

UNIVERSITET U NOVOM SADU
Prirodno Matematički Fakultet

"KORIŠĆENJE REAKTORSKIH NEUTRONA ZA ISTRAŽIVANJE
U FIZICI ČVRSTOG STANJA"

Nesarević B Tomislav

Ovaj rad rezultat je mojih kraćih boravaka u laboratoriji za fiziku čvrstog stanja u Institutu nuklearnih nauka "Boris Kidrič" u Vinči.

S obzirom da je bilo malo vremena za bilo kakav eksperimentalni rad ovde je sumirano moje upoznavanje sa istraživačkim metodama koje omogućuju uređajima oko reaktora.

Posebno sam obratio pažnju na prirodu neutrona i merenje osobina i karakteristika složenijih neutronskih snopova iz nuklearnog reaktora.

Ovim želim da zahvalim profesoru Dr. L. Marinkovu na sugestiji da siše za ovaj rad budu neutroni kao i kolegama Dr. J. Konstantinoviću, Dr. M. Živanoviću i Dr. Dj. Joviću koji su mi omogućili veći broj konsultacija tokom boravka u laboratoriji.



OTKRIĆE I OSOBINE NEUTRONA

Godine 1920. iz tri sasvim nezavisna izvora dobijena je sugestija da bi neka potpuno nova i do sada nepoznata čestica mogla da bude značajna jedinica u strukturi atoma.

Čestica o čijem je verovatnom postojanju bilo ređi u raspravama V.D. Harkinsa u SAD, / V.D. Harkins, / O. Masona /O. Mason/ u Australiji i E.Rutherforda /E.Rutherford/ u Engleskoj trebalo je po njihovim pretpostavkama da bude rezultat neutralizacije naselektrisanja protona elektronom, pri čemu nastaje neutralna tj. nенаселектрисана čestica, koja ima masu jedinice na običnoj atomske skali težina.

Ova hipotetična čestica koja je dobila ime "neutron" - najverovatnije po V.D.Harkinsa /V.D.Harkins/ - odigrala je veoma važnu ulogu u istoriji nuklearne nauke.

Pokušaj da se otkrije neutron učinili su zajedno E.Rutherford /E.Rutherford/ i njegov asistent Džens Čedvik /J. Chadwick/ bombardovanje aluminijuma brzin α - česticama iz radioaktivnog izvora. Ovaj eksperiment nije uspeo, ali su kasniji dogadjaji pokazali da su se eksperimentatori nalazili na pravom putu.

Do stvarnog otkrića neutrona došlo je 1930 godine.

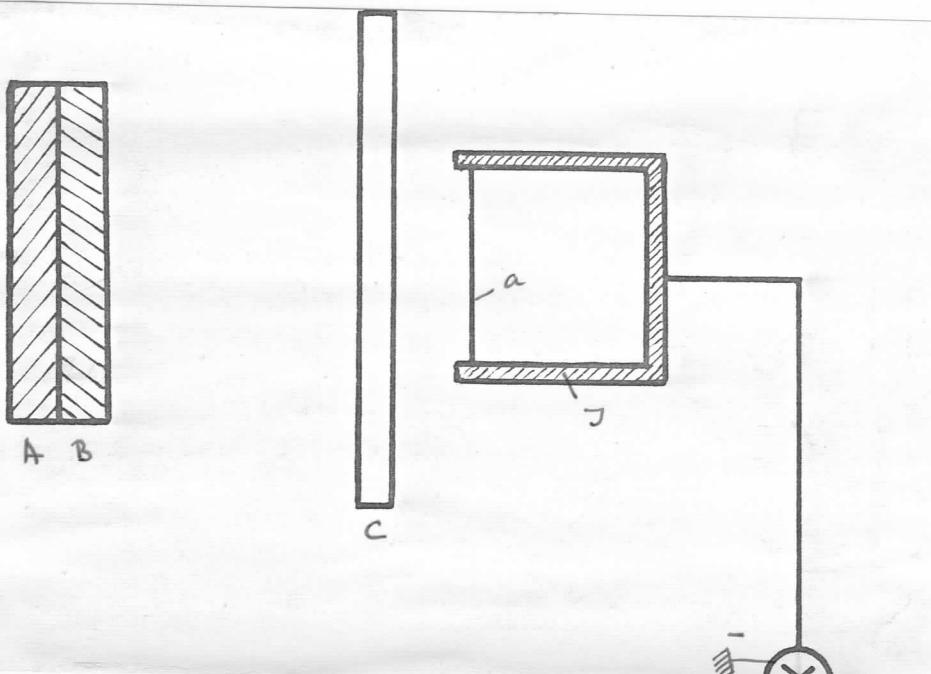
Bote /W. Bothe/ je otkrio da pri bombardovanju Berili-juna / $_{4}Be^9$ / α - česticama nastaje zračenje veoma velike probjene sposobnosti. Pretpostavljalo se da to zračenje predstavlja "tvrde" γ - zrake koji nastaju na račun toga što pri sjednjenu α - čestice jezgru $_{4}Be^9$ nastaje jako eksplodirani izotop ugljenika $_{6}C^{13}$ koji prelazeći u normalno stanje, emituje fotone $\hbar\nu$ velike energije. Na taj način, pretpostavljalo se, da se pojava obavlja po sledećoj shemi:



gde / $^{13}_6 C$ / označava ekscitirano jezgro iztopa ugljenika ^{13}C

Merenja apsorpcije nastalih zrakova u olovu pokazala su da svaki foton treba da ima energiju oko 7 MeV - a.

Irena Ž. Kiri /Curie I. Joliot/ i F.Želio /F.Joliot/ otkrili su 1932 godine da ionizujuće dejstvo berilijumovih zrakova veoma raste ako se oni puste da prodju kroz ploču parafina /slika 1/



A - metalni disk na koji se nanese radioaktivni preparat koji prestavlja izvor d - čestica.

B - ploča berilijuma .

C - sloj parafina.

J - ionizaciona komora sa okancem pokrivenim tankom folijom /a/.

