

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MIHAELA BAKOŠKA

OTKRIĆE FISIJE

Diplomski rad

Osijek, 2015.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MIHAELA BAKOŠKA

OTKRIĆE FISIJE

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja akademskog naziva **MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE**

Osijek, 2015.

"Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Vanje Radolića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija Fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".

Sadržaj

1. Uvod	0
2. Uranij, X-zrake i nepoznato zračenje	1
2.1. Otkriće uranija	1
2.2. Otkriće X-zraka	2
2.3. Nepoznato zračenje.....	3
3. Radioaktivnost	5
4. Razvoj nuklearne fizike	7
4.1. Otkriće elektrona	7
4.2. Otkriće alfa, beta zračenja i atomske jezgre	9
4.3. Otkriće izotopa i zakon radioaktivnog raspada	13
4.4. Otkriće gama zračenja	15
4.5. Prva nuklearna reakcija i otkriće protona	16
4.6. Otkriće neutrona	17
4.7. Otkriće pozitrona	19
5. Umjetna radioaktivnost	20
5.1. Irène Joliot-Curie i Frédéric Joliot.....	20
5.2. Enrico Fermi	23
6. Otkriće fisije	26
6.1. Zajednički rad Meitner i Hahn.....	28
6.2. Zajednički rad Otto Hahn i Fritz Strassman	31
6.3. Zajednički rad Meitner i Frisch	32
6.4. Nuklearna fisija.....	35
6.4.1. Spontana fisija.....	36
6.4.2. Izazvana fisija.....	37
6.4.3. Model kapljice.....	37

6.5.	Lančana nuklearna reakcija i prvi nuklearni reaktor.....	41
6.5.1.	Nuklearna lančana reakcija	42
6.5.2.	Nuklearni reaktori	44
7.	Projekt Manhattan	45
7.1.	Razvoj Manhattan projekta.....	45
7.2.	Trinity test.....	48
7.3.	Atomska bomba.....	49
7.4.	Hiroshima i Nagasaki	51
8.	Zaključak	53
9.	Literatura	54
	Životopis	56

OTKRIĆE FISIJE

MIHAELA BAKOŠKA

Sažetak

U prvom dijelu diplomskog rada opisana su ključna otkrića koja su dovela do otkrića nuklearne fisije 1939. godine što je izazvalo promjene u dotadašnjem svijetu fizike. Kroz rad su isprepletene biografije znanstvenika s njihovim otkrićima kao i događanja koja su bila presudna da se otkriće fisije upotrijebi protiv čovječanstva. Izgradnja nuklearnog reaktora i atomske bombe te povijesni pregled razvoja Projekta Manhattan opisani su u završnom dijelu diplomskog rada.

(57 stranice, 20 slika, 33 literaturna navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: nuklearna fisija/ Lise Meitner/ Projekt Manhattan/ atomska bomba

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Denis Stanić, predsjednik

izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić, mentor

dr. sc. Marina Poje, član

Rad prihvaćen: 06.03.2015.

DISCOVERY OF FISSION

MIHAELA BAKOŠKA

Abstract

The key findings which led to the discovery of nuclear fission in 1939 are shown in the first part of this bachelor thesis. This discovery changed the former world of physics. The main part of this thesis contains intertwined biographies of scientists and their discoveries as well as events that were crucial for using the discovery of fission against humanity. Construction of nuclear reactor and atomic bomb and historical overview of the development of the Manhattan Project are described in the final part of this thesis.

(57 pages, 20 figures, 33 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: nuclear fission/ Lise Meitner/ Project Manhattan/ atomic bomb

Supervisor: Vanja Radolić, Ph.D., Associate Professor

Reviewers: doc. dr. sc. Denis Stanić, predsjednik

izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić, mentor

dr. sc. Marina Poje, član

Thesis accepted: 06.03.2015

1. Uvod

Radioaktivnost definiramo kao proces spontanog raspada i transformacije nestabilnih atomskih jezgri praćen emisijom nuklearne čestice i/ili elektromagnetskog zračenja. Ona postoji svuda oko nas te je oduvijek prisutna. Uranij i torij postoje na Zemlji još od njezina nastanka kao i kozmičko zračenje kojem smo svakodnevno izloženi, a nedavno su ljudi počeli stvarati i umjetne radionuklide.

Otkriće X-zraka i radioaktivnosti dramatično je promijenilo fiziku i kemiju. Započelo je teorijsko, ali i eksperimentalno istraživanje atomske strukture tvari. Same promjene bile su vidljive i u područjima geologije, biologije, medicine, arheologije, proizvodnje energije i ratovanju. Bio je to početak nuklearne fizike, ali i novog doba u razvoju čovječanstva.

Otkriće elektrona, strukture atomske jezgre, cijepanje atoma, otkriće neutrona i umjetne radioaktivnosti, transuranijskih elemenata kao i brojna istraživanja s uranijem doveli su do otkrića nuklearne fisije, 1939. godine.

Od samog otkrića, fisija je privukla veliku pozornost znanstvene zajednice, ali i politike idejom da se fisiju iskoristi za dizajn novog oružja i kasnije novog izvora energije. Sve se to odvijalo u odgovarajućem društvenom i političkom kontekstu. Dolaskom na vlast Adolfa Hitlera i njegove nacističke stranke 1933. godine, u Njemačkoj raste militarizam i antisemitizam što je mnoge znanstvenike primoralo na bijeg kako bi spasili svoje živote. U strahu da nacisti ne iskoriste moć fisije, stvoren je Projekt Manhattan koji je imao samo jedan cilj: stvaranje atomske bombe.

Istraživanja, revolucionarna otkrića i uključenost politike stvorili su nešto što je zauvijek promijenilo čovječanstvo.

2. Uranij, X-zrake i nepoznato zračenje

2.1. Otkriće uranija

Zbog svoje žuto-narančaste boje, uranij je bio sastojak pojedinih minerala koji su se koristili u proizvodnji pigmenata za boje. Obojano staklo i keramičke posude s određenim postotkom uranija pronađeni su u drevnim rimskim vilama. U kasnom srednjem vijeku, uranijev oksid se koristio u industriji za bojanje stakla. Kemičar Martin Klaproth, je 1789. godine zaslužan za otkriće uranija. Tijekom istraživanja, Klaproth je pronašao način da djelovanjem dušične kiseline na uranijev oksid istaloži žuti talog kad se otopina neutralizira natrijevim hidroksidom. Zaključio je da je pronašao novi element i predložio naziv uranij, po Uranu, planetu u Sunčevom sustavu koji je netom bio otkriven. Eugene Melchior Péligot je 1841. godine uspio izdvojiti uranijev metal zagrijavajući uranij tetraklorid s kalijem. Uranij i njegovi spojevi bili su cijenjeni u cijelom svijetu i koristili su se u izradi keramike i stakla što upućuje na činjenicu da su ljudi mislili da je bezopasan.

Uranij je radioaktivan element iz skupine aktinoidi s atomskim brojem 92 i atomskom masom 238,02891. Prirodno je radioaktivan i vrlo otrovan jer su njegovi izotopi nestabilni. U elementarnom stanju je metal srebrne boje, mekan i težak. Uranij ima veliku gustoću, 65 % veću nego olovo, 18950 kg/m³.

Najčešći izotopi uranija su: uranij-238 (više od 99%), uranij-235 i uranij-234. Uranij-235 ima najveći značaj od svih izotopa jer se koristi pri nuklearnoj fisiji i održavanju nuklearnih lančanih reakcija. Kasnije se koristio i u izradi nuklearnog oružja jer se može osloboditi velika količina energije. Neki od najvećih proizvođača rude uranija su SAD, Rusija, Kina, Argentina, Kanada.¹

¹ Periodni sustav elemenata, URL: http://pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/u/fizikalni_podaci.html#FIZIKALNI (25.11.2014.)
URL:<http://en.wikipedia.org/wiki/Uranium> (25.11.2014.)

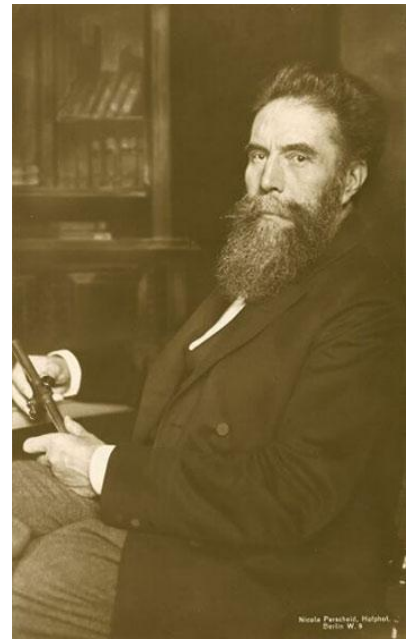
2.2. Otkriće X-zraka

U vrijeme djelovanja Wilhelma Röntgena², znanstvenici su proučavali prolazak električne struje u plinovima što ih je dovelo do otkrića katodnih zraka koje postaju vidljive pri udaranju o stjenku staklene cijevi u kojoj se pokus izvodio. Konstruirali su i nove uređaje koji bi poboljšali izvođenje pokusa. U svom istraživanju, Röntgen je koristio cijev s platinastom elektrodom koju je konstruirao P. Lenard.

Eksperimentirajući i razmišljajući o mogućim rezultatima, Röntgen je u jednom trenutku primijetio da papirnati zastor prekriven barij-platinocijanidom, koji se nalazio na drugom kraju sobe, daje fluorescentni sjaj. Staklo katodne cijevi je bilo debelo, a elektroni su izlazili samo kroz poseban prozorčić. Fluorescencija se pojavila i nakon što je cijev bila

prekrivena crnim papirom što je onemogućilo prolaz ultraljubičastog zračenja kao i katodnih zraka. U to doba, ultraljubičasto zračenje bilo je najprodornije zračenje koje se poznavalo što je dovodilo do mogućnosti pronalaska nove vrste zračenja. Stavljajući različite predmete između cijevi i svjetlucavih kristala (knjiga, drvo, krpica, metal) opazio je da su kod debljih materijala zrake prigušene te da prolazeći kroz ruku daju sjenu kostiju. Zaključivši da su u pitanju prodornija zračenja, do tada nepoznata, nazvao ih je X-zrake zbog nepoznate prirode i „kratkoće“ kako je naveo u svom izvornom radu.

Röntgen je bio skroman čovjek na što ukazuje i činjenica da je nakon revolucionarnog otkrića temeljno istraživao tajanstvene zrake. Dodatnim pokusima potvrdio je pravocrtno širenje zraka jer ih nije mogao otkloniti magnetom. Utvrdio je da prolaze kroz mnoge tvari kao što su npr. ljudsko tkivo i kosti, ali i da u različitim materijalima imaju različitu prodornost. Iz svega je proizlazilo da novo zračenje ima malu valnu duljinu. Danas znamo da je rendgensko zračenje vrsta elektromagnetskih valova valnih duljina između 10 pm i 10 nm i vrlo velikih energija.



Slika 1. Wilhelm Röntgen

(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/roentgen-photo.html) Preuzeto: 25.11.2014.

² Wilhelm Conrad Röntgen rođen je 27. ožujka 1845. godine u Njemačkoj. 1862. godine upisuje tehničku školu u Utrechtu. Diplomirao je strojarstvo, a 1869. završava doktorski studij na Sveučilištu u Zürichu. Određeno vrijeme radio je kao predavač na Sveučilištu u Strasbourgu te 1888. godine prihvaća ponudu da radi kao profesor na Sveučilištu u Würzburgu. 1870. godine objavio je svoj prvi rad u kojem govori o temperaturama plina. 08. studenog 1895. dolazi do otkrića X - zraka, a već u siječnju sljedeće godine objavljuje rad pod nazivom „*O jednoj novoj vrsti zraka*“ u kojem objašnjava razliku između novootkrivenih i već poznatih katodnih zraka. Za otkriće X - zraka, 1901. godine, dodijeljena mu je prva Nobelova nagrada za fiziku. Umro je u Münchenu 10. veljače 1923. (URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/roentgen-bio.html (01.10.2014.))

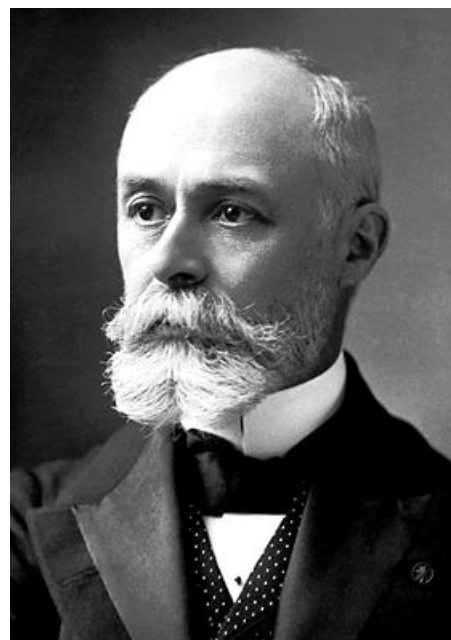
Röntgenovo otkriće i istraživanje s X-zrakama u medicini i fizici izazvalo je brojne promjene i napredak. Možemo reći da je on prvi proizveo umjetno zračenje.³

2.3. Nepoznato zračenje

Nit dva mjeseca nakon otkrića X-zraka, u veljači i ožujku 1896. godine, Antoine Henri Becquerel⁴ otkriva radioaktivnost.

Na zasjedanju Pariške akademije, Poincaré je izvijestio o otkriću rendgenskih zraka i pokazao rendgenske snimke. Uslijedila je i pretpostavka da je fluorescencija povezana s rendgenskim zrakama te da rendgenske zrake nastaju pri luminiscenciji tvari. Navedenu pretpostavku želio je provjeriti i Becquerel. Njegov otac je prikupljao minerale i održavao kolekcije u Prirodoslovnom muzeju. Budući da je Antoine Henri bio nasljednik, a ujedno i ravnatelj muzeja poslije očeve smrti, imao je materijale da provjeri pretpostavku.

Iz zbirke minerala svog oca uzeo je dvosol kalijeva i uranijeva sulfata. Becquerel je komadić uranijeva sulfata postavio na fotografsku ploču koja je bila prekrivena crnim papirom te je izložio dnevnoj svjetlosti. Nakon razvijanja fotografske ploče ugledao je jasnu sliku minerala. Nije bio previše iznenađen, budući da je time potvrdio Poincarévu teoriju. Pokušao je ponoviti eksperiment, ali je vrijeme bilo oblačno. Uzaludno čekajući da se vrijeme popravi, Becquerel je odlučio potreban materijal pospremiti u ladicu i pričekati da se vrijeme popravi.



Slika 2. Antoine Henri Becquerel

(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-facts.html) Preuzeto: 25.11.2014.

³ Supek I., Povijest fizike, Zagreb, Školska knjiga, 1980. str. 134. – 136.

L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 48. – 50.

⁴ Antoine Henri Becquerel rođen je u Parizu, 15. prosinca 1852. godine u uglednoj obitelji fizičara. 1872. godine upisuje studij gdje istovremeno studira znanost i tehniku, a 1888. godine dodjeljuje mu se titula doktora znanosti. Nekoliko godina kasnije imenovan je profesorom primijenjene fizike na *Department of Natural History at the Paris Museum i Polytechnic*. Radio i u prirodoslovnom muzeju, kojega je preuzeo od svog oca. Kao priznanje za svoj rad i otkriće radioaktivnosti, 1903. godine dobio je Nobelovu nagradu za fiziku. Antoine Henri Becquerel je preminuo 25. kolovoza 1908. godine.

(URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-bio.html (03.10.2014.))

Razvijanjem ploče koja nije bila izložena sunčevom svjetlu ugledao je jasan obris kristala što ga je dovelo do zaključka da soli uranija ispuštaju nevidljive zrake i djeluju na fotografsku ploču.

Daljnijim ispitivanjima, Becquerel je zaključio da na zračenje koje dolazi od uranijeva minerala ne utječe ni svjetlost, ni električna energija, odnosno toplina, te da intenzitet ne opada s vremenom. Ustanovio je da sve uranijeve soli daju istu vrstu zračenja te da sam metal daje još intenzivnije zračenje. Zrake je nazvao „uranijevim zrakama“, a kasnije su nazivane i Becquerelovim zrakama. Istraživao je i na koji način nove zrake utječu na vođenje elektriciteta kroz zrak te je ustanovio da zrak postaje vodič elektriciteta jer one ioniziraju zrak i neutraliziraju elektroskop.⁵

⁵ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 50. – 52.

3. Radioaktivnost

Prethodna otkrića dovela su Marie Curie⁶ do njezina životna djela. Unatoč Becquerelovom intrigantnom otkriću, znanstvena zajednica je više pažnje davala nedavno otkrivenim X – zrakama.

Zanemarene uranijeve zrake odlučila je istražiti Marie Curie. Pošto o njima nije bilo mnogo objavljenih radova, krenula je s eksperimentalnim istraživanjem i to u *Paris Municipal School of Industrial Physics and Chemistry* gdje je njezin suprug, Pierre Curie, radio kao profesor. Marie je u svom istraživanju koristila novu vrstu elektrometra, uređaja koji se koristio za mjerenje elektriciteta koji se nalazio u zraku. Elektrometar je postavila iznad uranija. Budući da je uranij zračio oko sebe, uređaj je određivao postoji li elektricitet u okolnom zraku. Svojim brojnim pokusima potvrđuje da zrak ozračen uranijevim zrakama postaje vodič elektriciteta bez obzira je li uranij u čvrstom stanju ili pretvoren u prah, u spoju ili čista tvar, je li izložen svjetlosti ili toplini. Dokazala je da minerali s većim postotkom uranija emitiraju intenzivnije zrake. Uslijedila je pretpostavka: zračenje uranijevih spojeva može biti atomsko svojstvo elementa uranija, nešto što je ugrađeno u samu strukturu atoma.

U to vrijeme, znanstvenici smatraju da je atom nepodijeljen i nedjeljiv te nisu shvaćali njihovu strukturu kao ni da je u njima pohranjena ogromna količina energije. Pri razmatranju svoje pretpostavke, Marie je testirala sve poznate elemente kako bi utvrdila postaje li zrak vodič elektriciteta u još nekom slučaju ili je samo uranij to mogao učiniti. U travnju 1898. godine, otkrila je da se spojevi torija ponašaju kao spojevi uranija, odnosno da spojevi torija emitiraju Becquerelove zrake. Ponašanje uranija i torija opisala je jednom riječi, radioaktivnost.

