=$), и у мање($\approx$)-више($\cong$) разумним апроксимацијама

$$\begin{aligned} N_2 &= N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] = 3,7105645 \times 10^{10} = \\ &\cong N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} [1 - e^{-\lambda_2 t}] = 3,7105645 \times 10^{10} \approx N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 3,710 \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

Промена броја језгара ^{234}Th у јединици времена (a) након године дана може се добити коришћењем једначина (B.7), (B.11) и (B.19),

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \cong N_{10}\lambda_1 - N_{10}\lambda_1 [1 - e^{-\lambda_2 t}] = \\ &= N_{10}\lambda_1 e^{-\lambda_2 t} = 1,07286 \times 10^7 a^{-1}, \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

или диференцирањем израза (B.12),

$$\frac{dN_2}{dt} = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}] \cong N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} [-\lambda_1 + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}] \cong N_{10}\lambda_1 e^{-\lambda_2 t}. \quad (\text{B.21})$$

Промена броја језгара по минути је

$$\frac{dN_2}{dt} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) = 20,41 \quad (\text{B.22})$$

Уврштавајући податке из табеле В.1 у (В.13) налазимо да је број атома следећег члана низа, ^{234}Pa , после годину дана

$$\begin{aligned} N_3 &= 1,2649651 \times 10^6 \cong N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{1}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] = 1,2649651 \times 10^6 = \\ &= N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_3} [1 - e^{-\lambda_2 t}] \cong N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_3} = 1,2650000 \end{aligned} \quad (\text{B.23})$$

Промена броја језгара ^{234}Pa у јединици времена (а) након годину дана може се добити коришћењем једначина (В.8), (В.12) и (В.13),

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \cong N_{10} \lambda_1 [1 - e^{-\lambda_2 t}] - N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] \cong \\ &\cong N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} e^{-\lambda_2 t} = 365,76354 \text{ a}^{-1} \cong N_{10} \lambda_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_3} e^{-\lambda_2 t} = 365,75288 \times 10^2 \text{ a}^{-1}, \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

Ово се може извести и диференцирањем израза (В.13). Након годину дана, промена броја језгара ^{234}Pa по минути је

$$\frac{dN_3}{dt} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) = 7 \times 10^{-4} \quad (\text{B.25})$$

На основу једнакости (15) налазимо да је број језгара ^{234}U после једне године

$$\begin{aligned} N_4 &= 3,5251309 \times 10^{11} \cong N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2^2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] = 3,5251309 \times 10^{11} \approx \\ &\approx N_{10} \lambda_1 \left[1 - \frac{1}{\lambda_2} \right] = 3,5251333 \times 10^{11} \approx N_{10} \lambda_1 = 3,8962000 \times 10^{11}. \end{aligned} \quad (\text{B.26})$$

Промена броја језгара у јединици времена након годину дана (а) је

$$\begin{aligned} \frac{dN_4}{dt} &= N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] = \\ &= \lambda_3 N_3 \cong N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] = 3,8960927 \times 10^{11} \text{ a}^{-1} \cong \\ &\cong N_{10} \lambda_1 [1 - e^{-\lambda_2 t}] = 3,8960927 \times 10^{11} \text{ a}^{-1} \approx N_{10} \lambda_1 = 3,8962000 \times 10^5 \text{ a}^{-1}. \end{aligned} \quad 27)$$

Након годину дана, број језгара ^{234}U повећа се у једној минути за

$$\frac{dN_4}{dt} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) = 7,4126573 \times 10^5. \quad (\text{B.28})$$

Разумни апроксимативни изрази за број језгара после годину дана су

$$N_4 \cong N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{t}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2^2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] \cong N_{10} \lambda_1 \left[t - \frac{1}{\lambda_2} \right] \approx N_{10} \lambda_1 t. \quad (\text{B.29})$$

Дакле, после једне године имали бисмо ситуацију приказану у табели В.2.

Табела В.2. Прва колона: број дезинтегрисаних језгара изотопа ^{238}U и језгара потомака ^{234}Th , ^{234}Pa и ^{234}U након годину дана природног зрачења $1\text{ g }^{238}\text{U}$.
Друга колона: промена броја језгара у једној минути, након годину дана.

$N_{10} - N_1$	$3,8962000 \times 10^{11}$	dN_1/dt	$-7,41286 \times 10^5$
N_2	$3,7105645 \times 10^{10}$	dN_2/dt	20
N_3	$1,2649651 \times 10^6$	dN_3/dt	7×10^{-4}
N_4	$3,5251309 \times 10^{11}$	dN_4/dt	$7,41266 \times 10^5$

Сабирањем вредности (В.19), (В.23) и (В.26) добија се да је

$$N_2 + N_3 + N_4 = 3,8962000 \times 10^{11}. \quad (\text{В.30})$$

Дакле, збир бројева језгара продуката распада ^{238}U , изотопа ^{234}Th , ^{234}Pa и ^{234}U , је, као што и треба да буде, једнак броју дезинтегрисаних језгара ^{238}U , датом једнакошћу (В.16). Исти се број добија када се саберу вредности приближних израза за N_2 , N_3 и N_4 ,

$$\begin{aligned} N_2 + N_3 + N_4 &\cong \\ &\cong N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} [1 - e^{-\lambda_2 t}] + N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] + N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{t}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2^2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] = \\ &= N_{10} \lambda_1 \left[t - \frac{\lambda_2}{\lambda_3 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] = 3,8962000 \times 10^{11}. \end{aligned} \quad (\text{В.31})$$

У нешто грубљој апроксимацији,

$$N_2 + N_3 + N_4 \approx N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_3} + N_{10} \lambda_1 \left[t - \frac{1}{\lambda_2} \right] = N_{10} \lambda_1 \left[t + \frac{1}{\lambda_3} \right] = 3,896212647 \times 10^{11}. \quad (\text{В.32})$$

Овај резултат је већи од тачног за вредност N_3 из једнакости (В.23).