Kada se stavi sloj parafina ionizacija u komori naglo poraste. Ova efekat objašnjen je tako što berilijumovo zračenje izbacuje iz parafina protone, koji pružaju jako ionizujuće dejstvo.

Proton izbačen iz parafina berilijunovim zračenjem, ima domet u vazduhu oko 40 cm što odgovara energiji od oko 5 MeV-a.

Ako se pretpostavi da se proton ubrzava na račun elastičnog sudara sa γ - fotonom, tada ovom posledom treba pripisati energiju od oko 55 MeV-a, što je daleko veće od vrednosti dobijene eksperimentom. apsorpcijom.

vrednost od 55 MeV-a ne slavi se ni sa prorečunom koji se bazira na određivanju defekta mase.

Ako se znaju atonske težine ${}^9_4\text{Be}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{13}_6\text{C}$ i energija α -čestice koja bombarduje, može se naći da defekt mase, koji odgovara procesu koji se obavlja po sheni $\frac{\text{volumen}}{\text{masa}}$ / iznosi 0,01665 jedinica atonske težine, što je ekvivalentno energiji od 15,5 MeV-a. Na taj način energija γ fotona ne može da prelazi 15,5 MeV-a.

Čedvik /J.Chadwick/ je pokazao da ove teškoće nestaju ako se predpostavi da se zračenje, koje emитuje berilijsum pod uticajem bombardovanja α -česticama sastoji od neutralnih čestica sa masom bliskom masi protona. Kao što je rečeno ove čestice su nazvane NEUTRONI. Oni su obeleženi simbolom n^1 pošto je redni broj /atomski/ neutrona $Z = 0$, a neseni broj $N = 1$.

Tada će proces obrazovanja neutrona pri bombardovanju berilijsma α -česticama biti napisan u obliku:



Neutroni s obzirom da nemaju naselektrisanje, slabo usajmno deluju sa atomima i molekulima, pored koji oni proleću, što i objašnjava njihovu slabu sposobnost da ionizuju gasove i njihovu veliku probojnu sposobnost.

Sudari neutrona sa jedinicama atoma dešavaju se kao sudari elastičnih kugli uz očuvanje zakona o održanju energije i zakona o održanju količine kretanja. Otuda se dobija da ako je v' početna brzina neutrona, tada je brzina emisionog jezgra v' /pri centralnom sudaru/ jednaka

$$v' = \frac{2M_n}{M_n + M} \cdot v \quad /3/$$

M_n - masa neutrona

M - masa atomskog jezgra.

Brzine v_1' i v_2' dva različita emisiona jezgra sa mase M_1 i M_2 pri jednoj istoj brzini neutrona, odnosiće se kao:

$$\frac{v_1'}{v_2'} = \frac{M_1 + M_2}{M_M + M_1}$$

/4/

Iz ovog odnosa nalazi se masa neutrona M_n .

Činjenica da različiti parovi jezgra dovode do jedne iste vrednosti mase neutrona M_n služi kao potvrda Čedvikove /J.Chadwick/ hipoteze o tome da zračenje beriliijuma ne predstavlja fotone, već da se ono sastoji iz "težih" čestica.

Po savremenim podacima masa neutrona iznosi:

$$M_n = 1,008982 \text{ a}m$$

i ona je nešto veća od mase protona koja iznosi:

$$M_p = 1,00813 \text{ a}m$$

Drugi postupak za određivanje mase neutrona primenili su Čedvik / J.Chadwick/ i Godhaber /M.Goldhaber/ 1934. godine i zasniva se na činjenici da γ zraci sa dovoljno energije mogu da dezintegruju deuteron u proton i neutron.



/5/

Kako su neutroni u pitanju kod mnogih nuklearnih reakcija - bili kao projektili, bilo kao isbađene čestice - to je očigledno da postoji veliki broj mogućnosti za izračunavanje mase neutrona, pod uslovom da su poznate atonske težine izotopa jezgra mete i jezgra proizvoda kao i energija reakcije.

Radioaktivnost neutrona



/6/

Elektroni koji radioaktivne jezgre emituju u vidu beta zraka moraju biti rezultat spontanog pretvaranja neutrona u proton i elektron. Pauli /v. Pauli/ je istakao mogućnost da je ovaj proces bio praćen emisijom neke druge čestice koja se zove neutrino.

Zbir mase protona, elektrona i neutrina, praktično je jednak masi vodoničnog atoma tj. $1,00813$ jedinica atomske ~~mase~~, pošto se ovaj atom sastoji iz jednog protona i jednog elektrona, dok se masa neutrina može zanemariti.

Može se zaključiti da je ukupna maza manja od mase neutrona za :

$1,00897 - 1,00813 = 0,00084$ jedinica što je ekvivalentno sa $0,78$ MeV-a energije, pa se zato može napisati:



/7/

Ovaj se proces vrši spontano, pa je neutron najprostija radioaktivna vrsta koja se raspada uz emisiju negativne β čestice tj. elektrona ostavljajući za sebe kao preizvod proton.

Nadjeno je da konstanta λ za β raspadanje neutrona, iznosi u recipročnim sekundama oko 6×10^{-4} a poluvreme neutrona iznosi približno 20 minuta.

Magnetni moment - spin

Postojanje spina neutrona je posledica spina jedra, koja se sastoji iz protona i neutrona. Duže vremena su, teorijska i eksperimentalna istraživanja, posebno na rasejanju neutrona na vodonikovim atomima i dalje kao zaključak / naročito radovi Vignera / E. P. Wigner/ da neutron mora imati spin koji je ravan $\pm \frac{1}{2}$

Ove, radije pretpostavke, nego direktno eksperimentalne činjenice konačno su potvrdili eksperimenti Šterna /O. Stern/ 1933. godine kada su bili odredjeni magnetni moment protona i deuterona. Nedjutim direktni eksperimentalni dokaz o magnetnom momentu neutrona dat je od strane Alvarez /L.W. Alvarez/ i Bloha /F. Bloch/ 1940. godine kada je konačno pokazana polarizacija neutrona na spinove $+ \frac{1}{2}$ i $- \frac{1}{2}$.

