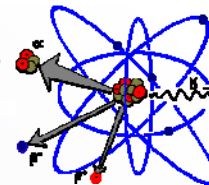
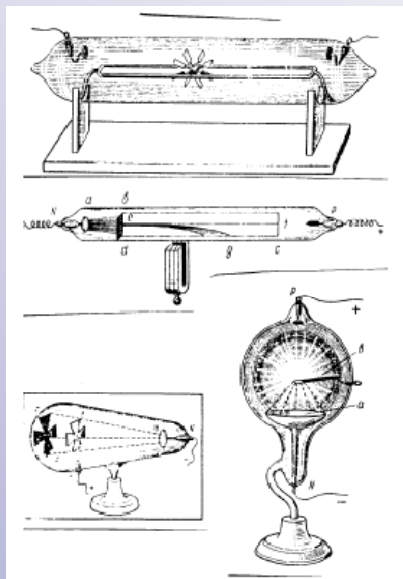


Otkriće prirodne radioaktivnosti

Radiohemija i nuklearna hemija



Kruksove cevi



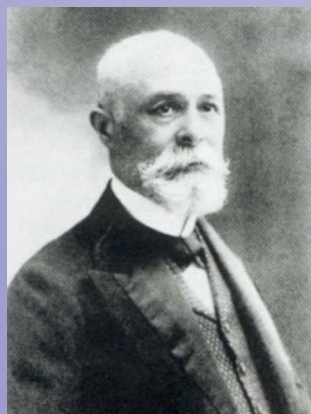
Sir Wiliam Crookes
1832-1919

Rentgen

[Wilhem Konrad Rontgen,
1845-1923]

Iz Kruksovih cevi se emituje
prodorno zračenje
Otkriće X-zraka - 1895

Prva Nobelova nagrada
za fiziku – 1901



Anri Bekerel

[Henri Antoine Becquerel,
1852-1908]

fosforescencija i X-zračenje
Uranijum spontano emituje
zračenje koje izaziva zacrnjenje
fotoploče - 1896



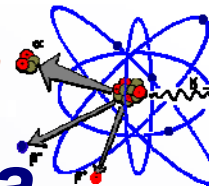
Marija Kiri

[Marie Curie, (Manya
Skodlowska), 1867-1934]

Izolovanje radioaktivnih
potomaka uranijuma

1898 – Polonijum
1902 - Radijum

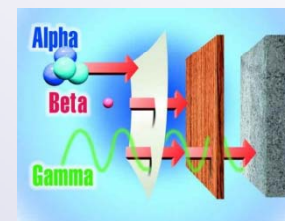
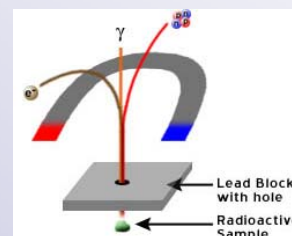
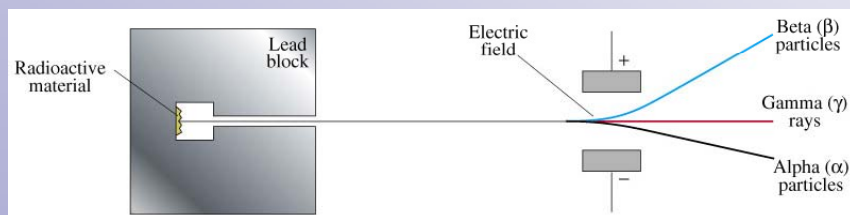
A.Bekerel, M.Kiri, P.Kiri Nobelova nagrada za fiziku – 1903



Od radioaktivnosti do strukture atoma

Pitanja nakon otkrića radioaktivnosti

Priroda zračenja?



Koje supstancije (elementi) emituju?

Ima ih puno, ali ne svi. Zašto?

Koji proces dovodi do emisije?

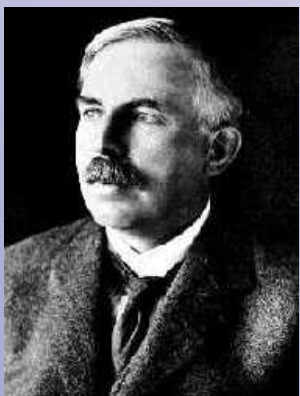
Pjer Kiri: 1 gram Ra oslobađa oko 140 cal/h
(100 000 puta više od sagorevanja vodonika)

Perpetum mobile? Ne, $E=mc^2$ (1906, Ajnštajn)

Kakva je struktura atoma?

Šta je bilo poznato?

1. Atom je neutralan
2. U atomu postoje elektroni

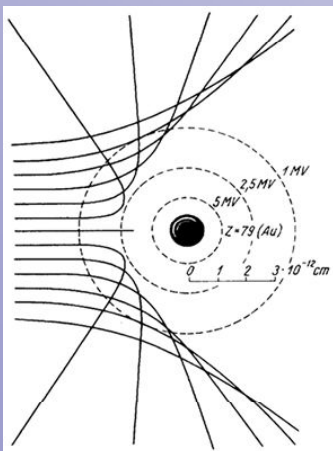


Rutherford, 1907

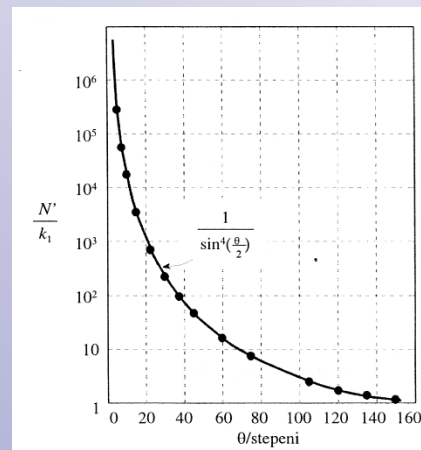
[Ernest Rutherford, 1st Baron Rutherford of Nelson, 1871-1937]

Rasejanje alfa čestica na foliji zlata

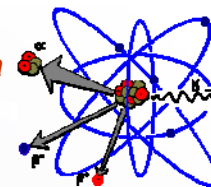
Nobelova nagrada za hemiju (!) - 1908



Teorija rasejanja
i eksperimentalna
potvrda



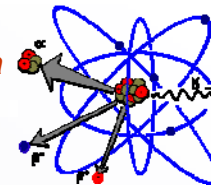
Radiohemija i nuklearna hemija



‘Celokupna’ masa atoma je koncentrisana u malom pozitivno naelektrisanom jezgru



Bor Šredinger Gamov



Model jezgra 1920-1930

- Jezgro (protoni + elektron, uz višak protona)
- Omotač – elektroni (Bor, Šredinger,.....)

Model uzima u obzir sve do tada poznate čestice i napravljen je u skladu sa činjenicom da atom mora da bude neutralan, a da pri tom jezgro mora da bude pozitivno naelektrisano.

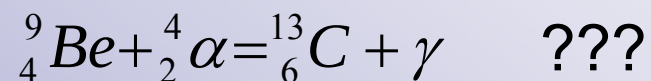
Glupavo?

Možda, ali je Gamov 1928. god. na osnovu takvog modela (tj. pogrešna struktura jezgra i pogrešna struktura alfa čestice) objasnio alfa raspad jezgra koji sa manjim modifikacijama važi i danas.

Raderford (oko 1920) – trebalo bi da postoji čestica mase protona i nultog naelektrisanja?!