Сабирањем изразâ (В.17) (с негативним знаком), (В.20), (В.24) и (В.26) добијамо да је

$$\frac{dN_1}{dt} + \frac{dN_2}{dt} + \frac{dN_3}{dt} + \frac{dN_4}{dt} = 0 \quad (\text{В.33})$$

Након годину дана бројеви језгара A_2 (^{234}Th) и A_3 (^{234}Pa) се практично не мењају. Успостављена је приближна равнотежа

$$\lambda_1 N_1 \cong \lambda_2 N_2 \cong \lambda_3 N_3. \quad (\text{В.34})$$

Расте број језгара ^{234}U , N_4 , на рачун смањења броја језгара ^{238}U , N_1 , приближно линеарно с временом,

$$N_4 \approx N_1 \lambda_1 \times t \quad . \quad (\text{B.35})$$

Овај број је знатно већи од броја језгара $(N_4)_e$ тог изотопа када би се успоставила равнотежа са следећим чланом низа, ^{230}Th

$$(N_4)_e = \frac{N_1 \lambda_1}{\lambda_4} \approx \frac{N_4}{3,08 \cdot 10^5} \quad . \quad (\text{B.36})$$

Укупна β -активност²³⁰, изражена као број распада по минути, после годину дана је

$$A_\beta = \lambda_2 N_2 + \lambda_3 N_3 = 7,4126574 \times 10^5 + 7,4126570 \times 10^5 = 1,4825314 \times 10^6 \text{ min}^{-1} \quad (\text{B.37})$$

б) $t = 1 \text{ h}$.

Величине које ћемо користити у случају када је ^{238}U очишћен од продуката спонтаних дезинтеграција стајао један сат дати су у табели В.3. Ово би одговарало условима једног типичног експеримента.

Табела В.3. Времена полураспада изотопа од интереса и из њих изведене вредности коришћене за прорачуне количина производа природног распада ^{238}U , очишћеног од продуката спонтаних дезинтеграција, које настану у току једног сата.

Изотоп	$t_{1/2}$	$(t_{1/2})_h$	λ_{h-1}	$e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$
^{238}U	$4,51 \times 10^9 \text{ a}$	$3,95 \times 10^{13}$	$1,75 \times 10^{-14}$	1,0000000	$1,7500000 \times 10^{-14}$
^{234}Th	24,1 d	578	$1,20 \times 10^{-3}$	0,99880072	$1,1992800 \times 10^{-3}$
^{234}Pa	1,18 min	0,0197	35,2	$5,1621930 \times 10^{-16}$	1,0000000
^{234}U	$2,48 \times 10^5 \text{ a}$	$2,17 \times 10^9$	$3,19 \times 10^{-10}$	1,0000000	$3,1900000 \times 10^{-10}$

Након једног сата број распаднутих језгара ^{238}U , брзина распада и број распада у минути дати су изразима

$$\begin{aligned} N_{10} - N_1 &= N_{10} (1 - e^{-\lambda_1 t}) \cong N_{10} \lambda_1 t = 4,4275000 \times 10^7, \\ \frac{d(N_{10} - N_1)}{dt} &= -\frac{dN_1}{dt} \cong N_{10} \lambda_1 = 4,4275000 \times 10^7 \text{ h}^{-1}, \\ \frac{d(N_{10} - N_1)}{dt} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) &= \frac{4,4275000}{60} = 7,379167 \times 10^5. \end{aligned} \quad (\text{B.38})$$

²³⁰ Разматрамо специјално β -активност, јер се α -честице, и поред веће специфичне јонизације и тиме кратког домета (у ваздуху им је домет реда неколико сантиметара, а у гушћим срединама знатно мање), по правилу не детектују уобичајеним мерним инструментима (нпр. Гајгер-Милеровим бројачем), а њихово директно токсично дејство је екстремно локалног карактера.

Број језгара првог потомка, ^{234}Th , брзина распада и промена броја језгара у једној минути, после једног сата су

$$\begin{aligned}
 N_2 &= N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right] \cong N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left[1 - e^{-\lambda_2 t} \right] \cong N_{10} \lambda_1 \left[t - \frac{1}{2} \lambda_2 t^2 \right] = \\
 &= 4,4248435 \times 10^7 \approx N_{10} \lambda_1 = 4,4275000 \times 10^7 = N_{10} - N_1 \\
 \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \cong \lambda_1 N_{10} - N_{10} \lambda_1 \left[1 - e^{-\lambda_2 t} \right] = N_{10} \lambda_1 e^{-\lambda_2 t} = 4,4221902 \times 10^7 \text{ h}^{-1} = \\
 &= N_{10} \lambda_1 \left[1 - \lambda_2 t + \frac{1}{2} \lambda_2^2 t^2 \right] \cong N_{10} \lambda_1 \left[1 - \lambda_2 t \right] = 4,422187 \times 10^7 \text{ h}^{-1} \approx N_{10} \lambda_1 = 4,4275 \times 10^7 \text{ h}^{-1} \\
 \frac{dN_2}{dt} \cdot (\Delta t = 1 \text{ min}) &= 7,370317 \times 10^5 \quad (\text{B.39})
 \end{aligned}$$