Danas se ova osobina neutrona veoma uspešno koristi kao direktna metoda za ispitivanje magnetnih osobina materijala.

IZVORI NEUTRONA - NUKLEARNI REAKTORI

Korisnost neutrona za istraživanja u fizici čvrstog tela - posebno za istraživanje strukture materijala, bila je očigledna posle otkrivanja poznatog Debro¹jevog zakona :

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

h - Plankova konstanta
m - masa
v - brzina

/8/

Osim ove generalne osobine talasnih svojetava čestica, eksperimentalno je za neutronski snop dokazana difrakcija na prirodnim optičkim rešetkama - kristalima.

Fenomen difrakcije dao je ekvivalentne rezultate /difrakcione slike/ kao što je to bilo dobiveno sa X-zracima.

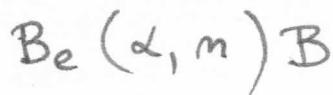
Bilo je očigledno da bi obairon na činjenicu da neutron nije naselektrisan, i da poseduje svoj magnetni moment, da bi difrakciona slika dobijena neutronskim snopom dala potpuniju sliku od onih koji su davali snopovi X - zraka jer je već bilo poznato da su skoro svi ovi materijali transparentni za neutrone.

Međutim na njihovo konkretno korišćenje u istraživačke svrhe morale je dugo da se čeka, jer su intenziteti neutronskih snopova, dobijeni preko nuklearnih reakcija, bili skoro milion puta slabiji od intenziteta X-zraka što je bilo jedva dovoljno za dokazivanje sazog fenomena neutronске difrakcije.

Tek realizacijom prve lančane reakcije, koja je očigledno za cilj imala svaranje fizičkih materijala za včne potrebe, istraživači su dobili neutronске snopove koji su bili stotinak puta intenzivniji od do tada poznatih neutronskih izvora.

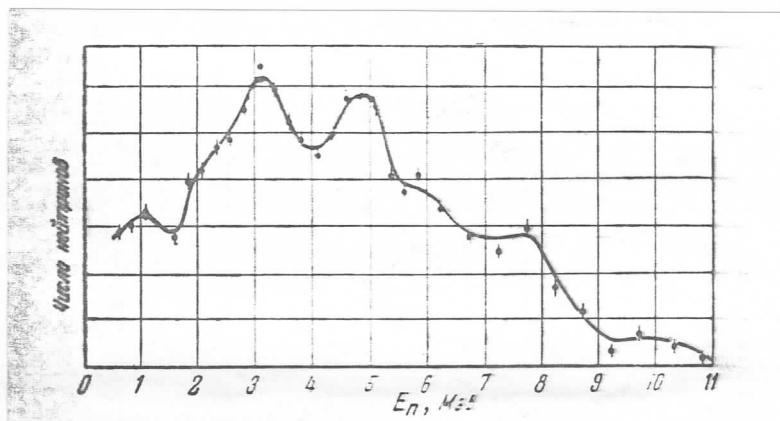
Danas već postoje reaktori čiji su intenziteti neutronskih snopova uporedivi sa intenzitetima X-zraka koje daju rentgenske cevi.

Kao što je već kazano jedan od načina da se dobije neutronski snop jeste nuklearna reakcija preko koje je otkriven neutron.



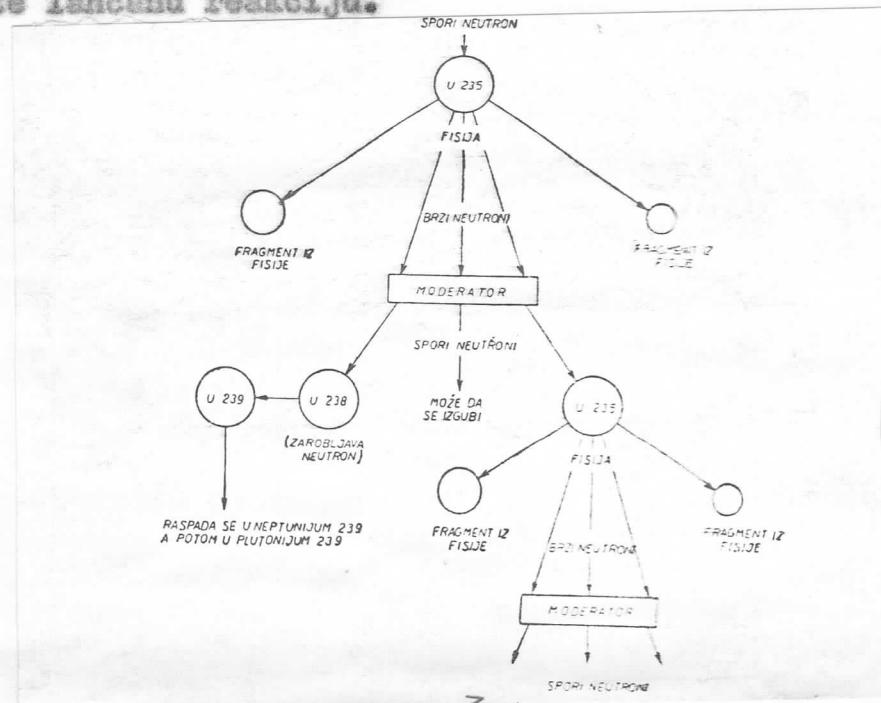
Ovaj izvor ima jedan nedostatak jer je ova reakcija $\text{D}, n /$ prečena intenzivnim γ zračenjima visoke energije koja smeta u eksperimentima.

Neki bolji je izvor $\text{Po} + \text{Be}$ - u kome se za osnovu koristi smeš Po i Be. Ovde γ zračenje skoro da i ne postoji, međutim, kako za predhodni tako i za ovaj izvor važi da energetaka raspodela dobijenih neutrona nije bila pogodna za difrakciona istraživanja jer su maksimumi neutronskih energija bili u okolini nekoliko MeV-a



slika 2

Snažni izvori neutrona - nuklearni reaktori - u svojoj osnovi koriste lančenu reakciju.