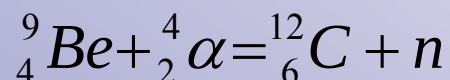
Otkriće neutrona

Ozračivanje meta lakih metala snopom alfa čestica prouzrokuje pojavu prodornog zračenja



Čedvik (1932)

[Sir James Chadwick, 1891 – 1974]



U reakciji se izbacuju čestice koje ne jonizuju (neutroni), ali iz parafina izbacuju čestice slične mase koje jonizuju (protoni iz parafina)

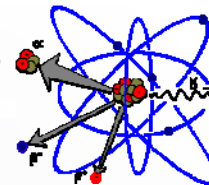
Raderford (oko 1920. god): 'U jezgru bi trebalo da postoji čestica koja je čvrsta asocijacija elektrona i protona (nulto naelektrisanje i masa slična protonu) i koja bi bila bolji gradivni element jezgra nege razdvojeni protoni i elektroni'

Sastav jezgra: protoni i neutroni koji u jezgru zadržavaju svoje osobine

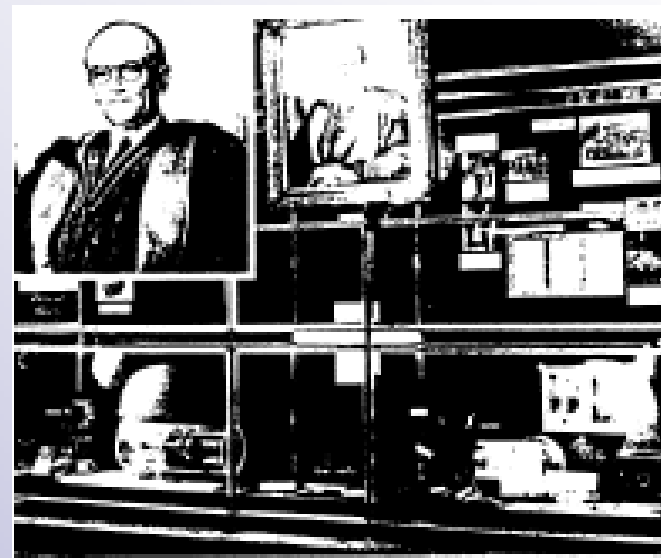
Sastav materije: protoni, neutroni i elektroni.

Da li je to sve?

Radiohemija i nuklearna hemija



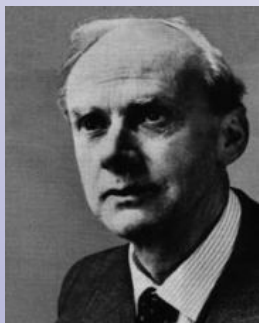
Vitrina koja komemorira Čedvikovo otkriće neutrona (slika autora i aparatura; Kembridž)



Nobelova nagrada za fiziku, 1935

Novi učesnici

Pozitron (elektron pozitivnog naelektrisanja)

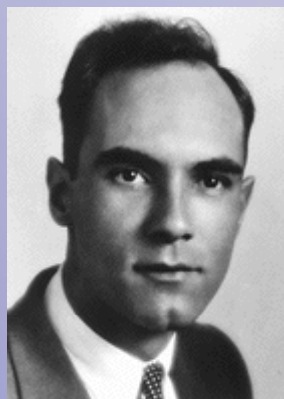


Dirak

[Pul Adrien Maurice Dirac, 1902-84]

Relativistička kvantna mehanika (1930)
Stanja 'negativne energije' elektrona
(anti-materija) i kreiranje para $e^- e^+$

P.A.M.Dirak i E.Šredinger
Nobelova nagrada za fiziku - 1933

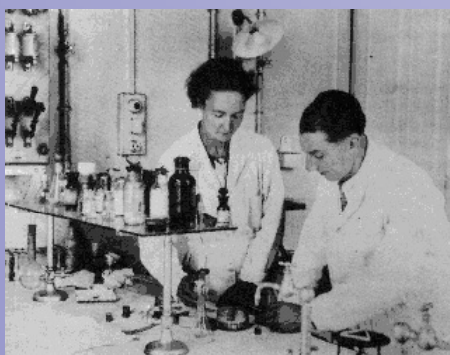


Anderson

[Carl David Anderson, 1905-91]

Čestica koju kosmičko zračenje indukuje
ima sve osobine elektrona, ali je
naelektrisanje suprotnog znaka

C.D.Anderson i V.M.Hes
Nobelova nagrada za fiziku - 1936

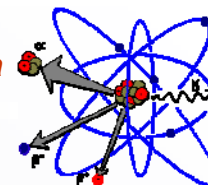


Irena i Frederik Žolio-Kiri

Veštačka radioaktivnost
Pozitronski beta raspad

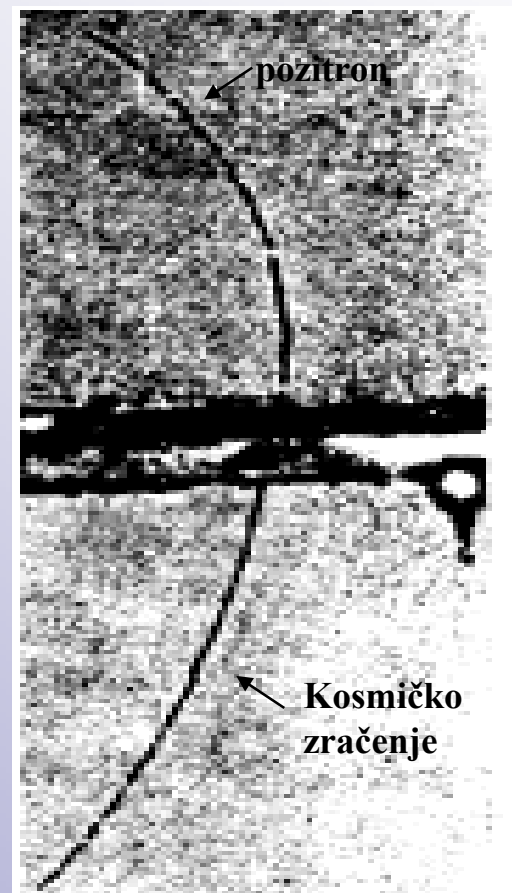
Nobelova nagrada za hemiju - 1935

Radiohemija i nuklearna hemija



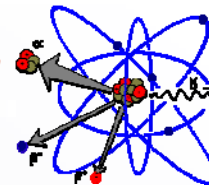
Otkriće pozitrona

Fotografija traga čestice u Vilsonovoj
komori u magnetnom polju normalnom
na ravan slike



Novi učesnici neutrino ('neutronče')

Radiohemija i nuklearna hemija



Wolfgang Pauli

[1900 – 58]

Sin profesora fizičke hemije na Univerzitetu u Beču



Nobelova nagrada za fiziku - 1945

Pismo upućeno učesnicima konferencije o radioaktivnosti:

Dragi radioaktivni

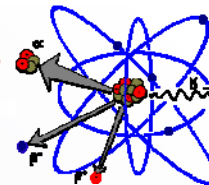
...Proces beta raspada pri kome beta čestica (elektron) nosi proizvoljnu energiju (kontinualni spektar energija) se ne slaže sa kvantiranjem energijskih prelaza

....u procesu beta raspada mora da učestvuje i jedna mala neutralna čestica koja nosi deo energije raspada kako bi se dopunila energija kvantnog prelaza....

Neutrino je detektovan 20-ak godina nakon Paulijeve tvrdnje, ali su autoritet Paulija i zdrava logika učinili da u međuvremenu bude prihvaćen i bez eksperimentale potvrde.

Radioaktivni raspad i struktura jezgra

Radiohemija i nuklearna hemija



Lista učesnika

Jezgro atoma kao izvor (protoni, neutroni i)

Emitovane čestice:

Alfa ($2p+2n$),

Beta (elektron ili pozitron),

Gama (e.m. zračenje),

neutrini (neutralne čestice, masa ?)

Osnovno pitanje:

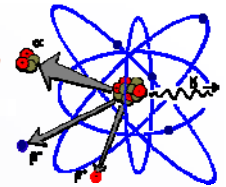
Da li se čestice koje se emituju u radioaktivnom raspadu prethodno nalaze u jezgru?

Odgovor:

1. Alfa čestice ($2p+2n$) postoje u jezgru i emisija alfa čestica se može smatrati kao 'izbacivanje viška'
2. Elektroni, pozitroni i neutrini ne postoje u jezgru i kreiraju se u toku transformacija jezgra u stabilnije stanje
3. Gama čestice – nalaze se u jezgru, ali ne kao posebne čestice nego kao višak energije koji se emituje u toku transformacije

Stabilnost protona

Radiohemija i nuklearna hemija



Postulat: radioaktivnost jezgara je posledica debalansa u sastavu jezgra, a ne inherentne nestabilnosti konstituenata (protoni i neutroni)

Pitanje: Postulat je OK, ako pretpostavimo da se vezani neutron nekako stabilizuje unutar jezgra u interakciji sa protonima. A šta ako je i proton nestabilan ('radioaktivan') tj. kako je moguće da dve nestabilne čestice obrazuju stabilno jezgro?