Одговарајући изрази за следећи члан низа, ^{234}Pa , су

$$\begin{aligned}
 N_3 &= 1,4656439 \times 10^3 = N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] \cong \\
 &\cong N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_3 (\lambda_3 - \lambda_2)} \left[-\lambda_2 + \lambda_2 \lambda_3 t - \frac{1}{2} \lambda_2^2 \lambda_3 t^2 \right] = 1,4656967 \times 10^3 \cong \\
 &\cong N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3^2} \left[-1 + \lambda_3 t - \frac{1}{2} \lambda_2 \lambda_3 t^2 \right] = 1,4655894 \times 10^3 \approx \\
 &\approx N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3^2} [\lambda_3 t - 1] = 1,466495 \times 10^3 \approx N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} = 1,509 \times 10^3 \\
 \frac{dN_3}{dt} &= N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \left[-\frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} - \frac{\lambda_3 e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] \cong \\
 &\cong N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} \left[1 - \lambda_2 t + \frac{1}{2} \lambda_2^2 t^2 \right] \cong N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} [1 - \lambda_2 t] = 1,50756 \times 10^4 \text{ h}^{-1} \approx \\
 &\approx N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} = 1,509375 \times 10^4 \text{ h}^{-1} \quad (\text{B.40}) \\
 \frac{dN_3}{dt} \cdot (\Delta t = 1 \text{ min}) &= 25,126
 \end{aligned}$$

Број језгара ^{234}U , брзина њиховог настајања и број који настане у једној минути, накој једног сата су

$$\begin{aligned}
N_4 &= 2,5099349 \times 10^4 \cong N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3^2} \left[1 - \lambda_3 t + \frac{1}{2} \lambda_3^2 t^2 \right] = 2,5098505 \times 10^4 \approx \\
&\approx N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} \left[-t + \frac{1}{2} \lambda_3 t^2 \right] = 2,50556 \times 10^4 \approx N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2^2 (\lambda_3 - \lambda_2)} \right] = 2,5056468 \times 10^4 \\
\frac{dN_4}{dt} &\cong N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} [\lambda_3 t - 1] = 5,1620625 \times 10^4 \approx N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \cdot t = 5,313 \times 10^4 \text{ h}^{-1}
\end{aligned} \tag{B.41}$$

$$\frac{dN_4}{dt} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) = \frac{5,1620625 \times 10^4}{60} = 860.$$

Табела В.4. Прва колона: број дезинтегрисаних језгара изотопа ^{238}U и језгара потомака ^{234}Th , ^{234}Pa и ^{234}U један сат након годину дана природног зрачења $1 \text{ g } ^{238}\text{U}$.

Друга колона: промена броја језгара у једној минути, након једног сата.

$N_{10} - N_1$	$4,4275000 \times 10^7$	dN_1/dt	$-7,37917 \times 10^5$
N_2	$4,4248435 \times 10^7$	dN_2/dt	$7,37032 \times 10^5$
N_3	$1,4658470 \times 10^3$	dN_3/dt	25
N_4	$2,5098505 \times 10^4$	dN_4/dt	860

Збир бројева језгара продуката и сада је једнак броју дезинтегрисаних језгара уранијума,

$$N_2 + N_3 + N_4 = (4,4248435 + 0,00014658 + 0,00250985) \times 10^7 = 4,4275000 \times 10^7$$

$$\begin{aligned}
N_2 + N_3 + N_4 &\cong N_{10} \lambda_1 \left[t - \frac{1}{2} \lambda_2 t^2 \right] + N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} t + N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} \left[-t + \frac{1}{2} \lambda_3 t^2 \right] \\
&= (4,4248435 + 0,000151 + 0,002506) \times 10^7 = 4,427500 \times 10^7 = N_{10} \lambda_1 t.
\end{aligned} \tag{B.42}$$

Такође важи

$$\frac{dN_1}{dt} + \frac{dN_2}{dt} + \frac{dN_3}{dt} + \frac{dN_4}{dt} = 0. \tag{B.43}$$

После једног сата једина приближна равнотежа је

$$\lambda_2 N_2 \cong \lambda_3 N_3. \tag{B.44}$$

Од $2,53 \times 10^{21}$ језгара које садржи један грам ^{238}U , у току једног сата дезинтегрише се $4,4275000 \times 10^7$ (табела В.4), дакле настаје око $7,4 \times 10^5$ слабо продорних α -честица по минути. Први продукт дезинтеграције, ^{234}Th , је β -емитер са релативно дугим (у односу на време извођења експеримента) временом полураспада; на основу приближног израза (В.39),

$$N_2 \cong N_{10} \lambda_1 \times t - \frac{1}{2} N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \cdot t^2 = 4,4275000 \times 10^7 - 2,6565 \times 10^4 = 4,4248435 \times 10^7, \quad (\text{B.45})$$