Otkriće ovog fenomena vezano je za imena P. Žolje /P.Joliet/, L. Kowarski /L.Kowarski/, H. Halban /H.von Halban/ i E. Fermija /E.Fermi/-koji su razmatrali mogućnost nuklearne lančane reakcije koja bi pratila fizičku uranu U_{235} pod dejstvom neutrona.

Utvrđeno je da samo spori neutroni omogućuju lančanu reakciju, pa je jeden od glavnih problema bio kako iste usporiti. Materijali koji se za ovu svrhu koriste zovu se moderatori; dobar moderator smanjuje brzinu neutrona pomoću malog broja sudara, ali ih ne apsorbuje u većim razmerama.

Moderatori se sastoje iz lakih elemenata, a da se proces usporavanja izvrši što je moguće brije treba da se kao moderatori koriste tela u čvrstom ili tečnom stanju, pošto su jezgra u ovom slučaju više slijedena pa su sudari sa neutronima češći.

Javljene i pogodne supstance za usporavanje brzih neutrona su voda i parafinski vosak koji se sastoje iz vodonika i ugljenika.

Međutim ni jedna od ove dve supstance ne zadovoljava u potpunosti kao moderator, zbog toga što postoji znatna verovatnoća da će spori neutroni stupiti u reakciju sa jezgrom vodonika koje će ih apsorbirati. Ipak kod jednog tipa nuklearnog reaktora koristi se obična voda kao moderator za usporavanje neutrona.

Idealni moderator biće bio, bez teorijski, tečan helijum pošto on ne apsorbuje neutrone ni pod kakvima uslovima. Ali njegova upotreba nije praktična zbog izvanredno niskih temperatura koje bi morale biti ostvarene.

Dobre osobine kao moderator pokazuju:

Deuterijum /D/ u obluku deuterijunovog oksida ili tečke vode D_2O

Berilijum i ugljenik, a tečka voda i ugljenik, u vidu grafita najčešće se koriste kao moderatori u nuklearnim reaktorima.

Nuklearni reaktor

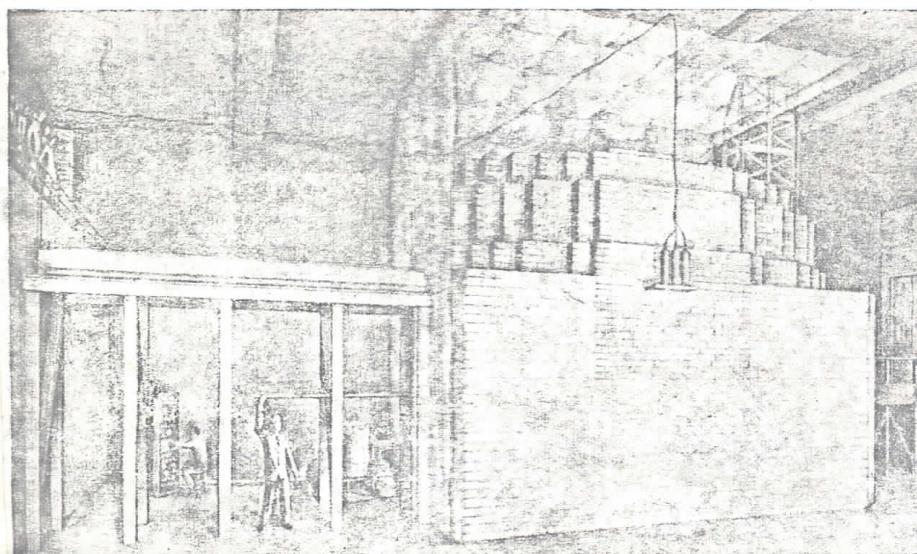
Najstariji i u istorijskom pogledu najinteresantiji nuklearni reaktor za naučna istraživanja u svetu je reaktor iz urana i grafita u Čikagu koji je sadržavac veliki deo oksida urana zbog toga što se nije moglo da nabavi dovoljno čistog metala.

Pošto je plan da se sagradi kubna rešetka iz komada urana i uranovog oksida u lopti od grafita. Zbog nedostatka čistog metala grafit je isečen u obliku cigala i naslagen u slojeve, pri čemu su pojedini slojevi sadržavali komade urana ili njegovog oksida.

Pošto je struktura izgradjena redjanjem slojeva u vidu gomile, to je i ona dobila ime "reaktorska gomila". Ovo ime bilo je vrlo pogodno i u ono vreme /1942. godine/ korisno, jer se njime nije odavala prava svrha strukture.

Za vreme izgradnje reaktorske gomile umetnute su trake od kadmijuma kao apsorbenta za neutrone, i kao mera bezbednosti jer se očekivalo da bi neutroni koji se stvaraju spontanom fizijskom, mogli na neki drugi način da pokrenu novu lančanu reakciju u trenutku kada bude dostignuta kritična veličina.

Ovo je bila nužna mera opreznosti pošto je faktor multiplikacije rastao brže nego što se predviđalo, pa se do kritičnog stanja i dospeo pre nego što se očekivalo. Zbog toga je gotova reaktorska gomila, umesto da bude leptastog oblika, kako se nameralo, imala oblik svezanog sferoida jajastog oblika spljoštenog pri vrhu.



Sl. 14. Skica prve uranske peći za lančanu reakciju na Univerzitetu u Čikagu.

Dabi se održala lančana reakcija nije potrebno da svaki neutron, koji se stvara pri fisiji, bude u mogućnosti da izazove drugu fisiju. Minimalni uslov je da za svako jednog koje trpi fisiju, bude preiveden u proseku najmanje jedan neutron koji će izazvati fisiju drugog jezgra. Ovaj uslov je pogodno izražen u vidu faktora multiplikacije - a koji se definiše kao odnos broja neutrona iz jedne generacije prema njihovem broju u generaciji koja mu je neposredno prethodila.

Ako je faktor multiplikacije - koji se obeležava sa $/k$ tačno jednak jedinici, ili nešto veći od nje, onda će biti moguća lančana reakcija; ali ako je vrednost za $/k$ manja od jedinice čak i za vrlo mali iznos, onda se lanac ne može održavati.