Da li je proton stabilan i kako se to može dokazati?

Mogući raspad slobodnog protona $p^+ \rightarrow e^+ + \gamma$

Raspad je u skladu sa osnovnim zakonima održanja (naelektrisanje i impuls), ali nije u skladu sa održavanjem barionskog broja (fizika elementarnih čestica kaže da se barioni ne mogu pretvarati u fermione). OK, ali barionski broj je nemerljiva osobina.

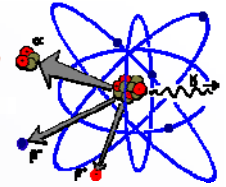
Ekperimentalni dokazi o stabilnosti ili makar izuzetnoj dugovečnosti protona:

1. Zdravorazumski – letalna doza jonizujućeg zračenja od protona u ljudskom telu bi se postigla ako bi se proton raspadao sa $t_{1/2}$ od oko 10^{17} godina (starost svemira 5×10^{10} god.)
2. Supekamiokande – rudnik u Japanu napunjen sa puno vode i 11000 detektora zračenja
Raspad protona nije registrovan – ako se i raspada $t_{1/2} > 10^{33}$ godina

Opšti zaključak: za sve 'svakodnevne' potrebe proton se može smatrati kao stabilna čestica i radioaktivnost kao posledica debalansa u sastavu jezgra, a ne kao inherentno svojstvo materije. Pitanje stabilnosti protona je više filozofsko, nego radiohemijsko.

***Sile koje drže neutrone i protone na
okupu u jezgru
-sastav jezgra i nuklearne sile-***

Radiohemija i nuklearna **hemija**



Isključivanje elektrona iz jezgra je definitivno isključilo mogućnost da elektrostatičke sile drže na okupu sastavne delove jezgra (ustvari su smetnja stabilnosti jezgra).

Pitanje:

Da li bi jezgro sastavljeno od neutrona bilo stabilnije od jezgra sastavljenog od protona i neutrona?

Odgovor:

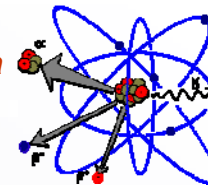
Da, jer bi se izbegao negativan uticaj elektrostatičkog odbijanja protona po stabilnost, ali to onda ne bi moglo da bude jezgro atoma.

Zašto?

Nedostak naelektrisanja u jezgru = nema privlačenja elektrona
Atom mora imati i elektrone inače nije atom i onda nema mogućnosti stvaranja
kompleksnih struktura
Rezultat odsustva protona = kolaps materije = neutronske zvezde

***Sile koje drže neutrone i protone na
okupu u jezgru
-poreklo nuklearnih sila-
'defekt' mase***

Radiohemija i nuklearna **hemija**



Pitanje:

Da li rana pretpostavka o poreklu energije za radioaktivni raspad (pretvaranje mase u energiju, $E = mc^2$) može da objasni i činjenicu da jezgra uopšte postoje unatoč elektrostatičkom odbijanju protona?

Ogovor: Da, a pri tom postoji i eksperimentalni dokaz:

Masa protona	1,008142
Masa neutrona	1,008982
Masa jezgra deuterijuma (proton + neutron)	2,014735
Razlika	0,002389

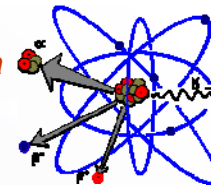
Energija oslobođena pri ukupnoj transformaciji protona ili neutrona u energiju
Atomska jedinica mase 1 a.j.m. = 931 MeV

1g U (fisija)	=	puno tona uglja
Nuklearna $E = mc^2$ energija		Hemija

Struktura jezgra

sile koje drže neutrone i protone na okupu

Radiohemija i nuklearna hemija



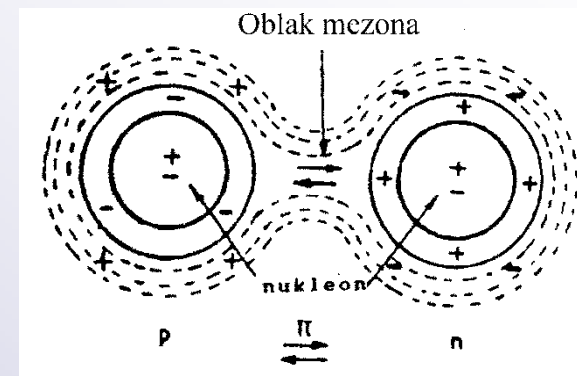
Analogija sa H_2^+ - jedan elektron 'drži na okupu' dva protona

Jukava

[Hideki Yukawa, 1907-81]



Nuklearne sile se ostvaruju preko razmene neke čestice između protona i neutrona (1935. god.)



Procena mase

Čestica deluje na nukleone unutar jezgra – domet sila oko $r = 1,2 \text{ fm}$
Ne može da se kreće brže od svetlosti – neodređenost vremena $t = r/c$

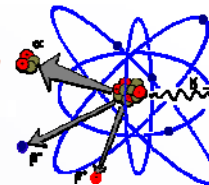
$$E = mc^2 = \frac{h}{t} = 6,5 \cdot 10^{-22} \text{ MeVs} / 0,4 \cdot 10^{-23} \text{ s} \approx 150 \text{ MeV}$$

Masa je između protona i elektrona = mezoni

Nobelova nagrada za fiziku - 1949

Jukavina čestica (π – mezon, masa) je nađena 1947 u kosmičkom zračenju na velikim visinama

Mala zamka: π mezoni u kosmičkom su realni, a Jukavini virtuelni, odnosno intermedijarni bozoni (vidi elementarne čestice)



Modeli jezgra

Šta je merljivo?

Masa, veličina, sastav

Stabilnost

Spin – magnetni momenat

Koje se još osobine se moraju uzeti u obzir?

Periodičnost nuklearnih osobina

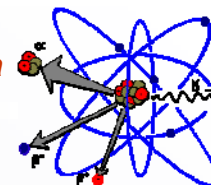
Osnovno i pobuđeno stanje – nuklearne reakcije

Literatura

Arnika *Osnovi nuklearne hemije*

Macura i Radić-Perić *Atomistika*

Osobine nukleona i jezgara



■ Poluprečnik jezgra

- Raspodela materije
- Raspodela naelektrisanja
- Domet nuklearnih sila

Gustina materije u jezgru je konstantna

$$\rho \propto \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

A=maseni broj,
R=poluprečnik jezgra
 r_0 =jedinični poluprečnik jezgra

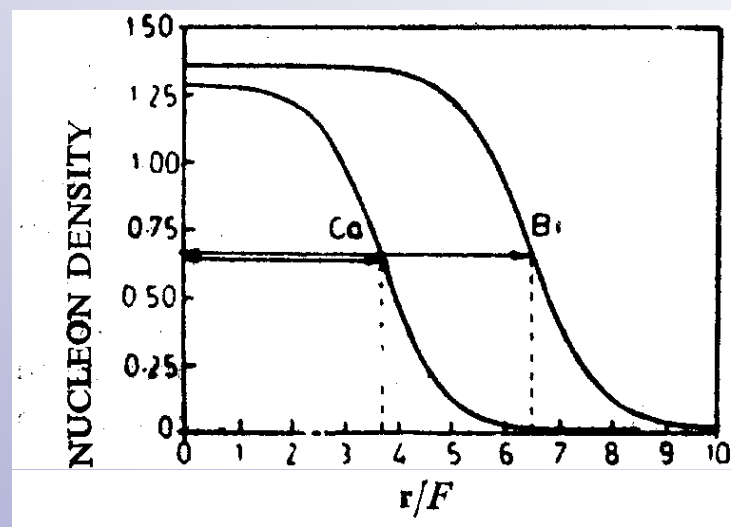
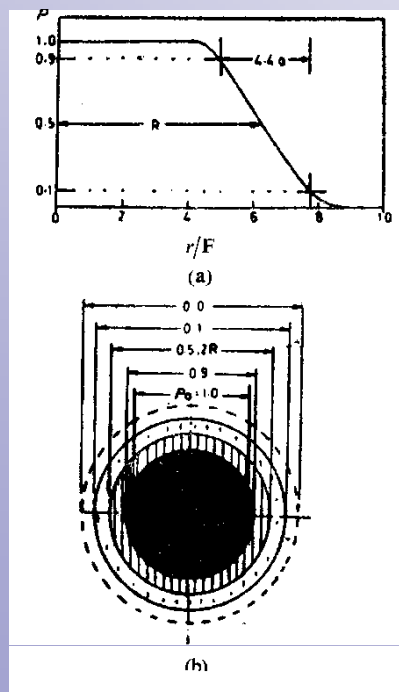
$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