слиди да после једног сата $4,4248435 \times 10^7$ његових језгара остане нераспаднуто, док се само $2,6565 \times 10^4$ [други члан на десној страни једнакости (B.45)] дезинтегрише у ^{234}Pa . Брзина дезинтеграције се у првој апроксимацији линеарно повећава са временом,

$$\frac{d(N_2 \rightarrow N_3)}{dt} \cong N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \times t \quad (\text{h}^{-1}). \quad (\text{B.46})$$

Приближан израз за број језгара ^{234}Pa након једног сата (B.40) је

$$N_3 \approx N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} t = 1,509 \times 10^3. \quad (\text{B.47})$$

Дакле, од $2,6565 \times 10^4$ језгара ^{234}Pa која су настала за сат времена из ^{234}Th , приближно $2,6565 \times 10^4 - 1,509 \times 10^3 = 2,5056 \times 10^4$, тј. око 94% се трансформисало у ^{234}U . Приближан број језгара ^{234}U може се добити и из (B.41),

$$N_4 \approx \frac{1}{2} N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \times t^2 - N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} t = 2,6565 \times 10^4 - 1,509 \times 10^3 = 2,5056 \times 10^4. \quad (\text{B.48})$$

Брзина настајања језгара ^{234}U након једног сата је у овој апроксимацији

$$\frac{dN_4}{dt} \approx N_{10} \lambda_1 \lambda_2 \times t - N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} = 5,3130 \times 10^4 - 1,509 \times 10^3 = 5,1621 \times 10^4 \text{ h}^{-1} \quad (\text{B.49})$$

Како је константа распада ^{234}U јако мала, $\lambda_4 = 3,19 \times 10^{-10} \text{ h}^{-1}$, активност овог нуклида је занемарљива,

$$A(^{234}\text{U}) = \lambda_4 N_4 = 3,19 \times 10^{-10} \times 2,51 \cdot 10^4 = 8,01 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}. \quad (\text{B.50})$$

Приближан број β -честица које након једног сата израче у току једне минуте ^{234}Th и ^{234}Pa добија се помоћу изразâ (B.46) и (B.49):

$$\left[\frac{d(N_2 \rightarrow N_3)}{dt} + \frac{dN_4}{dt} \right] \text{ h}^{-1} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) \approx \left[2N_{10} \lambda_1 \lambda_2 - N_{10} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_3} \right] \frac{1}{60} \text{ min}^{-1} = 1746 \text{ min}^{-1}. \quad (\text{B.51})$$

Иста вредност налази се коришћењем података из табела 3 и 4:

$$\begin{aligned} &= [\lambda_2 N_2 + \lambda_3 N_3] \text{ h}^{-1} \times (\Delta t = 1 \text{ min}) = \\ &= [1,2 \cdot 10^{-3} \times 4,4248435 \cdot 10^7 + 35,2 \times 1,4658470 \times 10^{10}] \frac{1}{60} \text{ min}^{-1} = \\ &= (885 + 860) = 1746 \text{ min}^{-1} \end{aligned} \quad (\text{B.52})$$

Имаћемо дакле, скоро 2000 β -распада у минути. Овај број може бити знатно већи од активности које потичу од језгара насталих озрачивањем чистог уранијума неутронима.

Г. МОГУЋНИ УЗРОЦИ НЕУСПЕХА НЕМАЧКОГ УРАНИЈУМСКОГ ПРОЈЕКТА

До почетка тридесетих година 20. века Немачка је несумњиво имала огромну предност у научном кадру. Ситуација се драматично променила 1933. доласком Хитлера на власт, а посебно након увођења Нирнбершких расних закона 1935. године. {Може се разумети ако је однос просечног немачког грађанима према новој власти, бар на почетку, био амбивалентан. Већина сигурно није читала *Mein Kampf*, многи за концентрационе логоре нису знали, или нису хтели да знају све до пада Трећег Рајха, а Хитлер је своју идеологију базирао на идеји, коју су многи делили, о понижености Немачке после Првог светског рата и на тези да су Јевреји повлаштена „раса“ чији је друштвени утицај и посебно удео у економској моћи несразмерно велики у односу на њихов број (што је чак и била чињеница, злоупотребљена од оних који разлоге за то виде у „завери“ против немачког народа). С друге стране, он је за релативно кратко време сузбио галопирајућу инфлацију и обезбедио радна места за десетине хиљада незапослених (додуше, највише у ратној индустрији, али и наоружавање Немачке су многи поздравили). Није, међутим, било за очекивање да ће нови поредак с таквим одушевљењем прихватити интелектуалци, пре свега научници, и то се заиста није догодило.} Из Немачке је у пет-шест година избегло на десетине врхунских научника, споменимо само неке физичаре и хемичаре: Ханс Беџе (1933. Нн.²³¹ 1967, *Manhattan*), Феликс Блох (*Felix Bloch*, 1933. Нн. 1952. *Manhattan*), Макс Борн (1933. Нн. 1954), Алберт Ајнштајн (1933. Нн. 1921), Џејмс Франк (*James Franck*, 1933. Нн. 1925. *Manhattan*), Ото Фриш (1933. *Manhattan*), Марија Гејерт-Мајер (*Maria Goeppert-Mayer*, 1937. Нн. 1963. *Manhattan*), Фриц Хабер (1933. Нн. 1918), Валтер Хајтлер (*Walter Heitler*, 1933), Герхард Херцберг (*Gerhard Herzberg*, 1935. Нн. 1971), Валтер Кон (*Walter Kohn*, 1938. Нн. 1998), Лизе Мајтнер (1938), Ервин Шредингер (1934, Нн. 1933), Ото Штерн (*Otto Stern*, 1933. Нн. 1943. *Manhattan*), Лео Сзилард (1933. *Manhattan*), Едвард Телер (1930, *Manhattan*), Еуген Пол Вијнер (*Eugene Paul Wigner*, 1930. Нн. 1963. *Manhattan*). Многи од њих су касније директно или индиректно учествовали у пројекту Менхетн (они означени у заградама именом *Manhattan*). Већина су били Јевреји, али неки од њих, као Џејмс Франк и Ервин Шредингер (у то време још грађанин Аустрије), емигрирали су из принципијелних разлога или из солидарности према својим јеврејским колегама.