Opreznim izvlačenjem traka od kadnijuma i merenjem intenziteta neutrona u reaktoru, moglo se pomoći brojaču koji je bio sastavljen bortriflorid posmatrati približavanje kritičnoj veličini.

Kad bi brojanje neutrona počelo naglo da raste, dok se povećavala veličina reaktora, faktor multiplikacije približavao se jedinici.

Drugog decembra 1942. godine pošto su izvučene šipke za apsorpciju neutrona, pokazan je nagli porast intenziteta neutrona u reaktoru, što je bio dokaz da se vršila lančana reakcija. Ovo je prvi put da su ljudska bića izazvala jednu nuklearnu lančenu reakciju koja se dalje razvijala sama od sebe.

Stvarni faktor multiplikacije u sistemu iznosio je oko 1,0006 pošto su uklonjeni svi apsorbenti neutrona. Ovo je bilo dovoljno da se omogući lančana reakcija. Reaktor je u početku radio se niskom snagom od 0,5 W ali je ona kasnije povećana na 200 W.

Ova energija mogla je još više da se poveća, ali je doneta odluka da se to ne učini zbog mogućih štetnih posledica od emitovanih radijacija, kojima je bilo izloženo osoblje. Zbog toga je prvi reaktor sa lančenu reakciju demontiran u proleće 1943. godine i ponovo konstruisan izvan Čikaga u Argonskoj nacionalnoj laboratoriji.

Supstance i rešetka su bili skoro identični, kao kod prvo-bitnog reaktora, ali je novi reaktor u obliku kocke imao pogodnu zaštitu od radijacije i usavršene mere za bezbednost.

Njegova normalna snaga iznosila je oko 2 kW, iako je katkad pušten da za vreme od jednog časa ili više, radi na snegom sve do 100 kW - razlog leži u činjenici da ovaj reaktor nije bio snabdeven uređajem za hlađenje.

Današnji reaktori obično kao gorivo imaju obogaćeni uran, a za moderator običnu ili tečku vodu, dok je reflektor najčešće grafit. Neutronski reflektor smanjuje gubitak neutrona na nagnjanju mera pa prema tome na koja supstanca koja je pogodna kao moderator - kao što je ugljenik ili berilijum - može da posluži kao reflektor - jer je u stanju da uspori brze neutrone koji bi inače pobegli - a da ih pri tome ne apsorbuje u većoj mjeri - i određeni broj vrati u jesagre reaktora.

Ovde navedimo karakteristike nuklearnog reaktora koji je izgrađen u našoj zemlji - u Institutu nuklearnih nauka u Vinči.

Nuklearni reaktor u Vinči ima sledeće karakteristike:

Moderator - tečka voda

Gorivo - prirodni uran obogaćen sa 2% urana 235

Reflektor - grafit

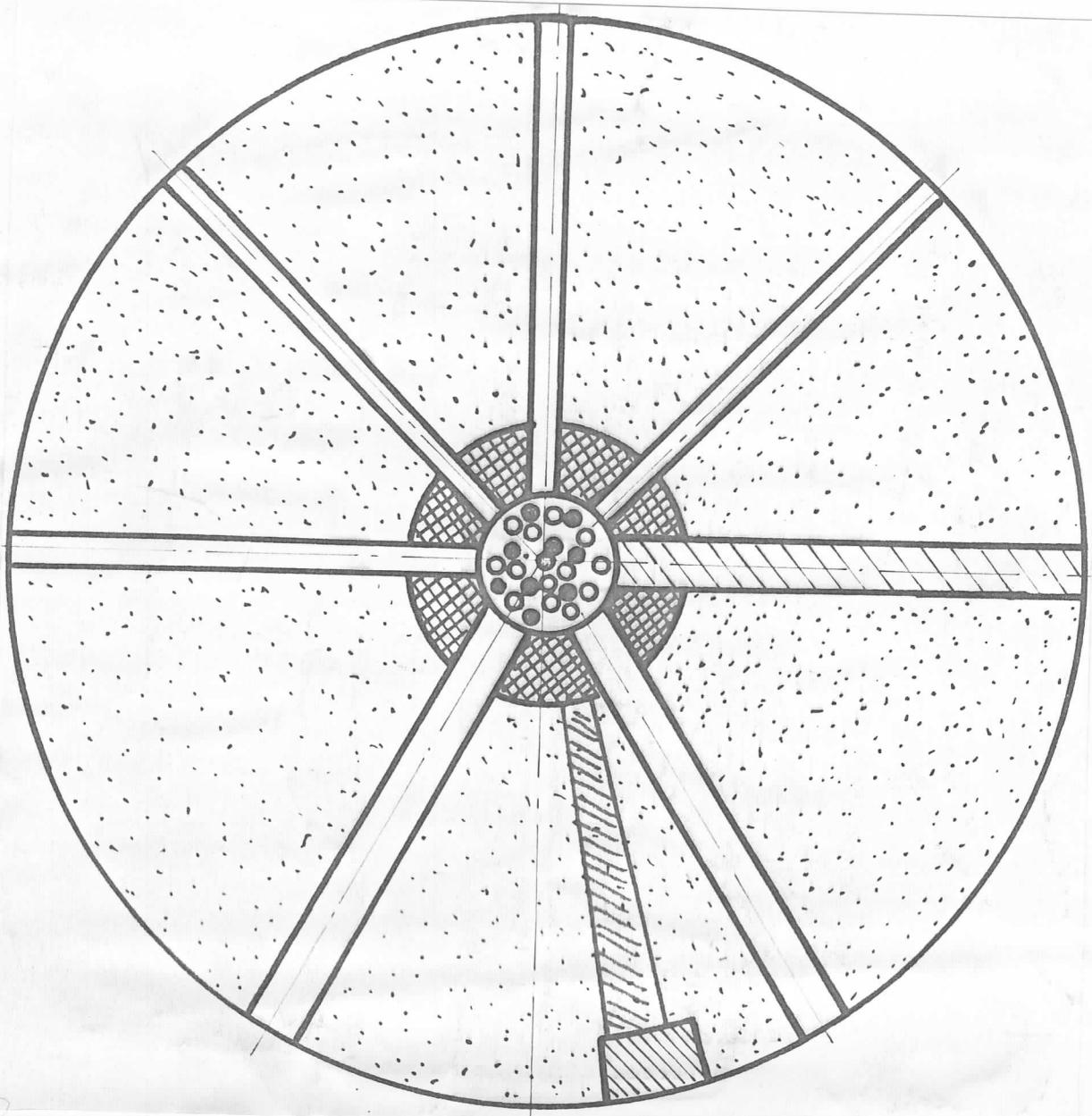
Snaga reaktora - 6,5/10 kW

Totalni fluks neutrona u centru reaktora iznosi približno $3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sek}$