Istraživanjima se pridružio i njezin suprug. Otkrivaju dvije rude uranija koje zajedno imaju znatno veću radioaktivnost nego čisti uranij. Marie je zaključila da se to događa zato što se u tim rudama nalaze dodatni radioaktivni elementi koje tek treba otkriti. Radili su kao tim, svatko je preuzeo svoje znanstvene zadaće. Bilo im je jako teško pratiti niz novih radioaktivnih elemenata. Koristili su vrlo složen mineral, napravljen od kombinacije 30 različitih elemenata.

⁶ Marie Curie, djevojački Skłodowska, rođena je 7. studenog 1867. godine u Varšavi, Poljska. Nakon završetka srednje škole, otputovala je u Pariz i započela studij fizike i matematike na sveučilištu Paris „La Sorbonne“. Tijekom studiranja upoznala je svog budućeg supruga, Pierrea Curiea. Istraživanjem zračenja koje emitira uranij pripremila je doktorat i time postala prva žena s tako visokom titulom. Zaslužna je za otkriće novih radioaktivnih kemijskih elemenata, polonija i radija. 1903. godine dobila je Nobelovu nagradu za fiziku koju je podijelila sa svojim suprugom i Becquerelom, a 1911. godine dodijeljena joj je Nobelova nagrada za kemiju. Marie Curie umrla je 4. srpnja 1934. godine od leukemije koju je vjerojatno dobila od prekomjernog izlaganja radioaktivnim materijalima.

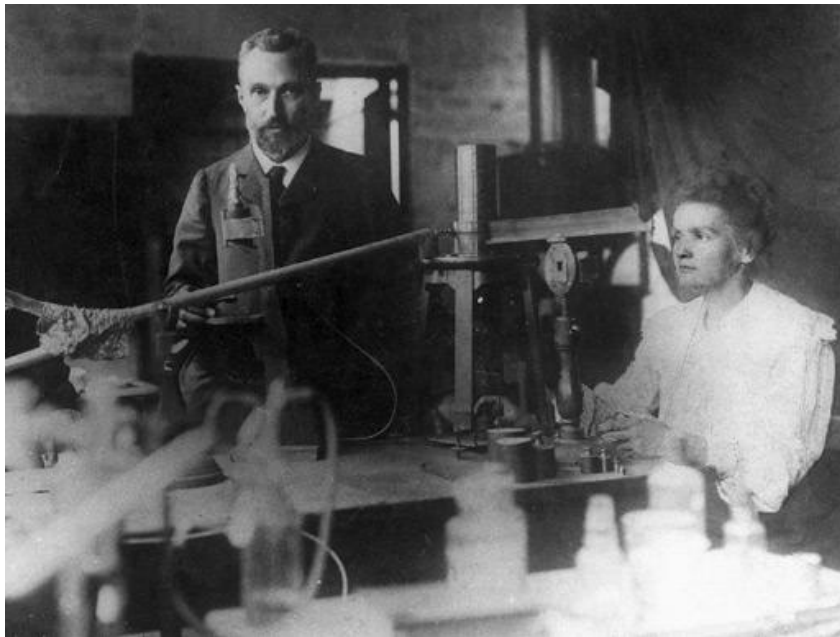
(URL : http://www.aip.org/history/curie/brief/01_poland/poland_1.html (04.10.2014.))

L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 52. – 55.))

Bilo je jako teško izolirati nepoznate tvari kojih se nalazilo u jako malim količinama. Koristili su nove metode kemijske separacije i analize koje su nužno bile potrebne. U uranijevom smolincu su otkrili dvije nove tvari od kojih je jedna imala kemijska svojstva slična bizmutu, a druga je bila slična bariju, i obje su bile jako radioaktivne. U srpnju 1898. godine, bračni par Curie objavljuje novi kemijski element sličan bizmutu te ga nazivaju polonij. U prosincu 1898. godine, objavili su otkriće radija, kemijskog elementa sličnog bariju. Oba novootkrivena elementa imaju potpuno različita kemijska svojstva, ali su jako radioaktivna.

Postupci kojima su Marie i Pierre dolazili do novih elemenata fizički ih je iscrpilo, a primili su i veću dozu zračenja što je utjecalo na njihovo zdravlje. U svojim radovima, iznijeli su opažanje da se zračenje radija može koristiti u liječenju nekih bolesti, ali da može biti i jako opasan.

Marie je cijeli svoj život posvetila istraživanju, borila se i kada joj je bilo najteže. Iako je time uništavala svoje zdravlje, čovječanstvo, a posebno medicina, fizika i kemija napredovali su upravo zahvaljujući njoj i njenom radu.⁷



Slika 3. Marie i Pierre Curie u laboratoriju

(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/marie-curie-photo.html) Preuzeto: 25.11.2014.

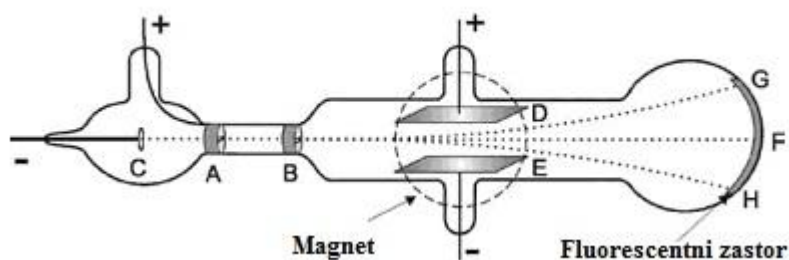
⁷ URL: <http://www.aip.org/history/curie/resbr2.htm> (14.01.2015.)

4. Razvoj nuklearne fizike

4.1. Otkriće elektrona

Tumačenja o atomima započinju još u staroj Grčkoj. Demokrit, grčki filozof rođen na sjeveru Grčke, smatrao je da su osnovni dijelovi svih tvari atomi, koji su nedjeljivi i neuništivi. Njegova ideja je bila zaboravljena sve do 17. stoljeća kada ju je ponovo oživio francuski znanstvenik Pierre Gassendi. Zagovarao je teoriju da se atomi razlikuju veličinom, oblikom i gibanjem, a da im je čvrstoća zajedničko svojstvo. Eksperimentalnu potvrdu atomske strukture tvari dao je engleski kemičar John Dalton smatrajući da su tvari građene od nedjeljivih atoma kao i kemijski elementi. Michael Faraday, proučavajući elektrolizu 1833. godine, navodi da postoji veza između atoma i elementarnog naboja. Njegov rad zaintrigirao je mnoge znanstvenika kao što su bili W. Crookes i Joseph John Thomson.

Godinu dana prije nego je Marie Curie otkrila radioaktivnost, Joseph John Thomson⁸ dao je svoj najveći doprinos fizici. Radilo se o otkriću prve atomske čestice, elektronu. U svojim istraživanjima koristio je katodnu cijev koja se koristila za proučavanje katodnih zraka koje je emitirala katoda C. Prolaskom kroz anode A i B zrake su se ubrzavale i putuju kroz cijev sve do fluorescentnog zaslona koji omogućava uočavanje emitiranog snopa.



Slika 4. Thomsonova katodna cijev

(L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 67)

⁸ Joseph John Thomson je rođen 18. prosinca 1856. godine u Engleskoj. Rano školovanje započeo je u privatnoj školi. Studirao je na Trinity College u Cambridgeu. Na istom sveučilištu, 1884. godine, postaje profesor eksperimentalne fizike i svoje je studente poučavao u čuvenom Cavendishovom laboratoriju. Njegov znanstveni rad vezan je za otkriće elektrona, modele atoma, otkrio je prirodnu radioaktivnost kalija te je djelovao na području spektroskopije. Nobelovu nagradu za teorijska i eksperimentalna otkrića elektriciteta kroz plinove dobio je 1906. godine. Umro je 30. kolovoza 1940. godine u Cambridgeu.

(L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 66. – 68.)

Thomson je pomoću električnog i magnetskog polja dokazao da se zrake sastoje od negativno nabijenih čestica. Uočio je da ako elektroda D bude pozitivno nabijena, a elektroda E negativno nabijena, snop zraka pojavljuje se u položaju G na fluorescentnom zaslonu. Ako električno polje zamijenimo s magnetskim koje djeluje okomito na zrake, one se pojavljuju u položaju H te stupanj otklona zraka ovisi o jakosti magnetskog polja. To je moguće ako su katodne zrake sastavljene od negativnih čestica na koje utječe električno i magnetsko polje. Čestice od kojih se sastoje katodne zrake nazvao je negativnim zrcima.

Thomson u svojim istraživanjima odlazi i korak dalje. Odredio je omjer naboja i mase negativnih čestica e/m . Dokazao je da omjer ne ovisi o vrsti plina u cijevi kao ni o samom materijalu katode. Odredio je da je masa čestica oko 1700 puta manja od mase vodika što je bilo prihvatljivo budući da se danas uzima da je masa elektrona oko 1840 puta manja od mase jezgre vodika (protona). Znamo da su čestice koje je Thomson otkrio zapravo elektroni, ali ih on nije tako nazvao. Pojam „elektron“ skovao je George Johnstone Stoney.⁹

Danas elektrone označavamo simbolom e odnosno e^- . To su stabilne čestice čija masa iznosi $m_e=9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, a naboj $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

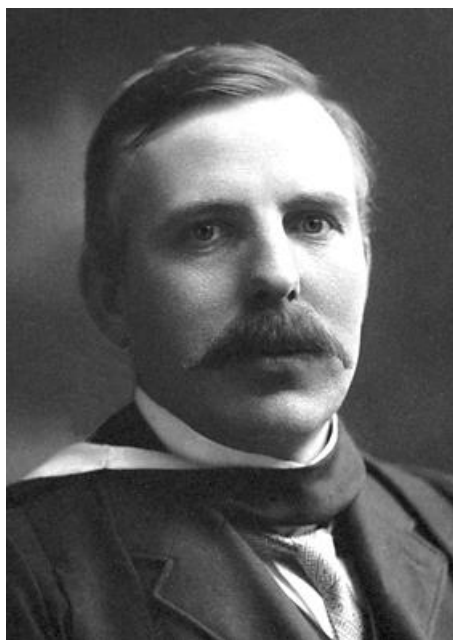
Thomson je bio izuzetan profesor što dokazuje činjenica da je nekoliko njegovih studenata dobilo Nobelovu nagradu. Jedan od njih je bio i Ernest Rutherford koji je zaslužan za daljnje istraživanje radioaktivnog zračenja.

⁹ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 66. – 68.
Faj Z., Pregled povijesti fizike, Sveučilište J.J. Strossmayera, Osijek, 1999. str. 182. – 185.

4.2. Otkriće alfa, beta zračenja i atomske jezgre

Nakon provedene tri godine u Cavendishovom laboratoriju i bliskom radu s J. J. Thomsonom, Ernest Rutherford¹⁰ 1898. godine odlazi na Sveučilište u Montreal, Kanada gdje započinje raditi kao profesor. Upravo su tamo nastala njegova najveća otkrića iz područja nuklearne fizike. Rutherforda su zainteresirala nedavna otkrića Röntgena i tajanstvena zračenja iz uranija. Želio je saznati jesu li Becquerelove zrake, vrsta X-zraka.

Budući da je Becquerel dokazao da je zračenje uranija uzrok ionizacije, koristeći Thomsonovu električnu teoriju i tanke listiće aluminijske, shvatio je da do izbijanja naboja dolazi zbog ionizacije zraka, a izazivaju je uranijeve zrake.



Slika 5. Ernest Rutherford

(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/rutherford-facts.html) Preuzeto: 25.11.2014.

Iz toga je slijedilo da zrake nisu jedinstvene, već da se sastoje od nekoliko komponenti, odnosno o dvije vrste zračenja koje ima različitu prodornost.

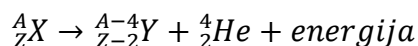
Zračenje koje se lako apsorbira nazvao je α zračenje, a zračenje koje ima jaču prodornost nazvao je β zračenje. Koristeći električno i magnetsko polje otkriveno je da su alfa čestice pozitivno nabijene jer se otklanjaju prema negativnoj katodi (raznoimeni se naboji privlače).

Beta čestice su negativno nabijene zbog otklona prema anodi ili pozitivno nabijenoj elektrodi. Istraživanjem je otkrio da će se radioaktivni atomi koji emitiraju alfa ili beta čestice raspasti na atome s manjom težinom, drugim riječima, atomi radioaktivnog elementa radija koji emitira alfa čestice raspadaju se na lakše atome, a time se stvaraju i novi elementi. Zajedno sa svojim suradnicima, uspio je dokazati da je alfa čestica zapravo jezgra helija. Nadalje,

¹⁰ Ernest Rutherford rođen je 10. kolovoza 1871. godine u gradu Nelson na Novom Zelandu. Osnovno obrazovanje dobio je u državnim školama, a sa 16. godina upisuje Nelson College. Osvojio je stipendiju koje mu je omogućila školovanje na Canterbury Collegu. Nakon što je diplomirao i magistrirao otvorila mu se mogućnost da ode u Trinity College u Cambridgu. Tako je 1894. godine Rutherford, kao student J. J. Thomsona započeo istraživanja u Cavendishovom laboratoriju. Nakon Cambridgea, 1898. godine odlazi na Sveučilište McGill u Montrealu gdje ostaje 10 godina i tu započinju njegova značajna otkrića. 1907. godine postaje profesor fizike na Sveučilištu u Manchesteru, 1919. godine profesor fizike na Cambridgeu. Rutherfordov rad temeljio se na istraživanju radioaktivnih elemenata i nuklearnih reakcija te otkriće atomske jezgre. Za svoj rad dobio je brojne nagrade, a jedna od njim je bila i Nobelova nagrada za kemiju. Umro je 19. listopada 1937. godine u Cambridgu. (URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/rutherford-bio.html (18.01.2015.))

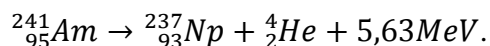
dokazao je da je lakši atom, koji je nastao raspadom radija, također radioaktivan, a konačan rezultat radioaktivnih raspada je stabilan atom.

Danas znamo da je alfa čestica strukturno jednaka jezgri helija i obično je obilježavamo s grčkim slovom α . Sastoji se od dva protona i dva neutrona. Emitira se raspadom mnogih radionuklida čiji je atomski broj pretežno veći od 82 te oni prelaze u stanje niže energije. Alfa raspad možemo zapisati na sljedeći način:

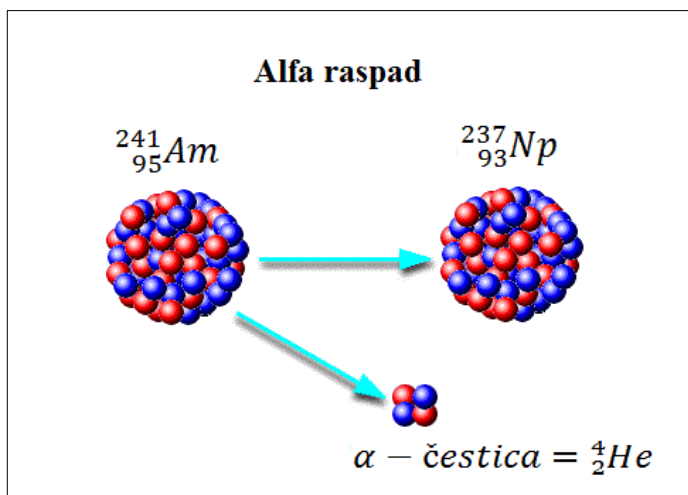


gdje je X kemijski simbol elementa kojem pripada jezgra roditelj, a Y kemijski simbol elementa kojem pripada jezgra kćer.

Kao na primjer, americij-241 raspadom emitira alfa česticu i nastaje nova jezgra, jezgra kćer radionuklida neptunij-237 što je i prikazano jednadžbom:



Uočavamo da je maseni broj nove jezgre umanjen za četiri, dobivena jezgra je umanjena za dva protona i neutrona. U nuklearnim jednadžbama indeks se odnosi na broj protona ili atomski broj, dok eksponent označava maseni broj, zbroj protona i neutrona. Energija koja se oslobađa tijekom nuklearnog raspada naziva se energija raspada, a u navedenom primjeru energija raspada iznosi 5,63 MeV.¹¹



Slika 6. Alfa raspad

(<http://www.nuceng.ca/igna/radioactivity.htm>) Preuzeto: 21.10.2014.

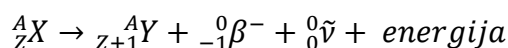
¹¹ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 71. – 75. Draganić I., Radioaktivni izotopi i zračenja, Beograd, 1981. str. 23.

Kod beta raspada, nestabilne jezgre spontano mijenjaju svoju strukturu tako da se jedan neutron u njima pretvori u proton ili jedan proton u neutron. Beta čestice, iste su mase i naboja kao i elektron. One se od elektrona razlikuju po svom podrijetlu. Beta čestica, koja može biti negativno nabijena (negatron) ili pozitivno nabijena (pozitron), potječe iz jezgre atoma. Beta čestice imaju nešto veći domet od alfa čestica, nekoliko metara, a zaustavlja ih aluminij debljine nekoliko mm.

a) Beta minus (β^-) raspad

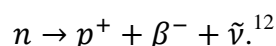
Pri beta minus raspadu jedan neutron u jezgri pretvara se u proton, a iz jezgre izlijeću dvije čestice, elektron (negatron) i antineutrino.

Broj protona u jezgri povećava se za jedan, a broj neutrona smanji se za jedan. Maseni broj se ne mijenja.