Poluprečnik jezgra (R)

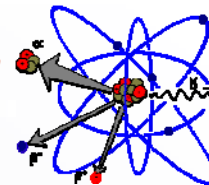
rastojanje od centra
gde je $\rho = 0,5 \rho_0$

Površina jezgra

oblast između $\rho = 0,9\rho_0$
i $\rho = 0,1 \rho_0$



Osobine nukleona i jezgara



Određivanje r_0 :

1. Metode koje (prevashodno) zavise od kulonskih interakcija, npr. rasejavanje visokoenergetskih elektrona i ispitivanje ugaone raspodele:

$$r_0 = 1,28 F \text{ za } A \text{ manje od } 50$$

$$r_0 = 1,21 F \text{ za } A \text{ veće od } 50$$

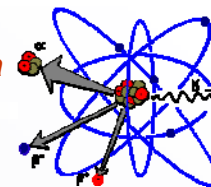
2. Metode koje zavise i od nuklearnih sila

-rasejavanje visokoenergetskih protona i α čestica

-rasejavanje brzih neutrona

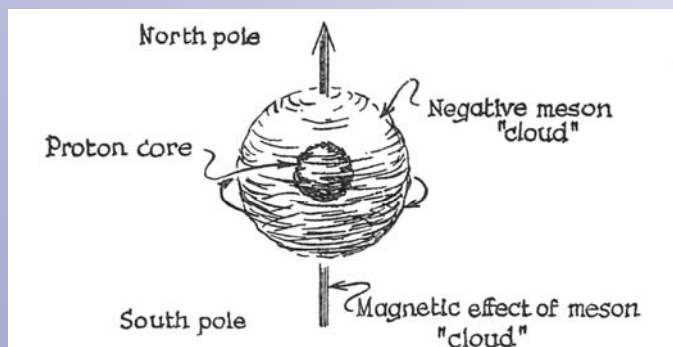
$$r_0 = 1,33 - 1,48 A$$

Osobine jezgra spin



- Proton i neutron imaju spin $\frac{1}{2}$ što se može zaključiti iz merenja magnetnog momenta
- Magnetni momenti neutrona i protona su u suprotnom smeru u magnetnom polju

Problem: Kako je moguće da neutron ima magnetni momenat, ako magnetni momenat potiče od rotiranja naelektrisane čestice oko sopstvene ose (spin)?



Pokušaj objašnjenja magnetnog momenta neutrona u duhu Jukavine teorije gde je neutron shvaćen kao jezgro od protona okruženo oblakom negativnih mezona

Naravoučenije: Spin (i pripadajući magnetni momenat) je osobina svake elementarne čestice (kao što su i masa i naelektrisanje) i nema nikakve veze sa kretanjem u prostoru.

Objašnjenje spina nukleona – kvark struktura nukleona

Proton – uud Neutron - udd

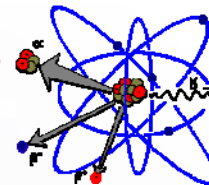
	naelektrisanje	spin
u	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
d	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$

Spin jezgra je zbir spinova nukleona uz poštovanje Paulijevog principa isključenja i kvark struktura nukleona nije bitna kod modela jezgra

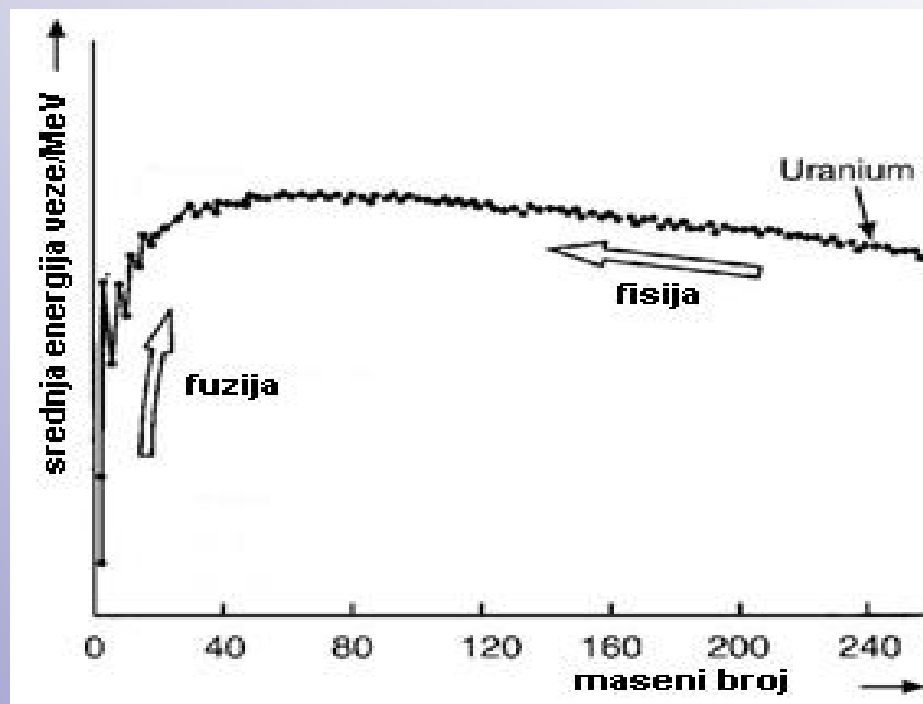
Sastav jezgra i nuklearne sile

Energija veze po nukleonu

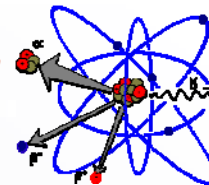
Radiohemija i nuklearna **hemija**



Energija veze po nukleonu $B_{\sigma p} = B/A$



Ključna tema i test svih modela jezgra:
Zašto kriva izgleda ovako i kako objasniti periodične diskontinuitete?



Periodičnost nuklearnih osobina

Magični brojevi - nuklearne osobine se periodično menjaju i svaki period se završava kada je broj protona ili neutrona jednak 2,8,20,50,82,126.

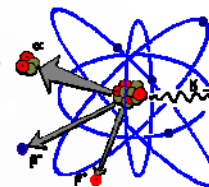
(nešto nalik na periodni sistem elemenata?)

Eksperimentalno određene nuklearne osobine

1. Sparivanje nukleona i stabilnost jezgara

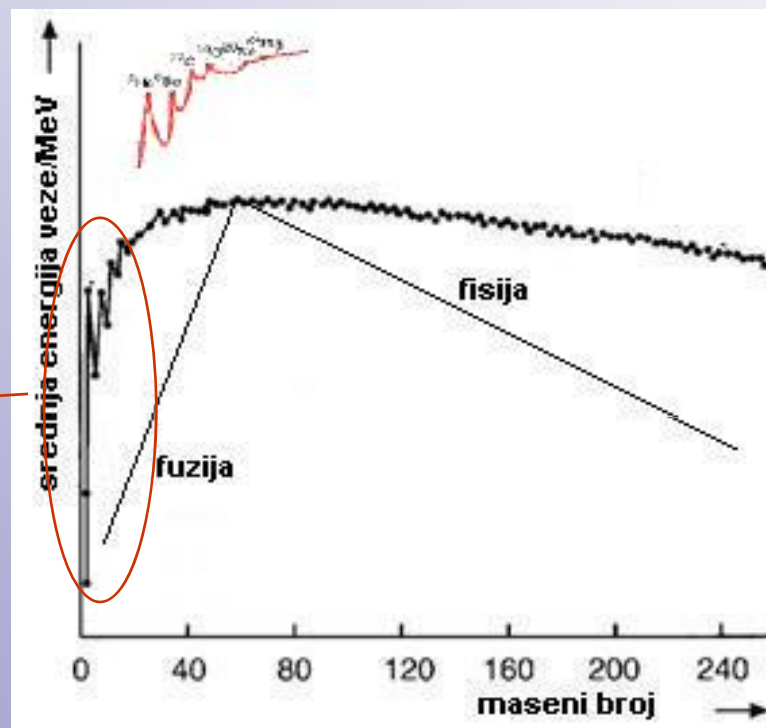
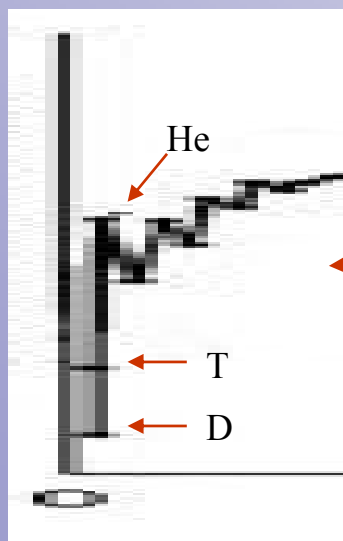
- a) Jezgra sa parnim Z i parnim N su najobilnija među stabilnim izotopima u prirodi (165 od 274).
- b) Elementi parnog Z imaju tri izotopa, a elementi neparnog Z samo jedan (pravilo važi do ^{35}Cl)
- c) Najteži stabilni nuklid u prirodi je ^{209}Bi (126 neutrona)
- d) Stabilni proizvod svih prirodnih nizova je Pb (82 protona), a svih veštačkih ^{209}Bi (126 neutrona).