²³¹ Нн. = Нобелова награда

Они који су освојили немачке научне институције, пре свега нобеловци и некада цењени научници Филип Ленард и Јоханес Штарк, дефинисали су „немачку науку“ базирану на принципима.²³²

1. Постулат механичке разумљивости и очигледности на основама класичне физике;
2. Непосредно доживљавање природе;
3. Експеримент као методичка основа, на коју се надграђују теоријска разматрања.

Она је била антипод „Јеврејској науци“, у коју су сврстане кључне дисциплине теоријске физике, Теорија релативности и Квантна механика, при чему је занимљиво уочити да већина твораца Квантне механике (Макс Планк, Вернер Хајзенберг, Ервин Шредингер, Паул А. М. Дирак) уопште нису били Јевреји.

У атмосфери у којој се развијао немачки *Уранијумски пројект* између различитих радних група често је било више конкуренције него сарађивања. Томе су доприносили и индивидуални карактери водећих истраживача. Навешћемо два примера. На конструкцији реактора истовремено је рађено на КWI у Берлин-Далему и у Кумерсдорфу. Док је Хајзенберг у Берлину експериментисао с уранијумским плочама, Курт Дибнер (*Kurt Dibner*) је у Кумерсдорфу користио коцке уранијума. Када је Дибнер постигао неочекивано добре резултате, Хајзенберг је то игнорисао и инсистирао и даље на – лакшој за прорачун – примени уранијумских плоча. Ова ситуација је била скоро идентична оној која је у САД настала у току рада на развоју првог нуклеарног реактора, што је имало одраза и на пројект Менхетн. Е. Ферми је разрадио нацрт „хомогеног“ реактора у којем би уранијум и графит били помешани као песак, док је Силард заговарао конфигурацију „гомила“, која се састојала од наизменично постављених слојева уранијума и графита. Силард (који није много прорачунавао, већ му се посао углавном завршавао изношењем идеја) пребацио је Фермију да се одлучио за своју конструкцију јер је она лакша за рачунање (што је Ферми савесно радио). Резултат конфликта био је, међутим, сасвим супротан. Док је Хајзенберг с позиције силе одбацио Дибнерову идеју, Ферми је признао предности Силардове, и реактор је грађен по Силардовој схеми. Слично је било и с одлуком о избору модераторске супстанције. У Хајделбергу је Валтер Боте (Нн. за физику, 1954) вршио истраживања на графиту, док је Хајзенберг испитивао својства тешке воде. Боте је дошао до резултата да графит није погодан због исувише велике апсорпције неутрона. Ово се касније показало нетачним, јер су неутроне апсорбовале примесе бора, а не сам графит. Међутим, није долазило у обзир да Ботеови сарадници свом ауторитарном шефу укажу на пропуст.²³³ Истовремено је Хајзенберг пронашао да је тешка вода бољи модератор него што се првобитно претпо-

²³² Philipp Lenard, *Deutsche Physik*, München, 1936, Bd. I, Worwort.

²³³ Како је већ речено у Уводу, Силард је у САД решио проблем тако што је набавио екстремно чист графит.

стављало. Тако је одлука пала у корист тешке воде, што се касније показало фаталном грешком.

Учесници пројекта су, како је већ речено, били и фон Лауе и Хан, али од њих није било никакве користи. Лауе је имао такав реноме да је смео да отворено показује одвратност према новом режиму, а Ханов морални интегритет је био толико неспоран²³⁴ да не само што, иако водећи светски експерт, није био принуђен да учествује у раду на атомској бомби, већ је још у току Рата (у то време у кућном притвору на Фарм Холу (*Farm Hall*)), 1944. године, добио Нобелову награду за откриће фисије, која му је уручена годину дана касније.