Fluks termalnih neutrone na izlazu iz horizontalnog tunela je reda veličine $10^9 \text{ n/cm}^2 \text{ sek}$ /korisni fluks/

Ovaj reaktor je tako konstruisan da omogućuje proizvodnju veštakih radioaktivnih izotopa u svojim vertikalnim kanalima, dok se višak neutrona koristi na horizontalnim kanalima preko više neutronskih difrektronstara i spektronstara.

Sledeća skica pokazuje horizontalni presek nuklearnog reaktora u Vinči.



● gor. elementi
○ vertikalni kanali

reflektor - grafit
◎ beton pomećan sa grafitom

Na horizontalnim kanalima montirani su:

Dva neutronска difraktometra

Dva spektometra za merenje vremena preleta neutrona

Jedan trokristalni spektometar

SPEKTAR TERMALNIH NEUTRONA

Kao što je poznato uslov za difrakciju je da je medjuatomsko rastojanje istog reda veličine kao talasna dužina zračenja koje se difraktuje.

Prema Bragovom zakonu /W.L. Bragg/.

$$m\lambda = 2d \sin \theta$$

- /9/
- λ - talasna dužina
 - d - medjuatomsko rastojanje /ismedju sukcesivnih površina, atoma, ionova ili molekula/.
 - θ - ugao rasejanja
 - m - red refleksije - ceo broj

IZM

a znajući da je medjuatomsko rastojanje obično reda veličine nekoliko Å (10^{-8} cm) te bi sa ove svrhe neutroni trebalo da imaju talasnu dužinu od oko jednog Angstrena.

Prema De Broljevoj relaciji talasna dužina $\lambda = \frac{h}{mv}$ koja odgovara čestici sa masom m /

grana, i koja se kreće brzinom v

h - Plankova /Max Planck/ $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ erg s
const.

/10/

Pošto je sva energija neutrona kinetička to je ova jednaka:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

/11/

pa se stoga vrednost mv u De Broljevoj /H.L.de Broglie/
jednačini može zameniti sa $\sqrt{2mE}$

Ekvivalentna talasna dužina neutrona data je

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$



/12/

Ako zamenimo $m \approx 1,67 \cdot 10^{-24} g$
i faktor $1,6 \cdot 10^{-12}$ za pretvaranje erga u eV

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-27}}{\sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} E}}$$

/13/

$$\lambda = \frac{2,87 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{E}}$$

/14/

Odavde se može videti koga reda veličine bi morala biti energija za ulaz neutrona, da bi niz njegovih pridruženih talasa mogao da vrši difrakciju u kristalu.

Talasna dužina trebalo bi da iznosi oko $2 \cdot 10^{-8} cm$.

Iz ovog izlazi na osnovu jednačine /14/ da bi neutroni sa energijom od oko $0,02 eV$ mogli da manifestuju difrakcione fenomene kod kristala. Eksperimentalnim putem ovo je i potvrđeno.

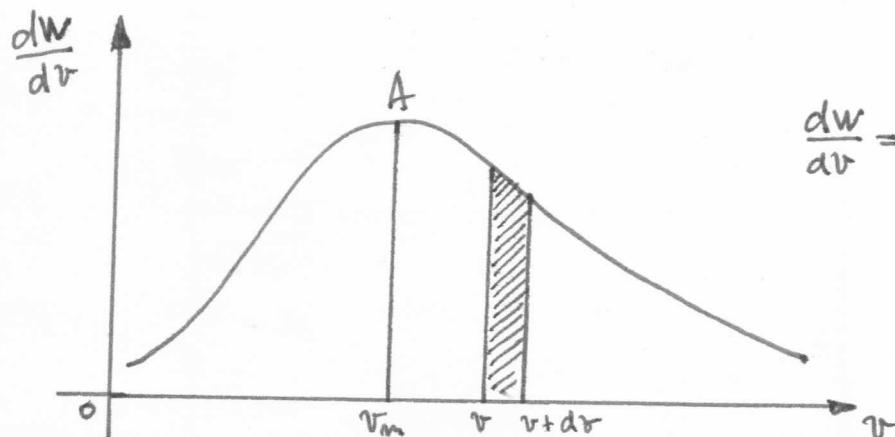
Očigledno je potrebno imati izvore neutrona malih energija - termalnih - koji su dobijeni u reaktorima izborom odgovarajućih količina moderatora - tečka voda - koji kao što je rečeno imaju za cilj - zadatek - da brze neutrone dobijene u fizijskim nizom uzastopnih neelastičnih sudara sa atomima moderatora uspore i svedu na željenu vrednost energija.

Za opisivanje energetske raspodele ovako usporenih neutrona može se uzeti da se nalaze u kvazi ravnoteži sa atomima moderatora /oni bi bili u ravnoteži ukoliko bi sistem bio zatvoren/

Zbog svega ovoga poželjno je da se moderator nalazi na što nižej temperaturi /ali ne i da se zaledi/ da bi energija neutrona bila što manja.

Zato često paralelno sa opisom metode merenja spektra neutrona iz reaktora dati i opis metode za njegovu interpretaciju korišćenjem Maksvelove /Maxwell/ raspodele brzina.

Kao što je poznato Maksvelova /Maxwell/raspodjela daje verovatnoću nalaženja određjenog broja neutrona sa brzinama u intervalu $(v, v+dv)$ na određenoj temperaturi neutrona



$$\frac{dW}{dv} = \frac{4}{\sqrt{\pi} \alpha^3} v^2 e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}}$$

/15/

O - A srazmerne je sa v^2 (pričišćivo)

Od A pa dalje/za velike brzine/ srazmerne sa $e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}}$

Iz uslova da je prvi izvod jednak nuli-nalazimo maksimum

$$\begin{aligned} \frac{d}{dv} \left(\frac{4}{\sqrt{\pi} \alpha^3} \cdot v^2 e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} \right) &= 0 \\ 2v e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} - v^2 \frac{2v}{\alpha^2} e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} &= 0 \\ v e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} \left(1 - \frac{v^2}{\alpha^2} \right) &= 0 \end{aligned} \tag{16}$$

Prva dva korena su $v=0$ i $v=\infty$ a treći $1 - \frac{v^2}{\alpha^2} = 0 \Rightarrow v = \alpha$

Ako ovo označimo sa V_m ; $V_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$

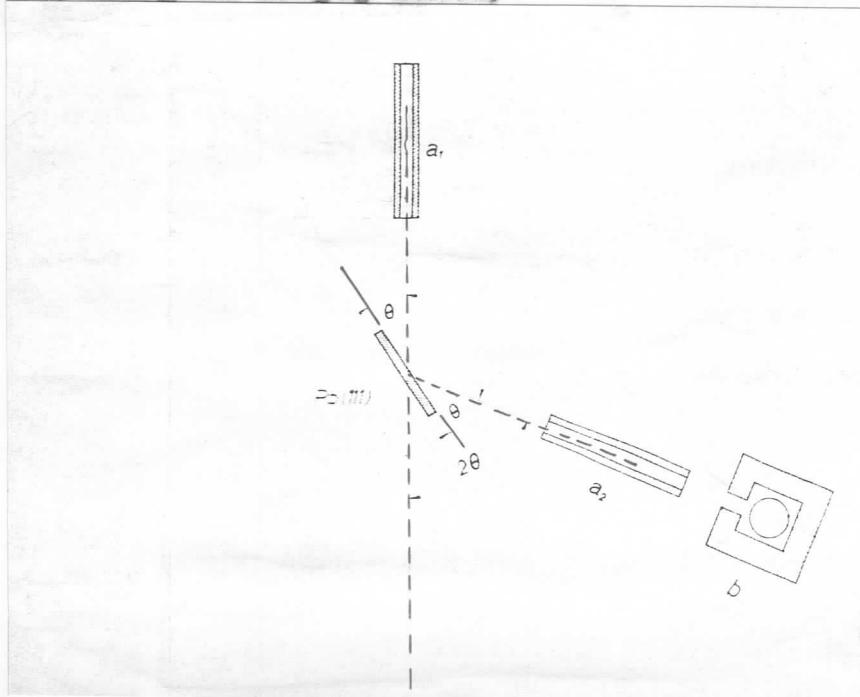
A to je najverovatnija brzina.

Kao što smo već rekli iz moderatora reaktora izlazi "beli" snop neutrona čiji je maximum jenin delon definisan temperaturom moderatora. Ova činjenica je već naglašena kao kvazi ravnoteža neutrona i atoma moderatora i razlog za opisivanje energetske raspodele neutrona pomoću Maksvelove/Maxwell/ jednačine.

Spektar termalnih neutrona koji izlazi iz horizontalnog kanala reaktora u Vinči izmeren je tokom 1963 god. pomoću jednog kristalnog neutronskog spektrometra.

Princip rada ovog spektrometra baziran je na talasnoj prirodi neutrona i poznate Bragove/W.L.Bragg/jednačine sa uglovnu raspodelu zračenja koje je reflektovano određenom ravni monokristala.

Za merenje raspodele termalnih neutrona pomoću kristalnog spektrometra/datog na donjoj slici/

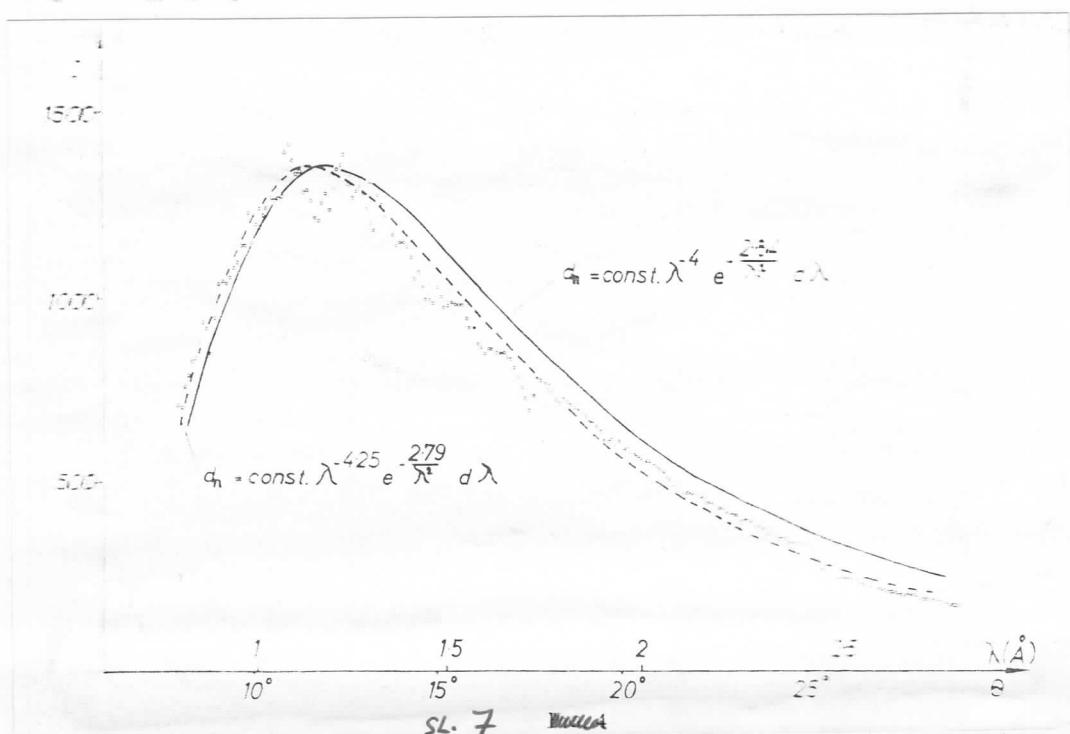


SL. 6

korišćen je monokristal cleva Pb /111/. Detektor neutrona BF_3 brojač spregnut je u rotaciji sa monokristalom cleva u odnosu 1:2