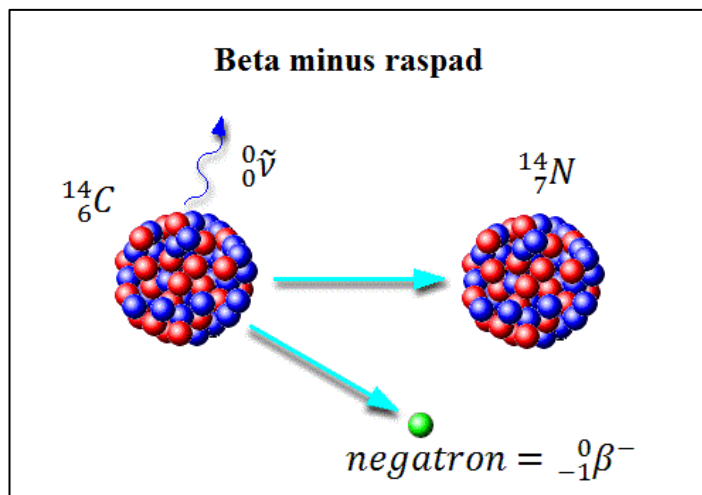
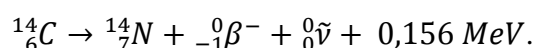


Negatron ili negativna beta čestica (β^-) emitirana je iz jezgre koja sadrži višak neutrona, a antineutrino, čestica neutralnog naboja, prati navedeni raspad i time se emitira energija. Energije beta zračenja ne prelaze 5 MeV. Često u literaturi nalazimo zapisano da je negatron

zapravo elektron. Znamo da se elektron ne nalazi u jezgri, nego u elektronskom oblaku. U jezgri se nalaze protoni i neutroni. Negatron je negativno nabijena čestica i ima jednaku masu kao i elektron, ali je on nastao raspadom neutrona na proton i elektron:



Beta raspad prikazan je i primjerom gdje ugljik-14 beta raspadom daje stabilnu jezgru dušika:



Slika 7. Beta minus raspad

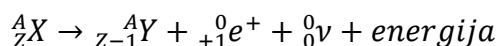
(<http://www.hpwt.de/Kern2e.htm>) Preuzeto: 21.10.2014.

¹² L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 119. – 120.
Draganić I., Radioaktivni izotopi i zračenja, Beograd, 1981. str. 20.

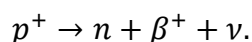
b) Beta plus (β^+) raspad

Pri beta plus raspadu jedan proton u jezgri pretvara se u neutron, a iz jezgre izlijeću dvije čestice, pozitron i neutrino.

Jezgra roditelj, sa Z protona i N neutrona, pretvara se u jezgru kćer, koja ima Z-1 protona i N+1 neutrona. Maseni broj se ne mijenja kao ni kod beta minus raspada.

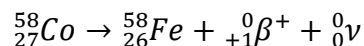


Pozitron ili pozitivna beta čestica emitira se iz jezgre koja ima višak protona. Da bi se stabilnost jezgre ostvarila, proton se pretvara u neutron i pozitron



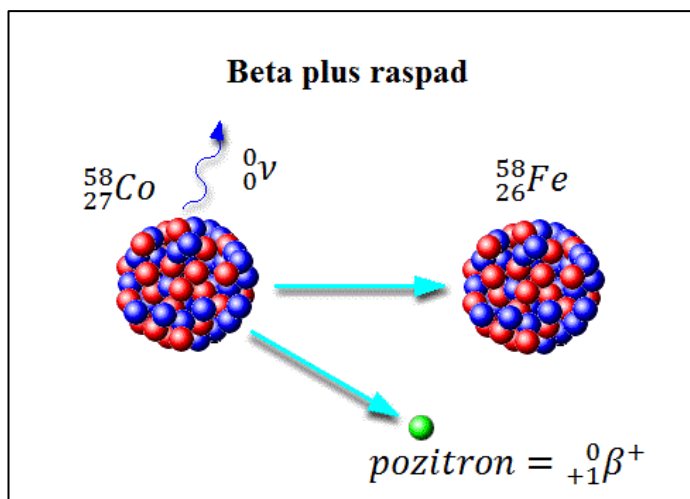
Prilikom beta minus raspada oslobađa se i neutrino, neutralna čestica zanemarive mase.

Raspad radioaktivnog kobalta-60 uzet je kao primjer:¹³



Rutherford je u suradnji s brojim znanstvenicima, uključujući i F. Soddyja, došao do zaključka da se kemijski element može transformirati u druge elemente. Jedan od najznačajnijih i najpoznatijih Rutherfordovih pokusa bio je dokaz postojanja atomske jezgre u atomu. Pokus se temeljio na bombardiranju listića zlata alfa česticama i uočavanju raspršenja odnosno skretanja alfa-čestica.

Pošto je Rutherford znao masu, brzinu i električni naboj alfa čestica, na osnovu dobivenih rezultata iz mnogobrojnih pokusa, zaključio je da ta skretanja mogu izazvati samo neke jake odbojne sile, koje se nalaze u atomima metala, kroz koji su alfa čestice prolazile. Kako su skretanja alfa čestica pod velikim kutovima bila jako rijetka, npr. pri prolazu kroz listić platine na svakih 8000 alfa-čestica jedna bi skrenula pod kutom većim od 90°, Rutherford je smatrao da na njih djeluju neke jake odbojne sile. Te sile su mogle potjecati samo od jakih električnih polja pozitivnog električnog naboja, koji je sabijen u pojedinim sitnim mjestima u unutrašnjosti atoma.



Slika 8. Beta plus raspad

(<http://www.hpwt.de/Kern2e.htm>) Preuzeto: 21.10.2014.

¹³ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 124. – 126.
Draganić I., Radioaktivni izotopi i zračenja, Beograd, 1981. str. 20 – 22.

Time se došlo do objašnjenja da se atom sastoji od vrlo male jezgre, a oko jezgre kruže elektroni.¹⁴

4.3. Otkriće izotopa i zakon radioaktivnog raspada

Rutherford je 1900. godine definirao pojam radioaktivnog raspada, odnosno vrijeme koje je potrebno da radioaktivni uzorak raspadne na polovinu svoje početne vrijednosti te postavio eksponencijalnu jednadžbu radioaktivnog raspada. U svom daljnjem istraživanju radioaktivnosti, u suradnji sa Soddyem, 1903. godine je nastala prva verzija teorije radioaktivnog raspada gdje objavljuju brzinu transformacije jednog radioaktivnog elementa (jezgra roditelj) u drugi element (jezgra kćer). Dokazali su da brzina raspada jezgre roditelja regulira brzinu tvorbe jezgre kći. Uočeno je da su neke atomske jezgre stabilne, a neke nestabilne. Stabilne jezgre mogu trajati vječno dok će se nestabilne raspasti.

Time je nastala teorija da je broj atoma nekog radioaktivnog elementa koji će se raspasti u kratkom vremenskom intervalu proporcionalan ukupnom broju atoma tog elementa u tom vremenu

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

gdje je λ konstanta radioaktivnog raspada. Nakon integriranja i uzimajući da je N_0 početan broj radioaktivnih jezgri u trenutku $t = 0$, a N broj jezgri koji je ostao neraspadnut nakon vremena t , dobivamo izraz

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Navedeni izraz definirani je oblik zakona radioaktivnog raspada. Prema njemu, jezgre se nakon beskonačno dugo vremena raspadnu te krivulja koja opisuje navedeni zakon je u eksponencijalnom opadanju. Broj neraspadnutih jezgri smanjuje s porastom vremena i to eksponencijalno.

Izraz koji povezuje konstantu raspada i vrijeme poluraspada definiran je:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

¹⁴ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 58. – 64.
Faj Z., Pregled povijesti fizike, Sveučilište J.J. Strossmayera, Osijek, 1999. str. 190. – 193.

Primjenom gornjeg izraza zakon radioaktivnog raspada se može prikazati i u sljedećem obliku koristeći vrijeme poluraspada:¹⁵

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Sljedeći veliki uspjeh Rutherforda i Soddyja bilo je razdvajanje radioaktivnih uzoraka torija koje su nazvali torij X. Nakon nekoliko tjedana, torij je ponovno postao radioaktivan kao prije početka razdvajanja, a za torij X se smatralo da će se formirati do tada nepoznat kemijski element. Bile su to kemijske reakcije koje do tada nisu bile viđene. Jedan radioaktivni element se spontano mijenja u drugi, atomi tvore nove atome. Svaki proces raspada karakterizira i vrijeme poluraspada koje je različito te za pojedine raspade može biti 3100 godina, a za neke 1,5 minuta. Neki radioaktivni elementi su bili slabo radioaktivni dok su neki bili jako nestabilni i radioaktivni što je također utjecalo na istraživanja.

Računajući energiju α čestica uočili su da je energija radioaktivne pretvorbe značajno veća nego što su se do sada susreli. Uočavanje veće energije odnosilo se samo na energiju zračenja, a ne na ukupnu energiju koja bi se stvorila raspadom. Bez obzira na sve, bio je to početak ideje o novom obliku energije.¹⁶

Nakon prestanka rada s Rutherfordom, Soddy odlazi u London gdje zajedno s Ramsayom dokazuje da je alfa čestica zapravo jezgra helija. Također je pokazao da se alfa i beta raspadima stvaraju novi elementi koji se od roditeljske jezgre razlikuju po masenom broju. Njih je nazvao izotopima. Izotopi se odnose na atome istog elementa koji imaju isti atomski broj (broj protona u jezgri), a različiti maseni broj (broj protona i neutrona) te su kemijski identični. Složio je radioaktivne elemente u periodni sustav, kakav i danas poznajemo, po brzini raspada, energiji i vrsti zračenja koje se emitira ili prema radioaktivnim elementima od kojih su nastali. Često su novonastali elementi bili nazvani po elementu od kojeg su nastali i to iz dva razloga: ili se mislilo da je jezgra kći isti element kao jezgra roditelj ili jednostavno nisu znali koji je novonastali element. Na primjer, Soddy je naveo u svom radu i prilikom slaganja radioaktivnih elementa u tablicu da su torij A, torij B i torij C nastali od torija, što se kasnije pokazalo da nije točno, nego su ti elementi izotopi polonija, olova i bizmunta.¹⁷

¹⁵ Draganić I., Radioaktivni izotopi i zračenja, Beograd, 1981. str. 28. – 29.

Ivanović M., Vučić V., Atomska i nuklearna fizika, Beograd, Naučna knjiga, 1975. str. 125. - 127

¹⁶ Faj Z., Pregled povijesti fizike, Sveučilište J.J. Strossmayera, Osijek, 1999. str. 188.

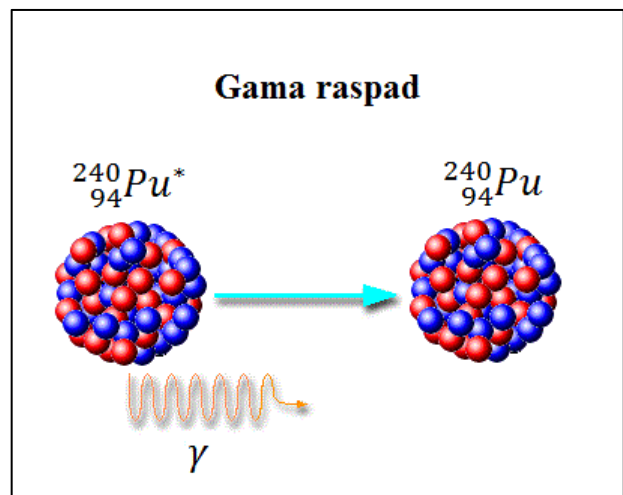
¹⁷ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 85. – 89.

4.4. Otkriće gama zračenja

Francuski fizičar, Paul Villard je 1900. godine otkrio novo zračenje. Istraživao je zračenje radijeve soli puštajući ga kroz uski otvor preko tankog sloja olova za koje je znao da će zaustaviti alfa zračenje. Ubrzo je dokazao da osim preostalog beta zračenja, postoji još jedna vrsta. Beta zračenje je skrenulo u magnetskom polju, a novootkriveno nije. Zračenje je bilo vrlo prodorno. Ernest Rutherford je predložio naziv gama zračenje što je i ostalo do danas.

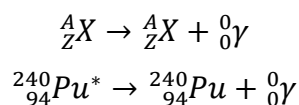
Atomi se mogu nalaziti u raznim energetska stanjima što vrijedi i za atomske jezgre. Atomska jezgra može biti u osnovnom stanju, prvom pobuđenom, drugom pobuđenom itd. Kod alfa i beta raspada dolazilo je do promjene strukture jezgre. Najčešće je novonastala jezgra bila u pobuđenom stanju iz kojeg spontano prelazi u osnovno stanje.

Ako se jezgra nalazi u pobuđenom stanju, ona spontano prelazi u stanje niže energije i pritom emitira foton. To zračenje naziva se gama zračenje ili gama raspad. Gama zrake su zapravo fotoni, elektromagnetsko zračenje visokih frekvencija i energije hf u intervalu od nekoliko stotina keV pa do manje od 10 MeV.



Slika 9. Gama raspad

(<http://www.hpwt.de/Kern2e.htm>) Preuzeto: 21.10.2014.



Zbog visokih energija, gama zrake (fotoni) dosežu brzinu svjetlosti. Mogu proći kroz različite vrste materijala, uključujući i ljudsko tkivo. Da bi se zaštitili, usporili ili zaustavili gama zračenje najčešće se koriste gusti materijali kao što je olovo.

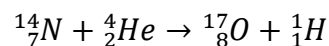
4.5. Prva nuklearna reakcija i otkriće protona

Rutherford je 1903. godine u jednom magazinu objavio karakteristike nuklearnih zračenja na temelju njihovih prodora kroz tvari:

- a) α zračenje se lako apsorbira
- b) β zračenje se sastoji od negativno nabijenih čestica i slične su katodnim zrakama
- c) γ zračenje prolazi kroz magnetsko polje bez odklona te je jako prodorno.

Bila je to godina u kojoj su se dogodila značajnija otkrića na području radioaktivnosti.

U lipnju 1919. godine, Rutherford je izazvao prvu umjetnu nuklearnu reakciju, odnosno cijepanje atoma. Bio je u mogućnosti pokazati da prilikom udara alfa čestica velikom brzinom o jezgru nekog atoma nastaju novi atomi. Pri istraživanju je koristio kvadratnu posudu na kojoj se nalazio izvor alfa čestica te zastor na kojem je proučavao udare čestica. Posuda je bila napravljena tako da se njezina unutrašnjost mogla napuniti željenim plinom. Prvo je upotrijebio kisik i na zastoru se pokazao manji broj svjetlucanja zbog toga što je plin apsorbirao alfa čestice. Zatim je pokus ponovio sa zrakom te je na njegovo iznenađenje broj svjetlucanja bio povećan, a još veći broj bljeskova na zastoru dogodio se kada je posudu ispunio čistim dušikom. Rutherford je daljnjim istraživanjem dokazao da bombardiranjem dušika alfa česticama nastaje nova čestica, velikih brzina i dometa, atom vodika. Dušikova jezgra ima maseni broj 14, a naboj jezgre 7. U dodiru dušika s alfa česticama naboj se povećava na 8, što označava nastanak atomske jezgre kisika, ali i jezgre vodika.



Bila je to prva umjetna nuklearna reakcija u povijesti i ustanovljeno je da je atom vodika sastavni dio jezgre složenog atoma i nazvao ih protonima.

Na svom predavanju 1920. godine, iznio je svoj uspjeh i pretpostavku postojanja čudnih čestica u jezgri, koje nisu ni protoni, a ni elektroni, što je početak teorije o neutronima. Osim dušika uspio je rascijepati jezgre neona, magnezija, sumpora, klora, argona i kalija, a nekoliko godina kasnije znanstvenici su uspjeli rascijepati i jezgre litija, berilija i ugljika.¹⁸

¹⁸L'Annunziata M.F., *Radioactivity Introduction and History*, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 58. – 64.
Faj Z., *Pregled povijesti fizike*, Sveučilište J.J. Strossmayera, Osijek, 1999. str. 221. – 222.

4.6. Otkriće neutrona

U studenom 1931. godine kemičar Harold Urey otkriva deuterij, izotop vodika koji sadrži jedan proton i neutron. Samo godinu kasnije dogodilo se otkriće koje je formiralo atomsku strukturu.

Radilo se o otkriću poznatog engleskog znanstvenika, Jamesa Chadwicka¹⁹. Prije njegovog otkrića, Bothe i Becker, su primijetili da se bombardiranjem berilija, bora, litija (laki elementi) alfa česticama emitira nepoznato, vrlo prodorno zračenje slično gama zračenju velike energije. U početku je to zračenje bilo nazvano „berilijevo zračenje“. Ubrzo su Irene Joliot-Curie i Webster pokazali da je zračenje prodornije od gama zračenja. Prolazilo je kroz limene ploče nekoliko centimetara i pritom nije gubilo na brzini. Supružnici Joliot-Curie promatranjem su ustanovili da nepoznato zračenje izbacuje proton kada je u interakciji s materijalima koji sadrže vodik. Budući da je proton bio izbačen velikom brzinom, smatrali su da je za njegov nastanak bio potreban foton s vrlo velikom energijom, ali nisu bili sigurni u svoja razmatranja zato što se narušavao zakon očuvanja energije. Bili su na tragu otkrića neutrona, ali nisu uzeli u obzir da bi nepoznato zračenje zapravo mogla biti čestica velike mase i neutralnog naboja.

Nakon niza eksperimenata pomiješanih s intuicijom i razmišljanjem, Chadwick je uspio dokazati da zračenje koje emitira berilij nije bilo gama zračenje, već čestice koje je nazvao neutronima. Prvo je uzeo u obzir da je nemoguće da nuklearna reakcija koja uključuje alfa čestice s kinetičkom energijom od samo 5 MeV prilikom interakcije s berilijem može proizvesti gama fotone energije 50 MeV.

Za izvođenje pokusa koristio je dvije komore. Iz prve komore je izvučen zrak te se u njoj nalazio izvor alfa čestica (polonij) i berilij dok je druga komora bila napravljena tako da detektira



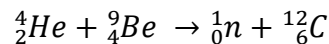
Slika 10. James Chadwick

(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-facts.html) Preuzeto: 25.11.2014.

¹⁹ James Chadwick rođen je u Engleskoj, 20. listopada 1891. godine. Nakon završetka srednje škole upisuje Sveučilište u Manchesteru gdje je diplomirao 1911. godine. Blisko je surađivao s Rutherfordom, prvo kao student, a zatim kao suradnik. Radom u Cavendishovom laboratoriju napravio je otkriće koje mu je donijelo Nobelovu nagradu 1935. godine. Dokazao je postojanje neutrona, njegovu masu i objasnio strukturu atoma. Umro je 24. srpnja 1974. godine.

(URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/chadwick-bio.html (18.01.2014.))

protone. Alfa čestice nastaju raspadom radioaktivnog polonija i pogađaju berilij koji zrači nepoznatim zračenjem, odnosno emitiraju se neutroni. Kada je između dvije komore postavio parafin, druga komora je detektirala protone. Zaključio je da berilijevo zračenje izbija iz parafina protone te da je ono sastavljeno od čestica koje imaju masu približno masi protona, ali nemaju naboj što im daje veću prodornost. Budući da su neutroni čestice koje nemaju naboj, bilo je puno lakše detektirati protone što je Chadwicku i uspjelo. Nuklearna reakcija koja je proizašla iz ovog eksperimenta glasi:



Daljnijim istraživanjima uspio je odrediti masu neutrona. Mjerenjem je dobio da je masa neutrona

$$m_n = 1,0066u$$

gdje je u atomska jedinica mase koja iznosi

$$u = 1,660565 \cdot 10^{-27} \text{kg}.$$

Danas znamo da masa neutrona iznosi

$$m_n = 1,00866u$$

Uočavamo da je svojim mjernim instrumentima, dosta precizno odredio masu.

Otkriće neutrona potaknulo je brojne znanstvenike na daljnje istraživanje. Potvrdu Chadwickog otkrića dao je i bračni par Joliot-Curie, a otkrića Fermia pa i Lise Meitner vodila su do otkrića fisije.

Tijekom cijepanja atomskih jezgri, znanstvenici su uočavali alfa čestice, protone ili neutrone, ali nikada elektrone. Iz toga su zaključili da se u atomskoj jezgri nalaze protoni i neutroni, dok se elektroni ne nalaze u njoj.²⁰

²⁰ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 217. – 224.
Faj Z., Pregled povijesti fizike, Sveučilište J.J. Strossmayera, Osijek, 1999. str. 223. – 224.

4.7. Otkriće pozitrona

Paul Dirac je 1928. godine u svom radu objavio pretpostavku da postoje elektroni s pozitivnim nabojem. Navedenu pretpostavku dokazao je američki fizičar C. D. Anderson. Prilikom istraživanja kozmičkih zraka u magnetskom polju motrio je tragove čestica, elektrona i protona. Detaljnijim istraživanjem tragova koje su ostavljale čestice, uočio je postojanje čestice koja ima istu masu kao i elektron, ali pozitivan naboj. Tu je česticu nazvao pozitron.

Danas znamo da je pozitron ili antielektron, antičestica elektrona. Ima električni naboj $+1e$ koji je po iznosu identičan elementarnom naboju, samo što je pozitivan; spin je jednak $\frac{1}{2}$ čime pripadaju u skupinu fermiona te ima masu kao i elektron.²¹

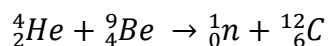
²¹ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 55. – 58.

5. Umjetna radioaktivnost

Radioaktivnost može biti prirodna ili umjetna. Kao što i same riječi govore, kod prirodne radioaktivnosti, radioaktivne tvari su same po sebi oduvijek prisutne na Zemlji, dok su umjetne izazvane od strane ljudi. Za otkriće umjetne radioaktivnosti zasluženi su Irène Joliot-Curie²² i Frédéric Joliot²³.

5.1. Irène Joliot-Curie i Frédéric Joliot

Svojim radom, pomogli su Chadwicku da otkrije neutron. Ono po čemu ih povijest najviše pamti je stvaranje umjetnih radioaktivnih elemenata. Prilikom istraživanja, pokušavali su pronaći pozitrona zato što su mislili da su im promakli kao i neutron. Ne samo da su pronašli, odnosno umjetno proizveli pozitron već su i napravili veliko otkriće. Prvi puta su umjetno proizveli radioaktivni izotop. Odlučili su različite metale izložiti alfa zračenju i proučavali koje su čestice rezultat pretvorbe. Bilo je poznato ako se berilij izloži djelovanju alfa česticama nastaju neutroni:



Oni su ozračili aluminijsku foliju s alfa česticama, a izvor alfa čestica je bio polonij. Energija sudara čestica mogla se kontrolirati stavljajući alfa čestice na različite udaljenosti od aluminijske. Kada je izvor alfa čestica pomaknut na udaljenost izvan mogućeg dosega od aluminijske, emisija neutrona prestaje, ali emisija pozitrona je i dalje postojala što je izazivalo čuđenje. Pomoću Geigerovog brojača uočavaju da se broj emitiranih pozitrona s



Slika 11. Jean Frédéric Joliot i Irène Curie Joliot

(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1935/joliot-curie-photo.html) Preuzeto: 26.11.2014.

²² Irène Curie, kći Marie i Pierre Curie, rođena je u Parizu 12. rujna 1897. godine. Pohađala je studij Faculty of Science u Parizu te je doktorirala 1925. godine. 1932. imenovana je predavačem, a 1937. postala je profesor na studiju koji je pohađala. Nekoliko godina kasnije postala je ravnateljica Radium Institute. Nobelovu nagradu za kemiju podijelila je sa svojim suprugom, Frédéricom Joliot. Umrla je u Parizu, 1956. godine.
(URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1935/joliot-curie-bio.html (18.01.2014.))

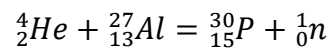
²³ Jean Frédéric Joliot rođen je u Parizu 19. ožujka 1900. godine. Studirao je na Ecole de Physique et Chemie u Parizu. Započinje raditi kao asistent u laboratoriju Marie Curie, 1925. godine, a 1930. je doktorirao. Profesor na Faculty of Science postaje 1935. godine kada prima Nobelovu nagradu za svoje otkriće. Jean Frédéric Joliot umro je 1958. godine.

(URL: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1935/joliot-fred-bio.html (18.01.2014.))

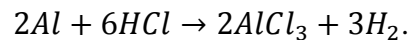
vremenom smanjio. Bombardiranje aluminijske folije alfa česticama stvara novi radioaktivni izotop, koje je do tada bio nepoznat ljudima. Radilo se o radioaktivnom fosforu.

Njihovo objašnjenje da se upravo radi o radioaktivnom fosforu odvijao se u sljedećim koracima:

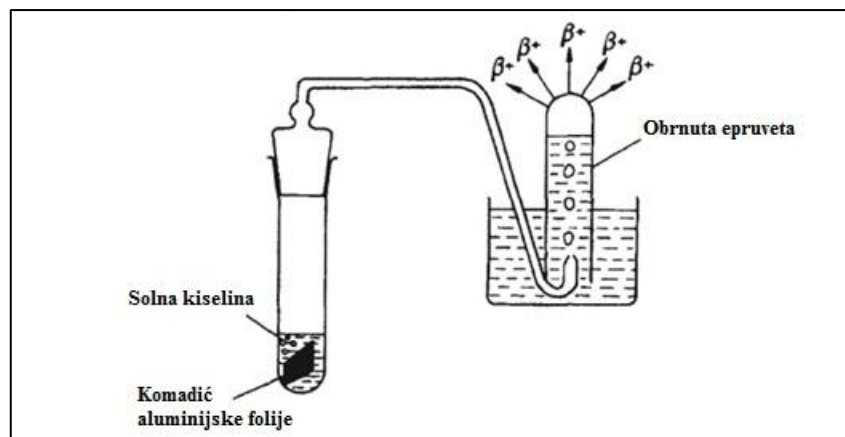
- 1) Nuklearnu reakciju između alfa čestica i aluminijske folije koja daje neutrone označena je znakom jednakosti zbog toga što su htjeli dokazati da je zbroj masenih i atomskih brojeva na jednoj strani jednak zbroju istih brojeva na drugoj strani jednadžbe.



- 2) Zatim su uzeli komad aluminijske folije koja je bila ozračena alfa česticama i stavili je u epruvetu koja je bila napunjena solnom kiselinom. Reakcijom će se stvoriti vodik kao što je prikazano jednadžbom:



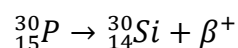
Nova radioaktivna tvar se nalazila u obrnutoj epruveti gdje je prenesena plinom vodikom kao što je prikazano na slici.



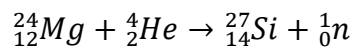
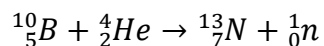
Slika 12. Pokus Jean Frédéric i Irène Joliot

(L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 96)

- 3) Potvrđeno je da kada se komad Al-folije ozrači i natopi u smjesu kiseline i kemijskih oksida u koje je dodana mala količina natrij fosfata i sol cirkonija, stvara cirkonij fosfat i njegov talog je zapravo nova radioaktivna tvar. Iz toga su zaključili da se radi o fosforu koji emitira pozitrone. Novi radioaktivni izotop, fosfor-30, vremena poluraspada oko 2,5 minute, raspada se na stabilni silicij-30 i emitira pozitron



Ozračivali su alfa česticama i druge metale, poput bora i magnezija i proizveli su radioaktivni dušik te radioaktivni silicij.



Nakon primitka Nobelove nagrade, nastavili su s istraživanjem, ali sada s težim elementima kao što su uranij i torij. Bili su blizu otkrivanja nuklearne fisije. Započeo je i veliki napredak u medicini. Medicinske primjene umjetnih radioizotopa sve više su se koristile za dijagnozu i liječenje raka.²⁴

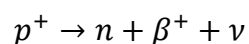
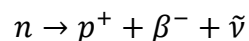
²⁴ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 94. – 99.

5.2. Enrico Fermi

Jedan od najznačajnijih fizičara koji je svojim radom unaprijedio razumijevanje umjetne radioaktivnosti i postavio važne temelje za otkriće nuklearne fisije bio je Enrico Fermi²⁵.

Enrico Fermi je poznat po razradi beta raspada. Znanstvenici su pokušali riješiti problem beta čestice. Ako je beta čestica ekvivalentna elektronu, kako je moguće da se nalazi u jezgri atoma? Fermi je pretpostavio da se unutar jezgre neutron može pretvoriti u proton i obrnuto te da postoji slaba interakcija, odnosno sila između njih koja omogućava postizanje nuklearne stabilnosti.

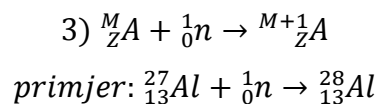
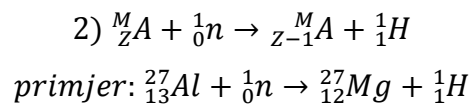
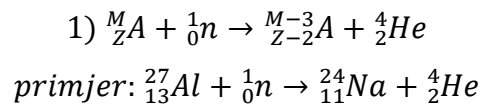
Smatrao je da je ta sila slabija od jake nuklearne koja drži protone i neutrone u jezgri. Njegova pretpostavka o slaboj interakciji kasnije je razrađena u jedinstvenu elektroslabu teoriju. Fermi teoriju beta raspada i nastanak pozitivne ili negativne beta čestice objašnjava raspadom jezgre. Međutim, pojavio se i problem što beta čestice imaju širok raspon energija. Pokusi su pokazali da je ukupna energija kod beta raspada manja od razlike energije kada jezgra prelazi iz stanja više u stanje niže energije. Time emisija beta čestice iz jezgre koja je mogla imati bilo koju energiju između nule i maksimalne vrijednosti narušava zakon očuvanja energije. Wolfgang Pauli je 1930. godine, pretpostavio postojanje čestice koja će dijeliti energiju raspada s beta česticom i nazvao je "neutron". Fermi je zaključio da te čestice prema Paulijevoj pretpostavci ne mogu biti već otkriveni neutroni nego čestice manje mase. Kasnije je ta neutralna čestica male mase nazvana neutrino. Prema navedenom beta raspad se može zapisati:



Kada se u jezgri neutron pretvara u proton, negativna beta čestica će biti izbačena iz jezgre zajedno s antineutrinom. Suprotno se događa kada se proton pretvara u neutron. Pri tom raspadu nastaje pozitivna beta čestica koja je izbačena zajedno s neutrinom. Također, raspad koji emitira negativnu beta čestica stvara jezgru kćer koja ima veći maseni broj (dodatan broj protona u jezgri), a raspad pri kojem se emitira pozitivna beta čestica stvara jezgru kćer koja ima umanjen maseni broj od jezgre roditelja.

²⁵ Enrico Fermi rođen je 29. rujna 1901. godine u Rimu. Školovao se na Sveučilištu u Pisi, gdje je i doktorirao. 1924. godine počinje raditi kao predavač na Sveučilištu u Firenci, a 1927. godine izabran je za profesora teorijske fizike na Sveučilištu u Rimu. Zajedno sa svojom obitelji emigrirao je u SAD gdje započinje raditi na Sveučilištu Columbia. Dodijeljena mu je Nobelova nagrada za istraživanje umjetne radioaktivnosti i nuklearnih reakcija dobivenih sporim neutronima. Bio je jedan od vođa tima fizičara koji su sudjelovali u projektu Manhattan. Umro je u Chicagu 28. studenog 1954. godine.

Fermi za objašnjenje beta raspada nije dobio Nobelovu nagradu, nego mu je ona dodijeljena za otkrivanje novih radioaktivnih izotopa te činjenice da neke nuklearne reakcije izazivaju spori neutroni što je vodilo do otkrića transuranijskih elementa. Kada su Joliot-Curie otkrili umjetnu radioaktivnost, Fermi se izjasnio da se umjetna radioaktivnost može dobiti ako se koristi i neki drugi izvor, a da nisu alfa čestice. Započeo je istraživanje bombardirajući različite elemente neutronima. Kao izvor neutrona koristio je staklenu cjevčicu koja je bila napunjena berilijem pomiješanim s radonom. Radon je emitirao alfa čestice koje bi sudarajući se s atomima berilija stvarale neutrone. Prvi rezultati pokusa dobiveni su 1934. godine, kada su Fermi i brojni suradnici otkrili 63 umjetna radioizotopa. Ustanovljeno je da se nuklearne reakcije (1 i 2) uglavnom događaju kod lakih elemenata, kojih je u to vrijeme bilo poznato 92, a reakcija 3 kod težih elemenata. Različite nuklearne reakcije pojavljivale bi se u trenutku kada promatrane elemente ozračimo neutronima. Ako bi ozračili izotop aluminija neutronima, pri prvoj reakciji nastao bi izotop natrija s vremenom poluraspada od 15 sati, zatim izotop magnezija s vremenom poluraspada od 10 minuta i nakraju izotop aluminija.



Nakon šest mjeseci istraživanja otkrio je da se stvaranje umjetnih radioaktivnih izotopa može poboljšati usporavanjem neutrona. Stavio je između izvora neutrona i željenog elementa parafin, a kasnije je pokus ponovio stavljajući i vodu. Na taj način nastali su takozvani termalni neutroni.

U potrazi za novim elementima pri bombardiranju neutronima koristio je i teže elemente kao što je uranij i torij. Prilikom toga otkrili su da tijekom reakcije nastaje više od jedan proizvod. Bombardiranjem jezgre proizveli su nestabilni izotop koji emitira beta čestice i time mu je atomski broj uvećan za jedan. Pošto su poznavali tri izotopa uranija te da novoformirana radioaktivna vrsta ne pripada izotopima elemenata od radona (86) do uranija (92), vjerovali su da

su proizveli novi element. Znanstvenici se nisu slagali s njegovim radom. Neki su mislili da su nastali transuranijski elementi, dok su drugi mislili da su kemijska svojstva novih elemenata slična onim lakih elemenata. Fermi je također bio u nedoumici. Nekoliko godina je pokušao otkriti o čemu se zapravo radi, ali odgovor na njegovo pitanje došao je iz Njemačke, neposredno prije Božića, 1938. godine.²⁶

²⁶ L'Annunziata M.F., *Radioactivity Introduction and History*, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 99. – 105.
Faj Z., *Pregled povijesti fizike*, Osijek, Sveučilište J.J. Strossmayera, , 1999. str. 229 – 232.
URL: <http://www.atomicarchive.com/History/mp/p1s3.shtml> (20.10.2014.)

6. Otkriće fisije

Bombardiranjem uranija neutronima, Fermi je pronašao nekoliko aktivnih produkata s različitim vremenima poluraspada (10 s, 40 s, 13 i 90 min). Broj produkata je na početku uvećan za deset od strane Hahna i Meitner, dok je Curie i njezin tim pronašao još osam aktivnih produkata iz reakcije kada je torij bombardiran neutronima. Korištene eksperimentalne tehnike su iradijacija (zračenje) nakon koje slijede različiti procesi u ovisnosti o dobivenoj aktivnosti i poluživotu produkata. Kemijska ispitivanja su provedena nakon otapanja uzorka u kiselinu, što rezultira odvajanjem malih količina aktivnih elemenata. Nažalost, takvi talozi dali su niz produkata s kojima je bilo jako teško raditi. Nakon kemijskog ispitivanja, mjerila se promjena aktivnosti u vremenu.

Nekoliko mjeseci nakon Fermijeve objave o mogućnosti postojanja transuranijskih elemenata, pojavila su se dva objavljena rada koji kritiziraju njegove zaključke. Prvi rad napisali su Grosse i Agruss koji predlažu da element s atomskim brojem 93 može biti izotop protaktinija. Drugi rad napisala je Ida Noddack. Ona je u svom radu 1934. godine, pretpostavila da se uranijeva jezgra raspada na izotope, ali nitko nije reagirao na njezino mišljenje.

Bitno je spomenuti i mađarskog znanstvenika Lea Szilárda, koji je 1933. godine došao do zanimljivog otkrića nakon što je pročitao Rutherfordov intervju o nuklearnim transformacijama i nuklearnoj energiji. Rutherford je zagovarao da nabijene čestice, poput protona, ubrzane visokim naponom, transformiraju elemente te da se energija dobivena nuklearnom reakcijom ne bi mogla iskoristiti. Szilárd se nije složio s izjavom da energija nije iskoristiva. Znao je da proton mora savladati kulonsku barijeru, tj. snažno elektrostatičko odbijanje pozitivno nabijene jezgre. Međutim, mislio je da bi neutron, zbog svog neutralnog naboja, trebao biti u stanju prodrijeti (tunelirati) kroz kulonsku barijeru elektronskih ljusaka atoma i sudariti se s jezgrom bez ikakve vanjske sile i uzrokovati transmutaciju jezgre.