Важну улогу у трци између Американаца и Немаца играла је и чињеница да је Немачка била у непрекидном рату од 1938. године (ако у то укључимо и инвазије на Чехословачку и Аустрију), а САД тек након напада Јапанаца на Перл Харбур у децембру 1941. Затим, рат се водио (пред крај, а перманентно бомбардовање почело је знатно раније) и на тлу Немачке, а никад на територији САД (ако изузмемо Хаваје). Немачка економија, моћна у европским размерама, била је неупоредиво инфериорна у односу на америчку, поготово од почетка исцрпљујућег похода на СССР. Најзад, Немци су сировине и полупроизводе довозили из покорених земаља (уранијум из Чехословачке и Белгије, тешку воду из Норвешке) што је, како је Рат одмицао, бивало све несигурније (Немци су практично остали без тешке воде када су у низу напада и саботажа које су предузели чланови Норвешког покрета отпора уз помоћ Савезника у фебруару 1943. разорена постојења за производњу у хидроелектрани Веморк код Рјукана, а годину касније потопљене и преостале залихе при транспорту у Немачку). Па ипак, изгледа да су Немци бар у једном тренутку имали опипљиву предност у односу на Американце: По Ирвингу (*David Irving*),²³⁵ у лето 1942. Роберт Депел (*Robert Döppel*) је у Институту за експерименталну физику Универзитета у Лајпцигу (*Experimental-physikalisches Institut der Universität Leipzig*) ставио у погон „уранијумску пећ“ *L IV* и започео прву ланчану реакцију, пре Фермија (крај јула 1942). Пред крај рата Немци су покушали да организују производњу у својој земљи, на неколико места на југу Немачке, али тада је већ било касно. А за све је постало прекасно када су Савезници у оквиру „Мисије Алсос“ (*Alsos Mission*) у априлу 1945. похапсили водеће немачке истраживаче, од Хајзенберга и Вајцзекера до сасвим недужних фон Лауе и Хана, и интернирали их на енглески посед Фарм Хол где су дочекали крај Рата. Ту су 6. августа 1945. на вестима *BBC*-а са запрепашћењем и неверицом чули да су Американци не само конструисали атомску бомбу (што су до тада сматрали немогућим) већ је и бацили на Хирошиму.

Не мали утицај на ток догађаја имали су, као што споменусмо, карактери кључних личности. При томе је нарочито контроверзно понашање Хајзенберга, као и њему блиског фон Вајцзекера. Када му је приликом последње посете САД

²³⁴ Касније, након добијања Нобелове награде, нажалост, помало оспораван.

²³⁵ D. Irving, *Der Traum von der deutschen Atombombe*, Mohn, Gütterloch, 1967.

лета 1939. (где се на Универзитету Колумбија састао с Фермијем) понуђена професура у тој земљи он ју је одбио рекавши да својим остајањем у Немачкој хоће да допринесе да се у катастрофи која ју је задесила спасе бар оно што се може. Њима се не може оспорити то да су се на почетку супротстављали заговорницима „Немачке науке“ – ови су нарочито жестоко нападали Хајзенберга, и као једног од протагониста од њих презрене теоријске физике и због тога што су његови млађи сарадници (пored осталих Феликс Блох (*Felix Bloch*, 1905–1983), као и Едвард Телер, будући „отац хидрогенске бомбе“) били Јевреји, и чак га прогласили „белим Јеврејем“. Њихов отпор био је, међутим, најчешће изражаван епиграмима типа овог, Вајцзекеровог: „Теорија релативности била би пронађена и без Ајнштајна, али она није пронађена без њега“ (*Die Relativitätslehre wäre auch ohne Einstein gefunden worden, aber sie ist nicht ohne ihn gefunden worden*). Не треба им превише замерати ни што су се укључили у *Уранијумски пројект*, невољно, по њиховим каснијим тврдњама, али довољно да друга страна то схвати као веома озбиљну претњу човечанству. О томе сведочи и посета коју су у недељи између 15. и 21. септембра 1941. Хајзенберг и Вајцзекер учинили Нилсу Бору који је тада (као полу-Јевреј) био у некој врсти кућног притвора у већ заузетом Копенхагену. О циљу путовања и току разговора постоје различити искази. Разговор је, међутим, у сваком случају био непријатан за обе стране. Према једној верзији коју је лист „Шпигел“ (*Spiegel*) дистрибуирао 1967.²³⁶ Хајзенберг је, наводно, питао Бора да ли физичар има морално право да у време рата ради на бомби. Бор је одговорио противпитањем, да ли је по његовом (Хајзенберговом) мишљењу уопште могуће војно коришћење нуклеарне фисије. Хајзенберг је одговорио да је распознао ту могућност. Он је предложио да се сви научници света договоре да не учествују у раду на бомби. На Хајзенбергово запрепашћење, Бор је одговорио да су војна истраживања физичара неизбежна и коректна. Хајзенберг се осетио изданим од Бора и морао се необављена посла вратити у Немачку. Ово је, наравно, била немачка помирљива интерпретација догађаја. Чињеница је, међутим, да је Бор очигледно страховао да је Немачка на прагу конструкције атомске бомбе и сумњао је да је Хајзенберг дошао с циљем да сазна докле су Американци стигли, а да је својим предлогом хтео да заустави или бар успори њихов рад. Када су Вајцзекера након Рата питали зашто се није бранио од пребацивања да је сарађивао с Немачким војним врхом, он је одговорио: „Нисам био довољно недужан да бих се могао оправдати, а ни довољно крив да бих се морао правдати.“ (*Ich war nicht schuldlos genug, um mich freisprechen zu können, und nicht schuldig genug, um mich rechtfertigen zu müssen*). Коначно, није неважна била ни разлика између Рузвелта и Хитлера. Рузвелт је одмах поклатио пуно поверење мишљењу Ајнштајна да конструкција атомског оружја треба да буде приоритет и инвестирао је у тај пројект око 4000 пута више средстава него Хитлер у немачки.

²³⁶ David Irwing: „So groß wie eine Ananas ...“, in *Der Spiegel*, Nr. 23 (1967) 65.