Ovaj odnos onogućava da se shodno Bragovom/W.L.Bragg/ zakonu $\lambda = 2d \sin \theta$ brojač nalazi uvek na nekefisnom mereno talasne dužine neutrona.

Konkretno, nerenjen broj neutrona na raznim uglovima kod već definisanog odnosa rotacija monokristala i detektora 1:2 i korišćenjem Bragove/S. L. Bragg/ relacije, ne prestavlja nikakav problem da se zavisnost broja neutrona od ugla θ prebači u zavisnost od talasne dužine λ ili, ako nam je to potrebno, energije, odnosno brzine neutrona.



Na slici (7) dat je izmeren spektar termalnih neutrona koji je korigovan za efikasnost brojača, za procenat refleksije višeg reda i reflektivnost monokristala-monokristal kada istu verovatnoću reflektovanja neutrona različitih talasnih dužina.

Ovaj spektar, kao što se vidi na slici, interpretiran je poznatom Maksvelovom/Maxwell/ raspodelom brzina koja je već data jednačinom / 15 /

$$N(v) dv = J(v) dv \cdot \epsilon(v) \rho_1 \cdot R \rho_2 \quad (17)$$

$$J(v) dv = \left(\frac{4\pi}{v_0^3} \sqrt{\pi} \right) v^3 e^{-\left(\frac{v}{v_0}\right)^2} dv$$

$N(v) dv$ - broj neutrona sa brzinama između v , $v + dv$

v_0 - srednja brzina u spektru

S obzirom da je osnovna karakteristika neutrona talasna dužina, prelazom na talasnu dužinu neutrona jednačina / 17 / dobija oblik:

$$dn = \text{const} \lambda^{-4} e^{-\left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2} d\lambda \quad (18)$$

dn - broj neutrona

λ - talasna dužina

λ_0 - srednja vrednost talasne dužine neutrona za dati spektar.

Metodom najmanjih kvadrata iz eksperimentalnih vrednosti isračunati su parametri Maksvelove raspodele. Raspodela je dobila novi analitički oblik:

$$dn = \text{const.} \lambda^{-4,25} e^{-\frac{2,79}{\lambda^2}} d\lambda \quad (19)$$

Ove vrednosti uporedjene su sa vrednostima izvirne Maksvelove /Maxwell/ - date jednačinom / 18 / u kojoj je $/ \lambda_0^2 /$ isračunato preko najverovatnije talasne dužine neutrona za datu temperaturu moderatora u uslovima potpune ravnoteže neutrona sa atomima moderatora.

$$dn = \text{const.} \lambda^{-4} e^{-\frac{2,84}{\lambda^2}} d\lambda \quad (20)$$

Iz razlike parametara jednačina /19/ i /20/ nadjeno je da za

$$\lambda_0 = 1,67 \text{ \AA}$$

odgovara temperatura $\approx T=341 \pm 10^\circ \text{ K}$

Stvarna merena temperatura moderatora za vreme eksperimenta bila je 335° K .

Ovako mala razlika temperature ukazuje na veoma dobru termalizaciju neutrona, a sasvim tim i na nali procenat brzih neutrona u neutronskim snopovima.

Na kraju želim da napomenem koje su oblasti korišćenja neutrona za ispitivanja u fizici kondenzovanih sistema u kojima su oni nezamenljivi:

Položaj lakih elemenata u strukturi i relativni položaj elemenata sa bliskim rednim brojevima.

Ovde je superiorija neutronска difrakcija nad X-difrakcijom jer je za X - zrake centar difrakcije elektronski omotač, dok je za neutronsku difrakciju centar difrakcije nuklearni potencijal jezgra atoma.

Nedostatak metode neutronске difrakcije je da mi još uvek nemamo dovoljno snažne neutronске snopove te je ova metoda znatno sporija od metode X - difrakcije.

Oblast magnetne strukture čvrstog tela je skoro isključiv domen difrakcije neutrona preko magnetne interakcije neutrona sa magnetnim momentima atoma.

Osim položaja magnetnog momenta u čvrstom telu metodom polarizacije odnosno depolarizacije neutronskog snopa, moguće je potpuno odredjivanje orijentacije vektora magnetnog momenta atoma u čvrstom telu.

Metoda X - difrakcije ovde nije uopšte primenljiva.

Osim ovoga, vrlo važna oblast istraživanja dinamike atoma u kondenzovanim sistemima, zatim mehanizmi prelaza iz jednog agregatnog stanja u druge takozvani fazni prelazi I reda, kao i mehanizmi faznih prelaza II reda kod kojih supstanca ostaje u istom agregatnom stanju, veoma uspešno se istražuju pomoću neelastičnog rasejanja neutrona.



L I T E R A T U R A

- N.A. Vlasov "Neutroni" Moskva 1971. godine
- I.I. Gurevič - L.V. Tarasov "Fizika neutrana niskih energija"
Moskva 1965. godine
- E.V. Špoljskij "Atomska fizika" - prevod - Beograd 1963.g.
- Friš "Kurs opšte fizike" -
- Dr. M.D. Živanović
- Dr. J.M. Konstantinović "Thermal neutron spectrum
measurements from the Yugoslav
heavy-water reactor"
Journal of Nuclear Energy Parts
A/B 1966.
- Dr. D.M. Jović