Eksperimentalno određene nuklearne osobine u okolini magičnih brojeva



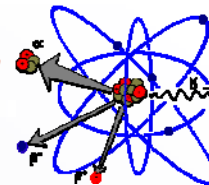
2. Energija veze po nukleonu

Funkcija B/A vs. A ima maksimume kod magičnih vrednosti Z ili N , koji su naročito izraženi kod dvostruko magičnih nuklida:



Eksperimentalno određene nuklearne osobine u okolini magičnih brojeva

Radiohemija i nuklearna hemija



(3) Prirodna obilnost

Najobilniji nuklidi u prirodi (zemaljsko ili kosmičko poreklo) su oni sa magičnim ili dvostruko magičnim brojem:



Odstupanja za nuklide $A < {}^{19}\text{F}$ (prestelarna faza nukleosinteze)

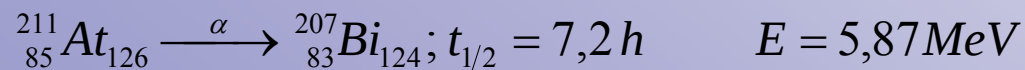
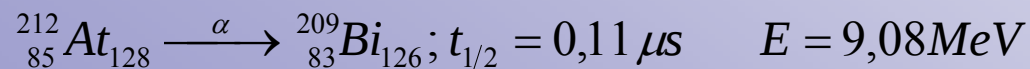
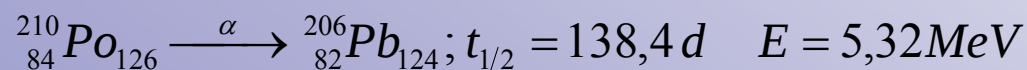
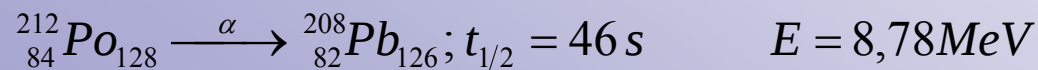
(4) Broj stabilnih izotopa nuklida u okolini magičnih brojeva

Oblast oko magičnog Z	Magični broj -1	Magični broj	Magični broj +1
Kalcijum (20)	${}_{19}\text{K}$: 2	${}_{20}\text{Ca}$: 6	${}_{21}\text{Sc}$: 1
Kalaj (50)	${}_{49}\text{In}$: 2	${}_{50}\text{Sn}$: 10	${}_{51}\text{Sb}$: 2
Olovo (82)	${}_{81}\text{Tl}$: 2	${}_{82}\text{Pb}$: 4	${}_{83}\text{Bi}$: 1

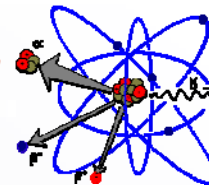
(5) Alfa - raspad

Geiger-Nuttal-ovo pravilo ($E_\alpha \approx 1/t_{1/2}$)

Jezgra čiji α - raspad proizvodi potomka koji ima magični broj nukleona (N ili Z) je favorizovan (kraće $t_{1/2}$) u odnosu na raspad koji potomka udaljuje od magičnog broja



Eksperimentalno određene nuklearne osobine u okolini magičnih brojeva



(6) Beta - raspad

Energija β - čestica je visoka, a $t_{1/2}$ kratko kod raspada čiji potomak ima N ili Z jednak jednom od magičnih brojeva ('analogija' sa Geieger –Nutall-ovim pravilom)

(7) Efikasni presek za apsorpciju neutrona (skolonst jezgra da primi dodatni neutron)

$N = \text{magični broj } -1 \rightarrow \text{visoko } \sigma$

$${}^{88}_{38}\text{Sr}_{50} \quad 5,8 \cdot 10^{-3}$$

$${}^{87}_{38}\text{Sr}_{49} \quad 16$$

$N = \text{magični broj} \rightarrow \text{nisko } \sigma$

$${}^{136}_{54}\text{Xe}_{82} \quad 0.16$$

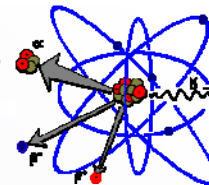
$${}^{135}_{54}\text{Xe}_{81} \quad 2,65 \cdot 10^6$$

(8) Energija odvajanja neutrona iz jezgra

Energija odvajanja (uklanjanja) neutrona iz jezgra preko (γ, n) reakcije (jedan od najboljih načina da se odredi energija veze neutrona u jezgru)

Prag reakcije = 7,38 MeV za ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ (dvostruko magični nuklid)

Prag reakcije = 3,78 MeV za ${}^{209}_{82}\text{Pb}_{127}$ ($N = \text{magični broj} + 1$)



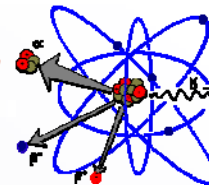
Modeli jezgra

Sve prethodno navedene osobine ukazuju na mogućnost da se jezgro može modelirati slično atomu, ali jezgra imaju i nezgodnu naviku da se spontano raspadnu (i u nuklearnim reakcijama), što se nikad ne događa sa atomima.

Model ljuske

model zatvorenih ljuski ili model nezavisnih čestica

Radiohemija i nuklearna hemija



Osnovni motiv za razvoj modela je pokušaj objašnjavanja prirodičnosti nuklearnih osobina po analogiji sa periodnim sistemom i osobinama atoma.

Maria Goeppert-Mayer i J.H.D. Jensen Nobelova nagrada za fiziku - 1963

Nezavisno n-n i p-p sparivanje

Kapacitet ljuske je određen kvantno mehaničkim pravilima i Paulijevim principom isključenja

Kvantni brojevi nukleona

Glavni i radijalni kvantni brojevi (n i ν) – mala uloga jer polje nije ni kulonsko ni centralno

Orbitalni momenat impulsa (l) $l = 0, 1, 2, 3, \dots$

Sprezanja momenata:

LS – nezavisno sparivanje l -ova i s -ova

Spin-orbitno ili j - j

Spinski moment impulsa (s) $s = 1/2$

Ukupni spin jezgra

Ukupni moment impulsa (j) $j = l + (-) s$

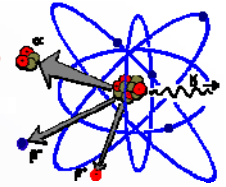
$l = 0$ parno-parna

$l = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$ neparno A

Magnetni broj m_j

$l = 1, 2, 3, \dots$ neparno-neparna

Model Ijuski



(1) Nuklearni potencijal

‘Orbitala’ nukleona je određena nuklearnim potencijalom koji potiče od usrednjene interakcije svih nukelona.