Ako se neutron sudari s atomskom jezgrom i nakon reakcije nastanu dva neutrona, postoji mogućnost stvaranja nuklearne lančane reakcije. Budući da neutroni nemaju naboj, oslobođeni neutroni će moći slobodno putovati kroz materiju dok se ne sudare s drugom jezgrom. Pokušao je stvoriti lančanu reakciju pomoću berilija i indija, ali nije uspio sve do 1939. godine.

Leo Szilárd je bio prvi koji je mogao opisati način dobivanja velike količine energije pa i eksplozije tijekom nuklearnog raspada. Nije mogao formulirati proces koji bi dao tu veliku količinu energije zbog nepoznavanja sastavnog elementa ili izotopa.

Zahvaljujući znanstvenicima Ottu Hahn, Ottu Frisch, Fritz Strassmanu i znanstvenici, koja je bila visoko kvalificirana i nepravedno tretirana, Lise Meitner, otkrivena je nuklearna fisija, proces kod kojeg su sva prethodna otkrića bila nužno potrebna.

6.1. Zajednički rad Meitner i Hahn

1907. godine Lise Meitner se doselila u Berlin. U to vrijeme muškarci su vladali svijetom znanosti i mnogi je kao ženu i fizičarku nisu cijenili. Položaj žena na sveučilištima bio je ograničen te je bila prva žena kojoj je u Austriji i Njemačkoj bilo dopušteno raditi i istraživati u ustanovama visokog obrazovanja. Rijetki su bili oni koji je nisu osuđivali već su prepoznali talent, upornost i trud koji je Lise nosila sa sobom, a jedan od njih je bio i Otto Hahn koji joj je bez razmišljanja predložio da mu se pridruži u istraživanjima radioaktivnosti.²⁷

Na takav način, započela je jedinstvena znanstvena suradnja. Hahn je bio kemičar, stručnjak u tehnikama kemijskog razdvajanja koje se koriste u radiokemiji, a Lise Meitner fizičarka, jednako dobra kao teoretičar i eksperimentator. Zajedno su tvorili tim koji je mogao zadovoljiti istraživanje radioaktivnosti.

Unatoč primitivnim uvjetima rada, Meitner i Hahn, objavili su niz radova od 1935. – 1938. u *Naturwissenschaften*. U središtu njihovog rada bio je β raspad i pronalazak novog radioaktivnog elementa, protaktinija s atomskim brojem 91.



Slika 13. Lise Meitner i Otto Hahn

(<http://www.fembio.org/biographie.php/frau/biographie/lise-meitner/>)
Preuzeto: 26.11.2014.

²⁷ Cropper W.H., *Great Physicists*, New York, Oxford, 2001. str. 332.

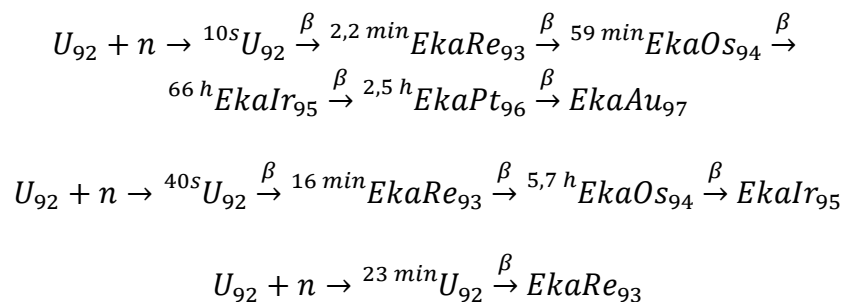
Nazvali su ga „protoactinium“ od grčke riječi „protos“ što znači prvi. Zapravo se radilo o izotopu protaktinija (^{231}Pa) koji je po svom atomskom broju prvi element koji se nalazi nakon uranija u seriji raspada s vremenom poluraspada od $3,3 \cdot 10^4$ godina.

Od samog početka njihove suradnje bili su zainteresirani za elemente koji nastaju beta raspadom. Prilikom alfa raspada nastaju elementi koji približno imaju iste energije. Kod beta raspada je nešto drugačije zbog toga što se pojavljuju energije koje mogu poprimiti vrijednost od nule do određene maksimalne vrijednosti.

Do 1937. godine, Lise Meitner²⁸ i Otto Hahn, u suradnji s njemačkim fizičarom Fritzom Strassmannom, otkrili su radioaktivne izotope uranija i to na način da su uranij bombardirali neutronima. U svom prvom objavljenom radu 1935. godine, složili su se s Fermijevom pretpostavkom da su radioaktivni produkti s vremenom poluraspada 13 i 90 minuta vjerojatno elementi s atomskim brojem većim od 92, odnosno da se radi o elementima atomskog broja 93 i 94. Zatim su pokazali da se 90 minutna aktivnost sastoji od dvije aktivnosti, kraćeg poluživota od 50-70 minuta i duže aktivnosti od 2-3 dana. U daljnjem radu Hahn i suradnici objavljuju poboljšane rezultate Fermijevih pokusa gdje pronalaze aktivne produkte s vremenom poluraspada od 13 min, 100 min i 3,5 dana. Godine 1936. objavili su otkriće 10 radioaktivnih produkata nastalih bombardiranjem uranija neutronima. Poluživot nekih elemenata se opet promijenio, a pronađeno je postojanje više od jedne aktivnosti. Kemijska oznaka aktivnosti zasnivala se na kemiji produkata koja se temeljila na vodećim elementima treće prijelazne periode Re, Os i Ir.

Predložili su i moguće produkte reakcije uranija i neutrona. ^{238}U apsorbira neutron te se otpuštanjem dva neutrona dobiva ^{237}U . Beta raspadom stvaraju se izotopi prijelaznih elemenata od renija do zlata ($^{237}\text{ekaRe}_{93}$ i $^{237}\text{ekaOs}_{94}$). Bili su poprilično sigurni u svoje zaključke kao što je prikazano sljedećim reakcijama (eksponent = poluraspada, a indeks = atomski broj):

²⁸ Lise Meitner rođena je u Austriji, 7. studenog 1878. godine u židovskoj obitelji. Tijekom pohađanja osnovne i srednje škole pokazivala je nadarenost za fiziku i matematiku. Iako je bilo ograničenja na Bečkim sveučilištima oko upisa studentica, ona je uspjela položiti prijemni ispit i upisati željeno sveučilište. Lise je doktorirala 1905. godine. Neko vrijeme je radila na Institutu za teorijsku fiziku gdje je i napisala svoj prvi rad o radioaktivnosti. U veljači 1939. objavila je teorijsko objašnjenje nuklearne fisije zajedno sa svojim nećakom Ottom Frischom. 1946. je otputovala u Sjedinjene Američke Države gdje je prisustvovala sastancima, domjencima, predavanjima, dodjelama nagrada i pohvalama u njezinu čast. National Press Club dodijelio joj je nagradu „Žena godine“. Predavala je na Princetonu, Harvardu i drugim američkim sveučilištima. U njezinu čast, 1997. godine, nazvan je element 109 meitnerij, ali i krateri na Mjesecu i Veneri. Umrula je 27. listopada 1968. godine. (L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 224. – 236. URL: <http://www.atomicarchive.com/Bios/Meitner.shtml> (30.10.2014.))



Prva i druga reakcija se mogu dogoditi s brzim i sporim neutronima. Berlinska grupa je pokušala i s jako dugim ozračivanjem (80 dana) uranija te je dobila izotop s dugim poluživotom od 60 dana kao i produkt koji je imao vrijeme poluraspada 23 min. Da su nastavili s istraživanjima, možda bi bio otkriven prvi transuranijski element. Iz proučavanja su izbacili izotop ^{235}U zbog toga što su ga teško pronalazili. To im je bila greška jer je ^{235}U podložan fisiji.

U međuvremenu, druga skupina radi na sličnim istraživanjima u Parizu pod vodstvom Irene Curie. Proučavali su reakcije neutrona s torijem te su pronašli četiri aktivna produkata. Irene Curie i Pavle Savić su 1937. godine, bombardiranjem uranija neutronima, pronašli radioaktivnu tvar s poluraspadom od 3,5 sata čija su svojstva podsjećala na rijetke zemne elemente kao što je lantan. Prvo su mislili da je riječ o aktiniju, ali su zbog aktivnosti elementa ostali pri svom prvom zaključku.²⁹

Dolaskom Adolfa Hitlera i njegove nacionalsocijalističke stranke na vlast započet je progon Židova te je nastala pomutnja na njemačkim sveučilištima. Lise Meitner je bila Židovka i njezin život je bio u opasnosti. Pokušali su je zaštititi, ali se nije moglo protiv vlasti. Jedino rješenje za Meitner je bilo da ode iz Njemačke. Pobjegla je u Švedsku, 17. srpnja 1938. godine.³⁰

²⁹ Fergusson, Jack E. "The history of the discovery of nuclear fission." *Foundations Of Chemistry* 13, no. 2 (July 2011): 145-166. Academic Search Complete, EBSCOhost

³⁰ L'Annunziata M.F., *Radioactivity Introduction and History*, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 224. – 236.
Cropper W.H., *Great Physicists*, New York, Oxford, 2001. str. 330. – 343.

6.2. Zajednički rad Otto Hahn i Fritz Strassman

Tijekom bijega Lise Meitner u Švedsku, Otto Hahn³¹ i Fritz Strassmann nastavili su s istraživanjima. Otkrili su da tijekom bombardiranja uranija neutronima nastaju elementi koji su slični radiju, ali im je vrijeme poluraspada puno kraće. Pažljivim radom, Strassmann je pokazao da se između mogućih produkata bombardiranja nalazi i izotop barija, čija je atomska masa gotovo za polovicu manja od uranijeve atomske mase. To novo otkriće znanstvenicima je bilo nejasno jer nisu znali objasniti zašto uranij s velikom jezgrom koja sadrži 92 protona stvara malu atomsku jezgru barija sa samo 56 protona. Stoga su pomoć potražili od Lise Meitner.

Pri završetku istraživanja naglasili su da ^{238}U bombardiran neutronima daje ukupno 16 različitih umjetnih atomskih vrsta, s atomskim brojevima od 88 (Ra) do 90 (Th) i 92 (U) do 96 (ekaPt).³²

³¹ Otto Hahn rođen je 8. ožujka 1879. godine u Frankfurtu, Njemačka. Nakon srednje škole započinje studij kemije na sveučilištima u Marburgu i Münchenu, a doktorirao je 1901. godine. Nakon doktorata ostao je raditi kao asistent. Nakon dvije godine otišao je u London na University College gdje je započeo svoj rad iz radioaktivnosti. 1944. dobio je Nobelovu nagradu za kemiju, a 1966. dobio je nagradu „Enrico Fermi“ koja je tada po prvi puta bila dodijeljena osobi koja nije bila Amerikanac. Otto Hahn umro je u Zapadnoj Njemačkoj, 28. srpnja 1968. godine. (L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 224. – 236. URL: <http://www.biographyonline.net/scientists/otto-hahn.html> (03.11.2014.))

³² L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 229. – 230.

6.3. Zajednički rad Meitner i Frisch

Suradnja Lise Meitner s Ottom Hahnom nije prestala nakon njezinog odlaska. Budući da su bili udaljeni i u nemogućnosti da se susretnu, komunikaciju su održali putem pisama.

U jednom od poslanih pisama, Hahn je zatražio njezino mišljenje o činjenici da bi barij mogao biti produkt neutronske bombardiranja uranija, na što mu je ona odgovorila da je sve moguće. Iako su Hahn i Strassman potvrdili svoju pretpostavku, temeljno razumijevanje pojave nisu mogli objasniti. Krajem prosinca 1938. godine, Lise je primila još jedno pismo u kojem ju je Hahn zamolio da mu pomogne shvatiti teorijsku pozadinu problema.

Pismo nije odmah pročitala zato što je u to vrijeme boravila kod nećaka, također fizičara, Otta Frischa. Razgovarali su o istraživanjima, ali su se i dotakli problema barija koje je i sama Lise pokušavala shvatiti. Frisch se prisjetio teorije da je jezgra atoma poput kapljice. Model kapljice temelji se na sličnosti nuklearne jezgre s kapljicom vode: bez obzira na veličinu gustoća je uvijek jednaka, sfernog je oblika i zato posjeduje najmanju energiju, a zbog kratkog doseg a sila između nukleona, podsjeća na silu koja drži molekule vode u kapljici. Međutim, kapljica pod određenim uvjetima može početi oscilirati, postaje nepravilna zbog neravnomjernog rasporeda nukleona i dolazi do podjele u dvije manje kapljice.

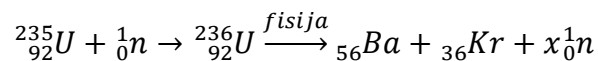
Postavljeno je pitanje ima li neutron dovoljno energije da izazove navedenu oscilaciju. Odlučili su da postoji mogućnost da dodatni neutron u jezgri uranija uzrokuje oscilacije te da se deformirane jezgre razlete zbog snažnih odbojnih sila uz oslobađanje velikih količina energije od oko 200 MeV-a.

Meitner i Fischer su na taj način vizualizirali cijepanje uranija, ali pojavio se problem s energijom. Energija koja je pratila cijepanje uranija iznosila je oko 200 MeV što je oko 10 puta više nego kod prethodnih nuklearnih reakcija. Meitner se zapitala odakle bi se stvorila tolika energija i sjetila se uobičajenog izračuna koji se koristi pri određivanju energije. To je bila Einstenova relacija $E = mc^2$. Uzimala je razliku mase uranija i dobivenih fragmenata fisije te se uvjerila da energija od 200 MeV prati cijepanje uranija. Tako je nastala teorija cijepanja uranija. Odlučili su se dobivenu nuklearnu reakciju nazvati „fisija“ upravo zato što su biolozi navedeni pojam koristili kada se govorilo o podjeli žive stanice. Meitner-Frisch proces postao je „nuklearna fisija“. Mnogi znanstvenici su bili fascinirani njihovim otkrićem i ubrzo su i sami pokušavali ponoviti eksperiment.

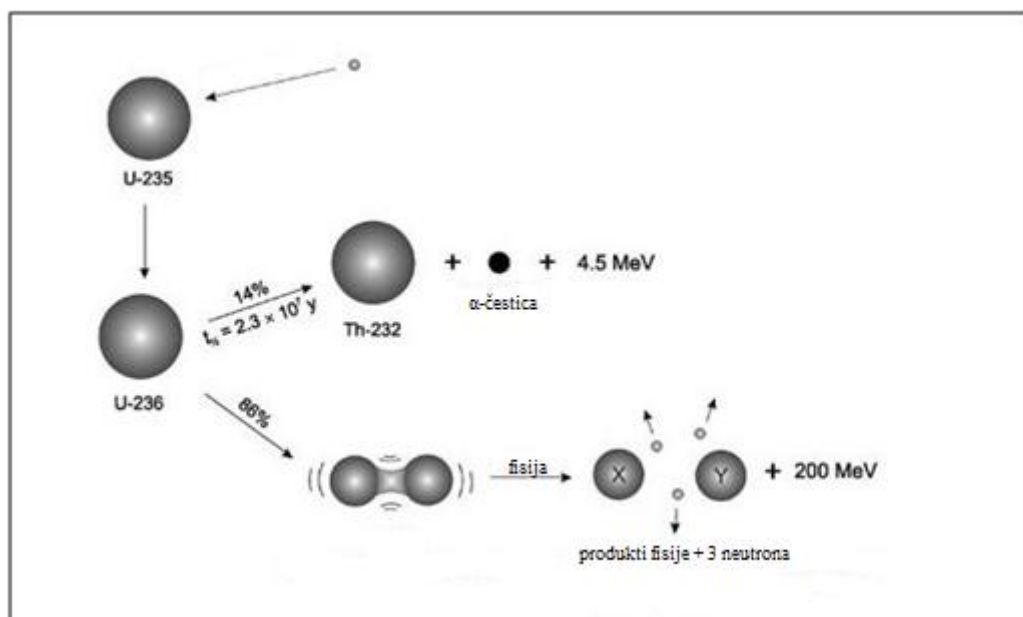
Meitner i Frisch objavili su tumačenje svojih eksperimenata u časopisu „Nature“, 11. veljače 1939. pod nazivom *Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear*

Reaction. Bili su prvi koji su dali teorijsko objašnjenje fisije. U svom radu pisali su da su Hahn i Strassmann bili prisiljeni zaključiti da je barij produkt bombardiranja uranija, ali nisu naveli razlog zbog čega se to događa. Stvorila se nova teorija o ponašanju teških jezgri koje imaju malu stabilnost te pod djelovanjem neutrona podjele se na dvije manje jezgre i oslobodi se znatna količina energije. Na početku 1939. godine, F. Joliot na Pariškoj akademiji dolazi do otkrića da uranijeva jezgra pri cijepanju izbacuje i nekoliko neutrona.

Meitner i Frisch otišli su i korak dalje. Došli su do sljedećeg zaključka: ako je jedan od fisijskih produkata barij ($Z=56$), drugi produkt mora biti kripton ($Z=36$) zato što zbroj atomskih brojeva oba fisijska produkta mora biti jednak 92. Naveli su samo jedan konkretan primjer nastalih fragmenata fisije koji se razlikuju po atomskom broju. Navedeno tumačenje može se zapisati:



gdje x u navedenoj jednadžbi predstavlja neodređeni broj neutrona. Broj emitiranih neutrona tijekom fisije iz ${}^{236}\text{U}$ neće biti uvijek isti, a prosječan broj je 2,4.



Slika 14. Fisija uranija

(L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 232)

Također su pokušali objasniti relativnu stabilnost nekih izotopa uranija koji se podvrgnu fisiji. Neki od njih pokazuju vrijeme poluraspada približno kao i vrijeme poluraspada barija i lantana koji su rezultat bombardiranja uranija. Stoga su predložili da su upravo ista vremena poluraspada posljedica fisije torija, koja je ista kao kod uranija i rezultira dijelom istim produktima. U svom radu identificirali su fragmente fisije radioaktivnog stroncija ($Z=38$) i itrija ($Z=39$).