Д. ДОБИТНИЦИ НОБЕЛОВЕ НАГРАДЕ
КОЈИ СУ УЧЕСТВОВАЛИ У ПРАВЉЕЊУ АТОМСKE БОМБЕ
ЗА ВРЕМЕ ДРУГОГ СВЕТСКОГ РАТА

KWI Projekt

Макс фон Лауе (1914) – *Max von Laue*
Вернер Хајзенберг (1932) – *Werner Heisenberg*
Ото Хан (1944) – *Otto Hahn*
Валтер Боте (1954) – *Walther Bothe*

Manhattan Project

Нилс Бор (1922) – *Niels Bohr*
Џејмс Франк (1925) – *James Franck*
Артур Комптон (1927) – *Arthur Compton*
Харолд Јури (1934) – *Harold Urey*
Џејмс Чедвик (1935) – *James Chadwick*
Енрико Ферми (1938) – *Enrico Fermi*
Ернест Лоренс (1939) – *Ernest Lawrence*
Ото Штерн (1943) – *Otto Stern*
Исидор Исак Раби (1944) – *Isidor Isaac Rabi*
Глен Сиборг (1951) – *Glenn Seaborg*
Џон Кокрофт (1951) – *John Cockroft*
Феликс Блох (1952) – *Felix Bloch*
Едвин МекМилан (1953) – *Edwin McMillan*
Емилио Сегре (1959) – *Emilio Segrè*
Вилард Либи (1960) – *Willard Libby*
Марија Геперт-Мајер (1963) – *Maria Goeppert-Mayer*
Еуген Пол Вигнер (1963) – *Eugene Paul Wigner*
Ричард Фејнман (1965) – *Richard Feynman*
Ханс Бете (1967) – *Hans Bethe*
Луис Алварез (1968) – *Luis Alvarez*
Ове Бор (1975) – *Aage Bohr*
Џејмс Рејнвотер (1975) – *James Rainwater*
Вел Фич (1980) – *Val Fitch*
Норман Ремзи (1989) – *Norman Ramsey*

Ђ. ГАЛЕРИЈА



Енрико Ферми
(1901–1954)



Ида Нодак
(1896–1978)



Ирена Жолио-Кири
(1897–1956)



Павле Савић
(1909–1994)



Лиза Мајтнер
(1878–1968)



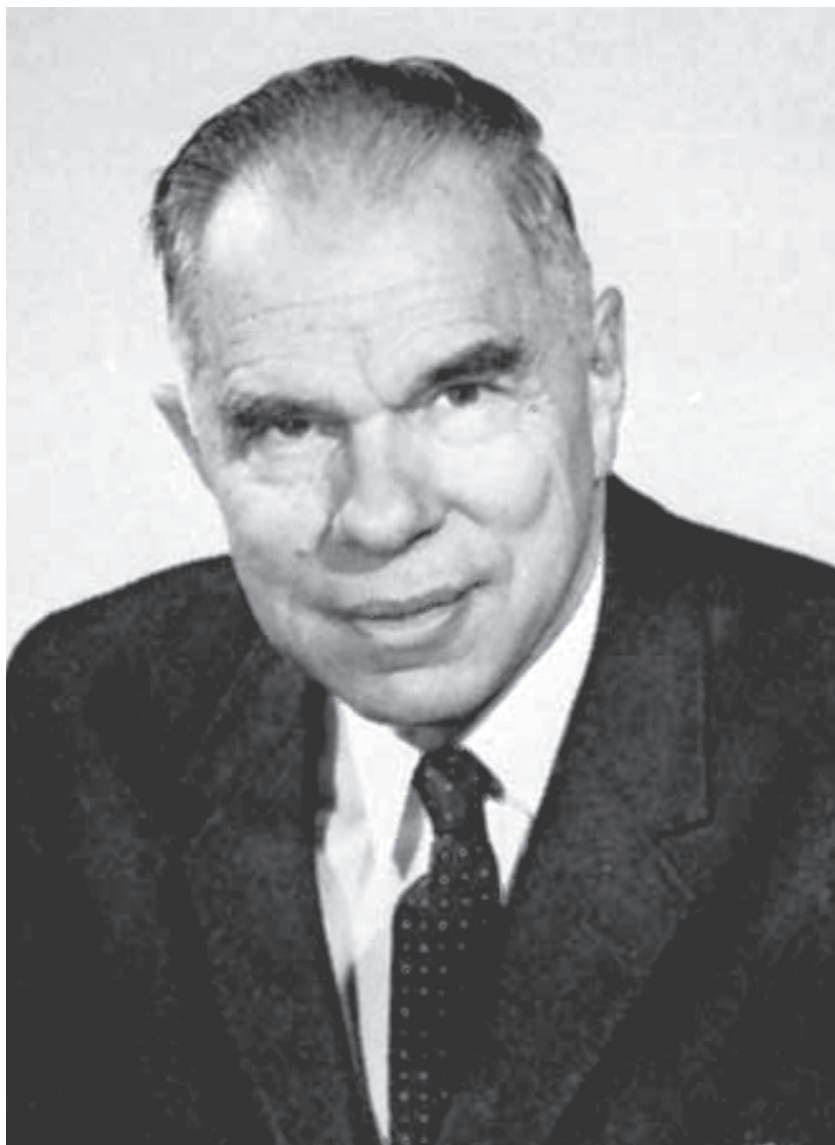
Ото Хан
(1879–1968)



Фриц Штрасман
(1902–1980)



Ото Роберт Фриш
(1904–1979)



Глен Сиборг
(1912–1999)

SUMMARY

ON FISSION AND URANIUM

Šćepan S. Miljanić, Jelena Radić-Perić, Miljenko Perić

This book describes the scientific phenomenon of nuclear fission and the research that led to its discovery. Our intention was to familiarize the broad public with the concept and the discovery of fission. Nuclear fission was one of the key discoveries in the history of science, and was quickly applied practically, both in a constructive and in a destructive fashion. This book is also an expression of our desire to emphasize that science and scientific method are indispensable in societies that seek to develop and better themselves.

Fission is a nuclear reaction in which an atomic nucleus is broken apart into two smaller nuclei by neutron impact, with the release of vast amounts of energy. It was discovered in 1939 by the German scientist Otto Hahn, who received a Nobel Prize in 1944 for “the discovery of fission of heavy nuclei”. The discovery was preceded by years of research in three research groups that concurrently studied nuclear reactions of neutrons with uranium. In Italy, this research was led by Enrico Fermi. The Berlin team was supervised by Hahn. Finally, the Paris group was led by Irène Joliot-Curie, and included Pavle Savić who collaborated with Joliot-Curie as an assistant.

The first part of this book includes a historic introduction and annotated translations of seven key scientific articles that led to the discovery of fission, as well as Otto Hahn’s Nobel lecture. In this lecture, Hahn noted that “fission was a phenomenon defying all other phenomena previously observed in nuclear physics;” this led scientists to be unusually cautious in the interpretation of their own experiments, even when they unambiguously suggested that nuclei were being broken up. This section continues with the article written by the US Nobel Laureate Glenn Seaborg, in which he described how the discovery of fission inspired his own experiments that created transuranium elements.

One of the key messages in this section of our book is that fission was discovered accidentally while scientists searched for something else: methods to

prepare transuranium (that is, heavier than uranium) elements. These searches were enabled by the 1932 discovery of neutron – an unusual particle without charge, that can easily incorporate itself into an atomic nucleus. The nucleus then becomes heavier and typically turns beta-radioactive; after emitting radiation, it turns into a nucleus of a different chemical element. Uranium nucleus and a neutron – these are the key players in the process of fission. Uranium was also the central element in the discovery of *radioactivity* in 1896, which is viewed as the beginning of the nuclear era. Today, uranium is a key resource in nuclear energy production, and is expected to maintain that role for several millennia. Uranium is thus a very special element, and the title of our book reflects that.

The second part of the book contains the description and interpretation of neutron-induced nuclear fission of uranium, description of fission chain reaction, as well as a chapter dedicated to uranium as a chemical element. We analyze the contribution of uranium to the naturally occurring radioactivity on Earth, as well as its importance in the future of energy technologies. In parallel, we survey the applications of fission in today's society, with a particular focus on its utilization in energy production. Nuclear fuels are an incredibly dense source of energy, releasing vast amounts of energy per unit of mass; in the case of uranium, these amounts are about ten million times greater than those released in chemical combustion processes. We go on to describe a nuclear reactor – the device that enables controlled harvesting of nuclear energy by keeping the fission in a self-sustaining chain reaction state. We also used this opportunity to introduce the reader to the Oklo phenomenon: the existence of a naturally fueled nuclear reactor billions of years ago. On the other hand, the high concentration of energy in fission has led to its unfortunate applications – shortly after its discovery – in nuclear weapons. Nuclear (or atomic) fission bomb was, at the time, the most terrifying weapon ever used; we describe its basic principle of operation in the section on nuclear weapons.

The third part of the book contains appendices that include a glossary of important terms used in the preceding parts of the book, as well as a gallery of photographs of scientists that contributed to the discovery of nuclear fission.

Finally, this book speaks about the unique set of conditions under which many scientists worked in the first half of the 20th century. Some of their fates were forever altered by conditions in the buildup to World War II. For example, Lise Meitner was Otto Hahn's main collaborator in the discovery of fission, but had to leave Germany because of her Jewish origins. In Italy, Enrico Fermi felt similar pressures and finally emigrated to the US. The development of nuclear fission technology was not free from political pressures in the US either, where the first atomic bomb was developed. One thing is certain: all of them together laid the groundwork for a number of technical and scientific revolutionary discoveries that followed World War II, especially in the domain of nuclear energy and space exploration. Such knowledge-based revolutions continue – although their focus today has perhaps shifted onto other scientific areas.

CIP – Каталогизација у публикацији –
Народна библиотека Србије, Београд

539.17
546.791

МИЉАНИЋ, Шћепан С., 1948–

До фисије, о фисији и о уранијуму / Шћепан С. Миљанић, Јелена Радић-Перић, Миљенко Перић ; уредник Владимир Стевановић. – Београд : САНУ, 2019 (Београд : Службени гласник). – 172 стр. : илустр. ; 24 см. – (Посебна издања / Српска академија наука и уметности ; књ. 691. Одељење хемијских и биолошких наука ; књ. 11)

"Примљено на IX скупу Одељења хемијских и биолошких наука од 23. новембра 2018, на основу реферата проф. др Душана Сладића и др Зорке Вукмировић" --> насл. стр. – На спор. насл. стр.: On Fission and Uranium. – Тираж 300. – Реч уредника: стр. 9-10. – Напомене и библиографске рефереце уз текст. – Summary: On Fission and Uranium

ISBN 978-86-7025-826-6

1. Радић-Перић, Јелена, 1948– [аутор] 2. Перић, Миљенко, 1949– [аутор]
а) Нуклеарне реакције б) Уранијум

COBISS.SR-ID 277586956