Oblici nuklearnog potencijala
način promene potencijala u zavisnosti od rastojanja od centra jezgra:

(a) *Potencijal pravouglole jame* $V(r) = -V_0 (r \leq R)$ $V(r) = 0 (r \geq R)$

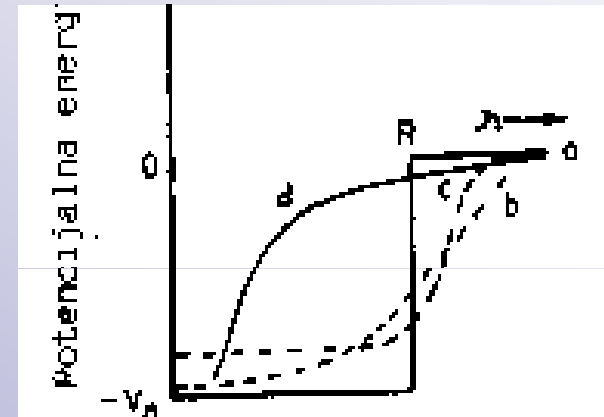
R – poluprečnik jezgra i zavisi od raspodele naelektrisanja

(b) *Potencijal harmonijskog oscilatora*

$$V(r) = V_0 + \frac{1}{2} M \omega^2 r^2 \quad E_n = (N + 3/2) h \omega$$

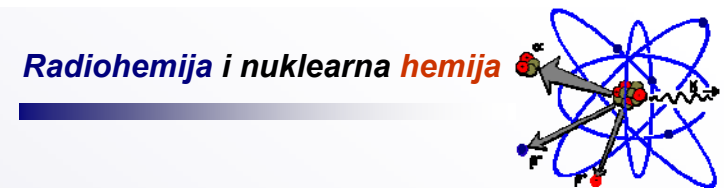
(c) *Potencijal Yukawa-e* $V(r) = V_0 \frac{e^{-\mu r}}{\mu r}$

(d) *Potencijal Woods-Saxona* $V(r) = \frac{-V_0}{1 + e^{(r-R)a}}$



Model ljuske

Energetski nivoi u nuklearnoj potencijalnoj jami i popunjavanja orbitala



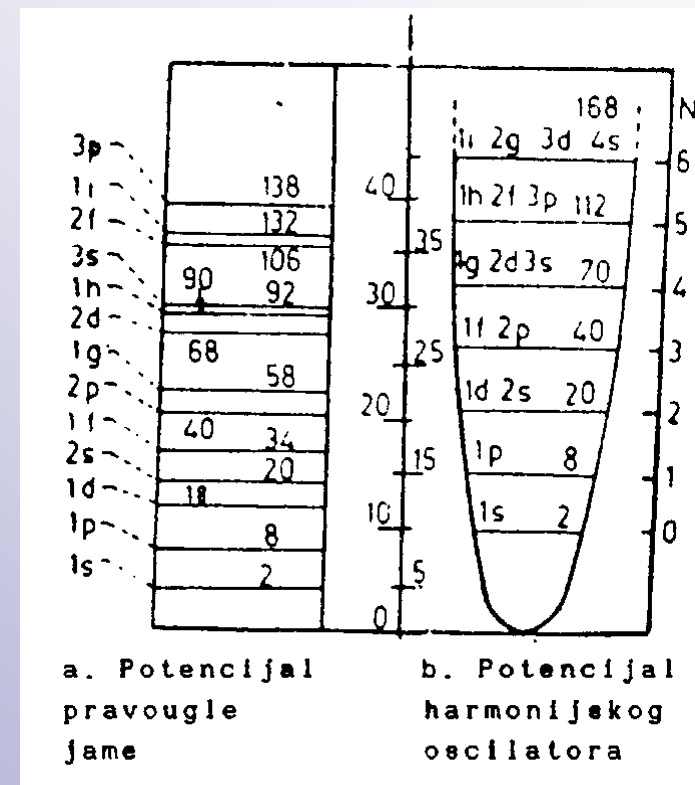
Eksperimentarno određena dubina potencijalne jame je 35-50 MeV za neutrone, a za protone je za oko 5 MeV manja (kulonsko odbijanje). Energija potrebna za izbacivanje n ili p iz jezgra (npr. fotonuklearne reakcije) ne prelazi 8 MeV.

Pravougaona potencijalna jama

- Energetski nivoi su na nejednakom rastojanju, koje se sužava na višim energijama.
- Popunjeni nivo sa $2(2l+1)$ nukleona je zatvorena ljuska (2, 8, 18, 20, 34, 40, 58, 68, 90, 92, 106, 132, 138).

Harmonijski oscilator

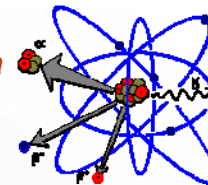
- Ravnomerno rastojanje između energetske nivoa broj nukleona u zatvorenim ljuskama je 2, 8, 20, 40, 70, 112, 168.



Model ljuske

Energetski nivoi u nuklearnoj potencijalnoj jami i popunjavanja orbitala

Radiohemija i nuklearna **hemija**



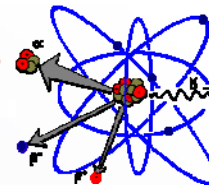
Spin-orbitalno sprezanje

- Spin-orbitalno sprezanje uključuje *necentralnu* komponentu sile koja zavisi od relativne orijentacije orbitnog i spinskog momenta.
- Svaki nivo se cepa na dva podnivoa $j = l \pm 1/2$ i relativni energetski procep raste sa porastom l .
- Dolazi do preklapanja (ukrštanja) nivoa za visoke vredosti l .
- Ljuske se zatvaraju na magičnim brojevima.

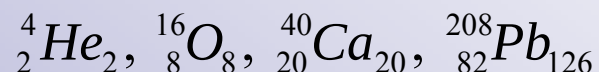
Ljuska	Nivo	Ukupni kapacitet nivoa	Energetski nivo neutrona (MeV)	Energetski nivo protona (MeV)
I	$1s_{1/2}$	Z = 2 (He)	41,63	32,72
II	$1p_{3/2}$	6 (C)	38,80	29,53
	$1p_{1/2}$	8 (O)	37,44	29,02
III	$1d_{5/2}$	14 (Si)	33,29	25,42
	$1s_{5/2}$	16 (S)	32,40	24,22
	$1d_{3/2}$	20 (Ca)	31,18	22,36
IV	$1f_{7/2}$	28 (Ni)	28,20	20,62
	$2p_{3/2}$	32 (Ge)	26,52	18,43
	$1f_{5/2}$	38 (Sr)	25,05	16,36
	$2p_{1/2}$	40 (Zr)	24,31	15,47
	$1g_{5/2}$	50 (Sn)	22,62	13,23

Tipovi jezgara na osnovu modela ljuski

Radiohemija i nuklearna hemija

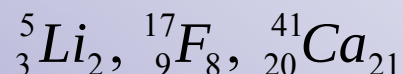


(1) jezgra sa zatvorenim ljuskama



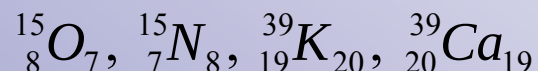
dvostruko magična jezgra analogna nultoj grupi periodnog sistema elemenata

(2) jednočestična jezgra



jezgra kod kojih je broj n ili p magičan, a broj drugih za jedan veći od magičnog – analogno alkalnim metalima

(3) jezgra sa jediničnom šupljinom



jezgra kod kojih nedostaje jedan nukleon do zatvorene (magične) ljuske - analogno halogenim elementima

Prednosti modela ljuski

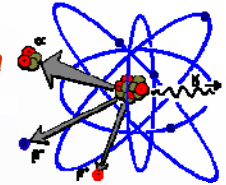
(1) Objašnjavanje periodičnosti nuklearnih osobina

(2) Predviđanje ukupnog momenta impulsa (spina), parnosti i magnetnog momenta jezgra

- Spin i parnost jezgara sa neparnim A su određene vrednostima j nesparenog nukelona i određuju ponašanje jezgra u celini (laka jezgra)
- Odstupanja od pravila kod teških jezgara (predviđeni spin od $13/2$) se mogu objasniti ukrštanjem (hibridizacijom nivoa)

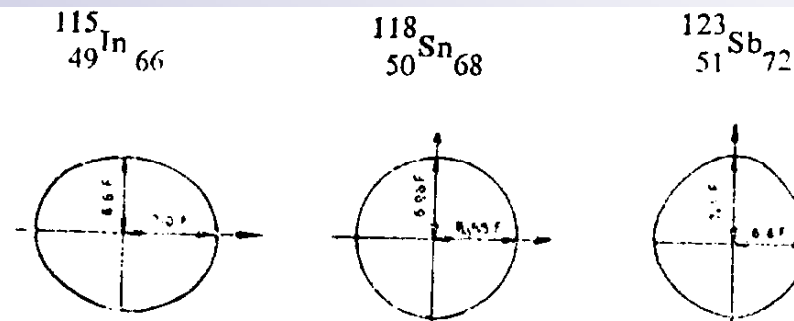
(3) Objašnjenje nuklearne izomerije

- Dug "život" izomera je posledica zabrane prelaza kada se nivoi razlikuju po spinu



(4) Električni kvadrupolni moment jezgra

- Popunjene ljuske $Q = 0$
- Manjak nukleona u odnosu na popunjenu ljusku $Q < 0$
- Višak nukleona u odnosu na popunjenu ljusku $Q > 0$

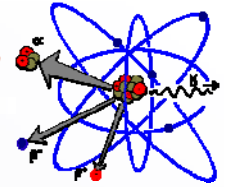


Slika 2.23 Promene oblika jezgra oko magičnog broja protona. Razmera nije proporcionalna.

Tablica 2.6

	Izduženi elipsoid	Sfera	Spljoštjeni elipsoid
Z	50-1	50	50+1
Q/b	+1,16	0	-1,20
ϵ	+0,056	0	-0,053
I	9/2(+)	0	7/2(+)
μ/μ_N	+5,50	0	+ 2,54

Model tečne kapi



Razvijen da bi se objasnile nuklearne reakcije
(prevashodno fisija termalnim neutronima)
N. Bohr i J.A.Wheeler - 1939

Analogije osobina jezgra sa osobinama kapi tečnosti:

(1) **Veliki broj čestica** (model važi za teška jezgra)

(2) **Nestišljivost i homogenost**

gustina, naelektrisanje i ostale osobine su konstantne unutar kapi (jezgra), a zapremina je proporcionalna masi (broju nukleona):

$$R=r_0 A^{1/3}$$

(3) **Sila između čestica ne zavisi od njihove prirode (idealni rastvor)**

$$f_{n-n} = f_{n-p} = f_{p-p}$$

(4) **Sile interakcije su kratkog dometa i imaju karakter zasićenja**

Energija interakcije $\propto A$, a ne $\propto A(A-1)$

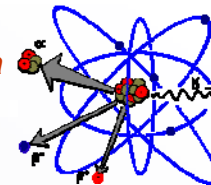
(5) **Površinski napon**

(6) **Statistička raspodela energije ekscitacije (upadna čestica) i deekscitacije (proizvodi reakcije)**

Formiranje *složenog* jezgra (upadna čestica + jezgro), brza raspodela energije na sve čestice (nukleone), vreme trajanja = 10^{-21} - 10^{-17} s.

Deekscitacija: emisija γ zračenja (kod kapi tečnosti se emituje toplota), emisija jednog ili više nukleona (isparavanje čestica), fisija (raspad kapi na dve ili više).

Prednosti modela tečne kapi



- objašnjava ponašanje jezgara u pobuđenom stanju
- objašnjava mehanizam niskoenergetskih nuklearnih reakcija i fisije
- daje osnovu za izračunavanje energije veze nukelona u jezgru

Poluempirijska jednačina mase jezgra

Weizsacker-ova jednačina: $B_{\text{ukupna}} = B_{\text{v(zapreminska)}} + B_{\text{s(površinska)}} + B_{\text{c(kulonska)}} + B_{\text{a(asimetrije)}} + B_{\text{p(sparivanja)}}$

(1) Zapreminska energija

Najznačajniji pozitivni član koji potiče od međusobnog privlačenja nukleona. Ima karakter zasićenja i zavisi od zapremine jezgra:

$$B_v = a_v A \quad a_v = 14,1 \pm 0,2 \text{ MeV}$$

(2) Površinska energija

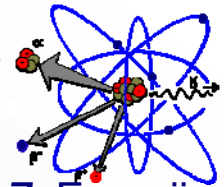
Analogno sa površinskim naponom, zavisi od površine jezgra, tj. od odnosa broja nukleona na površini u odnosu na broj u unutrašnjosti:

$$B_s = -a_s A^{2/3} \quad a_s = 13,0 \pm 0,1 \text{ MeV}$$

(3) Kulonska energija

Negativni doprinos ukupnoj energiji usled odbijanja protona:

$$B_c = -\frac{3}{5} \frac{Z(Z-1)e^2}{r_0 A^{1/3}} = -a_c Z(Z-1)A^{-1/3} \quad a_c = 0,595 \pm 0,02 \text{ MeV}$$



(4) Energija asimetrije ili energija viška neutrona

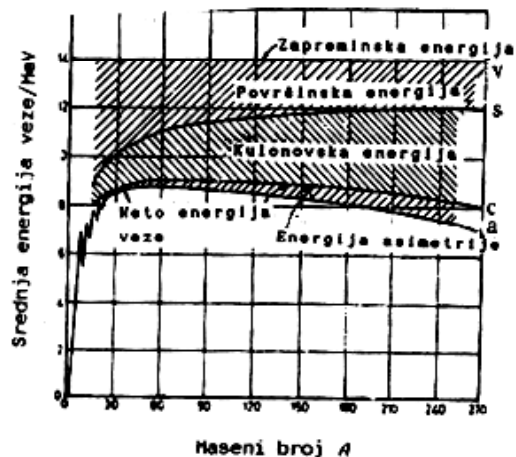
Negativni doprinos zbog asimetrije kod jezgara sa $A > 40$, tj. kod jezgara kod kojih je $N > Z$. Energija veze je maksimalna kada je $N = Z = A/2$, a sa porastom asimetrije ($N - Z$) opada energija veze.

$$B_a = a_a(N - Z)^2 A^{-1} = a_a(A - 2Z)^2 A^{-1} \quad a_a = 19,0 \pm 0,9 \text{ MeV}$$

(5) Energija sparivanja

Doprinos može biti pozitivan kod kompletnog $n - n$ i $p - p$ sparivanja ili negativan ako su p i n nespareni:

$$B_p = \pm a_p A^{-1} \begin{cases} + \text{parno } Z, \text{ parno } A \\ - \text{neparno } Z, \text{ neparno } A \end{cases} \quad a_p = 135 \text{ MeV} \quad B_p = 0 \quad \text{za neparno } A$$



3.8 Energija veze po nukleonu u funkciji masenog broja.
Doprinos pojedinih članova: (v) zapreminski, (s) površinski, (c) kulonski i (a) asimetrije.

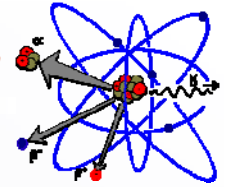
Ukupna energija veze

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z(Z - 1) A^{-1/3} - a_a(A - 2Z)^2 A^{-1} \pm a_p A^{-1}$$

Energija veze po nukleonu

$$\bar{B} = B/A$$

Primena poluempirijske jednačine mase



(1) Izračunavanje konstante poluprečnika jezgra

Ogledalska jezgra ${}_{15}^{31}\text{P} - {}_{16}^{31}\text{S}$ jedna $p - p$ veza zamenjena $n - n$ vezom

$$\Delta B = B(Z, N) - B(N, Z) = a_c A^{1/3} (N^2 - Z^2) = a_c A^{2/3}$$

$$a_c = 3/5 (e^2/r_0)$$

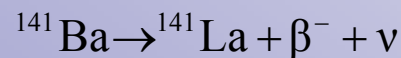
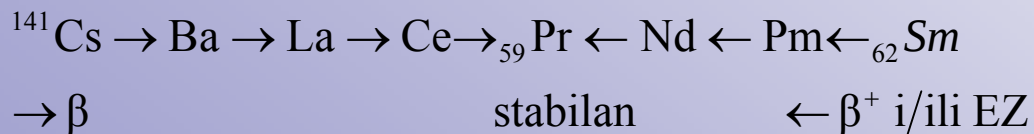
$$r_0 = 3/5 (e^2/\Delta B) A^{2/3}$$

(2) Predviđanje stabilnog nuklida u izobarskim serijama β - emitera

U izobarskoj seriji $A = \text{const.}$

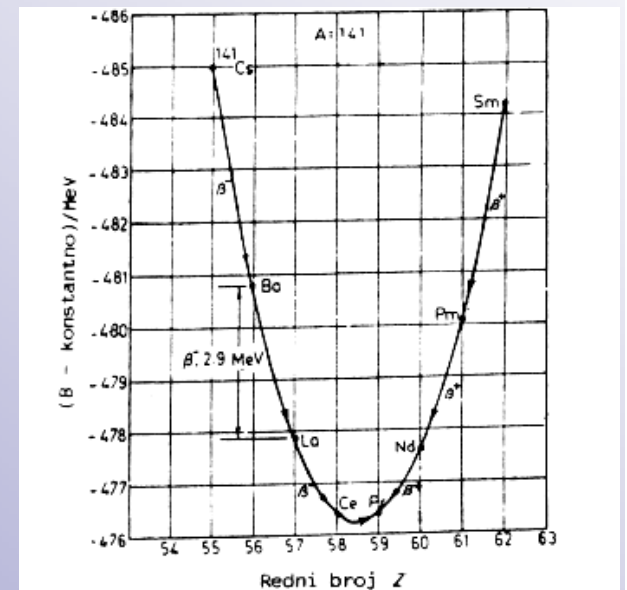
$$B_{A=\text{const.}} = K - \frac{Z^2}{A} (0,6A^{2/3} + 80) + 80Z$$

$$\left(\frac{dB}{dZ} \right)_A = \frac{-2Z_s}{A} (0,6A^{2/3} + 80) + 80 = 0 \quad \text{teme parabole} \quad Z_s = \frac{40A}{0,6A^{2/3} + 80}$$



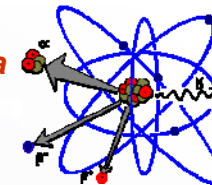
$$\Delta B = 2,9 \text{ MeV}$$

Eksperiment 2,8 MeV

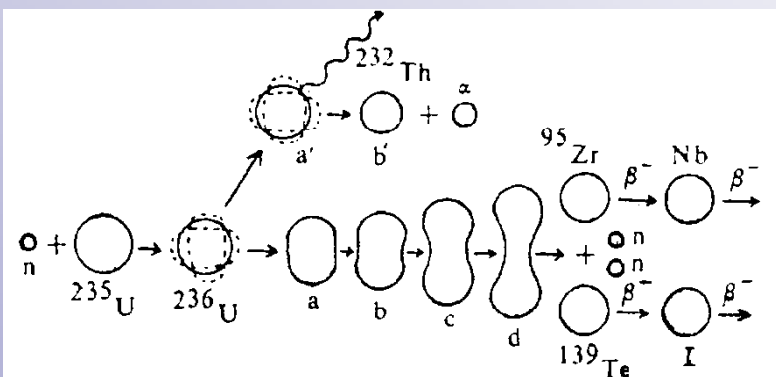


ka 3.9 Energija veze i β -raspad izobara sa $A = 141$.

Modeli jezgra i fisija



Fisija po modelu tečne kapi



Slika. 6.1. Alternativni načini raspada $^{236}\text{U}^*$
Put a, b, c, d : fisija
Put a', b' : α -raspad.

Zašto ^{235}U podleže fisiji termalnim neutronima (fisibilni izotop), a ^{238}U ne?

Upotreba semi-empirijske jednačine

Energija potrebna za fisiju (energija aktivacije) za jezgra $Z > 90$ je nešto veća od 6 MeV

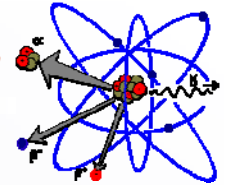
Jezgro	^{233}U	^{235}U	^{238}U	^{239}Pu
Energija oslobođena vezivanjem termalnog neutrona (MeV)	7,02	6,78	5,39	6,93

Kod ^{238}U nedostaje oko 1MeV, tako da je moguća fisija samo sa brzim neutronima (prag fisije od oko 1 MeV)

Razlika u energiji je od sparivanja (ili silaska na nižu ljusku)

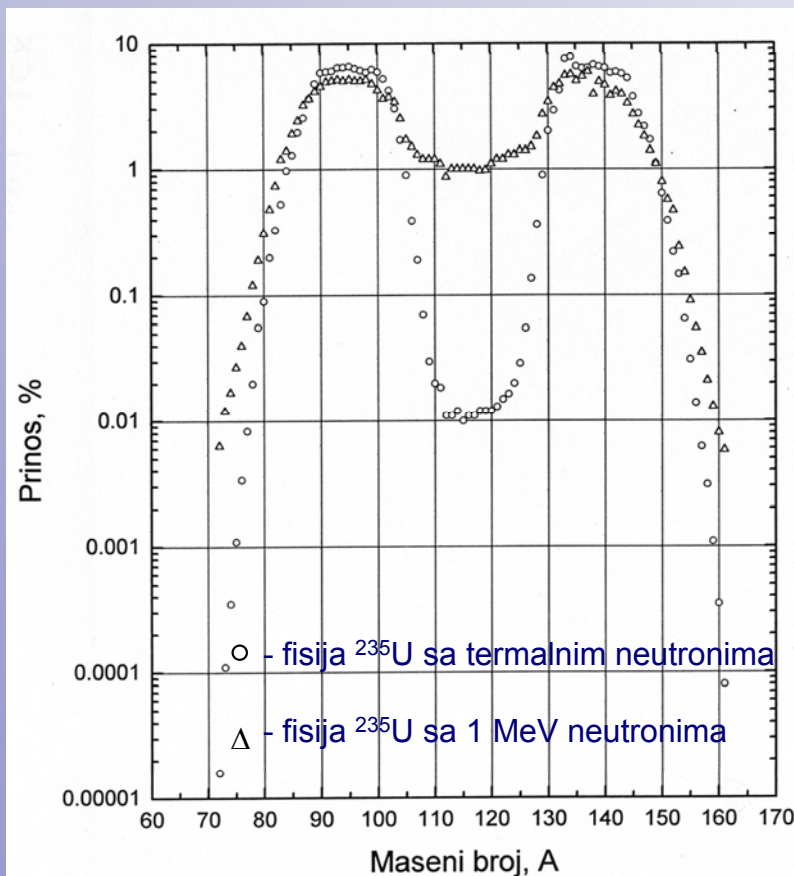
Modeli jezgra i fisija

Radiohemija i nuklearna hemija



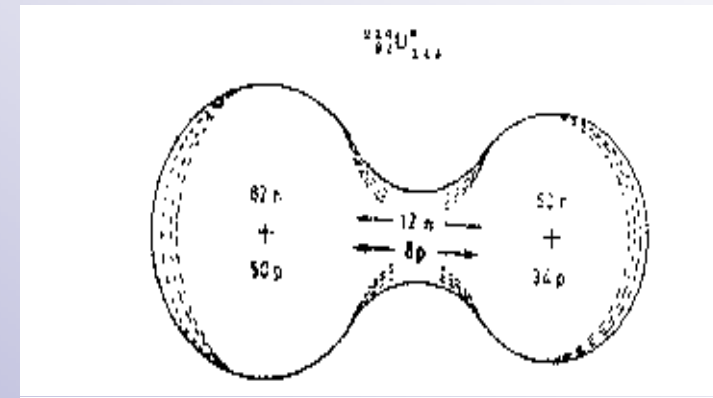
Model kapi predviđa simetričnu podelu fragmenata fisije

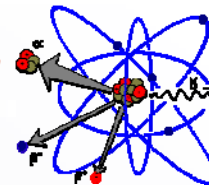
U realnosti se to ne dešava kod fisije termalnim neutronima, ali se prinos fragmenata približava simetričnoj fisiji sa povećanjem energije upadnog neutrona



Objašnjenje nije moguće u okviru modela tečne kapi, ali je moguće u kombinaciji sa modelom ljuske.

Pri niskoj energiji eksitacije fragmenti teže da budu u blizini magičnih brojeva





Naravoučenje

Mi nemamo model jezgra koji bi istovremeno i podjednako egzaktno opisao sve osobine jezgra, ali i ovi koje imamo su dovoljno dobri za npr.

- Pravljenje bombi i reaktora
- Objašnjenje funkcionisanja zvezda
- Ostale sitnije potrebe (proizvodnja izotopa za medicinu)