Brojni radovi pojavili su se u istom mjesecu kada je fisija bila otkrivena. Znanstvenici su stvarali ili proširivali svoje radove u kojima su navodili različite metode kako bi identificirali fisiju i fisijske produkte, npr.: Frisch je pronašao impulse ionizacije koje stvaraju fisijski produkti. Fermi nije primijetio te impulse u svom prvotnom radu jer je uranij bio pokriven aluminijskom folijom koja ih je blokirala. Edwin McMillan je sakupio fisijske produkte s aluminijskih folija i demonstrirao aktivnost, Corson i Thornton su koristili Wilsonovu maglenu komoru i promatrali „teške tragove“ koje su ostavljali fisijski produkti, a Abelson je izučavao fisijske produkte karakterističnih X zraka koje nastaju zbog radioaktivnosti elementa. Joliot je također, neovisno o Frischu, demonstrirao fisiju 26. siječnja 1939. godine. Proliferacija radova nije neuobičajena pojava u znanosti. Kada se nakon puno godina rada dođe do velikog otkrića, ubrzo postane preplavljena radovima drugih.

Lise Meitner bila je zaslužna za otkriće fisije, ali njezin doprinos nije bio uključen kada se dodjeljivala Nobelova nagrada. Nakon otkrića, Frisch se vratio u Kopenhagen i objasnio otkriće Bohru koji ga je na konferenciji podijelio s ostalima. Niels Bohr je pokušao ispraviti nepravdu, ali nažalost neuspješno. Meitner je jako pogodilo što Hahn ni u jednom trenutku nije spomenuo nju i njezin rad nakon toliko godina rada koje su ostavili iza sebe. Smatralo se da je dodjela Fermijeve nagrade zapravo ispravak pogreške kojom je zakinuta Lise Meitner.³³

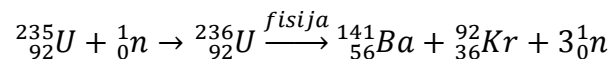
³³ L'Annunziata M.F., *Radioactivity Introduction and History*, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 230. – 235.
Cropper W.H., *Great Physicists*, New York, Oxford, 2001. str. 330. – 343.

6.4. Nuklearna fisija

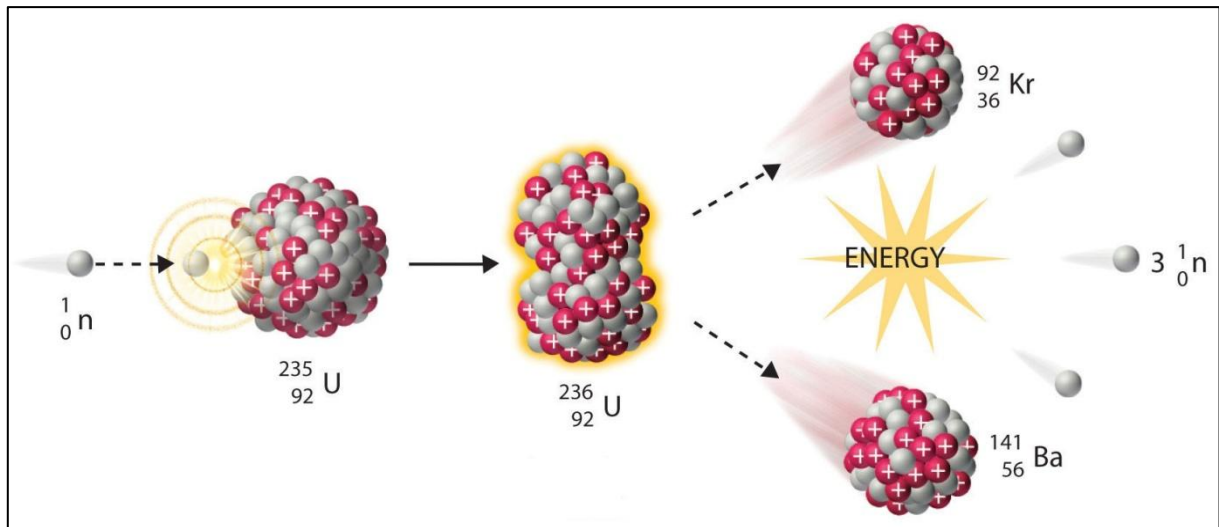
Nuklearna fisija ili fisija je proces gdje se teška jezgra cijepa na dvije lakše jezgre i par neutrona uz oslobodjenje velike količine energije. Novonastale jezgre u procesu fisije nazivaju se fragmenti fisije te nisu jednakih masa. Njihov odnos se obično odnosi kao 3:2. Upravo zbog toga, s određenom sigurnošću, ne možemo znati koji će produkti nastati fisijom. Isto tako, postoji mala mogućnost da tijekom fisije nastane i više produkata, ali to se rijetko događa.

Samo mali broj jezgri podliježe fisiji. Težak element kojim se dobiva fisija je izotop uranija koji se bombardira neutronima. Fisija sporim neutronima događa se kod prirodnog izotopa uranija ^{235}U , umjetnog izotopa ^{233}U i kod izotopa plutonija ^{239}Pu . Upravo pomoću njega i ^{232}Th može se ostvariti fisija s brzim neutronima. Osim neutrona, za dobivanje fisije mogu se koristiti i naelektrizirane čestice vrlo velikih energija, ali fisija dobivena neutronima ipak je najznačajnija. Prema tome, razlikujemo primarne i sekundarne neutrone. Primarni neutroni izazivaju fisiju i nazivamo ih spori ili termalni neutroni. Sekundarni neutroni nastaju kao produkti fisije. Njihove brzine su velike i zbog toga ih je potrebno usporiti. Tvari koje služe u tu svrhu nazivaju se moderatori. Oslobodeni neutroni mogu izazvati lančane nuklearne reakcije.

Najznačajniji primjer izazvane fisije je



Neutron je apsorbiran u jezgri ^{235}U . Privremeno nastaje složena jezgra, ^{236}U , koja je u pobuđenom stanju i posjeduje kinetičku energiju te energiju vezanja koju je neutron predao. ^{236}U cijepa se na dvije lakše jezgre (fisijske fragmente) ^{141}Ba (barij-141) i ^{92}Kr (kripton-92) uz oslobodjenje 3 neutrona i velike količine energije.



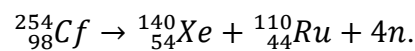
Slika 15. Fisija ^{235}U

(<http://www.nuclear-power.net/nuclear-power/fission/>) Preuzeto: 28.11.2014.

6.4.1. Spontana fisija

Teška jezgra kalifornij-254 ($Z=98$) nastaje u nuklearnim reaktorima. Zanimljiva je zbog toga što je proizvedena u eksploziji supernove te su svojstva navedenog elementa omogućila znanstvenicima razumijevanje sastava zvijezda i formiranje elemenata.

Kalifornij je radioaktivan element i cijepanjem se raspada na dvije jezgre, izotope ksenona i rutenija. Uočavamo da su novonastale jezgre lakše od same jezgre iz koje su nastale. Proces je prikazan jednačbom.³⁴



Jezgra kalifornija je umjetno proizvedena i primjer je spontane fisije. Spontana fisija je oblik radioaktivnog raspada koji se može dogoditi bez da se jezgra bombardira neutronima.

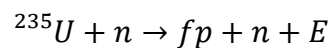
Poznato je da se oko 100 radionuklida raspada spontanom fisijom uz emisiju neutrona. Spontana fisija podrazumijeva spontano, neizazvano cijepanje jezgre na dvije jezgre ili fisijske

³⁴ Krane, K., Modern physics, SAD, 2012. str. 416.

fragmente i istodobno emisiju više od jednog neutrona u prosjeku. Mali izvori ^{252}Cf komercijalno su dostupni.³⁵

6.4.2. Izazvana fisija

Kada se prirodni izotop ^{235}U izloži sporim neutronima, formira se nestabilna jezgra ^{236}U . Novonastala jezgra može biti i jezgra ^{232}Th koja pritom emitira alfa česticu. To se događa u približno 14 % slučajeva. S većom vjerojatnošću, odnosno u 86 %, izotop uranija-235 apsorbira neutron i nastaje nestabilna jezgra ^{236}U koja sadrži karakteristike nestabilne oscilirajuće kapljice. Oscilirajuća jezgra dijeli se na dva pozitivno nabijena fragmenta (*fp*), ne nužno jednake veličine, i oslobađa se prosječna energija od oko 193,6 MeV. Navedeno se može prikazati pomoću općenite reakcije:



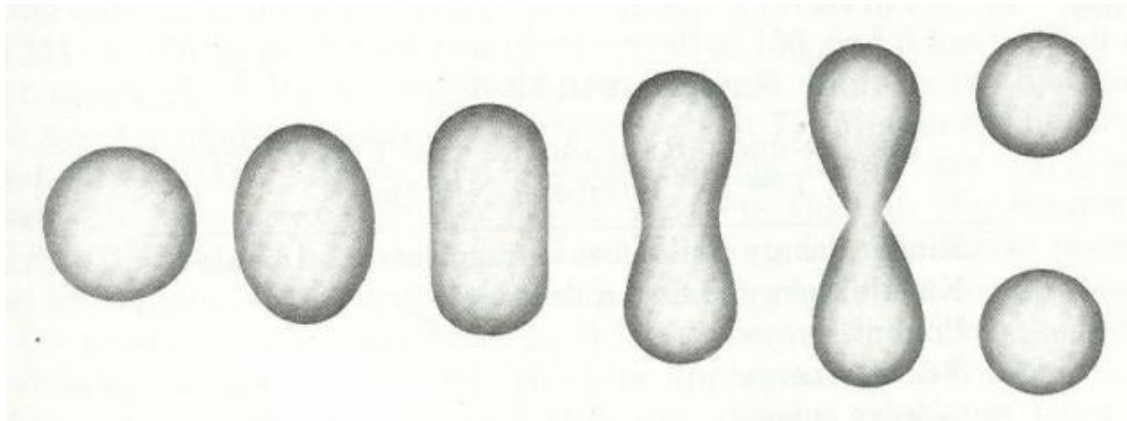
Dio energije preuzimaju fragmenti fisije kao svoju kinetičku energiju, a preostala energija dijeli se između neutrona koji se emitiraju te gama zračenja koje prati fisiju. Kada se ^{235}U bombardira sporim neutronima, fragmenti fisije nisu jednake mase. Time se stvara mogućnost nastanka oko 60 različitih fragmenata fisije u bombardiranju jednog izotopa. Isto tako, u prosjeku se 2,4 neutrona emitira pri svakoj fisiji. Neutroni koji izlaze iz procesa fisije razlikuju se po energiji koja je u rasponu od 0 – 10 MeV te se oni klasificiraju kao brzi neutroni.³⁶

6.4.3. Model kapljice

Unutar jezgre nalaze se nukleoni, zajednički naziv za protone i neutrone. Sila koja drži na okupu nukleone naziva se nuklearna sila. Ona je vrlo kratkog dosega i jača je od elektrostatske sile. Jedna od teorija nastanka fisije je cijepanje jezgre kao kapljice. Analogija je nastala činjenicom da se kapljica održava molekularnim silama koje joj daju simetričan oblik prilikom pada te se pokušava oduprijeti bilo kojoj deformaciji.

³⁵ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 261. – 262.

³⁶ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 262. – 263.

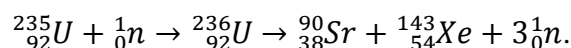


Slika 16. Model kapljice

(<http://www.bitlanders.com/blogs/liquid-drop-model-of-nucleus-and-fission-process/258529>) Preuzeto: 28.11.2014.

S obzir da jezgru povežujemo s kapljicom, proces opisujemo na sljedeći način. Jezgra se nalazi u osnovnom stanju, netaknuta je i nuklearna sila jača je od elektrostatske. U trenutku kada neutron apsorbiramo u željenu jezgru, formira se složenija jezgra. Složena jezgra privremeno sadrži sve naboje, mase i nalazi se u pobuđenom stanju. Energija pobuđenja, koja se dodaje složenoj jezgri, jednaka je energiji vezanja upadne čestice uvećanoj za kinetičku energiju te iste čestice. Energija u složenoj jezgri može izazvati oscilacije koje utječu da se izobličuje jezgra. Ako energija bude veća od kritične energije, oscilacije mogu uzrokovati da jezgra poprimi oblik bučica za vježbanje. Kada se to dogodi, nuklearne sile u užem dijelu su male, a elektrostatska sila pri jačim deformacijama i dovoljnim energijama se polako pobuđuje. U trenutku kada odbojna elektrostatska sila savlada nuklearnu privlačnu silu, događa se nuklearna fisija.

Prije otkrića fisije, energija koja je oslobođena pri nuklearnim reakcijama nije bila veća od 22 MeV. Spomenuto je da se prilikom nuklearne fisije oslobodi znatna količina energije. Izračunat ćemo za određeni primjer koliko ona iznosi.



Oslobođenu energiju možemo izračunati kao razliku mase jezgre ${}^{236}\text{U}$ i mase produkata fisije i neutrona.

Energija vezanja (B) ^{236}U računa se kao razlika masa nukleona i mase same jezgre:

$$B = (M_{92 \text{ protona}} + M_{144 \text{ neutrona}}) - M_{236\text{U}}$$

$$M_p = 1,00782u$$

$$M_n = 1,00866u$$

$$M_{236\text{U}} = 236,045561u$$

$$B = [(92 \cdot 1,00782u) + (144 \cdot 1,00866u)] - 236,045561u$$

$$B = 237,96648u - 236,045561u = 1,92092u$$

Atomsku jedinicu mase označavamo s u . S obzirom da je nama potrebna energija u MeV uzimamo da

$$1u = 931,494 \text{ MeV}.$$

$$B = 1,92092 \cdot 931,494 \text{ MeV} = 1789,3254 \text{ MeV}$$

Ako dobivenu energiju vezanja podijelimo s brojem nukleona u jezgri ($A=236$) dobivamo energiju vezanja po nukleonu za ^{236}U

$$\left(\frac{B}{A}\right)_{236\text{U}} = \frac{1789,3254 \text{ MeV}}{236} = 7,58 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}}.$$

Na sličan način izračunamo energije vezanja za produkte fisije:



$$B = (M_{38 \text{ protona}} + M_{52 \text{ neutrona}}) - M_{90\text{Sr}}$$

$$M_{90\text{Sr}} = 89,907738u$$

$$B = [(38 \cdot 1,00782u) + (52 \cdot 1,00866u)] - 89,907738u$$

$$B = 90,74748u - 89,907738u = 0,839742u$$

$$B = 0,839742 \cdot 931,494 \text{ MeV} = 782,2146 \text{ MeV}$$

$$\left(\frac{B}{A}\right)_{\text{Sr}} = \frac{782,2146 \text{ MeV}}{90} = 8,69 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}}$$



$$B = (M_{38 \text{ protona}} + M_{52 \text{ neutrona}}) - M_{143\text{Xe}}$$

$$M_{143\text{Xe}} = 89,907738u$$

$$B = [(54 \cdot 1,00782u) + (89 \cdot 1,00866u)] - 142,93511u$$

$$B = 144,19302u - 142,93511u = 1,25791u$$

$$B = 1,25791 \cdot 931,494 \text{ MeV} = 1171,736 \text{ MeV}$$

$$\left(\frac{B}{A}\right)_{Xe} = \frac{1171,736 \text{ MeV}}{143} = 8,19 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}}$$

Poznavajući energije vezanja možemo prema sljedećoj relaciji odrediti kolika će se energija osloboditi tijekom fisije:

$$E = \left[\left(\frac{B}{A}\right)_{\text{Produkti fisije}} - \left(\frac{B}{A}\right)_{^{236}\text{U}}\right] \cdot 236 \text{ nukleona}$$

$$E = \left[\left(\frac{\left(\frac{B}{A}\right)_{^{90}\text{Sr}} + \left(\frac{B}{A}\right)_{^{143}\text{Xe}}}{2}\right) - \left(\frac{B}{A}\right)_{^{236}\text{U}}\right] \cdot 236 \text{ nukleona}$$

$$E = \left[\left(\frac{8,69 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}} + 8,19 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}}}{2}\right) - 7,58 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}}\right] \cdot 236 \text{ nukleona}$$

$$E = \left[\left(8,44 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}}\right) - 7,58 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}}\right] \cdot 236 \text{ nukleona}$$

$$E = 0,86 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleonu}} \cdot 236 \text{ nukleona}$$

$$E = 202,96 \text{ MeV}^{37}$$

Iz dobivenog rezultata uočavamo da se oslobodila znatna količina energije. Mala tvar sadrži vrlo veliku količinu energije koja se može koristiti za proizvodnju električne energije u nuklearnim elektranama. S druge strane, znanstvenici su dobivenu energiju iskoristili za stvaranje atomske bombe.

³⁷ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 264. – 265.

6.5. Lančana nuklearna reakcija i prvi nuklearni reaktor

Nakon otkrića fisije brojni znanstvenici su u laboratorijima diljem svijeta istraživali fisiju uranija. Bio je to početak nove ere koja će uzdrmati cijeli svijet.

Nakon prvog izvješća o fisiji, Leo Szilárd³⁸ shvaća da je uranij element koji bi održao lančanu reakciju. U srpnju 1939. godine, Herbert Anderson, Enrico Fermi i Leo Szilárd pronašli su izotope koji održavaju lančanu reakciju te utvrđuju da se nakon lančane reakcije stvara veća količina emitiranih neutrona, odnosno u prosjeku 2,4 neutrona po svakom koji je apsorbiran u uraniju. Neutroni su bili klasificirani kao brzi neutroni s energijom oko 3,5 MeV. Da bi se lančana reakcija održala, neutrone je bilo potrebno usporiti za što su se koristili elementi s malim atomskim brojem ili grafit. Iz njihovog rada bilo je jasno da su blizu ostvarenja kontrolirane nuklearne lančane reakcije, što će ubrzo i demonstrirati.³⁹

U isto vrijeme, Nijemci su pokušali stvoriti kontroliranu nuklearnu lančanu reakciju pomoću grafita. Njihov pokušaj je bio bezuspješan zbog toga što su koristili grafit koji je sadržavao bor karbid, odnosno nečistoće koje su zaustavljale nuklearne reakcije. Szilárd i Fermi su shvatili u čemu je problem i zamolili su proizvođače grafita da proizvode grafit bez bora. Upravo je to rezultiralo prvom kontroliranom nuklearnom lančanom reakcijom, 02. prosinca 1942., pod nazivom Chicago Pile-1.

Chicago Pile-1 bio je prvi svjetski umjetni reaktor u kojem je kontrolirana nuklearna reakcija. Bio je izgrađen od crnih cigli i drvenih greda te da bi se postigao željeni cilj bile su potrebne velike količine grafita i uranija. Dobiti čisti uranij u to vrijeme je predstavljao veliki problem, ali su pronašli određenu količinu koja bi im bila potrebna za istraživanje. Nije imao rashladni sustav i zaštitu od zračenja kao današnji reaktori. Bio je izgrađen u šumi izvan grada, na napuštenom nogometnom igralištu Sveučilišta. Između uranija je postavljen grafit koji je služio kao neutronska moderacija, odnosno usporavali bi se neutroni i povećala mogućnost apsorpcije. Kontrola se postizala pomoću kontrolnih šipki koje su bile napravljene od kadmija, indija i srebra. Kadmij i indij apsorbiraju neutrone, a srebro postaje radioaktivno kada se ozrači neutronima. Kada kontrolnu šipku postavimo dublje u reaktor tada kadmij apsorbira slobodne

³⁸ Leo Szilárd je rođen u Budimpešti, 11. veljače 1898. godine. Započeo je studij na Sveučilištu u Budimpešti. 1919. napustio je svoju domovinu i odlazi u Berlin gdje nastavlja studirati strojarstvo na Institute of Technology. Već sljedeće godine napušta studij i posvećuje se fizici na Sveučilištu u Berlinu. Između brojnih radova, nalazile su se i patentne prijave za linearni akcelerator čestica, betatron i ciklotron. Bio je prvi koji je opisao princip rada ciklotrona za ubrzavanje nabijenih atomskih čestica što otvara mogućnost stvaranja mnogih umjetnih radioaktivnih elemenata. Jedan patent je ipak ostao u izradi, a to je bila atomska bomba. Umro je 30. svibnja 1964. godine. (L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 236. - 238.)

³⁹ L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007. str. 239 - 242.

neutrone i sprječava nastanak lančane reakcije. Ako kontrolnu šipku izvlačimo iz jezgre reaktora, neutroni će više udarati u uranij sve dok se samoodrživa nuklearna reakcija ne postigne.

Demonstracija je započela oko 08:30, 02. prosinca 1942. godine, okupljanjem znanstvenika. Svaki je imao posebno mjesto na kojom je obavljao svoju funkciju. Fermi, Zinn, Anderson i Compton su bili grupirani oko instrumenata na istočnoj strani. George Weil je bio zadužen za kontrolu šipki, a svaka ostala grupa imala je svoje dužnosti da bi eksperiment uspio. Prvi pokušaj je bio neuspješan zato što je sigurnosna točka na kojoj je bila šipka za automatsko upravljanje bila postavljena prenisko. Weil je popravio smetnje te se je u 14:00 h nastavilo s istraživanjem. Weil je bio na poziciji gdje nije mogao promatrati što se događa zato što je morao pratiti reakcije Fermija i biti koncentriran na njegove zapovjedi. U jednom trenutku Fermi je s osmjehom izgovorio: „Reakcija je samoodrživa, krivulja je eksponencijalna.“ Skupina je napeto gledala ukupno 28 minuta koliko je radio prvi nuklearni reaktor. Čovjek je pokrenuo nuklearnu lančanu reakciju, a zatim je zaustavio. Oslobodio je energiju iz atoma i kontrolirao je.⁴⁰

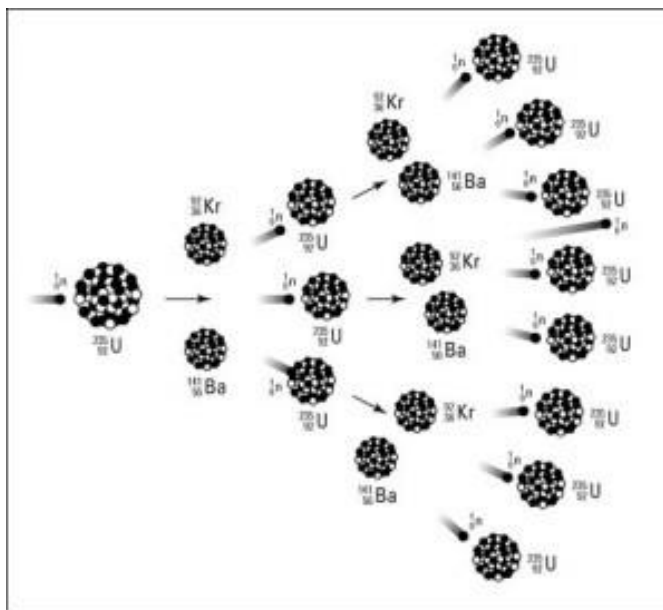
6.5.1. Nuklearna lančana reakcija

Prilikom fisije oslobađaju se neutroni koji mogu izazvati nove fisije. Pojava u kojoj jedna nuklearna reakcija uzrokuje u prosjeku još jednu ili više nuklearnih reakcija naziva se nuklearna lančana reakcija. Fisija lančanih reakcija javlja se zbog međudjelovanja neutrona i fisijskih izotopa. Tijekom fisije, nekoliko neutrona je oslobođeno. Ti slobodni neutroni će djelovati s okolinom i ukoliko je prisutna jezgra koja podliježe fisiji, apsorbirat će neutrone i izazvati više fisija.

Kada usporeni, termički neutron naleti na jezgru ^{235}U nastane fisija. Energija primarnih neutrona je mala. Nasuprot tome, neutroni koji nastaju pri fisiji (sekundarni neutroni) imaju veće brzine i upravo je to razlog zašto su znanstvenici pokušavali usporavati neutrone koji su stvoreni kao produkti fisije i time izazvati nuklearnu lančanu reakciju.

⁴⁰ URL: http://www.atomicarchive.com/History/firstpile/firstpile_10.shtml (17.11.2014.)

URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Le%C3%B3_Szil%C3%A1rd#Developing_the_idea_of_the_nuclear_chain_reaction (17.11.2014.)



Slika 17. Nuklearna lančana reakcija

(<http://revision.systems/exam-boards/aqa/physics-nuclear-fission/>) Preuzeto: 01.12.2014.

Materijali koji se koriste za usporavanje nazivaju se moderatori. Da bi moderator imao ulogu „usporivača“ neutrona, mora imati što manju atomsku masu i njegova sposobnost apsorpiranja neutrona mora biti što manja. U praksi postoje četiri elementa koji zadovoljavaju uvjete: voda (H_2O), teška voda (D_2O), grafit i berilij. Između navedenih moderatora najraširenija je voda. Svojstva teške vode zapravo su efikasnija, ali problem je u vrlo visokoj cijeni.

Prema tome, proces postaje samoodrživ i vanjski izvor neutrona je nepotreban. Ukoliko sekundarni neutroni izazovu samo jednu fisiju, kaže se da je lančana reakcija slabog intenziteta. Izazivanje sve više fisija rezultirat će održavanjem reakcije u vremenu te će ona divergirati.⁴¹

Pri lančanoj reakciji neutroni uzastopnih fisija mogu se pratiti po „generacijama“ fisije. U svemu tome važan je koeficijent multiplikacije k koji izražava odnos između određene generacije neutrona i neposredno prethodne generacije. Isto tako postoji i efektivni faktor multiplikacije k_{ef} koji predstavlja količnik prosječnog broja fisije jedne generacije neutrona i broja neposredno prethodne generacije. Ukoliko je lančana reakcija povećana $k_{ef} > 1$, ako je slabija $k_{ef} < 1$. U situaciji kada je $k_{ef} = 1$, lančana reakcija je održiva.⁴²

⁴¹ URL: http://paksnuclearpowerplant.com/download/1226/nuclear_chain_reaction.pdf (18.11.2014.)

⁴² Ivanović D., Vučić V., Atomska i nuklearna fizika, Beograd, Naučna knjiga, 1975. str. 269.

6.5.2. Nuklearni reaktori

Nuklearni reaktori su uređaji u kojima se održava kontrolirana nuklearna lančana reakcija. Da bi svaki reaktor radio, potrebna je određena količina nuklearnog goriva koja omogućava da faktor multiplikacije bude vrlo blizu jedinice da bi se postigla lančana reakcija. U reaktorima se kao gorivo najčešće koriste izotopi uranija, plutonija te ponekad torija.

Nuklearni reaktor proizvodi i kontrolira oslobođenu energiju koja je dobivena iz cijepanja pojedinih atoma. U nuklearnim elektranama oslobođena energija koristi se kao toplina da bi se proizvela električna energija. Danas postoje različite vrste nuklearnih reaktora, a neki od njih koriste se za proizvodnju plutonija, dok su neki izgrađeni samo u istraživačke svrhe. Postoji oko 450 nuklearnih reaktora u elektranama koji se koriste za proizvodnju električne energije u približno 30 zemalja diljem svijeta. Klasifikacija nuklearnih reaktora postoji prema: vrsti nuklearne reakcije, moderatoru, rashladnoj tekućini, prema generacijama, gorivu i ostalo.

Ključni dijelovi reaktora su nuklearno gorivo, moderator, kontrolne šipke, rashladne tekućine, apsorpcijski materijal, zaštitni dio itd.

Rad nuklearnog reaktora temelji se na moderatoru koji se koristi za usporavanje sekundarnih neutrona i poboljšava daljnje stvaranje fisije. Postoje i reflektori neutrona koji odbijaju one neutrone koji ne sudjeluju u daljnjim procesima fisije. Upravljačke šipke zapravo kontroliraju rad i sprječavaju pregrijavanje reaktora te su izrađene od kadmija ili bora. Rashladne tekućine postavljaju se oko aktivne zone, odnosno jezgre. Zbog oslobođenog zračenja tijekom reakcija potrebno je zaštititi reaktor da bi se izbjegle moguće katastrofalne posljedice za ljude i okolinu.⁴³

⁴³ Ivanović D., Vučić V., Atomska i nuklearna fizika, Beograd, Naučna knjiga, 1975. str. 270. – 271.
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor (20.11.2014.)

7. Projekt Manhattan

U vrijeme kada su bile otkrivene nove spoznaje nuklearne fizike i nuklearnih reakcija, politička situacija u svijetu bila je vrlo nestabilna. Japan je imao imperijalističke interese u Europi gdje su nacisti došli na vlast. Otkrićem fisije, 1938. godine od strane Hahna, Strassmana i Lise Meitner, znanstvenici su počeli otvoreno razgovarati o mogućnosti primjene oslobođene energije u obliku bombe. Znanstvenici su se bojali da će Njemačka biti prva koja će napraviti bombu pa su odlučili poslati pismo upozorenja američkom predsjedniku.

Projekt Manhattan bio je tajni projekt SAD-a u Drugom svjetskom ratu čiji je cilj bio napraviti prvu atomsku bombu na svijetu. Projekt je podrazumijevao razumijevanje nove teorije i osiguravanje dovoljno radioaktivnog materijala koji je potreban za rad. Bio je to veliki projekt koji se nije mogao održati u tajnosti iako je većina suradnika to zahtijevala.

7.1. Razvoj Manhattan projekta

U vrijeme kada je Europa bila na rubu Drugog svjetskog rata otkrivena je nuklearna fisija. Meitner i Frisch su svoje rezultate priopćili Niels Bohru, koji se u to vrijeme pripremao za odlazak u SAD. Skup velikih fizičara koji su se doselili u SAD, na čelu s Bohrom i Fermijem, razvio je veliki interes za daljnja istraživanja nuklearne fisije.

Leo Szilard, poznati europski znanstvenik, bojao se da bi Nijemci mogli iskoristiti energiju dobivenu fisijom u izradi atomske bombe. O ideji stvaranja bombe govori i činjenica da su Nijemci zabranili prodaju uranija Čehoslovačkoj i tako osigurali dovoljno materijala za rad. Szilard je bio veliki prijatelj s Albertom Einsteinom. Budući da su vidjeli da se situacija u Njemačkoj pogoršava, odlučili su obavijestiti američkog predsjednika Franklina D. Roosevelta. Einstein je osobno bio u jako dobrim odnosima s predsjednikom te je uz pomoć Szilarda sastavio pismo.

Pismo je poslano u kolovozu 1939. godine i temeljilo se na informiranju predsjednika o mogućim posljedicama stvaranja atomske bombe. Željeli su upozoriti Amerikance da bi njemački znanstvenici mogli stvoriti atomsku bombu i da je Hitler taj koji bi je mogao i upotrijebiti. Zbog tadašnjih zbivanja u Europi, Roosevelt je uspio pronaći vremena da sa svojim pomoćnikom razgovara o aktualnom pismu.

11. listopada 1939. godine, A. Sachs susreo se s predsjednikom Rooseveltom kako bi razgovarali o pismu koje je dobio od Einsteina. Einstein je u pismu izrazio želju da vlada SAD-a započne podupirati istraživanja lančanih reakcija i iskorištavanje dobivene energije. U samom početku razmatranja, Roosevelt je bio jako suzdržan i zabrinut, ali se ubrzo uvjerio i pristao na istraživanja atomske energije.

Roosevelt je Einsteinu odgovorio 19. listopada 1939. godine, da pristaje i odobrava istraživanja s uranijem zato što nije mogao riskirati da Hitler stvori bombu. Bio je to početak Manhattan Projekta koji je okupio brojne znanstvenike.

Određeno vrijeme, SAD nije pokazivao značajniji i uvjerljivi napredak što se tiče istraživanja, dok se Britanija itekako iskazala. Tijekom veljače 1940. godine, fizičari Otto Frisch i Rudolf Peierls radili su na istraživanju fisije ^{235}U te su predložili prve sheme za izradu bombe. Uvjerljiva izvješća potaknula su znanstvenike da unaprijede metode kojima se postiže najveće obogaćivanje uranija. Tijekom 1940. i 1941. godine istraživanja u SAD-u su se počela intenzivno proširivati i započelo je razvoj praktičnih sustava za obogaćivanje uranija, a ujedno su G. Seaborg i A. Wahl otkrili plutonij koji se pokazao kao dobar fizijski materijal.

3. rujna 1941. godine W. Churchill je pristao na početak razvoja atomske bombe. Iste je godine konačno započeo projekt SAD-a o stvaranju atomskog oružja koji se razmatrao posljednje dvije godine. Prethodnik Manhattan Projekta, kodnog imena S-1 projekt, predvodio je Arthur H. Compton. Skupina znanstvenika koja će voditi razvoj atomske bombe bila je formirana i određeni su zadaci pojedincima. Određene skupine radile su na različitim tehnikama koje se koriste pri razdvajanju izotopa ^{235}U od ^{238}U . Lawrence i njegov tim na Sveučilištu u Kaliforniji koristili su elektromagnetsko odvajanje, Eger Murphree i Jesse Wakefield pokušavali su plinskom difuzijom, a Philip Abelson bio je usmjeren na istraživanja toplinske difuzije.

U siječnju 1942. godine, E. Fermi je radio na istraživanju uranija i grafita te je bio prebačen na novi tajni projekt kodnog imena Metallurgical Laboratory (Met Lab) na Sveučilištu u Chicagu. U travnju je započela izgradnja prvog nuklearnog reaktora. Tijekom 1942. godine, istraživanja s neutronima su se nastavila kao i proizvodnja fizijskih materijala.

18. lipnja 1942. godine, J. Marshall stvara Army Corps of Engineers District koji preuzima kontrolu nad razvojem atomske bombe. Tijekom kolovoza Marshall stvara novu organizaciju koja je danas poznata kao „Manhattan Project“.

Neki od znanstvenika koji su bili uključeni u vojno - politički projekt: Robert Oppenheimer (USA), David Bohm (SAD), Leo Szilárd (Mađarska), Eugene Wigner (Mađarska), Rudolf Peierls (Njemačka), Otto Frisch (Njemačka), Niels Bohr (Danska), Felix Bloch

(Švicarska), James Franck (Njemačka), James Chadwick (Velika Britanija), Emilio Segre (Italija), Enrico Fermi (Italija), Klaus Fuchs (Njemačka) i Edward Teller (Mađarska).

Iako se službeno smatra da je projekt osnovan u kolovozu 1942. godine, započeo je 17. rujna 1942. godine, kada je pukovnik Leslie Richard Groves bio obaviješten da je njegov odlazak u inozemstvo otkazan. Bio je iskusan menadžer i dobio je zadatak da u samo dva dana riješi problem nestašice uranija. Sljedeći dan kupio je 1250 tona visoko-kvalitetnog uranija kao i 52000 hektara zemljišta gdje će se nalaziti Oak Ridge.

15. listopada 1942. Groves je upitao J. Robert Oppenheimera da bude voditelj novog Projekta Y čije bi sjedište bilo u Los Alamosu u Novom Meksiku. Radilo se o laboratoriju za dizajn i fizikalna istraživanja oružja. U siječnju 1943. Groves započinje izgradnju reaktora za proizvodnju plutonija, a tijekom ožujka Los Alamos je započeo s radom. Unatoč tome, nastavila se izgradnja postrojenja za proizvodnju plutonija i obogaćivanje uranija (metode za odvajanje uranija) u Oak Ridgeu. Izgrađen je i veliki eksperimentalni reaktor.

Usavršavanje oružja čija se baza temeljila na uzorku pištolja i implozije nastavljeno je u Los Alamosu. Činjenice su se dobro razvijale sve do rujna 1944. kada su znanstvena istraživanja krenula u suprotnom smjeru. Metode za odvajanje uranija nisu pokazivale učinkovitost, postrojenje u Oak Ridgeu nije bilo dovršeno do kraja, a znanstvenici su uspjeli odvojiti samo nekoliko grama uranija. Jedina izvediva bomba bila je pištolj-tipa, ali zbog nedostatka uranija njezin završetak je bio nemoguć. U to vrijeme, proizvodnja plutonija još nije započela zbog kvara pogona zato što se koristio otrovan apsorber neutrona. U prosincu je napokon proizvodnja plutonija započela.

Do početka 1945., Manhattan projekt imao je niz neuspjeha. Reaktor Y-12 proizvodio je 204 grama ^{235}U što je značilo da će se potreban materijal za pravljenje bombe imati tek u srpnju navedene godine. Dizajn pištolj - bombe je završen i zamrznut. Bilo je potrebno planirati implementaciju i uporabu nakon što se dobije potrebna količina uranija. U ožujku 1945. toplinska difuzija obogaćivanja uranija je konačno započela kako se očekivalo. 5. ožujka Oppenheimer je službeno zamrznuo eksplozivni dizajn.

12. travnja 1945. predsjednik Roosevelt umro je od krvarenja u mozgu. Da je cijeli projekt bio u tajnosti govori i činjenica da je Truman u trenutku dolaska na vlast od svog tajnika čuo o projektu kojim se razvija atomska bomba. Groves mu je detaljno opisao temelje projekta.⁴⁴

⁴⁴ URL: <http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Med/Med.html> (28.11.2014.)

7.2. Trinity test

U međuvremenu, testiranje oružja s plutonijem, koji je nazvan Trinity po Oppenheimeru, bilo je odgođeno za 16. srpanja na pustom mjestu, 210 km od Los Alamosa. Test eksplozije bio je proveden 7. svibnja s malim količinama fisijskih materijala i finom opremom. Daljnje pripreme nastavile su se tijekom svibnja i lipnja da bi u konačnosti sve bilo spremno. Kao početna točka uzimao se toranj na koji će biti postavljena bomba, a bunker za promatranje bili su smješteni 10 km dalje i to sa sjeverne, zapadne i južne strane. Pokušali su utvrditi simetriju implozije i količinu energije koja je izdana, ali i moguću štetu koja bi mogla nastati tijekom testiranja. Korištena oprema je trebala zabilježiti ponašanje vatrene kugle, a najveći problem je predstavljalo radioaktivno zračenje koje će nastati te je vojska bila sprema evakuirati ljude u



Slika 18. Oblak oblika gljive prve atomske bombe

(<http://www.atomicarchive.com/History/mp/p5s6.shtml>) Preuzeto: 01.12.2014.

okolnim područja ukoliko se pokaže da je potrebno. Dana 12. srpnja, jezgra plutonija je stigla na odredište i nakon nekoliko dana postavljena je na toranj. Groves, Bush, Conant, Lawrence, Farrell i Chadwick stigli su u bunkere odakle su promatrali eksperiment. U ponedjeljak, 16. srpnja 1945., u 05:30h započelo je atomsko doba.

Kada je bomba eksplodirala iznad pustinje Novog Meksika, nastala je nevjerojatna svjetlost koja je obasjala pustinju.

Sekundu nakon eksplozije osjetila se velika toplina kroz pustinju, a narančasto žuta vatrena kugla protezala oko 12,1 km u visinu. Izgled su joj povezali s gljivom. Eksplozija je davala ekvivalent od oko 20 kilotona TNT-a. Zastrašujuća snaga

atomskog oružja ostavila je veliki utjecaj na sve znanstvenike.

Uspjeh Trinity testa nagovijestio je kraj Drugog svjetskog rata, ali i konstrukciju atomske bombe koja je sadržavala radioaktivni plutonij. Budući da je Japan ostao jedini u borbi protiv SAD-a, Truman je Japanu predložio kapitalizaciju. Pošto Japan nije pristao na njihove uvijete, odlučili su se na radikale poteze.⁴⁵

⁴⁵ URL: <http://www.atomicarchive.com/History/mp/p5s5.shtml> (29.11.2014.)

7.3. Atomska bomba

Temelj atomske bombe je fisija. U trenutku kada neutron s dovoljno energije pogodi atom radioaktivnog materijala poput uranija, može doći do lančane nuklearne reakcije. Ona se može kontrolirati, što se i događa u nuklearnim reaktorima i u srcu nuklearnih elektrana. Dobivena energija koristi se za zagrijavanje vode dok se ne stvori vodena para koja vrti turbine povezane s generatorima da bi se proizvela struja. Ako se reakcija odvija na nekontroliranoj razini dolazi do nuklearne eksplozije.

Uranij ili plutonij, vrlo reaktivni elementi, mogu se koristiti kao gorivo atomskih bombi. Samo neki izotopi poput ^{235}U i ^{239}Pu mogu se koristiti za lančane reakcije zbog oslobađanja neutrona visoke energije koji vrše daljnje cijepanje atoma. Kada se dovoljno radioaktivnog materijala stavi zajedno, započinje lančana reakcija i kažemo da je masa kritična. Kritična masa se definira kao količina materijala na kojoj će neutron, koji je proizveden u procesu fisije, stvoriti drugu fisiju.

Izraz koji se koristi za masu kada su lančane reakcije u eksponencijalnom porastu je superkritična masa. Ako držimo dijelove uranija u masi koja je manja od kritične mase i u poželjnom trenutku ih spojimo, kritična masa prelazi u superkritičnu masu i događa se eksplozija zbog slobodnih neutrona.

Snaga atomske bombe može se protezati od tone TNT-a pa sve do 500 kilotona TNT-a što uzrokuje potpuno uništenje u krugu od nekoliko kilometara. Postavlja se i pokreće na nekoliko stotina metara od cilja da bi maksimalno djelovala. Zatim se oslobađa val topline ogromne temperature koji se širi prostorom. Nakon toplinskog vala dolazi eksplozija i stvara se gljivasti oblik prašine i plinova koji se širi kilometrima u visinu. Sve je popraćeno značajnom količinom radioaktivnog zračenja koje se zadržava u zraku te ostavlja posljedice na ljudima i životinjama.

Postoje dvije poznate metode koje se koriste u izgradnji atomske bombe.

a) Metoda „pištolj“

Metoda „pištolj“ najjednostavniji je način izrade atomskog oružja. Oružje se sastoji od cijevi na kojoj se polovica nuklearnog materijala nalazi na jednom kraju, a ostala polovica na suprotnom. Razlog tome je održavanje kritične mase da se eksplozija ne bi dogodila u krivom trenutku. Kroz cijev se ispali određena količina ^{235}U u drugi dio, čime se stvori superkritična masa. Bitno je da se sav materijal okupi u što kraćem vremenu kako bi se lančane reakcije održale. Oslobođena energija prenosi se u okolinu.

Iako je metoda jednostavna za konstrukciju, ima neke nedostatke. Nuklearni materijal se mora dovoljno brzo na određenim udaljenostima okupiti da bi se održala lančana reakcija i da bi došlo do željene eksplozije.

Metoda „pištolj“ zahtijeva znatnu količinu uranija. Da bi se dobilo fisijsko gorivo potrebno je vrijeme, strpljenje kao i dobra metoda obogaćivanja uranija koja daje najučinkovitije rezultate. Metoda „pištolj“ funkcioniра samo ako se kao gorivo koristi uranij.⁴⁶

b) Metoda implozije

Druga metoda je metoda implozije. Fisijski materijal ima sferni oblik. Njegova masa je manja od kritične mase pa ne može doći do privremene eksplozije. Oko nuklearnog materijala nalazi se trotil (trinitrotoluen) ili neki drugi eksploziv. Pri njegovoj eksploziji nuklearni materijal podliježe jakoj imploziji zbog čega mu se veličina smanjuje, a gustoća povećava. Kada se ona detonira, sila eksplozije pritišće fisijski materijal u superkritičnu masu. Nuklearni materijal postaje superkritičan i dolazi do lančane reakcije.

Metoda implozije najčešće koristi plutonij kao gorivo, ali se može koristiti i uranij.⁴⁷

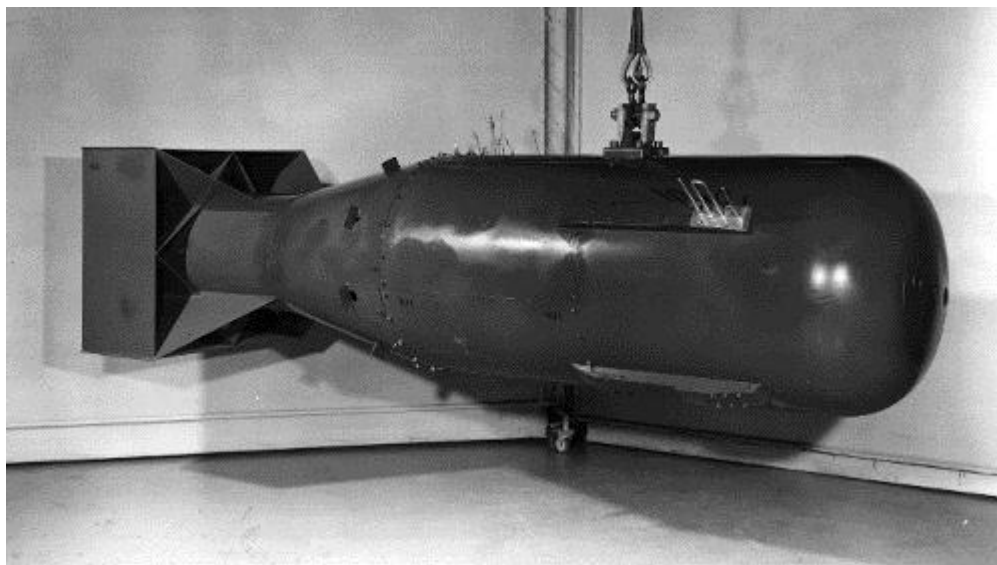
⁴⁶ URL: <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission7.shtml> (30.11.2014.)
<http://www.unmuseum.org/buildabomb.htm> (30.11.2014.)

⁴⁷ URL: <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission7.shtml> (30.11.2014.)
<http://www.unmuseum.org/buildabomb.htm> (30.11.2014.)

7.4. Hiroshima i Nagasaki

Ogromna snaga oslobađa se iz atomskog oružja cijepanjem fisijskih elemenata koji čine jezgru atomske bombe. Za vrijeme Drugog svjetskog rata, SAD je stvorio tri bombe od kojih je prva bila testirana, a ostale su bačene na Japan.

„Little Boy“ konstruiran je metodom „pištolja“, a korišteni fisijski materijal bio je ^{235}U . Bomba je bačena 6. kolovoza 1945. na Hiroshimu koja je tada brojila 330 000 stanovnika od kojih je 70 000 odmah ubijeno. Do kraja 1945. godine, broj poginulih se popeo na 140 000. Bomba je bila dugačka oko 3 m, promjera oko 71 cm i mase 4 400 kg te je bačena s visine koja je približno iznosila 10 000 m, a detonirala je na polovici te visine. Prvi učinak eksplozije bila je zasljepljujuća svjetlost koju je popratila vatrena kugla čiji je promjer iznosio oko 370 m. Toplina koja se pri tom širila iznosila je oko 6000 °C. Eksplozija je davala ekvivalent od oko 15 kilotona TNT-a.⁴⁸



Slika 19. Little Boy

(<http://www.atomicarchive.com/Photos/LBFM/image1.shtml>) Preuzeto: 01.12.2014.

⁴⁸ URL: http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_85255.html (30.11.2014.)
<http://www.atomicarchive.com/Photos/LBFM/image1.shtml> (30.11.2014.)

9. kolovoza iste godine, SAD je bacio i drugu bombu na japanski grad Nagasaki. Budući da su promašili željenu metu i bacili bombu 2 km dalje, pola grada je bilo uništeno. Pod kodnim imenom nazvana je „Fat man“. Bila je to bomba koja je sadržavala jezgru od oko 6,4 kg plutonija. Toplina koja se javlja tijekom eksplozije procjenjuje se na 3 900 °C. Bomba je bila dugačka oko 3,25 m i mase 4656 kg. Detonirala je oko 469 m iznad grada. Eksplozija je davala ekvivalent od oko 21 kilotona TNT-a. Procjenjuje se da je broj žrtava bio između 40 000 i 80 000.⁴⁹



Slika 20. Fat man

(<http://www.atomicarchive.com/Photos/LBFM/image2.shtml>) Preuzeto: 01.12.2014.

Projekt Manhattan započeo je s ciljem da se napravi atomska bomba prije nego to uradi Njemačka. U projektu se koristilo oko 40 laboratorija i tvornica kao i više od 200 000 ljudi. Puno truda i novaca je uloženo. Ukupno se smatra da je do 1945. godine potrošeno oko 1,89 milijardi dolara, što bi u današnje vrijeme iznosilo oko 24,8 milijardi dolara.

Veliku ulogu u projektu imao je već spomenuti Leo Szilard. Iako je radio na izgradnji atomske bombe, bojao se da bi znanstvenici mogli izgubiti kontrolu u svojim istraživanjima i upotrijebiti je na neprimjeren način, što je na kraju i učinjeno.

⁴⁹ URL: http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_88783.html (30.11.2014.)
<http://www.atomicarchive.com/Photos/LBFM/image2.shtml> (30.11.2014.)

8. Zaključak

Od dana kada je J. J. Thomson otkrio elektron pa sve do otkrića nuklearne fisije prošlo je četrdeset godina. Najznačajniji trenuci u navedenom razdoblju bili su Rutherfordovo otkriće jezgre atoma i transformacije elemenata, otkriće umjetne radioaktivnosti koja se pripisuje Joliot-Curie te otkriće neutrona. Od 1934. do 1938./39. istraživanja s neutronima i uranijem provodila su se u Rimu (Enrico Fermi), Berlinu (Otto Hahn, Lise Meitner i Fritz Strassmann) i u Parizu (I. Curie i P. Savić). Rezultati su se interpretirali kao nastanak transuranijskih elemenata. Ključni rezultati njihovih istraživanja objavljeni su 23. prosinca 1938. godine od strane Otta Hahna i Fritza Strassmanna. Iako bez dokaza, oni pretpostavljaju da je produkt bombardiranja uranija barij. Konačno objašnjenje dala je Lise Meitner 11. veljače 1939. godine i proces nazvala nuklearna fisija.

Općenito nuklearnu fisiju definiramo kao cijepanje teških jezgara uz oslobađanje energije. Zasluge za otkriće dobili su samo njemački fizičari Otto Hahn i Fritz Strassmann.

U vrijeme kada je nuklearna fisija otkrivena, započeo je Drugi svjetski rat. Brojni fizičari bili su prisiljeni, spašavajući svoje živote, otići iz Njemačke u SAD. Bio je to trenutak početka utrke i rasprave između Njemačke i SAD – a koja je trajala više od pet godina. Iako su obje strane imale potencijal da se stvori oružje za masivno uništenje, SAD je u konačnici pobijedio i cilj Manhattan projekta se ostvario.

Da se sve to nije dogodilo, rat bi zasigurno završio na sasvim drugačiji način. Također, ne bi se stvorilo oružje koje ima nevjerojatnu snagu uništenja. Uz sve negativne činjenice postoje i one dobre. Nuklearna fizika svijetu je dala jeftinu i čistu proizvodnju električne energije kao i razne mogućnosti liječenja u medicini.

Otvoreno je novo poglavlje fizike s brojnim istraživanjima koje uz sebe nosi uzroke, posljedice, ali i korist. Tehnologija i umovi neprestano napreduju te možemo očekivati samo neočekivano.

9. Literatura

1. L'Annunziata M.F., Radioactivity Introduction and History, Amsterdam, Elsevier, 2007.
2. Supek I., Povijest fizike, Zagreb, Školska knjiga, 1980.
3. Faj, Z., Pregled povijesti fizike, Osijek: Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku (Pedagoški fakultet), 1999.
4. Draganić I., Radioaktivni izotopi i zračenja, Beograd, 1981.
5. Ivanović M., Vučić V., Atomska i nuklearna fizika, Beograd, Naučna knjiga, 1975.
6. Cropper W.H., Great Physicists, New York, Oxford, 2001.
7. Krane, K., Modern physics, SAD, 2012.
8. http://pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/u/fizikalni_podaci.html#FIZIKALNI (25.11.2014.)
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Uranium> (25.11.2014.)
10. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/rontgen-bio.html (01.10.2014.)
11. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/becquerel-bio.html (03.10.2014.)
12. http://www.aip.org/history/curie/brief/01_poland/poland_1.html (04.10.2014.)
13. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/marie-curie-bio.html (04.10.2014.)
14. <http://www.biography.com/people/marie-curie-9263538#synopsis> (04.10.2014.)
15. <http://www.atomicarchive.com/History/mp/p1s3.shtml> (20.10.2014.)
16. <http://www.atomicarchive.com/Bios/Meitner.shtml> (30.10.2014.)
17. <http://www.biographyonline.net/scientists/otto-hahn.html> (03.11.2014.)
18. http://www.atomicarchive.com/History/firstpile/firstpile_10.shtml (17.11.2014.)
19. http://en.wikipedia.org/wiki/Le%C3%B3_Szil%C3%A1rd#Developing_the_idea_of_the_nuclear_chain_reaction(17.11.2014.)
20. http://paksnuclearpowerplant.com/download/1226/nuclear_chain_reaction.pdf (18.11.2014.)
21. http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor (20.11.2014.)
22. <http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Med/Med.html> (28.11.2014.)
23. <http://www.atomicarchive.com/History/mp/p5s5.shtml> (29.11.2014.)
24. <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission7.shtml> (30.11.2014.)
25. <http://www.unmuseum.org/buildabomb.htm> (30.11.2014.)
26. <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission7.shtml> (30.11.2014.)

27. <http://www.unmuseum.org/buildabomb.htm> (30.11.2014.)
28. http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_85255.html (30.11.2014.)
29. <http://www.atomicarchive.com/Photos/LBFM/image1.shtml> (30.11.2014.)
30. http://www.hcc.mnscu.edu/chem/abomb/page_id_88783.html (30.11.2014.)
31. <http://www.atomicarchive.com/Photos/LBFM/image2.shtml> (30.11.2014.)
32. <http://www.aip.org/history/curie/resbr2.htm> (14.01.2015.)
33. Fergusson, Jack E. "[The history of the discovery of nuclear fission.](#)" Foundations Of Chemistry 13, no. 2 (July 2011): 145-166. Academic Search Complete, EBSCOhost (accessed July 15, 2014)

Životopis

Rođena sam 19. kolovoza 1990. godine u Našicama. Osnovnu školu Ivana Gorana Kovačića pohađala sam u Zdencima. Nakon završetka osnovne škole upisala sam srednju školu „Stjepan Ivšić“ u Orahovici, smjer Opća gimnazija. Po završetku srednje škole, 2009. godine, upisujem se kao redoviti student na Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, koji je u sastavu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. 2012. godine, nakon završetka preddiplomskog studija, upisala sam Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike.