

Program za kolokvijume i vežbe iz radiohemije

I kolokvijum

Vrste radioaktivnih raspada. Osnovni zakon radioaktivnog raspada, određivanje vremena poluraspada. Prolaz zračenja kroz materiju i određivanje energije β i γ - zračenja metodom apsorpcije. Detekcija nuklearnog zračenja, mehanizam rada i karakteristike GM brojača. Geometrija merenja i efikasnost. Korekcije i greške statističke prirode. Odbijanje β - zračenja od podloge. Samoapsorpcija mekog β - zračenja u uzorku. Mehanizam rada i karakteristike scintilacionih brojača. Gasni brojači, drugi tipovi detektora.

Literatura:

Draganić, Radioaktivni izotopi i zračenja, Skripta za I kolokvijum

Vežbe:

1. Određivanje faktora samoapsorpcije mekog β - zračenja i specifične aktivnosti uzorka.
2. Određivanje vremena poluraspada grafičkom metodom i metodom merenja apsolutne aktivnosti uzorka.
3. Određivanje energije β i γ - zračenja metodom apsorpcije.
4. Određivanje energije γ - zračenja scintilacionim brojačem.

II kolokvijum

Principi primene radioaktivnih izotopa kao obeleživača. Primena radioaktivnih izotopa u industriji i medicini. Radiometrijska analiza. Metoda izotopnog razblaženja. Aktivaciona analiza. Radioimunološka analiza - RIA. Fizičko-hemijske metode za razdvajanje smeše izotopa. Ekstrakcija. Hromatografske metode.

Literatura:

I. Draganić, Radioaktivni izotopi i zračenja; M. Haissinsky, Nuklearna hemija i njena primena; H.J. Arnkar, Osnovi nuklearne hemije; Skripta za II kolokvijum.

Vežbe:

1. a) Određivanje nepoznate zapremine tečnosti metodom izotopnog razblaženja.
b) Određivanje nepoznate koncentracije rastvora metodom radiometrijske titracije.
2. Određivanje količine mikrokomponente u uzorku metodom aktivacione analize.
3. Određivanje koncentracije hormona RIA metodom.
4. Razdvajanje ^{32}P , ^{137}Cs i ^{60}Co u mikrokoncentracijama upotrebom katjonske smole Dowex - 50x8 u H obliku sa HCl kao eluensom.

III Kolokvijum

Nuklearne reakcije i tipovi nuklearnih reakcija. Reakcije sa neutronima. Efikasni presek, faktori koji utiču na njegovu veličinu. Silard-Chalmers-ova reakcija. Faktor obogaćenja, uzroci retenzije. Uzman pri α i β - raspadu.

Literatura:

M. Haissinsky, Nuklearna hemija i njena primena; G. Friedlander i J. Kennedy, Nuklearna i radiohemija; H.J. Arnkar, Osnovi nuklearne hemije; Skripta za III kolokvijum.

Vežbe:

1. Odvajanje radioaktivnog $^{56}\text{MnO}_2$ iz KMnO_4 ozračenog neutronima.

I kolokvijum

MERENJE RADIOAKTIVNIH UZORAKA I IDENTIFIKACIJA RADIOAKTIVNIH IZOTOPA

Radiohemija je primenjena nauka koja ima za cilj ispitivanje hemijskih osobina prirodnih i veštačkih radioaktivnih izotopa kao i njihovu identifikaciju. Osim toga ona se bavi ispitivanjem fizičko-hemijskih osobina sistema u kojima komponente mogu biti u izuzetno malim koncentracijama. Radioaktivni izotopi se sve više koriste kao obeleživači za praćenje različitih promena u sistemima, kako hemijske tako i fizičke prirode.

Zato je neophodno na početku ovog praktikuma, sumirati tipove grešaka koje se pri merenjima radioaktivnih uzoraka čine, jer one mogu da dovedu do dobijanja pogrešne informacije o procesu koji se prati uz upotrebu radioaktivnih izotopa.

MERENJE RADIOAKTIVNIH UZORAKA

Poznato je da od vrste zračenja koje emituje neki radioaktivni uzorak zavisi izbor detektora kako bi se obezbedila odgovarajuća efikasnost detekcije. Međutim, pored toga treba izvršiti ceo niz korekcija kako bi se dobijeni rezultat mogao koristiti za tumačenje fenomena koji se prate. Treba razlikovati neophodne korekcije koje treba izvršiti kada su u pitanju relativna merenja aktivnosti uzorka od onih koje su neophodne pri određivanjima apsolutne aktivnosti uzorka.

Relativno merenje radioaktivnih uzoraka

Sam naziv ovog merenja kaže da je u pitanju upoređivanje aktivnosti uzoraka sa aktivnošću etalona. Zbog toga kod ovog merenja nema nikakvog značaja priroda emitovanog zračenja, već su samo od uticaja greške koji se unose u rezultat kao posledica statističke prirode radioaktivnog raspada kao i one koje su posledica ograničenja samog detektora.

Greške statističke prirode

Radioaktivni raspad je slučajan proces, čija verovatnoća odigravanja predstavlja funkciju nestabilnosti jezgra datog radioaktivnog izotopa. Zato promena broja radioaktivnih jezgara u određenom vremenskom intervalu nije ravnomerna, dolazi do tzv. fluktuacija raspadnutog broja jezgara. Ako se ograničimo na merenja GM brojačem, onda ovaj tip grešaka najviše dolazi do izražaja pri merenju uzoraka male aktivnosti.

Polazeći od binomnog obrasca raspodele primenjenog na radioaktivni raspad

$$W(m) = \frac{N_0!}{(N_0 - m)! m!} p^m (1 - p)^{N_0 - m}, \quad (1)$$

gde je:

$W(m)$ - ukupna verovatnoća događaja

m - broj dezintegracija (raspada) u vremenu t

N_0 - prvobitni broj radioaktivnih jezgara, dakle i ukupan broj raspada koji mogu da se odigraju u vremenu t

p - verovatnoća da će baš u vremenu t da dođe do dezintegracije

dolazi se do izraza za standardnu grešku, koja se definiše kao

$$\sigma = \pm k\sqrt{npq}, \quad (2)$$

gde je:

n - ukupan broj događaja koji se može odigrati

p - verovatnoća da će do tog događaja doći u vremenu t

q - verovatnoća da se on neće odigrati

k - faktor pouzdanosti dobijene greške čije vrednosti proističu iz Gauss-ove raspodele

Polazeći od toga da je početni ukupni broj radioaktivnih jezgara u uzorku, N_0 , u nekom arbitrarnom vremenu $t = 0$, onda je i broj događaja koji se mogu odigrati $n = N_0$. Posle vremena t , jedan deo radioaktivnih jezgara će se raspasti i preostaje još N_t radioaktivnih jezgara, koji se mogu dalje raspadati. Ove dve veličine su povezane osnovnim zakonom radioaktivnog raspada

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

gde je:

λ - radioaktivna konstanta koja predstavlja verovatnoću da će se u jedinici vremena raspasti određen broj radioaktivnih jezgara, dimenzije: vreme⁻¹

t - vremenski interval u kome se proces posmatra.

Iz ovog zakona sledi da je verovatnoća da se jedan radioaktivni atom neće raspasti u vremenu t , q

$$q = \frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

a verovatnoća da će se raspasti u tom vremenskom intervalu, p , je

$$p = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

jer je $p + q = 1$ u slučaju dva događaja koja jedan drugog isključuju.

Iz jednačina 2, 4 i 5 sledi da će standardna devijacija biti

$$\sigma = \pm k\sqrt{N_0(1 - e^{-\lambda t}) \cdot e^{-\lambda t}} \quad (6)$$

Za malu vrednost λt , a što je uvek slučaj kad mereni radioaktivni izotop ima daleko veće vreme poluraspada nego što je vremenski interval merenja (takav slučaj imamo pri merenju radioaktivnih uzoraka na GM brojaču u ovom praktikumu), funkciju $e^{-\lambda t}$, možemo razviti u red po Tejlorovoj formuli

$$e^{-\lambda t} = 1 - \frac{(\lambda t)}{1!} + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \dots, \quad (7)$$

pa ako smo pošli od uslova da je λt veoma mala vrednost, svi višestepeni članovi reda teže nuli a mogu se zadržati samo prva dva člana reda

$$e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t \quad (8)$$

Standardna devijacija onda dobija oblik

$$\sigma = \pm \sqrt{N_0 |1 - (1 - \lambda t)| (1 - \lambda t)} = \pm \sqrt{N_0 \lambda t}, \quad (9)$$

jer $(\lambda t)^2$ možemo kao veličinu drugog reda opet da zanemarimo. Koeficijent pouzdanosti k ima vrednost 1 kada se radi o standardnoj greški. Veličina pod korenom, $N_0 \lambda t$, nije ništa drugo do neki srednji broj radioaktivnih jezgara koji će se raspasti u vremenu t i možemo ga obeležiti sa oznakom M , pa će standardna greška biti

$$\sigma = \pm \sqrt{M}, \quad (10)$$

Vrednost M se međutim odnosi na apsolutni broj raspada radioaktivnih jezgara u vremenu t , a mi GM brojačem merimo relativnu aktivnost tj. jedan deo od ukupne aktivnosti uzorka. Kako su te dve vrednosti proporcionalne za dovoljno veliki broj izmerenih impulsa, možemo da izvršimo aproksimaciju da je standardna greška

$$\sigma = \pm \sqrt{r}, \quad (11)$$

gde je r broj registrovanih impulsa u vremenu t .

Ako je aktivnost uzorka velika merenje se uvek vrši po jedinici vremena (najčešće 1 min.), a ako je aktivnost mala, onda mora da se vrši merenje u dužem vremenskom intervalu, kako bi broj izmerenih impulsa najviše odgovarao nekoj najverovatnoj srednjoj vrednosti. Međutim, obračun krajnjeg rezultata se uvek vrši po jedinici vremena. Zato i definišemo neku tzv. standardnu grešku po jedinici vremena koja će biti:

$$S = \pm \frac{\sqrt{r}}{t} = \pm \sqrt{\frac{Rt}{t^2}} = \pm \sqrt{\frac{R}{t}}, \quad (12)$$

gde je $R = r/t$ (imp/min).

Iz ove relacije je moguće izračunati koliko dugo treba meriti neki uzorak male aktivnosti da bi se rezultat dobio sa odgovarajućom greškom

$$t = \frac{R}{S^2} \text{ (min)}. \quad (13)$$

Dobijeni rezultat se uvek predstavlja kao

$$R_{kor} \pm S \text{ (imp/min)}. \quad (14)$$

Mnogo češće se radi sa relativnom procentnom greškom koja je

$$S_{rel} = \left(\frac{S}{R} \right) \cdot 100 \text{ (\%)}. \quad (15)$$

Pri obračunu greške sa kojom je merenje izvršeno mora se voditi računa o osnovnoj aktivnosti kao faktoru koji uzima učešće u ukupnoj greški, a to se vrši po metodi statističke matematike za obračun složene greške.

Greške detektora

Kako se u ovom praktikumu merenje aktivnosti uzorka vrši GM brojačem, to ćemo se zadržati samo na korekcijama o kojima treba voditi računa kada je taj detektor u pitanju.

Greške nastaju usled:

- mrtvog vremena brojačke cevi (τ), koja predstavlja vremenski interval u kome brojač posle jedne izvršene detekcije nije u stanju da detektuje drugu česticu,
 - osnovne aktivnosti (R_0), koja je uključena u rezultat pri svakom merenju aktivnosti uzorka, a posledica je kosmičkog zračenja i eventualnog zagađenja brojačke kutije,
 - geometrija merenja,
- pa je neophodno izvršiti odgovarajuće korekcije. Korigovana vrednost aktivnosti na prve dve veličine ima oblik

$$R^* = R_{iz} + R_{iz}^2 \tau - R_0 \quad (\text{imp/min}), \quad (16)$$

gde je:

R_{iz} - izmerena aktivnost uzorka GM brojačem u imp/min,

τ - mrtvo vreme brojača u min/imp,

R_0 - osnovna aktivnost u imp/min.

Pri tome treba voditi računa da je korekcija na mrtvo vreme veoma značajna kada je u pitanju uzorak velike aktivnosti i da je u tom slučaju korekcija na osnovnu aktivnost nema velikog značaja. Kada su u pitanju uzorci male aktivnosti korekcija na mrtvo vreme može da se zanemari dok korekcija na osnovnu aktivnost postaje veoma značajna.

Pri relativnim merenjima neophodno je voditi i računa o položaju uzorka u odnosu na brojačku cev, pošto aktivnost uzorka opada sa kvadratom rastojanja od detektora. Zato sve uzorke kao i etalon treba meriti pod istim geometrijskim uslovima na istoj polici u brojačkoj kutiji, ili ako to nije moguće treba sve rezultate svesti na iste geometrijske uslove pomoću tzv. faktora police.

Faktor police se definiše kao odnos aktivnosti uzorka na nekoj od polica i njegove aktivnosti na zadnjoj polici

$$F_p = \frac{R_i^*}{R_z^*}, \quad (17)$$

gde je:

R_i^* - izmerena aktivnost uzorka na i-toj polici korigovana na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost po jednačini (16) u imp/min,

R_z^* - izmerena aktivnost istog uzorka na zadnjoj polici korigovana na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost po jednačini (16) u imp/min.

Faktor police je neimenovan broj i predstavlja geometrijski faktor svake brojačke kutije. Njegovo poznavanje je neophodno pogotovo kada se vrše serijska merenja, jer u takvoj seriji uvek postoje uzorci veoma velike aktivnosti, kao i oni veoma male, što onemogućava merenje pod istim geometrijski uslovima.

Greške kao posledica prirode radioaktivnog uzorka

Apsolutna aktivnost nekog radioaktivnog izvora predstavlja ukupan broj čestica koje taj izvor emituje u jedinici vremena, pri čemu se emitovane čestice radijalno prostiru kroz celu sferu oko izvora. Ova stvarna aktivnost uzorka je povezana sa aktivnošću koju možemo izmeriti GM brojačem preko relacije

$$A = C \times R^* \quad (\text{rasp/min}), \quad (18)$$

gde je:

A - apsolutna aktivnost u rasp/min

R^* - aktivnost izmerena GM brojačem korigovana na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost u imp/min

C - faktor proporcionalnosti, koji je uvek veći od 1, a sadrži u sebi sve korekcije koje treba izvršiti kako bi se od izmerene aktivnosti prešlo na apsolutnu aktivnost

Treba naglasiti da broj čestica koje će biti detektovane u našem slučaju brojačem zavisi kako od već pomenutih faktora tako i od vrste zračenja i prirode radioaktivnog uzorka. To je i razumljivo ako se podsetimo na to da postoje znatne razlike u interakciji alfa i beta čestica sa jedne strane i gama zračenja sa druge strane, sa sredinom kroz koju se prostire.

Kako se u ovom praktikumu detekcija vrši GM brojačem efikasnim za detekciju beta čestica, to ćemo se u daljem izlaganju malo više zadržati na uzorcima grešaka pri detekciji tih čestica.

Efekat odbijanja beta čestica od podloge

Beta zračenje, kao zračenje korpuskularne prirode, pri prolazu kroz neku sredinu trpi niz sudara sa česticama iste prirode, elektronima iz omotača atoma. Zato je putanja beta čestica cik-cak, pri čemu postoji verovatnoća da se pri tim sudarima jedan deo beta čestica odbije pod uglom većim od 90° , odnosno da bude reflektovan u suprotnom pravcu od prvobitnog načina prostiranja, pa time detektovan GM brojačem. Ova pojava unosi u dobijeni podatak merenja pozitivnu grešku, tj. povećava broj detektovanih čestica u odnosu na onaj broj koji bi bio detektovan kad ne bi bilo refleksije. Kako su radioaktivni uzorci uvek smešteni na neku podlogu sa kojom se zajedno unose u kutiju brojača, to je neophodno voditi račune o ovom efektu. Faktor odbijanja od podloge se definiše kao

$$F_b = \frac{R_{sa\ pod.}^*}{R_{bez\ pod.}^*} = \frac{R_{sa\ pod.}^*}{R_{Fb}^*}, \quad (19)$$

gde je $R_{sa\ pod.}^*$ dato jednačinom (16).

Očigledno da ovaj faktor nema dimenzije i predstavlja samo broj koji kaže koliko se povećava broj imp/min zbog refleksije beta čestica. Faktor odbijanja od podloge, F_b , zavisi od energije beta čestica koje detektujemo, zatim od vrste materijala podloge kao i od njene debljine.

Da bi smo dobijeni rezultat merenja nekog beta radioaktivnog uzorka (već korigovanog na mrtvo vreme brojača i osnovnu aktivnost) korigovali, odnosno da bi smo eliminisali iz dobijenog rezultata grešku načinjenu zbog refleksije, neophodno je izvršiti obračun tako da dobijemo aktivnost uzorka koju bi on imao ako bi bio bez podloge

$$R_{Fb}^* = \frac{R_{sa\ pod.}^*}{F_b}. \quad (20)$$

Znači moramo poznavati vrednost faktora odbijanja od podloge, za datu vrstu materijala podloge, za odgovarajuću debljinu podloge.

Kada su u pitanju relativna merenja beta radioaktivnih uzoraka ova se korekcija može izbeći na taj način što svi uzorci kao i etalon treba da budu u posudama načinjenim od istog materijala a čija će debljina biti veća od debljine zasićenja.

Efekat samoapsorpcije mekog beta zračenja

Ovaj efekat dolazi do izražaja kod radioaktivnih izvora alfa i mekog beta zračenja, pod

kojim se podrazumevaju beta čestice energija manjih od 0,4 MeV-a. Domet čestica je veličina direktno proporcionalna energiji, pa ako je i uzorak deblji od dometa čestica, onda će se samoapsorbovati i brojač ih neće detektovati. Znači da, za razliku od prethodno opisane greške, ova greška umanjuje rezultat.

Opšti izraz za samoapsorpciju u izvoru konačne debljine je

$$R_m = \frac{\alpha S}{\mu} (1 - e^{-\mu x}), \quad (21)$$

gde je:

R_m - izmerena aktivnost u imp/min,

x - debljina uzorka u mg/cm^2 ,

μ - maseni apsorpcioni koeficijent u cm^2/mg ,

α - specifična aktivnost u imp/min/mg

S - površina uzorka u cm^2 .

Ako se za niz proba grafički predstavi zavisnost aktivnosti od debljine uzorka, dobija se kriva samoapsorpcije. Pri debljinama $x > x_i$ (gde je x_i tzv. beskonačna debljina uzorka), kriva ima plato odnosno aktivnost dostiže zasićenje. Ta maksimalna aktivnost naziva se aktivnost pri beskonačnoj debljini i obeležava se sa R_i . Iz jednačine (21) kada $x \rightarrow \infty$ dobija se da je:

$$\lim R_m = R_i = \frac{\alpha S}{\mu}. \quad (22)$$

Oznake imaju prethodno značenje.

Iz ovih veličina moguće je obračunati korekcionni faktor za samoapsorpciju k , pošto je

$$k = R_{sa}^*/R_m$$

$$k = \frac{R_i^* \mu x}{R_m^*}, \quad (23)$$

gde je:

R_m^* - izmerena aktivnost korigovana na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost po jednačini (16) u imp/min,

R_i^* - aktivnost uzorka pri beskonačnoj debljini korigovana na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost u imp/min

μ i x - imaju isto značenje kao u prethodnim jednačinama.

Sada je moguće izvršiti korekciju dobijenog rezultata, koji je već korigovan na mrtvo vreme, osnovnu aktivnost, kao i efekat odbijanja od podloge

$$R_{Fb,k}^* = k R_{Fb}^* \quad (24)$$

k - dato jednačinom (23)

R_{Fb}^* - dato jednačinom (20)

Kod relativnih rešenja primenjuju se uprošćeni postupci koji eliminišu ovu grešku. U uprošćene postupke spadaju:

- Tehnika beskonačno tankih uzoraka (efekat samoapsorpcije ne dolazi do izražaja).
- Tehnika uzoraka standardne debljine (svi uzorci i etalon imaju istu debljinu, pa su aktivnosti međusobno proporcionalne).
- Tehnika beskonačno debelih uzoraka (svi uzorci imaju veću debljinu od maksimalnog

dometa beta čestica, pa se mogu međusobno upoređivati njihove specifične aktivnosti).

Efikasnost brojača

Tek pošto su izvršene sve ove korekcije pristupa se korekciji na efikasnost brojača, čime se obračun vrši na celu sferu 4π , a u kojoj se zračenje prostire. Da bi ova korekcija bila izvršena što bolje, neophodno je odrediti efikasnost detektora sa izotopom što sličnije energije energiji zračenja čiju apsolutnu aktivnost određujemo. Apsolutna aktivnost uzorka će biti

$$A = \frac{R_{Fb,k}^*}{E} \text{ (rasp/min)}, \quad (25)$$

gde je:

$R_{Fb,k}^*$ - relativna aktivnost korigovana na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost, efekat odbijanja od podloge, kao i na efekat samoapsorpcije.

E - efikasnost brojača.

Na primeru uzorka nekog beta zračenja pokazaćemo kako se na osnovu izmerene aktivnosti i poznavanja određenih korekcionih faktora može izračunati apsolutna aktivnost tog uzorka. Neka je GM brojačem izmerena aktivnost uzorka bila $R_{izm} = 2000$ imp/min a osnovna aktivnost $R_0 = 15$ imp/min. Mrtvo vreme brojačke cevi je $\tau = 3,5 \times 10^{-6}$ min/imp. Korekcija na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost je prema jednačini (16)

$$R^* = R_{izm} + R_{izm}^2 \tau - R_0$$

jednaka

$$R^* = 2000 + 2000^2 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} - 15$$

$$R^* = 2125 \text{ imp/min.}$$

Ako je faktor odbijanja od podloge za datu debljinu podloge od Al bio $F_b = 1,027$ onda je sledeći korak korekcija po jednačini (20)

$$R_{Fb}^* = \frac{R_{sa\ pod.}^*}{F_b} = \frac{R^*}{F_b}$$

$$R_{Fb}^* = \frac{2125}{1,027} = 2089 \text{ imp/min.}$$

Korekcionni faktor za samoapsorpciju je iznosio $k = 1,60$ a efikasnost brojača je 5%. Onda je prema jednačini (24)

$$R_{Fb,k}^* = k \cdot R_{Fb}^*$$

$$R_{Fb,k}^* = 1,60 \cdot 2089$$

$$R_{Fb,k}^* = 3343 \text{ imp/min.}$$

Apsolutna aktivnost je data jednačinom (25)

$$A = \frac{R_{Fb,k}^*}{E}$$

$$A = \frac{3343}{0,05}$$

$$A = 66860 \text{ rasp/min} = 1,11 \text{ kBq} \quad (\text{ili } 0,03 \text{ } \mu\text{Ci}).$$

IDENTIFIKACIJA RADIOAKTIVNIH IZOTOPA

Poznato je da jedan hemijski element može da ima više izotopa koji se međusobno razlikuju po masenom broju i stabilnosti jezgra. Ukoliko jedan hemijski element ima više radioaktivnih izotopa njih ne možemo razdvojiti niti identifikovati uobičajenim hemijsko-analitičkim metodama jer su njihove razlike u hemijskom ponašanju neznatne, a ne možemo primeniti ni spektrohemijske metode jer su neosetljive na tako male koncentracije. Zato se mora pribеći drugim metodama.

Osnovno je ustanoviti, pri identifikaciji, vrstu zračenja koju emituje dati radioaktivni izotop. Ukoliko se emitovano zračenje apsorbuje već u listu papira radi se o alfa emiteru, ako se apsorbuju Al foliji u pitanju je beta emisija, a ako se zračenje apsorbuje tek u Pb pločama radi se o gama zračenju.

Čest je slučaj da jedan hemijski element ima više radioaktivnih izotopa koji emituju istu vrstu zračenja, pa je onda potrebno izvršiti i dalju analizu. Ona se sastoji u određivanju vremena poluraspada. Na taj način pored identifikacije radioaktivnog izotopa moguće je utvrditi i radiohemijsku čistoću datog uzorka. Radiohemijski čist uzorak ne sme da ima ni jedan drugi radioaktivni izotop u svom sastavu. Ovaj pojam je veoma značajan za procese razdvajanja radioaktivnih izotopa nekom fizičko-hemijskom metodom, pri čemu se proverava i efikasnost primenjenog postupka.

Metode određivanja energije radioaktivnog zračenja

Energiju nekog radioaktivnog izvora moguće je odrediti metodom scintilacione spektroskopije i apsorpcionom metodom.

Određivanje energije gama zračenja apsorpcijom

Za apsorpciju gama zračenja važi eksponencijalni zakon

$$R = R_0 e^{-\mu d}, \quad (26)$$

gde je:

R_0 - aktivnost datog izvora pri debljini apsorbera $d = 0$,

R - merena aktivnost posle prolaska zračenja kroz apsorber konačne debljine d ,
 μ - maseni apsorpcioni koeficijent koji predstavlja gubitak energije po jedinici debljine apsorbera i karakterističan je za dati apsorber, cm^2/mg , cm^2/g ,
 d - debljina apsorbera u mg/cm^2 , g/cm^2 .

Ako se nanosi $\log R$ (ili $\ln R$) u funkciji debljine apsorbera dobija se tzv. apsorpciona kriva koja za apsorpciju gama zračenja predstavlja pravu.

Pri određivanju energije gama zračenja koristi se poludebljina $d_{1/2}$. To je ona debljina apsorbera koja aktivnost smanjuje na polovinu početne vrednosti.

$$\frac{I}{2} R_0 = R_0 e^{-\mu d_{1/2}} \quad (27)$$

$$\log\left(\frac{1}{2}\right) = 0,434 \mu d_{1/2} \quad (28)$$

$$\mu = \frac{0,693}{d_{1/2}}. \quad (29)$$

Poludebljina se određuje iz apsorpcione krive, a iz relacije (29) moguće je izračunati apsorpcioni koeficijent. Iz poznatih empirijskih krivih zavisnosti $d_{1/2}$ od energije gama zraka (ili μ od energije gama zraka) moguće je poznavajući poludebljinu odrediti energiju.

Određivanje maksimalne energije beta zračenja metodom apsorpcije

Za razliku od alfa i gama zračenja beta čestice imaju kontinualnu raspodelu energije, koja se završava sa određenim maksimumom. Ova maksimalna energija (E_{max}) se menja u zavisnosti od prirode izvora i karakteristična je za dati radioaktivni izotop.

Za beta zračenje eksponencijalni zakon (26) važi samo približno i to utoliko što aktivnost opada sa povećanjem debljine apsorbera. Apсорpciona kriva beta zračenja u semi-logariamskoj podeli ne predstavlja pravu već ima konkavan oblik. Tačka na apcisnoj osi koja odgovara minimalnoj vrednosti aktivnosti naziva se maksimalni domet R_{max} i predstavlja onu maksimalnu debljinu apsorbera koja apsorbuje celokupno zračenje. Za male energije beta zračenja R_{max} se nalazi u preseku apsorpcione krive sa apcisnom osom, a za više zbog zakočnog zračenja, u preseku tangenti na linearni i produženi deo apsorpcione krive. Ako je određen maksimalni domet, maksimalna energija beta zračenja se može izračunati iz empirijskih jednačina ili odrediti iz postojećih dijagrama.

Određivanje energije zračenja metodom spektrometrije

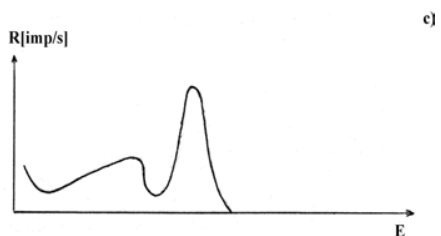
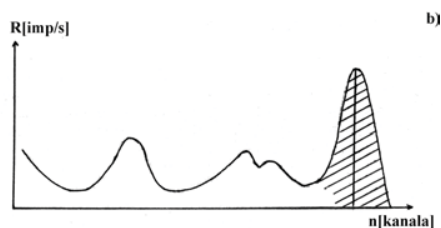
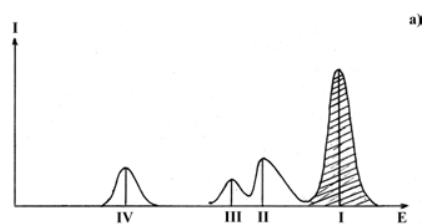
Spektar zračenja nekog radioaktivnog izotopa predstavlja raspodelu intenziteta čestica ili fotona u funkciji energije.

Zbog kontinualnog spektra energija beta čestica, spektrometrija beta zračenja nema velike praktične primene (npr. u aktivacionoj analizi) izuzev za identifikaciju izotopa.

Na drugoj strani, činjenica da radioizotopi emituju gama zračenje diskretnih energija, omogućava široku primenu gama spektrometrije.

Spektrometrija gama zračenja zasnovana je na merenju spektara sekundarnih elektrona, nastalih procesima apsorpcije gama zračenja u materiji. Na sl.1. dat je spektar zračenja

radioizotopa, koji emituje u monoenergetsko gama zračenje energije $E_{gama} > 1,022$ MeV-a, kada dolaze do izražaja sva tri mehanizma apsorpcije gama kvanata u detektoru. Izuzimajući komptonske spektrometre, u spektrometriji gama zračenja najznačajnija je fotolinija, predstavljena linijom I na dijagramu (sl.1.a). ona potiče od fotoelektrona i prema jednačini: $E_{kin} \approx E_{gama}$, njen položaj u spektru određen je energijom fotona. Deo spektra II, na istom dijagramu je Comptonova raspodela, Dok linije III i IV, predstavljaju tzv. "par 1" i "par 2" linije, koje iznose: $E_{gama} = 0,511$ MeV-a, odnosno $E_{gama} = 1,022$ MeV-a, a javljaju se zavisno od toga da li je samo jedan od fotona, nastalih anihilacijom elektronskog para, napustio kristal, ili su ga, pak, napustila oba fotona.



Slika 1.

Usled statističke prirode procesa interakcija zračenja i materije pri detekciji zračenja, kao i zbog nesavršenosti mernih uređaja, merni spektar zračenja ima oblik prikazan dijagramom na sl.1.b (fotolinija ima pravilan oblik Gauss-ove raspodele).

Na sl.1.c. dat je dijagram koji predstavlja eksperimentalni spektar monoenergetskog gama zračenja, kada je energija gama kvanta manja od 1,022 MeV-a.

Kvalitativna spektrometrijska analiza zasniva se na određivanju energije gama zračenja radioizotopa na osnovu položaja karakterističnih fotolinija u spektru. Površina pod fotolinijom srazmerna je koncentraciji radioizotopa, pa njeno određivanje čini osnov kvantitativne spektrometrijske analize.

Metode određivanja vremena poluraspada radioaktivnih izotopa

Vreme poluraspada, T , je specifična konstanta svakog radioaktivnog izotopa o čemu govori i njegova povezanost sa radioaktivnom konstantom. Verovatnoća da će jedan radioaktivni atom "preživeti" vremenski interval t je

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

Vreme poluraspada, T , se definiše kao onaj period na čijem kraju je $N_T = N_0/2$, tj. $e^{-\lambda T} = 1/2$, odakle je $\ln 2 = \lambda T$, a odatle

$$T = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Kako se vrednosti vremena poluraspada, T , mogu kretati do delova sekunde do 10^9 godina, to se i metode njegovog određivanja razlikuju.

Određivanje vremena poluraspada grafičkom metodom

Ako radioaktivni izotop ima vreme poluraspada od minuta do nekoliko meseci pristupa se grafičkom određivanju, koje se sastoji u praćenju opadanja aktivnosti sa vremenom. Iz osnovnog zakona radioaktivnog raspada sledi da je

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$
$$\log N_t = \log N_0 - 0,434 \cdot \lambda t.$$

Ova logaritamska jednačina predstavlja jednačinu prave iz čijeg nagiba možemo da odredimo vreme poluraspada.

Određivanje vremena poluraspada metodom merenja apsolutne aktivnosti

Ukoliko se radi o izotopima sa veoma dugim vremenom poluraspada nije moguće izvršiti grafičku analizu već se pristupa metodi merenja apsolutne aktivnosti. Iz osnovnog zakona radioaktivnog raspada predstavljenog u diferencijalnom obliku sledi

$$-\frac{dN}{dt} = A = \lambda N = \frac{0,693}{T} N.$$

Ovde je jedini problem odrediti apsolutnu aktivnost uzorka i računati ukupan broj radioaktivnih atoma koje uzorak sadrži. Treba izmeriti aktivnost uzorka GM brojačem a zatim izvršiti potrebne korekcije, o kojima je već bilo reči, kako bi se prešlo na apsolutnu aktivnost, a zatim prići izračunavanju vremena poluraspada izotopa.

VEŽBE POSLE I KOLOKVIJUMA

I vežba

Određivanje faktora samoapsorpcije mekog β zračenja i specifične aktivnosti uzorka

Zadatak vežbe: *Odrediti specifičnu aktivnost uzorka koji je meki β -emiter ^{45}Ca , metodom samoapsorpcije, kao i korekcionni faktor za samoapsorpciju.*

Oprema vežbe:

1. GM brojač,
2. Razmeren CaCO_3 koji je obeležen sa ^{45}Ca .

Opis vežbe:

CaCO_3 obeležen sa ^{45}Ca je razmeren u 5 posudica čija je površina $3,14 \text{ cm}^2$. U svakoj od posudica ima:

Broj probe	mg soli	$x \text{ (mg/cm}^2\text{)}$
1	40	12,7
2	75	23,9
3	120	38,2
4	165	55,7
5	200	63,6

Izmeriti aktivnost ovih pet uzoraka pod istim geometrijskim uslovima i dobijene podatke uneti u tabelu:

Broj probe	$x \text{ (mg/cm}^2\text{)}$	$R_m \text{ (imp/min)}$	$t \text{ (s)}$	$R_m^* \text{ (imp/min)}$	k
------------	------------------------------	-------------------------	-----------------	---------------------------	-----

Merenja vršiti sa relativnom standardnom greškom od 1%.

Iz dobijenih podataka:

1. Konstruisati dijagram $R_m^* = f(x)$
2. Sa dijagrama očitati vrednosti aktivnosti pri beskonačnoj dabljinu uzorka R_i , i izraziti tu aktivnost u imp/min i u jedinicama Bq upotrebom korekcije za efikasnost brojača.
3. Odrediti specifičnu aktivnost uzorka po jednačini

$$\alpha = R_i \frac{\mu}{S} \text{ imp/min mg i u Bq/mg}$$

S - površina sudića je $3,14 \text{ cm}^2$,

μ - maseni apsorpcioni koeficijent za CaCO_3 je $0,09 \text{ cm}^2/\text{mg}$.

4. Za pet merenih vrednosti aktivnosti odrediti korekcionni faktor kao

$$k = \frac{R_i^* \mu x}{R_m^*}$$

i konstruisati dijagram $k = f(x)$.

5. Za jednu vrednost x očitati sa dijagrama vrednost R_m^* i k , pa izračunati aktivnost uzorka kada ne bi bilo samoapsorpcije po jednačini

$$R_k^* = k R_m^* \quad (\text{imp/ min})$$

6. Za tu vrednost x ucrtati u prvi dijagram pravu vrednost aktivnosti, pa tu tačku treba spojiti sa koordinatnim početkom, čime se dobija grafik porasta aktivnosti sa debljinom kada ne bi bilo samoapsorpcije.

II vežba

Određivanje vremena poluraspada grafičkom metodom i metodom merenja apsolutne aktivnosti

Zadatak vežbe: a) Odrediti vreme poluraspada ^{116}In grafičkom metodom.

b) Odrediti vreme poluraspada ^{40}K metodom apsolutnog merenja aktivnosti.

Oprema vežbe:

1. GM brojač,
2. Izvor ^{116}In ,
3. Izvor ^{40}K .

Opis vežbe:

a) Meriti aktivnost ^{116}In svakih 5 min. do 30-og min., zatim svakih 10 min. do 60-og min. i na svakih 20 min. do 120-og min. uvek pod istim geometrijskim uslovima. Dobljene podatke uneti u tabelu:

vreme t (min)	R (imp/min)	R^* (imp/min)	$\log R^*$
-----------------	-------------	-----------------	------------

Nacrtati grafik $\log R^* = f(t)$ i sa grafika odrediti T .

b) Izmeriti aktivnost uzorka 0,1g KCl i izvršiti potrebne korekcije da bi se prešlo na apsolutnu aktivnost. Izračunati vreme poluraspada ^{40}K po jednačini

$$T = \frac{0,693}{A} \cdot \frac{mk}{M} \cdot N_A$$

m - količina K u KCl,

k - zastupljenost ^{40}K u prirodnoj smeši K (0.012%)

M - maseni broj,

N_A - Avogadrov broj.

III vežba

Određivanje energije β i γ zračenja metodom apsorpcije

Zadatak vežbe: a) Odrediti maksimalnu energiju β -zračenja apsorpcijom u Al.
b) Odrediti energiju γ -zračenja apsorpcijom u Pb.

Oprema vežbe:

1. GM brojač,
2. Izvor γ -zračenja (^{137}Cs).
3. Izvor β -zračenja (^{137}Cs).
4. slog Al, Pb pločica.

Opis vežbe:

a) Izmeriti aktivnost uzorka β -emitera, na 5-6 polici brojačke kutije, a zatim iznad njega stavljati apsorber od Al različitih debljina. Za svaku debljinu apsorbera izmeriti aktivnost uzorka. Dobljene podatke uneti u tabelu:

d [g/cm ²]	R [imp/min]	R* [imp/min]	log R*
------------------------	-------------	--------------	--------

Nacrtati apsorpcionu krivu $\log R^* = f(d)$. Sa krive odrediti maksimalni domet R_{max} . Na osnovu jedne od empirijskih jednačina:

$$E_{max} = 1,85 R_{max} + 0,245 \text{ (MeV)} \quad (R_{max} > 0,3 \text{ g/cm}^2), \text{ ili } E_{max} = 1,92 R_{max}^{0,725} \text{ (MeV)} \quad (R_{max} < 0,3 \text{ g/cm}^2)$$

izračunati maksimalnu energiju.

b) Izmeriti aktivnost uzorka, γ -emitera, na 5-6 polici brojačke kutije stavljajući prvo iznad njega apsorber od Al koji potpuno zaustavlja β -čestice. Zatim na taj Al apsorber stavljati apsorber od Pb različitih debljina. Za svaku debljinu apsorbera izmeriti aktivnost. Dobljene podatke uneti u tablicu

Debljina apsorbera [g/cm ²]	R [imp/min]	R* [imp/min]	log R*
---	-------------	--------------	--------

Nacrtati apsorpcionu krivu $\log R^* = f(d)$. Sa krive odrediti poludebljinu $d_{1/2}$ i po jednačini (1.32) izračunati apsorpcioni koeficijent. Sa grafika XIV.9. (I Draganić i sar., Radioaktivni izotopi i zračenja, II knjiga, str. 161 Naučna knjiga, Beograd 1968) odrediti energiju γ -zračenja.

IV vežba

Određivanje energije γ zračenja korišćenjem scintilacionog detektora

Zadatak vežbe: Odrediti energiju γ zračenja korišćenjem scintilacionog detektora

Oprema vežbe:

- a) Izvori γ zračenja ^{60}Co i ^{137}Cs .
- b) Scintilacioni detektor.

c) Računar i softver za obradu rezultata.

Opis vežbe:

Snimi se spektar γ zračenja uzorka koji sadrži ^{137}Cs i ^{60}Co korišćenjem NaI(Tl) scintilacionog detektora sa višekanalnim analizatorom. Prikazati grafik zavisnosti $I=f$ (Broj kanala). Znajući da se fotolinije ^{60}Co javljaju na energijama 1.17 MeV i 1.33 MeV, može se izvršiti energijska kalibracija detektora crtajući grafik zavisnosti $E=f$ (Broj kanala). Posle kalibracije, sa grafika odrediti energiju fotolinije ^{137}Cs i pripisati energijsku skalu snimljenom spektru.

PRIMERI ZADATAKA ZA I KOLOKVIJUM

1: Period poluraspada ^{226}Ra je $1,602 \cdot 10^3$ god. Kolika je aktivnost izvora koji sadrži 1g radijuma?

$$\text{R1: } A = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2 \cdot m \cdot N_A}{T_{1/2} \cdot M} = 3,65 \cdot 10^{10} \frac{\text{rasp.}}{\text{s}}$$

2: Izotop fosfora ^{32}P je β radioaktivan sa periodom poluraspada 14,3 dana. Pomoću uređaja za detekciju elektrona utvrđeno je da preparat radioaktivnog fosfora ^{32}P daje 10^4 β raspada u sekundi. Izračunaj:

a) Masu ^{32}P u preparatu

b) Kolika će biti aktivnost preparata 30 dana posle ovog merenja?

R2:

$$\text{a) } A_0 = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2 \cdot m \cdot N_A}{T_{1/2} M}$$

$$m = \frac{A_0 \cdot T_{1/2} \cdot M}{\ln 2 \cdot N_A} = 9,5 \cdot 10^{-13} \text{ g}$$

$$\text{b) } A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = 2,35 \cdot 10^3 \frac{\text{rasp.}}{\text{s}}$$

3: Kolko je puta specifična aktivnost ^{238}U manja od specifične aktivnosti ^{226}Ra ? Periodi poluraspada ^{238}U i ^{226}Ra su $4,49 \cdot 10^9$ god i $1,602 \cdot 10^3$ god respektivno.

R3:

$$\frac{A_S(^{238}\text{U})}{A_S(^{226}\text{Ra})} = \frac{\left(\frac{\lambda \cdot N}{m}\right)_U}{\left(\frac{\lambda \cdot N}{m}\right)_{Ra}} = \frac{\left(\frac{\ln 2 \cdot m \cdot N_A}{T_{1/2} \cdot M \cdot m}\right)_U}{\left(\frac{\ln 2 \cdot m \cdot N_A}{T_{1/2} \cdot M \cdot m}\right)_{Ra}} = 3,38 \cdot 10^{-6}$$

4: Odnos broja atoma ^{238}U prema broju atoma ^{208}Pb u nekoj uranovoj rudi ja 2,785. Odrediti starost rude ako su atomi Pb krajnji potomci. Vreme poluraspada ^{238}U je $4,49 \cdot 10^9$ god.

R4:

$$\frac{N_U}{N_{Pb}} = 2,785$$

$$N_U = N_0 \cdot e^{-\lambda t}; \quad N_U = N_{Pb} + N_U;$$

$$N_U = (N_{Pb} + N_U) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \Rightarrow \text{podeli se leva i desna strana jednačednsa } N_{Pb};$$

$$\frac{N_U}{N_{Pb}} = \left(1 + \frac{N_U}{N_{Pb}}\right) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \Rightarrow \text{odavde se izrazi } t;$$

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln\left(\frac{N_{Pb}}{N_U} + 1\right) = 2 \cdot 10^9 \text{ god.}$$

5: Za jednu primenu radioaktivnog ^{24}Na potrebna je količina od 1mCi. Koliku količinu ovog izotopa (u gramima) treba poručiti od proizvođača, ako od trenutka isporuke pa do trenutka primene prođe 2 dana? Period poluraspada ^{24}Na je 14,9 časova.

R5:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow A_0 = \frac{A}{e^{-\lambda t}};$$

$$A_0 = \lambda \cdot N = \frac{\ln 2 \cdot m \cdot N_A}{T_{1/2} \cdot M}$$

$$m = \frac{A_0 \cdot T_{1/2} \cdot M}{N_A \cdot \ln 2} = \frac{A \cdot T_{1/2} \cdot M}{e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{T_{1/2}}} \cdot \ln 2 \cdot N_A} = 1,0647 \cdot 10^{-9} \text{ grama}$$

6: Odrediti zapreminu radona Rn (na normalnoj temperaturi i pritisku) koji je u radioaktivnoj ravnoteži sa 1g radijuma Ra. Period poluraspada Ra je $1,602 \cdot 10^3$ godina, a Rn je 3,825 dana. Radon je produkt raspada radijuma ^{226}Ra i nalazi se u gasovitom stanju.

R6:

$$A_{Ra} = A_{Rn}$$

$$\lambda_{Ra} \cdot N_{Ra} = \lambda_{Rn} \cdot N_{Rn}$$

$$N_{Rn} = \frac{T_{1/2} \cdot N_{Ra}}{\lambda_{Rn}} = \frac{\ln 2}{(T_{1/2})_{Ra}} \cdot N_{Ra} = \frac{(T_{1/2})_{Rn}}{(T_{1/2})_{Ra}} \cdot N_{Ra}$$

$$N_{Rn} = \frac{(T_{1/2})_{Rn}}{(T_{1/2})_{Ra}} \cdot \frac{m_{Ra} \cdot N_A}{M_{Ra}} = 1,76 \cdot 10^{16} \text{ atoma}$$

Ako jedan mol ($6,02 \cdot 10^{23}$ atoma) gasa zauzima $22,4 \text{ dm}^3$,

$1,76 \cdot 10^{16}$ atoma gasa zauzima $0,66 \text{ mm}^3$, što je i rešenje ovog zadatka.

7: Uran ^{234}U javlja se kao produkt u toku radioaktivnog raspada osnovnog izotopa urana ^{238}U i to u odnosu 0,006%. Odrediti period poluraspada urana ^{234}U , ako je pri ovom postignuta radioaktivna ravnoteža. Period poluraspada za ^{238}U je $4,5 \cdot 10^9$ godina.

R7:

$$\lambda_{234} \cdot N_{234} = \lambda_{238} \cdot N_{238}$$

$$\frac{N_{234}}{N_{238}} = \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234}} = \frac{\frac{\ln 2}{(T_{1/2})_{238}}}{\frac{\ln 2}{(T_{1/2})_{234}}} = \frac{(T_{1/2})_{234}}{(T_{1/2})_{238}} = \frac{0.006}{100}$$

$$(T_{1/2})_{234} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{1/2})_{238} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ godina}$$

8: Pri radioaktivnom raspadu jezgra ^{24}Na , nastaje emisija α čestice. Period poluraspada ovoga jezgra je 14,8 časova. Koliko se jezgara ^{24}Na raspadne za vreme $t=10$ časova u uzorku mase $m=1\text{mg}$.

R8:

$$N^R = N_0 - N = N_0 - N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

$$N^R = \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot (1 - e^{-\lambda t}) = \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot (1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t})$$

$$N^R = 9,3 \cdot 10^{18} \text{ jezgara}$$

9: Kolika masa ^{24}Na će imati istu aktivnost kao i 1mg ^{28}Al ? ($T_{1/2}(\text{Na})= 15$ časova, $T_{1/2}(\text{Al})= 23$ min.)

R9:

$$A = \lambda N = \frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A$$

$$\frac{m_{\text{Na}}}{M_{\text{Na}}} \cdot \frac{1}{t_{1/2}(\text{Na})} = \frac{m_{\text{Al}}}{M_{\text{Al}}} \cdot \frac{1}{t_{1/2}(\text{Al})} \Rightarrow m_{\text{Na}} = 0,335\text{g}$$

10: Vreme poluraspada ^{226}Ra je 1620 godina. Za koliko vremena aktivnost uzorka opadne za a) 70% od početne vrednosti; b) 50% od početne vrednosti. c) Izračunati radioaktivnu konstantu.

R10:

a)

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{1/2}}}$$

$$0,3 \cdot X = X \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot t}{1620}} \Rightarrow t = \frac{\ln 0,3}{-\frac{0,693}{1620}} = 2814 \text{ godina}$$

b) Postupak rešavanja je sličan kao pod a). Kao rezultat se dobija:

$$0,5 \cdot X = X \cdot e^{-\frac{0,693 \cdot t}{1620}} \Rightarrow t = \frac{\ln 0,5}{-\frac{0,693}{1620}} = 1620 \text{ godina}$$

c)
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$
$$\lambda = 1,36 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

11: Ispred izvora γ zračenja aktivnosti $30 \mu\text{Ci}$ postavljena je pločica od olova debljine 7cm . Gustina olova je $11,34 \text{ g/cm}^3$. Na pločicu u pravcu brojača pada 3% od ukupnog broja fotona u jedinici vremena. Aktivnost iza apsorbera je merena GM brojačem i iznosi $5,4 \cdot 10^4 \text{ imp/min}$. Efikasnost brojača je 10% . Izračunati maseni i linearni apsorpcioni koeficijent za olovo.

R11:

Aktivnost izvora I_d je $5,4 \cdot 10^4 \text{ imp/min}$, a efikasnost brojača je 10% . Aktivnost I_d izražena u jedinicama za apsolutnu aktivnost iznosi:

$$I_d = \frac{5,4 \cdot 10^4}{0,1} = 5,4 \cdot 10^5 \frac{\text{raspada}}{\text{min.}} = 9 \cdot 10^3 \frac{\text{raspada}}{\text{s}} = 0,243 \mu\text{Ci}$$

Aktivnost I_0 ispred apsorbera je $(30 \times 0,03) \mu\text{Ci} = 0,9 \mu\text{Ci}$

Zamenom odgovarajućih vrednosti u osnovni zakon apsorpcije

$$I_d = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

$$0,243 = 0,9 \cdot e^{-\mu \cdot 7}$$

$$\mu_{lin.} = 0,187 \text{ cm}^{-1}$$

Maseni apsorpcioni koeficijent je:

$$\mu_m = \frac{\mu_{lin.}}{\rho} = 0,0165 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

12: GM-brojačem izmerena je aktivnosti izvora od 12600 imp/min . Izvršiti potrebne korekcije rezultata ako je mrtvo vreme tog brojača $\tau = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ min/imp}$, osnovna aktivnost 24 imp/min , a faktor odbijanja od podloge $1,3$. Izračunati efikasnost korišćenog brojačkog uređaja ako je apsolutna aktivnost kalibrisanog izvora 1112 Bq .

R12:

a) Korekcija na mrtvo vreme i osnovnu aktivnost je

$$R_{kor} = R_{izm} + R_{izm}^2 \cdot \tau - R_0$$

$$R_{kor} = 13005 \text{ imp/min}$$

b) Korekcija na odbijanje od podloge je

$$R_{Fb} = R_{kor} / F_b = 10004 \text{ imp/min}$$

c) Efikasnost brojačkog uređaja je

$$E = R_{Fb} / A = 0,15 = 15\%$$

13: Izračunati korekcionni faktor za samoapsorpciju mekog emitera ^{42}Ca , ako je nekorigovana aktivnost pri beskonačnoj debljini uzorka 17000 s^{-1} , izmerena aktivnost 9720 imp/s pri debljini uzorka 26 mg/cm^2 , maseni apsorpcioni koeficijent $0,09 \text{ cm}^2/\text{g}$ a mrtvo vreme GM-bojača $1,62 \cdot 10^{-6} \text{ s/imp}$. Osnovna aktivnost je 7 imp/s .

R13:

Prvo je potrebno izvršiti korekcije izmerenih vrednosti na osnovnu aktivnost i mrtvo vreme GM-bojača:

$$R_{i(kor)} = 17000 + (1,7 \cdot 10^4)^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-6} - 7 = 17462 \frac{\text{imp}}{\text{s}}$$

$$R_{m(kor)} = 9720 + (9,72 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-6} - 7 = 9866 \frac{\text{imp}}{\text{s}}$$

Korekcionni faktor za samoapsorpciju dat je jednačinom

$$k = \frac{R_{i(kor)} \cdot \mu_x}{R_{m(kor)}} = 4,14 \cdot 10^{-3}$$

14: Aktivnost uzorka zajedno sa osnovnom aktivnošću bila je 8720 imp , a merenje je vršeno 5 min . Osnovna aktivnost merena je 10 min i iznosila je 320 imp . Izračunati standardnu grešku merenja. Koliko dugo treba meriti uzorak da bi relativna standardna greška korigovane aktivnosti bila 2% ?

R14:

$$r = 8720 \text{ imp}$$

$$t = 5 \text{ min}$$

$$R_{izm} = 8720 / 5 = 1744 \text{ imp/min}$$

$$R_0 = 320 / 10 = 32 \text{ imp/min}$$

$$R_{kor} = R_{izm} - R_0 = 1744 - 32 = 1712 \text{ imp/min}$$

Standardna greška data je izrazom

$$S_{kor} = \pm \sqrt{\frac{R}{t} + \frac{R_0}{t_0}} = \pm \sqrt{\frac{1744}{5} + \frac{32}{10}} = 18,7 \frac{imp}{min}$$

$$R_{kor} = 1712 \pm 19 \frac{imp}{min}$$

Vreme merenja za datu relativnu standardnu grešku korigovane aktivnosti izračunava se po obrascu

$$t = \frac{10^4 \cdot (R_{izm} + \frac{R_0}{c})}{S_{kor}^2 \cdot (R_{izm} - R_0)^2} = \frac{10^4 \cdot (1744 + \frac{32}{0,135})}{2^2 \cdot (1712)^2} = 1,69 \text{ min} \quad c = \sqrt{\frac{R_0}{R}}$$

$$t_0 = 0,135 \cdot t = 0,23 \text{ min}$$

II kolokvijum

PRIMENA RADIOAKTIVNIH IZOTOPA

PRIMENA RADIOAKTIVNIH IZOTOPA KAO OBELEŽIVAČA

Radioaktivni izotopi se mnogo koriste kao obeleživači i kao izvori zračenja. Primena radioaktivnih izotopa kao obeleživača (indikatora) može da se susretne u raznim oblastima nauke i tehnike. Njihova primena je naročito velika u biologiji, zatim hemiji, fizičkoj hemiji, fizici, geologiji i dr. Poznati su radovi u kojima su radioizotopi kao obeleživači dali odgovor na pitanje mehanizma izotopske izmene, građe molekula, mehanizma i kinetike hemijskih reakcija, mehanizma katalize, adsorpcije, difuzije, trenja, pitanja analitičke hemije, elektrohemije itd. Radioaktivni indikatori imaju i veliku primenu i u industriji¹.

Pri izboru radioaktivnih izotopa koji će se koristiti kao obeleživač u ispitivanju nekog procesa, neophodno je voditi računa da bude izbegnut izotopski efekat, kao i da aplicirana količina indikatora nema suviše veliku aktivnost koja bi mogla da dovede do destrukcije materije ili pojave radiolize ako su u pitanju tečnosti. Pod izotopskim efektom podrazumeva se razlika u brzinama reakcije između izotopskih molekula, a koja je posledica razlike u energijama aktivacije za odigravanje istih. Ovaj efekat ne sme da se zanemari ako se kao radioaktivni indikatori koriste izotopi lakih elemenata kao što je tritium, ³H, ugljenik, ¹⁴C, kiseonik, ¹⁸O, itd.

Pri odlučivanju koji radioaktivni izotop treba upotrebiti u datim eksperimentu, faktori o kojim treba voditi računa su:

1. Vreme poluraspada, T, radioaktivnog izotopa treba da bude dovoljno dugo kako se aktivnost uzorka ne bi mnogo promenila u vremenskom periodu pripreme eksperimenta, trajanje eksperimenta i samog merenja aktivnosti uzorka.
2. Specifična aktivnost uzorka treba da bude dovoljno velika kako bi se merenje aktivnosti moglo izvršiti sa odgovarajućom tačnošću.
3. Priroda zračenja je treći faktor o kome treba voditi računa pri izboru radioaktivnog obeleživača. Izvori mekog zračenja nisu pogodni jer se samoapsorbuju u obeleženom uzorku. Ni izvori γ -zračenja nisu pogodni zbog prodornosti tog zračenja i moguće destrukcije materije. Iz toga sledi da su β -radioaktivni izvori najpogodniji, s tim što se i α -emiteri koriste, naročito u oblasti autoradiografije.
4. Primenjeni radioaktivni izotop, u svojstvu obeleživača, mora da ima isti hemijski oblik kao i uzorak koji se obeležava.

Primena radioaktivnih obeleživača u hemijskoj analizi

Primena radioaktivnih izotopa u hemijskoj analitici ima za cilj:

- ispitivanje ponašanja tragova supstanci (aktivnih i neaktivnih) u homogenim i heterogenim smešama, kao i njihovu kvalitativnu i kvantitativnu analizu;
- razdvajanje uglavnom nemerljivih količina radioaktivnih jedinjenja, jednih od drugih, ili od neaktivnih produkata;
- merenje fizičko-hemijskih konstanti koje su od interesa u hemijskoj analizi (rastvorljivost, distribicioni koeficijent itd):- proveru i usavršavanje postojećih i istraživanje novih analitičkih metoda itd.

Razlikuje se nekoliko postupaka, kao što je: metoda radiometrijske analize, metoda izotopnog

¹M.Haissinsky, Nuklearna hemija i njene primene, Naučna knjiga, Beograd, str. 446-456, 1962.

razblaženja, metoda aktivacione analize, o kojoj će posebno biti reči u poglavlju 4., i dr².

Radiometrijska analiza

Analitičke hemijske metode kvantitativnog određivanja radioaktivnih izotopa se mogu zameniti merenjem aktivnosti, čak i u slučajevima kada su merene količine veoma male. Određivanjem apsolutnog broja raspada po jedinici vremena, uz poznavanje radioaktivne konstante datog izotopa, može da se izračuna masa izotopa, pri čemu treba voditi računa o faktoru zastupljenosti merenog izotopa u izotopskoj smeši hemijskog elementa.

Radiometrijska analiza može da se primeni i u slučajevima određivanja izotopa koji nisu radioaktivni, ukoliko oni grade neka karakteristična jedinjenja sa nekim od radioaktivnih izotopa. Takav je slučaj kvantitativne analize sadržaja sulfata u nekom rastvoru. Rastvoru čija se koncentracija ne zna dodaje se rastvor olova obeležen sa ²¹²Pb (ThB) ili ²¹⁰Pb (RaD) čija je specifična aktivnost poznata. Tom prilikom dolazi do taloženja PbSO₄ čime je aktivnost rastvora iznad taloga smanjena u odnosu na prvobitnu. Iz te razlike se može izračunati koncentracija sulfata u ispitivanom rastvoru.

Metoda izotopnog razblaženja

Metoda izotopnog razblaženja predstavlja vrlo preciznu kvantitativnu metodu za određivanje sadržaja neke supstance čak i u veoma složenim hemijskim sistemima. princip metode je sledeći: U smešu, u kojoj je potrebno kvantitativno odrediti neku komponentu (x mg), dodaje se poznata količina te komponente, ali obeležena radioizotopom (a mg). Po dodatku izvrši se totalno homogenizovanje, a zatim odvaja jedan deo i određuje njegova specifična aktivnost (S_1 imp/min mg). Ako je specifična aktivnost obeležene komponente bila S_0 (imp/min mg) onda se na osnovu činjenice da je ukupna aktivnost ostala nepromenjena dolazi do odnosa za izračunavanje:

$$aS_0 = (a + x) S_1$$

Odakle je nepoznata količina :

$$x = a \left(\frac{S_0}{S_1} - 1 \right)$$

Gore opisani postupak naziva se normalnim. Osim ovoga razlikuju se još i inverzni, postupak višestrukog razblaženja i derivativni postupak³.

Primena radioaktivnih izotopa u industriji

Primena izotopa kao izvora zračenja

Njihova najjednostavnija primena sastoji se u jonizujućem dejstvu. Zbog pojave trenja u nekim proizvodnim procesima dolazi do naelektrisanja metalnih površina mašina. Onda se u blizini

²M.Haissinsky, Nuklearna hemija i njena primena, Naučna knjiga, Beograd, str.540, 1962.

³ I. Draganić i sar., Radioaktivni izotopi i zračenja, Naučna knjiga, Beograd, Knjiga II, str. 139-145, 1962.

tih površina mogu postaviti izvori ^{210}Pb (izvor α -čestica) koji jonizuje okolni vazduh, zbog čega se metalna površina razelektriše.

Izvori γ -zraka se često upotrebljavaju u oblasti defektoskopije, tj za ispitivanje homogenosti varova, ispitivanje odlivaka i dr. Ovi se takođe često primenjuju u uređajima pomoću kojih se registruju promene gustine sredine kroz koju prolazi γ -zračenje. Takvi su uređaji npr. registratori nivoa tečnosti. Unošenjem γ -izvora u vodu koja doseže do naftonosnih slojeva moguće je ustanoviti pojas u kome je ima najviše, i to opet preko različite apsorpcije γ -zraka u vodi i nafti. Tok podzemnih voda se na isti način može ispitati.

Apsorpcija β -čestica omogućava merenje debljine tankih folija, papira i dr. U industriji papira npr. postoje automatski uređaji u koje je ugrađen izvor β -zraka koji se delimično apsorbuju u papiru (koriste se meki β -zraci) i time se kontroliše debljina papira.

Izvori zračenja jakog intenziteta imaju veliku primenu u industriji jer često katalizuju neki proces sinteze. Tako npr. hloriranje benzola i njegovo prevođenje u heksahlorbenzol u reakciji benzola sa ugljentetrahloridom ide daleko brže u prisustvu jakih γ radioaktivnih izvora. Jaki γ -izvori se koriste i za sterilizaciju farmaceutskih proizvoda, kao i hrane. Za to se najčešće koriste izvori ^{137}Cs i ^{60}Co ⁴.

Primena radioaktivnih izotopa kao obeleživača

Najpoznatija je primena radioaktivnih izotopa za ispitivanje habanja velikih metalnih postrojenja. Radioaktivni izotop se ugrađuje u zid metalne obloge koja je izložena habanju, pa merenjem aktivnosti date površine može da se konstatuje kad je dati sloj otpao. Propustljivost različitih industrijskih filtera se takođe ispituje uz pomoć radioaktivnih izotopa, čija se difuzija kroz filter prati preko registrovanja aktivnosti brojačem. Pri proizvodnji čelika često se ugrađuje ^{60}Co u čelične ploče, pa se autoradiografskim metodama sudi o kompaktnosti materijala ⁵.

Primena radioaktivnih izotopa u medicini

Savremena dijagnostika, kao i veoma važne biohemijske analize, nemoguće su bez primene radioaktivnih obeleživača. Pri izboru radioaktivnih izotopa vodilo se računa o mnogim faktorima (vremenu poluraspada, energiji, specifičnoj aktivnosti), ali je najvažniji faktor biološko vreme izlučivanja datog izotopa iz organizma (biološko vreme poluraspada). Tako su najširu primenu dobili radioaktivni izotopi ^{32}P i ^{59}Fe za analizu krvi, ^{131}I za scintigrafiju tiroidne žlezde i drugi.

Kao zatvoreni izvor u medicini se najviše koristi tzv. kobaltna bomba za ozračivanje kancerogenog tkiva ⁶.

Ovo je samo u najkraćim crtama pregled mnogostruke primene radioaktivnih izotopa, ali primeri svakako ovim izlaganjem nisu iscrpljeni.

⁴ I.Draganić i sar., Radioaktivni izotopi i zračenja, Naučna knjiga, Beograd, Knjiga III, str. 88, 1962.

⁵ Ibid, str. 86.

⁶ Ibid, str.3, 41, 64 i M.Haissinsky, Nuklearna hemija i njene primene, Naučna knjiga, Beograd, str. 578, 1962.

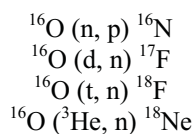
AKTIVACIONA ANALIZA

Savremenom naučno-istraživačkom radu, kao i industriji, medicini, biologiji i mnogim drugim oblastima, često se nameće problem određivanja mikrokoncentracija nekih elemenata u određenim materijalima. U pojedinim slučajevima to mogu biti i tako niske koncentracije kao što su 10^{-15} do 10^{-16} g izvesnih elemenata. U tim slučajevima jedino osetljivošću se pokazala metoda aktivacione analize i ona zauzima veoma značajnu ulogu u modernoj analitici tragova.

Princip metode aktivacione analize sastoji se u tome što označavanjem nekog materijala tzv. "mete" neutronima ili ubrzanim naelektrisanim česticama, kao posledica nuklearnih reakcija, nastaju radioaktivni izotopi elemenata - komponenta mete. Na osnovu vrste, energije zračenja i vremena poluraspada nastalih radioaktivnih izotopa, moguće je izvršiti identifikaciju elemenata prisutnih u mikrokoncentracijama, dok se kvantitativna analiza vrši merenjem aktivnosti .

Izbor nuklearne reakcije za aktivaciju

Osnov aktivacione analize čine nuklearne reakcije između jezgra mete i bombardujućih čestica ili fotona. Pri nuklearnim reakcijama stabilni izotopi, u jednoj te istoj meti, mogu da pretrpe različite nuklearne transformacije, zavisno od vrste i energije čestice kojima se meta ozračuje. Tako npr. ako se izotop kiseonika ^{16}O izloži dejstvu različitih čestica, ishod nuklearnih reakcija može da bude:



gde simbol ispred zagrade označava jezgro-metu, a simbol iza zagrade jezgro-prodakt nuklearne reakcije. U zagradi se navodi prvo upadni projektil, a zatim, zračenje u trenutku nuklearne reakcije.

S obzirom na vrstu projektila, u aktivacionoj analizi mogu da se koriste sledeći tipovi nuklearnih reakcija:

- reakcije sa neutronima:

a) sa termalnim neutronima: (n, γ) , (n, α) , (n, f) i dr.

b) reakcije sa brzim neutronima - mogu da budu vrlo različite zavisno od energije neutrona: (n, p) , (n, d) , (n, α) , $(n, 2n)$ itd.

-reakcije sa protonima: (p, n) , $(p, 2n)$, (p, α) , i dr.

-reakcije sa deutronima: (d, n) , (d, p) , $(d, 2n)$, (d, α) i dr.

-reakcije sa α -česticama: $(\alpha, 2n)$, (α, pn) i

-reakcija sa fotonima visokih energija: (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) i dr.

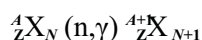
Pri razmatranju mogućnosti određivanja nekog hemijskog elementa u mikrokoncentraciji metodom aktivacione analize od velikog je značaja izbor nuklearne reakcije za aktivaciju. To znači da je od velikog značaja izbor čestica sa kojima se vrši ozračivanje mete, jer nam je cilj da se samo željene nečistoće (elementi u mikrokoncentraciji) aktiviraju, a to je uslovljeno efikasnim presekom. Efikasni presek (σ) je merilo verovatnoće odigravanja određene nuklearne reakcije između posmatranog jezgra i upadne čestice. Jedinica efikasnog preseka je 1 barn ($1\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2$). Kako se određivanje elemenata u mikrokoncentraciji ovom metodom zasniva na merenju nastale radioaktivnosti, potrebno je da ona bude dovoljno visoka, kako bi osetljivost i preciznost merenja bili zadovoljavajući. Pri tome nastali radioaktivni izotop mora da bude pogodan za identifikaciju, odnosno mora da ima povoljno vreme poluraspada i, za merenje, pogodnu vrstu i energiju zračenja.

Reakcije sa termalnim neutronima

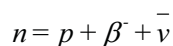
Od pomenutih nuklearnih reakcija za analitičke svrhe u najvećoj meri se koriste (n, γ) reakcije sa termalnim neutronima. Termalni neutroni su oni neutroni koji su u termodinamičkoj ravnoteži sa okolinom na datoj temperaturi tj. pokoravaju se Maxwell-ovoj raspodeli po brzinama. Budući da su neutroni čestice bez naelektrisanja, oni ne trpe dejstvo kulonske potencijalne barijere pri prodiranju u jezgra atoma. Tako i termalni neutroni, čija je energija samo oko 0,03 eV, sa lakoćom prodiru u jezgra atoma. Kao posledica toga, većina stabilnih izotopa elemenata koji se nalaze u prirodi, ima dovoljno velike efikasne preseke za reakcije sa termalnim neutronima.

Pri (n, γ) reakciji, neutron - čestica jedinične mase i bez naelektrisanja, biva zahvaćen od strane jezgra atoma mete uz trenutnu emisiju više γ -kvanata.

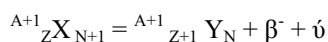
Procesom zahvata neutrona ne menja se hemijski identitet jezgra atoma mete (naelektrisanje jezgra ostaje nepromenjeno), ali nastaje izotop mase veće za jedinicu:



Ako je nastalo jezgro ${}^{A+1}_ZX_{N+1}$, u energetskom smislu, nestabilno, ono spontano radioaktivnim raspadom, uz emisiju najčešće β^- čestice (zbog viška neutrona u njemu), prelazi u stabilno stanje. Shodno tome dolazi do reakcije:



odnosno:



U nekim slučajevima dezintegracija radioaktivnih jezgara dešava se β^+ -raspadom (emisijom pozitrona), ili može da dođe do zahvata elektrona iz atomskog omotača.

Osnovna zračenja, β^+ i β^- , pri pomenutim nuklearnim transformacijama, za većinu jezgara praćena su i emisijom γ -zračenja diskretnih energija.

Značajni parametri

Aktivnost radioizotopa, nastalog aktivacijom neutronima, pored toga što je srazmerna količini stabilnog izotopa u uzorku, zavisi i od prirode ozračivanog uzorka, od uslova kojima se uzorak ozračuje i od osobina nastalog radioizotopa.

U najprostijem slučaju kada hemijska nečistoća sadrži samo jedan stabilan izotop koji se nuklearnom (n, γ) reakcijom prevodi u odgovarajući radioaktivni izotop, broj nastalih radioaktivnih jezgara, n , u toku vremena ozračivanja, t , može da se predstavi kao:

$$n = \frac{n_0 F \sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

gde je:

σ - efikasni presek jezgra koje učestvuje u nuklearnoj reakciji, u barnima,

n_0 - ukupan broj prisutnih jezgara koja mogu da se aktiviraju,

F - fluks termalnih neutrona - br. neutrona / $\text{cm}^2 \text{s}$

λ - radioaktivna konstanta nastalog radioaktivnog izotopa.

Aktivnost uzorka, tj. broj raspada po jedinici vremena, neposredno posle ozračivanja će biti:

$$A = \lambda n = n_0 F \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \text{ rasp/s}$$

a posle nekog vremena t_1 , koje protekne za izvođenje nužnih operacija pre nego što se pristupi merenju aktivnosti biće:

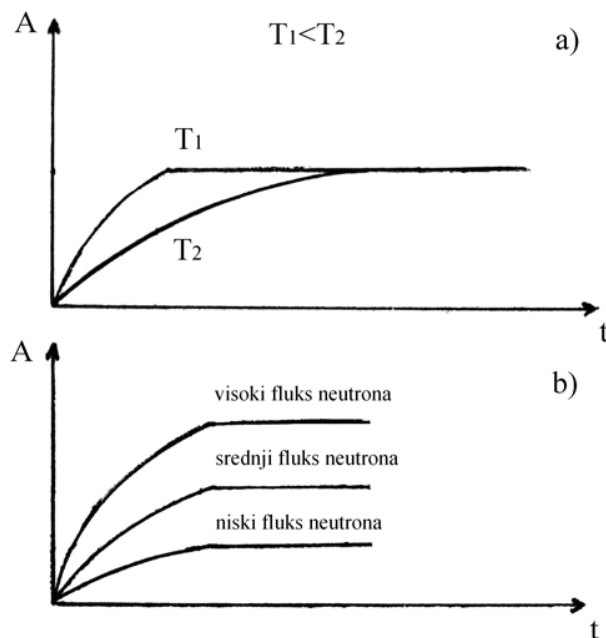
$$A = n_0 F \sigma (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_1} \text{ rasp/s}$$

Ukoliko hemijski element nečistoće ima više stabilnih izotopa, a jedan podleže nuklearnoj reakciji, prethodna jednačina dobija oblik:

$$A = n_0 F \sigma \theta (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_1} \text{ rasp/s}$$

gde je θ - udeo izotopa (koji učestvuje u nuklearnoj reakciji) u prirodnoj smeši izotopa datog elementa.

Iz gornje jednačine sledi da je aktivnost, pri konstantnim uslovima ozračivanja, za dati izotop eksponencijalna funkcija vremena ozračivanja. Usled izjednačavanja brzine nastajanja radioizotopa i brzine njegovog nestajanja usled raspada, zaviso od vremena poluraspada radioizotopa, brže ili sporije, aktivnost dostiže neku maksimalnu vrednost i ostaje praktično konstantna, ma koliko da se produži vreme ozračivanja. Ova aktivnost naziva se *aktivnost zasićenja*, a vreme za koje se ono



Slika 1.

postiže - *vreme zasićenja*. Praktično za svaki radioizotop ono iznosi oko 10 T, budući da se po isteku tog vremena dostigne 99,9% aktivnosti zasićenja.

Na sl.1a. dat je grafički prikaz gornje jednačine za dva radioizotopa: za jedan sa kratkim i za

drugi sa znatno dužim vremenom poluraspada. Na sl.1b. dat je prikaz uticaja veličine fluksa neutrona na prinos posmatranog izotopa.

Pri izvođenju aktivacione analize, pri izboru uslova rada, mora da se vodi računa o usklađivanju ovih veličina, kako bi se postigli optimalni rezultati.

Ako se u jednačini broj jezgara zameni ekvivalentnim izrazom $n_0 = N_A m/M$ i jednačina reši po m , dobiće se izraz za proračun količine nečistoće u uzorku:

$$m = \frac{A \cdot M}{N_A \cdot F \cdot \sigma \cdot \theta \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot e^{-\lambda t_1}}$$

Određivanje sadržaja mikroelementa u uzorku, primenom ove jednačine zahteva poznavanje apsolutne aktivnosti (A), efikasnog preseka (σ) i fluksa neutrona (F). Međutim, određivanje apsolutne aktivnosti uzorka, naročito za zračenja niskih energija, povezano je sa znatnim teškoćama pri definisanju svih onih veličina od kojih zavisi određivanje apsolutne aktivnosti. Na drugoj strani, efikasni preseki za (n, γ) reakcije velikog broja jezgara definisani su sa nedovoljnom tačnošću, a često podaci citirani od strane različitih autora nesaglasni. Upravo iz ovih razloga, metode apsolutnih merenja nisu praktične za rutinsku analizu materijala, već se u te svrhe primenjuju relativne metode merenja. Primenom metode relativnog merenja dobijaju se daleko tačniji rezultati jer se pravi standard, etalon, približno istog sastava kao i uzorak, s tim što je u standardu sadržaj nečistoće poznat. Uzorak i standard se istovremeno ozračuju pod istim uslovima, posle čega dobijene aktivnosti mogu da se upoređuju:

$$A_x : A_{st} = m_x : m_{st}$$

gde su A_x i A_{st} apsolutne aktivnosti uzorka i standarda respektivno, a m_{st} količina nečistoće u standardu.

Kako se apsolutna aktivnost izračunava na osnovu merene vrednosti uz poznavanje efikasnosti (konstante karakteristične za svaki detekcioni uređaj i određene geometrijske uslove), to je jasno da se relativnom metodom u aktivacionoj analizi izbegava i zahtev za poznavanje apsolutnih aktivnosti, pa je:

$$m_x = m_{st} \frac{R_x}{R_{st}}$$

gde je:

R_x - relativna aktivnost uzorka (imp/s)

R_{st} - relativna aktivnost standarda (imp/s).

Osetljivost metode i izvori grešaka u aktivacionoj analizi

Osetljivost svake analitičke metode definisana je najmanjom količinom nekog elementa izmerenom tom metodom, pod određenim uslovima. Po Koch-u osetljivost aktivacione enelize se definiše kao količina elementa izražena u μg koja, pri ozračivanju fluksom neutrona od $10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$ do zasićenja (ili najduže 30 dana), daje aktivnost od 1.000 Bq. Saglasno ovome, aktivaciona analiza ima izuzetno veliku osetljivost u odnosu na druge analitičke metode, i pod određenim uslovima, pruža mogućnost određivanja nekih elemenata prisutnih u ispitivanom uzorku u količinama reda veličine 10^{16} g .

Neka za ilustraciju osetljivosti pri određivanju niza elemenata aktivacionom analizom i nekim drugim metodama posluži tabela (1). Navedene osetljivosti metode aktivacione analize dobijene su pri

ozračivanju uzoraka fluksom od 10^{13} n/cm²s do zasićenja ⁷, odnosno najduže do trideset dana, za elemente koji aktivacijom daju radioizotope dugog vremena poluraspada.

Tabela (1).

Osetljivost metode izražena u µg/ml					
Element	Aktivaciona analiza	Bakarna varniza	Luk jednosmerne struje	Plamena fotometrija	Spektrofotometrija
Na	0.00035	0.1	20	0.002	-
Al	0.00005	0.1	0.2	20	0.002
P	0.001	20	50	-	0.01
Cl	0.0015	-	-	-	0.04
V	0.00005	0.05	-	2	0.2
Mn	0.00003	0.02	0.2	0.1	0.001
Co	0.001	0.5	-	10	0.025
Ni	0.0015	0.1	4	10	0.04
Fe	0.45	0.5	0.2	2	0.05
Cu	0.00035	-	0.2	0.1	0.03
Zn	0.002	2	20	2000	0.015
As	0.001	5	10	-	0.1
Ag	0.0055	-	0.1	0.5	0.1
Cd	0.0025	2	4	20	0.01
In	0.000005	1	-	1	0.2
Sb	0.0002	5	4	-	0.03
Sm	0.00003	0.2	-	100	-
Eu	0.0000015	0.02	-	-	-
Dy	0.0000015	0.5	-	10	-
Ir	0.000015	5	-	-	2
Au	0.00015	0.2	-	200	0.1
Hg	0.0065	5	2	100	0.08
U	0.0005	1	-	10	0.7

Već sama činjenica da se osetljivost definiše za određene uslove, ukazuje na uticaj više činilaca od čijeg izbora zavisi osetljivost analize. Na osnovu jednačine za aktivnost može da se zaključi koji su to činioci u aktivacionoj analizi, čijom se promenom može postići veća ili manja osetljivost. To su: fluks neutrona, vreme ozračivanja i vreme proteklo od prestanka ozračivanja do momenta merenja

⁷Maksimalni fluks neutrona reaktora RA u Vinči iznosi oko $5 \cdot 10^{13}$ n/cm²s

aktivnosti. Pored pobrojanih činilaca, osetljivost aktivacione analize zavisi od efikasnosti mernih uređaja.

Rezultati dobijeni aktivacionom analizom, u većini slučajeva, dati su u literaturi sa greškom od $\pm 10\%$, što je daleko ispod nivoa grešaka rezultata dobijenih ostalim analitičkim metodama u oblasti niskih koncentracija ispitivanih elemenata. I pored toga što rezultati mogu da budu određeni sa relativno malom greškom, pri izvođenju aktivacione analize postoji niz mogućih izvora grešaka, od kojih će na ovom mestu biti pomenuti samo oni koji se odnose na pripremu uzoraka za ozračivanje i na proces aktivacije.

S obzirom na visoku osetljivost metode aktivacione analize, potrebno je da se obrati maksimalna pažnja pri radu da pri analizi tragova u uzorku ne bi došlo do aktiviranja makrokomponente u meti. Potrebno je da efikasni presek makrokomponente za datu nuklearnu reakciju bude jednak nuli, ili da teži nuli. U slučaju kada je potrebno radiohemijsko razdvajanje izotopa posle ozračivanja, može doći do radiohemijskog onečišćenja, koji predstavlja dodatni izvor grešaka.

Od oblika i veličine pripremljenih uzoraka zavisne su i greške nastale pri ozračivanju usled tzv. efekta samozaklanjanja. U uzorcima većih debljina dolazi do smanjenja fluksa neutrona na izlazu iz mete. Tada merena aktivnost nije srazmerna masi uzorka. Promena fluksa neutrona u funkciji debljine uzorka data je izrazom:

$$F_x = F_0 e^{-\sigma_t n x}$$

gde je:

F_x - fluks neutrona oslabljen prolaskom kroz uzorak debljine x

F_0 - fluks neutrona pre prolaska kroz uzorak,

σ_t - ukupan efikasni presek,

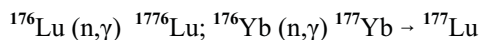
n - broj jezgara u meti po cm^2 ,

x - rastojanje od površine uzorka, izraženo u cm.

Očigledno je da će greške usled samozaklanjanja biti izraženije za uzorke velikog ukupnog efikasnog preseka. Kako je σ_t konstanta za dati materijal, greške koje nastaju usled ovog efekta mogu da se umanje korišćenjem dovoljno malih uzoraka i standarda. Takođe neophodno je voditi računa o geometrijskom rasporedu uzoraka i standarda pri ozračivanju.

Neželjene nuklearne reakcije koje se tokom ozračivanja uzorka odigravaju, kao i transformacije produkata ovih reakcija, predstavljaju takođe izvor grešaka ako doprinose stvaranju ili nestajanju iz sistema onog izotopa koji se analizira. One mogu da budu svrstane u tri grupe ometajućih nuklearnih reakcija: primarne reakcije, sekundarne reakcije i reakcije drugog reda.

Primarne reakcije se odigravaju pri ozračivanju uzoraka koji sadrže više hemijskih elemenata u mikrokonzentraciji. Tada različiti stabilni izotopi u reakciji sa neutronima mogu da daju radioizotop na osnovu kojeg se analiza vrši. Tako (n, γ) reakciju na elementu rednog broja Z ometaju (n, p) i (n, α) reakcije na elementima rednih brojeva $Z-1$ i $Z-2$. Na primer: pri određivanju arsena reakcijom $^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$ ometajuća reakcija je $^{76}\text{Se}(n, p)^{76}\text{As}$. Ako se analizira izotop rednog broja Z , mase A , a u uzorku je prisutan izotop susednog elementa iste mase koji se, pošto je aktiviran, dezintegriše β^- raspadom, dobija se isti radioizotop kao u osnovnom, ispitivanom procesu. Na primer:



Sekundarne nuklearne reakcije se odigravaju između jezgra atoma mete i nuklearnih čestica ili fotona nastalih osnovnom nuklearnom reakcijom. Pri (n, γ) reakcijama ovaj vid smetnji ne dolazi do izražaja, jer je fluks fotona dobijen primarnim procesom nedovoljan za izazivanje nove reakcije.

Reakcije drugog reda mogu da povećavaju ili smanjuju koncentraciju ispitivanog radioizotopa. To su reakcije neutrona sa već aktiviranim izotopom koji se ispituje. Da bi se izbegle

greške ovog porekla, neophodno je pri analizi složenih uzoraka razmotriti moguće interferencije i izabrati najpovoljniji osnovni proces preko koga će biti analiziran određeni element.

Vrste aktivacione analize

Aktivaciona analiza može da se izvodi na dva načina: nedestruktivnim postupkom, pri kome se ispitivani uzorak, po završenom ozračivanju, bez hemijske obrade, analizira na osnovu karakteristika zračenja koje emituje. Drugi, destruktivni postupak, primenjuje se kada je teško, ili nemoguće, razlikovati pojedine mikrokomponente u uzorku zbog sličnih karakteristika njihovih zračenja. Hemijsko razdvajanje tada ne mora da se vrši do elemenata, već je često dovoljno da se uzorak razloži do grupe elemenata, od kojih se svaka podvrgava aktivacionoj analizi. Za ova razdvajanja najčešće se koriste metode jonske izmene, ekstrakcije i nosača koje su osetljive za mikrokoncentracije.

Dok se analiza uz razlaganje primenjuje samo u specifičnim slučajevima, dotle nedestruktivna metoda analize ima široku primenu u analitici najraznovrsnijih materijala. Ona pruža mogućnost istovremenog određivanja i preko dvadeset hemijskih elemenata u uzorku, čija masa nemora da bude veća od desetak miligrama. Ovim su zadovoljeni mnogi od zahteva koji se postavljaju u analitici, brzina i ekonomičnost, uz, već pomenute, osetljivost i tačnost metode.

Zavisno od toga koja će karakteristična veličina radioizotopa biti praćena u cilju njegove identifikacije, postoji više mogućnosti za analizu aktivacionom metodom, bez obzira na to da li je reč o nedestruktivnom ili destruktivnom postupku. Za ovu analizu koriste se radiohemijske metode za identifikaciju radioaktivnih izotopa preko vremena poluraspada i energije zračenja.

Selektivnost metode aktivacione analize

Pri analizi γ -spektara, uz sve predostrožnosti i optimalan izbor parametara od kojih zavisi osetljivost metode aktivacione analize, često može da dođe u pitanje mogućnost određivanja nekog radioizotopa. Smetnje mogu da se jave usled aktivacije onih komponenata uzorka koje nisu predmet analize. Teškoće se javljaju i kada se analiziraju složeni uzorci koji daju kompleksne spektre zračenja. U ovim slučajevima potrebno je postići dovoljnu selektivnost metode za datu mikrokomponentu koja treba da omogući merenje njenog sadržaja u prisustvu ostalih komponenata u uzorku.

Selektivnost metode aktivacione analize pri određivanju nekog elementa i dat je odnosom:

$$S_i = \frac{\text{kolicina } i \text{ - tog elementa u uzorku}}{\text{kolicina svih ostalih elemenata u uzorku koji ometaju odredjivanje } i \text{ - tog elementa}}$$

Kako se postupak pri aktivacionoj analizi sastoji iz više etapa: pripreme, aktivacije, othlađivanja i obrade uzorka, merenja i obrade rezultata, a svaka od njih ima svoju selektivnost, to je moguće povećavanjem selektivnosti u svakoj od etapa, poboljšati ukupnu selektivnost metode.

Kod izvođenja nedestruktivne aktivacione analize, kada se uzorci ozraćuju termalnim neutronima, pri razmatranju poboljšanja selektivnosti treba voditi računa o sledećem:

- Efikasni preseki za aktivaciju stabilnih izotopa termalnim neutronima imaju vrednost od 10^{-4} do 10^4 barna-a. Razlike u efikasnim presecima daju mogućnost za selektivnu aktivaciju tragova elemenata velikog efikasnog preseka (σ), u osnovnom materijalu uzorka (engl. matrix) koji sadrži elemente malih efikasnih preseka. Može da se smatra da je selektivnost metode u odnosu na ispitivanu i -tu mikrokomponentu dobra, ako je σ_i za jedan do tri reda veličine veći od zbira efikasnih preseka ostalih mikrokomponentata i makrokomponente uzorka (σ_m).

-Selektivnost može znatno da se poboljša pravilnim izborom vremenskih parametara: vremena ozračivanja, vremena othlađivanja i vremena merenja aktivnosti. Ovaj izbor zavisi od odnosa vremena poluraspada ispitivanog elementa (T_i) i srednjeg vremena poluraspada ometajuće aktivnosti (T_m). Na ovaj način dobra selektivnost može da se postigne kada je $T_i \ll T_m$ ili $T_i \gg T_m$.

S obzirom na intenzitet i spektar γ -zračenja, dobra selektivnost se postiže takođe optimalnim izborom detektora i metode merenja.

Korišćenje γ -spektrometrije u neutronskoj aktivacionoj analizi, primenom poluprovodničkih detektora, obezbeđuje maksimalnu selektivnost metode, pri čemu su i ostale odlike metode: dobra tačnost, preciznost, osetljivost i brzina izvođenja, u velikoj meri ostvarljive.

FIZIČKOHEMIJSKE METODE ZA RAZDVAJANJE SMEŠA IZOTOPA

Nuklearne reakcije izazvane neutronima ili brzim naelektrisanim česticama, mogu da imaju za posledicu stvaranje radioaktivnih izotopa i u tako malim koncentracijama kao 10^{-15} do 10^{-20} g. Bilo da se izotopi javljaju pojedinačno ili u smeši radioaktivnih izotopa (kao posledica fisije), ni analitičke hemijske, ni spektrohemijske metode nisu mogle da se primene za njihovo određivanje i razdvajanje, jer su neosetljive za tako male koncentracije. Kao vrlo pogodna za razdvajanje smeše izotopa pokazala se grupa fizičkochemijskih metoda koja se zasniva na raspodeli komponenata smeše između dve faze (najčešće tečnost-čvrsta supstanca ili tečnost-tečnost). Nernstov zakon raspodele koji je zajednički za sve metode, važi u svim oblastima koncentracije (kako za 10^{-2} M, tako i za 10^{-12} M rastvora). Za sve koncentracije vrednost distribucionog koeficijenta se praktično ne menja; razlike na trećoj-četvrtj decimali nemaju nikakvog praktičnog niti eksperimentalnog značaja. Najpogodnije su metode sutaloženja (koprecipitacije) sa neaktivnim izotopskim nosačem, jonske izmene i ekstrakcije. Metode jonske izmene i ekstrakcije, osim što su pogodne za razdvajanje smeša izotopa, pogodne su i za ispitivanje raznih karakteristika kao što su na primer: valentnost jona, kompleksiranje itd.

EKSTRAKCIJA

Opšte definicije

Ekstrakcija je važna fizičkochemijska metoda koja se primenjuje za razdvajanje elemenata sličnih hemijskih osobina i malih koncentracija, za ispitivanje fizičkochemijskih osobina kompleksnih jedinjenja, za preradu nuklearnog goriva u nuklearnoj tehnologiji, itd.

Ekstrakcija se zasniva na raspodeli neke supstance između dva rastvarača koji se međusobno ne mešaju u uslovima ravnoteže faza na konstantnoj temperaturi. Ovu raspodelu uslovljava rastvorljivost ispitivane supstance u datom paru rastvarača. Najčešće se kao par rastvarača koriste voda i neki organski rastvarač koji se sa vodom ne meša.

Ekstrakcija se najčešće izvodi u više stupnjeva jer je tako efikasnija u kvantitativnom smislu. U industriji se takav višestepeni proces izvodi automatski pomoću specijalno konstruisanih kolona, a što naročito ima veliki značaj u nuklearnoj industriji za preradu isluženog reaktorskog goriva.

Proces ekstrakcije karakteriše termodinamička veličina koja se naziva koeficijentom raspodele datog elementa i koji proističe iz Nernst-Berthelotovog zakona raspodele:

$$K = \frac{C_1}{C_2} \quad (1)$$

gde je C_1 ravnotežna koncentracija datog elementa u organskoj fazi, a C_2 koncentracija istog elementa u vodenoj fazi.

Ako u vodenoj fazi imamo rastvorena dva elementa, od kojih se svaki raspodeljuje između dve faze sa odgovarajućim koeficijentima raspodele, koje možemo da obeležimo sa K_1 i K_2 , onda njihov odnos:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\left(\frac{C_1}{C_2}\right)_1}{\left(\frac{C_1}{C_2}\right)_2} = Z \quad (2)$$

predstavlja separacioni faktor, tj. faktor koji nam govori do kog stepena je dati organski rastvarač pogodan za razdvajanje posmatranih elemenata. Ako je njegova vrednost 1, ili bliska jedinici upotrebljeni rastvarač nije pogodan za razdvajanje, a ako se jako razlikuje od jedinice razdvajanje će biti efikasno.

Ako pri ekstrakciji u organsku fazu pređe količina supstance m_1 pri čemu je zapremina organske faze V_1 , a ako je u vodenoj fazi početna količina supstance bila m u zapremini V_2 , onda je preostala količina supstance u vodenoj fazi posle ekstrakcije, $m - m_1$, pa se onda osnovna jednačina ekstrakcije može napisati u obliku:

$$\frac{\frac{m_1}{V_1}}{\frac{m - m_1}{V_2}} = K \quad (3)$$

a odavde je količina estrahovana:

$$m_1 = m \frac{K V_1}{K V_1 + V_2} \quad (4)$$

Ako je za kvantitativno izdvajanje elemenata iz vodene faze potrebno izvršiti ekstrakciju sa organskim rastvaračem n puta, pri čemu su zapremine faza uvek iste, to ćemo posle n -te ekstrakcije dobiti:

$$m_n = m \left(\frac{K V_1}{K V_1 + V_2} \right)^n \quad (5)$$

Daleko je pogodnije izvršiti ekstrakciju u više stupnjeva sa manjim porcijama organskog rastvarača nego u jednom stupnju sa velikom zapreminom organskog rastvarača.

Sve ove relacije mogu da se primene samo u slučaju veoma razblaženih rastvora i odsustva bilo kakve promene elementa koji se ekstrahuje, tj. element mora da bude u istom hemijskom obliku u obe faze. Pojave koje mogu da dovedu do odstupanja od osnovnog termodinamičkog zakona raspodele su pojave asocijacije jona u organskoj fazi, zatim mala dielektrična konstanta većine organskih rastvarača može da prouzrokuje ekstrakciju datog elementa, ne u jonskom, nego u molekulskom obliku itd. Zato će u opštem slučaju ravnotežna raspodela rastvorenog elementa između dve faze koje se ne mešaju biti postignuta onda kada hemijski potencijali ispitivanog elementa u te dve faze postanu jednaki:

$$\mu_1 = \mu_1^0 + RT \ln a_1 = \mu_2 = \mu_2^0 + RT \ln a_2 \quad (6)$$

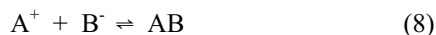
gde je:

μ - hemijski potencijal u datoj fazi,
R - gasna konstanta,
T - apsolutna temperatura i
a - koeficijent aktivnosti jona u datoj fazi.

Odatle sledi univerzalna formulacija zakona raspodele pri ekstrakciji, koja će važiti i za koncentrovanije rastvove:

$$K = \frac{a_1}{a_2} = const. \quad (7)$$

Često se vrši ekstrakcija, organskim rastvaračima, supstanci koje su u vodenim rastvorima potpuno disosovane, ali u nevodenim rastvorima nedisosovane. U tom slučaju zakon raspodele se odnosi samo na nedisosovane molekule koji imaju istu prirodu u obe faze. Ako su A i B joni na koje disosuje jedinjenje AB u vodenoj fazi:



onda se zakon hemijske ravnoteže za proces disocijacije može napisati:

$$k = \frac{C_{AB}}{C_A \cdot C_B} \quad (9)$$

a ako je, kao što je to čest slučaj, disocijacija u vodi potpuna i osim toga $C_A = C_B$, onda je:

$$C_{AB} = k C_A^2 \approx k C^2 \quad (10)$$

gde je C - molarna koncentracija posmatranog jedinjenja u vodi. Onda će zakon raspodele imati oblik:

$$K = \frac{(C_{AB})_1}{(C_{AB})_2} = \frac{(C_{AB})_1}{(kC^2)_2} \quad (11)$$

gde se indeksi 1 i 2 odnose na organsku, odnosno vodenu fazu. U tom slučaju koncentracija supstance ekstrahovane organskim rastvaračem zavisice od kvadrata koncentracije te supstance u vodenom rastvoru.

Osim čisto termodinamičkih faktora koji utiču na efikasnost metode ekstrakcije veoma je važna i kinetika procesa. Kinetika prelaza iz jedne faze u drugu zavisi od koeficijenta difuzije supstance koje se ekstrahuje i od uslova mešanja. Ako je proces ekstrakcije povezan i sa hemijskim promenama, o kojima je bilo reči, onda kinetika ekstrakcije može biti određena brzinom uspostavljanja hemijske ravnoteže u odgovarajućoj tečnosti. U svakom posebnom slučaju pitanje kinetike mora da se rešava eksperimentalnim putem, jer nekih opštih zakona nema.

HROMATOGRAFSKE METODE

Hromatografske metode se dele prema tipu fizičkohemijskih procesa na kojima se zasnivaju na:

1. Adsorpcionu hromatografiju,
2. Podeonu hromatografiju
3. Taložnu hromatografiju,
4. Jonoizmenjivačku hromatografiju.

Adsorpciona hromatografija

Adsorpciona hromatografija je proces u kome dolazi do adsorpcije molekula ili jona iz rastvora na čvrstom adsorbensu. Razdvajanje elemenata je moguće jer postoje razlike u afinitetu vezivanja pojedinih komponenata sistema za adsorbens. Na adsorpcioni proces mogu da se primene osnovni zakoni adsorpcije. Najčešće se koristi Langmuir-ova izoterma koja pretpostavlja da je adsorbovan samo monomolekulski sloj i dobro se primenjuje u slučaju hemisorpcije. U rastvorima je adsorpcija vrlo kompleksna i za nju se, osim Langmuir-ove, koristi i empirijska Freundlich-ova jednačina izoterme:

gde je:

$$\frac{x}{m} = k C_n^{\frac{1}{n}} \quad (18)$$

x/m - adsorbovana količina po gramu adsorbenasa u uslovima ravnoteže,
 C - ravnotežna koncentracija rastvora u odnosu na komponentu koja se raspodeljuje,
 k - konstanta koja ima ulogu distribucionog koeficijenta,
 $1/n$ - empirijska konstanta čija je vrednost manja od 1.

Ukoliko dolazi do adsorpcije molekula i ako oni hemijski ne reaguju sa aktivnim centrima adsorbenasa, onda povišenje temperature smanjuje adsorpciju. Međutim, ako se adsorbuju joni, taj se proces zasniva na pojavi dvostrukog električnog sloja i adsorpcija može da bude primarna i sekundarna (pojava objašnjena kod primene nosača u radiohemiji, pogl.7)⁸.

Podeona hromatografija (hromatografija na hartiji i na tankom sloju)

Podeona hromatografija se zasniva na pojavi različite rastvorljivosti supstance u nepokretnom rastvaraču, fiksiranom na nekoj koloni od internog, poroznog materijala, i pokretnom rastvaraču koji struji kroz kolonu. Razdvajanje kako radioaktivnih, tako i stabilnih izotopa vrši se po principima koji važe za metodu ekstrakcije. Ako pokretni rastvarač veoma sporo struji kroz kolonu, dolazi do ravnotežne raspodele ispitivane komponente između pokretnog i nepokretnog rastvarača u veoma tankim slojevima (mikroslojevi) duž cele kolone. Proces adsorpcije i desorpcije se više puta

⁸S.Gleston, Udžbenik fizičke hemije, Naučna knjiga, Beograd, str.922, 1970.

ponavljaju (broj ponavljanja zavisi od dužine kolone) čime se postiže da se neznatne razlike u koeficijentima raspodele različitih komponenti povećavaju, pa njihova separacija postaje veoma efikasna. U ovu vrstu hromatografije ubraja se i hromatografija na papiru. Moć odvajanja definisana

$$R_f = \frac{\text{rastojanje koje supstanca predje od tacke nanosenja}}{\text{rastojanje koje predje front rastvaraca}}$$

je razlikama karakteristične vrednosti:

a efikasnost separacije dve komponente data je separacionim faktorom:

$$F = \frac{R_{f_1}}{R_{f_2}} \quad (19)$$

Taložna hromatografija

Taložna hromatografija je metoda koja počiva na razlikama u proizvodima rastvorljivosti jedinjenja koje grade različiti joni ispitivane smeše sa istim taložnim sredstvom. Ovo taložno sredstvo može da bude smešteno u staklenu kolonu ili se sa njime natopi neki inertni nosač (porozni materijal) kao što je celuloza. Efikasnost ove metode u mnogome zavisi od mogućnosti taloga da se zadrži na onom mestu na kome se formirao.

U tom slučaju se dobijaju talozi koji se formiraju duž cele kolone na mestima kako to odgovara njihovim proizvodima rastvorljivosti, pri čemu se na vrh kolone uvek nalazi talog jedinjenja sa najmanjim proizvodom rastvorljivosti⁹.

Jonoizmenjivačka hromatografija

Jonoizmenjivačka hromatografija ima veliku primenu u radiohemiji i služi kako za razdvajanje izotopa, tako i za njihovo koncentrovanje. Kao jonoizmenjivači mogu da posluže prirodni minerali (neorganskog porekla) i sintetički materijali (organskog porekla) koji se nazivaju jonoizmenjivačkim smolama. Osnovna karakteristika svih jonoizmenjivačkih adsorbenasa je da mogu da vrše izmenu svojih jona ili grupa atoma sa jonima iz rastvora.

Jonoizmenjivači, bilo neorganski ili organski, mogu da se podele na katjonske i anjonske u zavisnosti od toga koju vrstu jona izmenjuju. Isto tako i jedni i drugi jonoizmenjivači moraju da budu praktično nerastvorni u rastvorima iz kojih se vrši izmena jona.

Neorganski jonoizmenjivači

Proces jonske izmene bio je otkriven na prirodnim materijalima, međutim danas su razrađeni procesi sinteze neorganskih jonoizmenjivača. Njihova primena je veoma velika, specijalno u slučajevima ispitivanja na visokim temperaturama, kao i u radiohemiji zbog velike postojanosti u odnosu na jonizujuće zračenje. Osim njihove praktične primene mora se spomenuti i njihov značaj u ispitivanju sorpcije jona na talozima, elektroforetskih osobina suspenzija, difuzije jona u kristalima,

⁹ I. Draganić i sar., Radioaktivni izotopi i zračenja, Naučna knjiga, Beograd, II knjiga, str. 123, 1962.

izotopske izmene u heterogenim sistemima i mnogih pitanja strukturne hemije. Neorganske jonoizmenjivače možemo da podelimo na:

- a) Jonoizmenjivače sa kristalnom strukturom (alumosilikati, heteropolikiseline),
- b) Jonoizmenjivače delimično kristalne strukture i amorfne supstance (hidroksidi viševalentnih jona, kisele soli viševalentnih jona i višebazne kiseline).

Organski jonoizmenjivači

Sintetičke smole koje imaju jonoizmenjivački karakter dobijaju se npr. polimerizacijom stirola i umrežavanjem dobijenog polimera sa divinilbenzolom. U tako dobijeni produkt ugrađuju se

aktivne grupe koje imaju karakter izmenjivačkih centara za katjone ili anjone.

Katjonski izmenjivači imaju kao aktivne grupe $-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ i dr. pri čemu u zavisnosti od stepena disocijacije svake od njih zavisi jačina ovih polielektrolita.

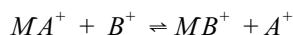
Anjonski jonoizmenjivači imaju u svojim aktivnim centrima amino grupe, čiji vodonikov jon može biti supstituisan raznim anjonima, pa jačina ovih polielektrolita zavisi od stepena disocijacije te supstancije.

Kapacitet organskih jonoizmenjivača zavisi očigledno od broja aktivnih grupa u njemu i on je najveći reda veličine 2-4 mekv/g smole.

Mehanizam jonske izmene

U procesu jonoizmenjivačke hromatografije dolazi do reverzibilne izmene jona između dve supstance, pri čemu je jedna od njih nerastvorni jonoizmenjivač. Kao primer neka nam posluži katjonski jonoizmenjivač *Dowex 50*, koji spada u jake polielektrolite jer ima aktivne grupe $-\text{SO}_3\text{H}$ koje su potpuno disosovane pri svim vrednostima pH. Dakle ako ovu smolu potopimo u vodu, dolazi do potpune disocijacije pomenutih grupa, pri čemu u unutrašnjosti smole $[\text{H}^+]$ dostiže vrednost i do 5N. Ako ovu smolu sada tretiramo nekom bazom, dolazi do neutralizacije, a jonoizmenjivač prelazi u katjonski oblik. Prevođenje smole iz H^+ oblika u katjonski oblik može da se postigne njenim potapanjem u rastvor neke soli, jer katjoni mogu slobodno da ulaze i izlaze iz polimerne rešetke ako je zadovoljen uslov elektroneutralnosti. Kako proces jonske izmene ima ravnotežni karakter, to potpuno prevođenje katjonske smole iz jednog oblika u drugi može biti postignuto samo ako je količina jona koji se izmenjuje u velikom višku ili ako se jon koji se izmenjuje na smoli stalno odstranjuje iz sistema (slučaj eluiranja).

Proces jonske izmene može da se predstavi povratnom reakcijom:



gde je M^- polimerna rešetka smole, a A^+ i B^+ katjoni koji učestvuju u izmeni.

Anjoni koji se nalaze u rastvoru ne učestvuju u ovoj reakciji jer je anjon jonoizmenjivačke smole nerastvoran, pa do izmene ne može da dođe. Na ovu reverzibilnu reakciju, u uslovima ravnoteže, može da se primeni zakon o dejstvu masa, pa se za proces jonske izmene može da odredi termodinamička konstanta ravnoteže:

$$K = \frac{[M^- B^+][A^+]}{[M^- A^+][B^+]} \quad (20)$$

pri čemu smo zanemarili koeficijente aktivnosti jona u čvrstoj fazi i koeficijente aktivnosti jona u

rastvoru (što je dozvoljeno ako se radi o vrlo razblaženim rastvorima).

$[M^-B^+]$ nije ništa drugo do koncentracija vezanog jona iz rastvora na jedan gram smole u uslovima ravnoteže na konstantnoj temperaturi, a $[B^+]$ ravnotežna koncentracija tog istog jona u rastvoru, pa se distribicioni koeficijent za katjon B^+ može predstaviti kao:

$$K^{B^+}_d = \frac{[M^-B^+]}{[B^+]} \text{ ml/g} \quad (21)$$

Na osnovu jednačina (20) i (21) konstanta izmene je:

$$K = K_d^{B^+} \cdot \frac{[A^+]}{[M^-A^+]} \quad (22)$$

Ako je poznat ukupan kapacitet jonoizmenjivačke smole q_0 (broj mekv./g smole) i početna koncentracija rastvora c_0 (mekv/ml rastvora) onda je:

$$\begin{aligned} [A^+] + [B^+] &= c_0 & \text{tj.} & [A^+] = c_0 - [B^+] \\ [M^-A^+] + [M^-B^+] &= q_0 & \text{tj.} & [M^-A^+] = q_0 - [M^-B^+] \end{aligned}$$

posle izvršenog procesa izmene i u uslovima ravnoteže.

Sada izračunavanje konstante izmene ne predstavlja nikakav problem jer se može odrediti iz poznatih eksperimentalnih podataka, po jednačini:

$$K = K_d^{B^+} \cdot \frac{c_0 - [B^+]}{q_0 - [M^-B^+]} \quad (23)$$

Dato razmatranje se odnosilo na jednovalentne katjone, međutim ukoliko se radi o izmeni viševalentnih katjona, konstanta jonske izmene će biti utoliko veća (proces pomeranja u smislu s leva na desno), ukoliko je valentnost katjona veća i ukoliko je redni broj elemenata veći, sa čim u vezi stoji hidratizirani jonski radijus.

U tabeli 2. su podaci za konstante izmene jednovalentnih katjona na smoli Dowex 50 iz rastvora 0,1N, pri čemu je jasna zavisnost afiniteta izmene od rednog broja elemenata.

Tabela 2:

Konstante jonske izmene K u funkciji rednog broja jednovalentnih katjona na smoli Dowex 50

Katjon	K	Anjon
NH_4^+	1,20	Cl^-
Na^+	1,20	Cl^-
K^+	1,50	Cl^-
Li^+	0,61	Br^-

Kao što se iz tabele vidi, konstante jonske izmene za razne jednovalentne katjone se razlikuju među sobom i imaju vrednosti veće od jedinice (osim za Li kod koga je u pitanju velika hidratacija). Zato ako propustimo rastvor koji sadrži više različitih katjona kroz kolonu, dolazi do njihovog raspoređivanja duž kolone, a ono je uslovljeno razlikama u vrednostima konstante izmene. Na dnu kolone će se naći joni koji imaju najmanje vrednosti konstante izmene, a na vrhu oni katjoni koji se najlakše izmenjuju, tj. katjoni čija je konstanta izmene velika. Ako sada vršimo ispiranje smole u koloni sa čistim rastvaračem, onda će brzina desorpcije biti obrnuto proporcionalna vrednosti konstante jonske izmene. Na tom principu je moguće razdvajanje mnogih hemijskih elemenata.

Tehnika potisnog eluiranja adsorbovanih katjona se sastoji u tome da se kao eluens koristi rastvor katjona koji ima veliku konstantu jonske izmene na datoj smoli. Na taj način se adsorbovani katjoni prevode u rastvor. Međutim, moguće je izvršiti eluiranje adsorbovanih katjona i sa rastvorima katjona koji nemaju veliku konstantu izmene, ali su u velikoj koncentraciji, na primer rastvori koji imaju veliku koncentraciju vodonikovih jona, čime se smola pretvara u H^+ oblik.

Najveća efikasnost razdvajanja se postiže ako se kao eluens koristi rastvor supstance koja ima sposobnost da adsorbovani katjon prevodi u neutralni ili negativni kompleks. Na primer pri desorpciji katjona elemenata retkih zemalja sa rastvorom limunske kiseline ovi prelaze u rastvor u obliku negativnog kompleksa $[M(C_6H_5O_7)_2]^{3-}$. U ovom slučaju formiranja kompleksa, a samim tim i efikasnost desorpcije jako zavisi od pH rastvora.

Proces jonske izmene se odigrava na površini zrna smole, međutim najveći deo površine jonoizmenjivača sačinjava površina kapilara kojih ima u svakom zrnu. Zato ako se smola usitni ne dolazi do povećanja površine, već se samo povećava površina dostupna aktu izmene. Ako se proces izmene odigrava u heterogenoj sredini, ravnoteža se ne uspostavlja trenutno, (najsporiji je proces difuzije katjona kroz kapilare zrna), pa je neophodno da se eluiranje vrši što sporije.

Reakcija jonske izmene ima hemijski karakter pa na brzinu izmene ima veliki uticaj temperatura sredine u kojoj se izmena vrši.

VEŽBE POSLE II KOLOKVIJUMA

I Vežba

Primena radioaktivnih indikatora

Zadatak vežbe: a) *Odrediti nepoznatu zapreminu tečnosti metodom izotopnog razblaženja. Kao izotop koristiti ^{32}P .*

b) *Odrediti nepoznatu koncentraciju rastvora upotrebom ^{32}P kao obeleživača.*

Oprema i rastvori:

1. GM brojač,
2. Rastvor Na_2HPO_4 u vodi, obeležen radioaktivnim ^{32}P ,
3. 0,2M rastvor $MgCl_2$ u vodi,
4. koncentrovani amonijak, 5% rastvor amonijaka i so NH_4Cl .

Opis vežbe:

a) *Odrediti relativnu specifičnu aktivnost osnovnog rastvora Na_2HPO_4 u kome je P obeležen sa ^{32}P . Izraziti je u imp/min/ml. Dodati u tečnost nepoznate zapremine određenu zapreminu osnovnog*

rastvora, pomešati i odmeriti u dva staklena sudića po 1 ml tog pomešanog rastvora. Upariti do suva i izmeriti specifičnu aktivnost. Korigovati dobijenu aktivnost na mrtvo vreme brojača i osnovnu aktivnost. Nepoznata zapremina se određuje po formuli

$$a \cdot S_0 = (a + V) \cdot S_1$$

a - dodati broj ml osnovnog rastvora,

S_0 - specifična aktivnost osnovnog rastvora izražena u imp/min/ml,

S_1 - specifična aktivnost smeše u imp/min/ml,

V - nepoznata zapremina tečnosti u ml.

b) U pet čaša odmeriti po nekoliko ml rastvora Na_2HPO_4 , čija je koncentracija nepoznata. U svaku čašu dodati po 0,5 ml koncentrovanog amonijaka i na vrh kašike soli NH_4Cl . Zatim u svaku probu treba dodati MgCl_2 uz mešanje, i to u svaku probu različitu zapreminu (asistent određuje u kojim proporcijama treba dodavati taj rastvor). Zatim dodati svakoj probi po 5 ml 5% rastvora amonijaka. Ostaviti probe da se dekantuju jedan sat. Posle dekantovanja odmeriti iz svake čaše po 1 ml bistrog rastvora iznad taloga u staklene posudice. Upariti pripremljene probe pod infracrvenom lampom i meriti njihovu aktivnost na GM brojaču. Neophodno je poznavanje specifične aktivnosti osnovnog rastvora Na_2HPO_4 , međutim ta veličina je već poznata iz zadatka pod a) pa se i ovde koristi. Dobijene podatke uneti u tabelu:

Broj probe	Ukupna aktivnost po probi pre talozenja imp/min	Dodato ml MgCl_2	Ukupna zapremina probe ml	Specifična aktivnost rastvora iznad taloga imp/min/ml	Ukupna aktivnost rastvora iznad taloga imp/min

Nacrtati grafik: ukupna aktivnost rastvora u funkciji datog broja ml rastvora MgCl_2 . Iz grafika izračunati nepoznatu koncentraciju Na_2HPO_4 .

II Vežba

Aktivaciona analiza

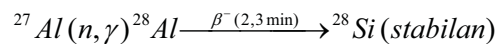
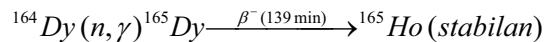
Zadatak vežbe: *Odrediti količinu Dy u uzorku Al_2O_3*

Oprema vežbe:

1. Neutronske izvor,
2. uzorak Al_2O_3 sa primesom Dy,
3. standardni uzorak Al_2O_3 sa poznatom količinom Dy,
4. GM brojač,
5. hronometar.

Opis vežbe:

Prilikom ozračivanja termalnim neutronima, u uzorku se dešavaju sledeće nuklearne reakcije



Izotopni efikasni preseki za ove reakcije iznose $\sigma_{\text{Dy}}=2200 \text{ b}$ i $\sigma_{\text{Al}}=230 \text{ mb}$. Usled velike razlike u efikasnim presecima, aktivnost aluminijuma će biti znatno manja od aktivnosti disprozijuma. Zbog vrlo malog efikasnog preseka ($\sigma_0 < 0,2 \text{ mb}$) reakcija kiseonika sa neutronima se mogu zanemariti.

Uzorak i standard uneti u neutronske izvor i ozračivati ih dok se ne postigne aktivnost zasićenja ^{165}Dy . U trenutku vađenja uzorka iz neutronske izvora ($t=0$) aktivirati hronometar. Sačekati 10-15 minuta da se ^{28}Al raspadne i pod istim uslovima meriti aktivnost uzorka i standarda (1 minut u intervalima od 10 minuta, prva polica brojačke kutije). Korigovati izmerene aktivnosti na mrtvo vreme brojača i osnovnu aktivnost. Nacrtati grafike $\log R^* = f(t)$ za uzorak i standard. Sa grafika naći aktivnost ^{165}Dy u momentu vađenja uzorka (R_x^0) i standarda (R^0) iz neutronske izvora (ekstrapolacija na $t=0$). Izračunati količinu Dy (m_x) u uzorku po jednačini

$$m_x = m \frac{R_x^0}{R^0}$$

m - masa Dy u standardu (podatak daje asistent).

III Vežba

Određivanje koncentracije hormona RIA metodom

Zadatak vežbe: *Odrediti ukupan tiroksin (T4) u serumu RIA metodom*

Oprema vežbe:

1. RIA komplet
2. scintilacioni GM brojač
3. centrifuga

Opis vežbe:

RIA-T4 (PEG) je dijagnostička metoda namenjena za kvantitativno određivanje ukupnog tiroksina (T4) u serumu. Ova metoda se primenjuje tek kada se pretpostavlja poremećaj u funkciji štitaste žlezde. Povišene vrednosti T4 mogu se očekivati kod hipertireoza, a snižene vrednosti se mogu javiti kod hipertireoza izazvanih ekstremnim nedostatkom joda. Metoda se zasniva na konkurentnom vezivanju serumskog T4 i radioaktivnog T4 za mali ali određeni broj antigenih determinanti na specifičnim antitelima za T4, pri čemu nastaju obeleženi i neobeleženi imunokompleksi. Obeleženi kompleksa formiraće se toliko manje koliko više ima serumskog T4. Posle završene reakcije i jedan i drugi kompleks se talože polietilenglikolom (PEG), dok slobodni T4 (obeleženi i neobeleženi) kao i slobodna antitela zaostaju u tečnoj fazi. Radioaktivnost istaloženog kompleksa meri se odgovarajućim scintilacionim brojačem. Istovremeno sa uzorcima seruma tretiraju se i standardi koji sadrže T4 precizno određene koncentracije pomoću kojih se formira standardna kriva. Upoređivanjem sa standardnom krivom, određuje se koncentracija T4 u uzorcima seruma. Za eksperiment je korišćeno 18 epruveta obeleženih na sledeći način: 1 i 2 za ukupnu aktivnost (T); 3 i 4 za maksimalno vezivanje; 5-16 za standarde (S1-S6); 17-18 za uzorak seruma nepoznate koncentracije T4(x). U epruvete se reagensi dodaju na sledeći način:

epruveta broj	25 μ l	25 μ l	25 μ l	0,1 ml	0,1 ml
	S. bez T4, standard "0"	standard broj	kontr.s. KS	125-J-T4	anti-T4
1,2				+	+
3,4	+			+	+
5,6		1		+	+
7,8		2		+	+
9,10		3		+	+
11,12		4		+	+
13,14		5		+	+
15,16		6		+	+
17,18			+	+	+

Nakon dodavanja reagensa, sve se inkubira 1čas na 19-25°C, zatim se doda po 1 ml PEG-a u sve epruvete osim u 1 i 2, i sve se centrifugira 15 min. Zatim se odlije supernatant, osuše epruvete i meri radioaktivnost 1min. Rezultate srediti tabelarno:

broj epruvete	R(imp/min)	R*	R _{sr} *	$\frac{B}{B_0} \cdot 100 \%$	oznaka	c [nmol/l]	log c
---------------	------------	----	-------------------	------------------------------	--------	------------	-------

Nacrtati grafik $\frac{B}{B_0} \cdot 100 = f(\log c)$. Sa grafika odrediti nepoznatu koncentraciju c_x .

IV Vežba

Razdvajanje ^{32}P , ^{137}Cs i ^{60}Co u mikorkoncentracijama upotrebom katjonske smole Dowex –50x8 u H^+ obliku sa HCl kao eluensom

Zadatak vežbe:

- Odvojiti ^{60}Co , ^{32}P i ^{137}Cs korišćenjem katjonske smole Dowex – 50x8 u H^+ obliku, sa promerom zrna od 50-100 mesh-a.
- Odrediti distribucione koeficijente za ^{60}Co , ^{137}Cs i ^{32}P iz 4 N HCl odnosno 0,1 N HCl.
- Odrediti separacioni faktor za ^{60}Co i ^{137}Cs iz 4N HCl kiseline.

Oprema i rastvori:

- GM brojač
- Hronoskop
- Kolona napunjena katjonskom smolom
- 0,1 N i 4 N HCl kiselina.

Opis vežbe:

- a) Kolona je napunjena sa 2gr katjonske smole Dowex – 50x8.
- Tretirati smolu sa 0,1 N HCl kiselinom i pri tome odrediti brzinu proticanja eluensa u $V - x$ [min cm²]
- Prečnik kolone je 5 mm. Odrediti koliko kapi eluensa odgovara 1 ml.
- Adsobovati na smolu smešu ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs i ³²P iz 0,1 N HCl kiseline i kontinualno hvatati probe eluensa od po 1 ml u staklene posudice predhodno obeležene.
 - Pošto je propušteno 10 ml 0,1 N HCl kiseline, vršiti eluiranje sa 4 N HCl kiselinom kako bi se desorbovao ⁶⁰Co i ¹³⁷Cs. Hvataati probe kao i prethodnom slučaju.
 - Upariti pripremljene probe pod infracrvenom lampom i meriti njihovu aktivnost pod istim geometrijskim uslovima.
 - Merenje vršiti sa 1% relativnom standardnom greškom.
 - Dobijene podatke uneti u tabelu:

Br. probe	ml eluensa	eluens N HCl	r imp/t min	R imp/min	R _{kor} imp/min	Br. slobod. zapremina kolone
-----------	------------	--------------	-------------	-----------	--------------------------	------------------------------

- Nacrtati krive eluiranja, odnosno R_{kor} u funkciji broja ml eluensa.
 - Sa krive eluiranja za ³²P odrediti koliki broj ml odgovara slobodnoj zapremini kolone.
- b) Sa grafika na kome su predstavljene krive eluiranja očitati broj ml eluensa koji odgovara položaju maksimuma, preračunati taj broj ml u slobodne zapremine kolone.
- Izračunati distribucione koeficijente po:

$$D = C (v/m) \text{ [ml/gr]}$$

C - broj slobodnih zapremina kolone koji odgovara položaju maksimuma na krivim eluiranja

v – slobodna zapremina kolone izražena u ml

m – količina smole izražena u gr.

za ³²P se dobija njegov distribucioni koeficijent iz 0,1 N HCl, a za ⁶⁰Co i ¹³⁷Cs iz 4 N HCl.

- c) Odrediti sepracioni faktor za ⁶⁰Co i ¹³⁷Cs iz 4 N HCl kiseline iz dobijenih distribucionih koeficijenata po:

$$K = D_1 / D_2$$

D₁ je distribucioni koeficijent ⁶⁰Co iz 4 N HCl kiseline,
D₂ je distribucioni koeficijent ¹³⁷Cs iz 4 N HCl kiseline.

PRIMERI ZADATAKA ZA II KOLOKVIJUM

1: Koliko dugo treba da bombardujemo metu ⁵⁹Co izotopske čistoće 100% neutronima $F = 10^{15} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ da bi aktivirali sva prisutna jezgra ⁵⁹Co? Efikasni presek za reakciju ⁵⁹Co (n, γ) ⁶⁰Co je 20 barna. Vreme poluraspada ⁶⁰Co je 5,27 godina.

R1:

$$n = n_0$$

$$n = \frac{n_0 F \sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

$$\frac{\lambda}{F \sigma} = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$1 - \frac{\lambda}{F \sigma} = e^{-\lambda t}$$

$$\ln \left(1 - \frac{\lambda}{F \sigma} \right) = -\lambda t;$$

$$t = - \frac{\ln \left(- \frac{\lambda}{F \sigma} \right)}{\lambda}$$

$$t = - \frac{\ln \left(1 - \frac{0,693}{5,27 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 s} \cdot \frac{1}{10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot 20 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2} \right)}{\frac{0,693}{5,27 \text{ god.}}}$$

$$t = 1,778 \text{ godina}$$

2: U rastvor koji sadrži jone Br^- dodato je 1,03g $\text{Na}^+ \text{Br}^-$ aktivnosti 4×10^4 imp/min. Po dodatku 10ml 0,1M AgNO_3 dobijen je talog AgBr aktivnosti 10^3 imp/min. Koliko ima Br^- u rastvoru?



R2:

$$M(\text{NaBr}) = 102,9 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{AgNO}_3) = 169,9 \text{ g/mol}$$

$$102,9 \text{ g} : 79,9 \text{ g} = 1,03 \text{ g} : x$$

$$x = 0,80 \text{ g } ^* \text{Br} = 10^{-2} \text{ mol } ^* \text{Br}$$

$$0,1 \text{ mol} : 1000 \text{ cm}^3 = x : 10 \text{ cm}^3$$

$$x = 10^{-3} \text{ mol } \text{Ag}^+ \Rightarrow \text{istaloženo } 10^{-3} \text{ mol } \text{Br}^-$$

$$a \cdot S_o = (a + x) \cdot S_l$$

$$10^{-2} \text{ mol} \cdot 4 \cdot 10^6 \text{ imp/min} \cdot \text{mol} = (10^{-2} \text{ mol} + x) \cdot \frac{10^3 \text{ imp/min}}{10^{-3} \text{ mol}}$$

$$4 \cdot 10^4 \text{ imp/min} = (10^{-2} \text{ mol} + x) \cdot 10^6 \text{ imp} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$x = 3 \cdot 10^{-2} \text{ mol Br}^- = 2,4 \text{ g Br}^-$$

3: U 10ml 0,2M $^{60}\text{CoCl}_2$ dodato je V ml vode. Specifična aktivnost pre razblaženja je bila $4,5 \cdot 10^4 \text{ imp/min ml}$, a posle razblaženja $2 \cdot 10^4 \text{ imp/min ml}$. Koliko je ml vode dodato i kolika je koncentracija rastvora?

R3:

$$C_0 = 0,2 \text{ M} \quad ; \quad V_0 = 10 \text{ ml}$$

$$S_0 = 4,5 \cdot 10^4 \frac{\text{imp}}{\text{min} \cdot \text{ml}} \quad ; \quad S_1 = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{imp}}{\text{min} \cdot \text{ml}}$$

$$V_{H_2O} = ? \quad ; \quad C_1 = ?$$

a)

$$S_0 \cdot V_0 = S_1 \cdot (V_0 + V_{H_2O})$$

$$S_0 \cdot V_0 = S_1 \cdot V_0 + S_1 \cdot V_{H_2O} \Rightarrow V_{H_2O} = \frac{(S_0 - S_1) \cdot V_0}{S_1} = 12,5 \text{ ml}$$

b)

$$\begin{array}{r} 0,2 \text{ mol} - 1 \text{ dm}^3 \\ x \quad - 10 \cdot 10^{-3} \text{ dm}^3 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 2 \cdot 10^{-3} \text{ mol} - (10 + 12,5) \cdot 10^{-3} \text{ dm}^3 \\ x \quad - 1 \text{ dm}^3 \end{array}$$

$$x = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{CoCl}_2$$

$$C_1 = 0,089 \text{ M}$$

4: Rastvor ^{65}Zn ima ukupnu aktivnost 50 mCi, a specifičnu aktivnost 13,3 mCi/ml. Koliku zapreminu vode treba dodati da bi se dobio rastvor čija je izmerena specifična aktivnost $1,5 \cdot 10^8 \text{ imp/min ml}$? Efikasnost korišćenog brojačkog uređaja je $E = 10\%$.

R4:

$$S_0 V_0 = (V_0 + V_1) S_1$$

$$V_0 = \frac{A}{S_0} = \frac{50 \text{ mCi}}{13,3 \text{ mCi/ml}} = 3,76 \text{ ml}$$

$$S_I = \frac{1,5 \cdot 10^8 \frac{\text{imp}}{\text{min} \cdot \text{ml}}}{60 \cdot 0,1} = 0,25 \cdot 10^8 \text{ rasp/s} \cdot \text{ml}$$

$$1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ rasp/s}$$

$$1\text{mCi} : 3,7 \cdot 10^7 \text{ rasp/s} = x : 0,25 \cdot 10^8 \text{ rasp/s}$$

$$x = 0,676 \text{ mCi}$$

5: Odvajanje Zr od Hf iz vodenog rastvora njihovih nitratnih soli vrši se postupkom ekstrakcije. Ekstrakciju iz 520 ml vodenog rastvora vršimo pomoću 90 ml dietiletra uz koncentraciju HNO₃ od 8N. Količina Zr u vodenoj fazi je 17g, a koeficijenti raspodele za Zr i Hf u ovakvim uslovima ekstrakcije su 2 i 0,2 respektivno.

a) Kolika količina Zr će preći u organsku fazu, ako ekstrakciju izvršimo jedan put?

b) Izračunati separacioni faktor.

R5:

$$a) \quad m_{org} = m_{vod} \left(\frac{K_{Zr} V_{org}}{K_{Zr} V_{org} + V_{vod}} \right) = 17g \left(\frac{2 \cdot 90\text{ml}}{2 \cdot 90\text{ml} + 520\text{ml}} \right) = 4,37g$$

$$b) \quad Z = \frac{Z_{Zr}}{Z_{Hf}} = \frac{2}{0,2} = 10$$

III kolokvijum

NUKLEARNE REAKCIJE

Nuklearna reakcija obuhvata uzajamno dejstvo neke čestice i jezgra ili dejstvo dva jezgra (reaktanti) pri čemu se gradi jezgro drugačijeg sastava i oslobađa neka čestica (produkti reakcije):



ili skraćeno:



U predstavljanju nuklearnih reakcija sa jednačinom, mora da bude zadovoljen uslov da ukupan broj nukleona sa leve strane bude jednak broju nukleona sa desne strane, vodeći posebno računa o neutronima a posebno o protonima.

Bombardovanjem jezgara izotopa X (meta) sa česticama a (projektili) dolazi do građenja produkata reakcije ($Y+b$) samo u slučaju ako projektil a uđe u sastav jezgra (apsorpcioni zahvat).

Nuklearne reakcije se izvode putem ozračivanja mete (metalna folija, rastvor željenog izotopa, čvrste soli) koja sadrži željeni izotop, sa snopom projektila poznatog fluksa u određenom vremenskom intervalu. Fluks projektila q se definiše kao broj projektila (n) koji pada na 1 cm^2 mete u jednoj sekundi:

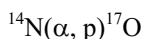
$$q = \frac{n}{\text{cm}^2 \text{ s}} \quad (2)$$

Zatim se ispituju produkti nuklearne reakcije, tj. osobine emitovanog zračenja i nastalih jezgara. Nagrađena jezgra (Y , jed. (1)) mogu biti stabilna i radioaktivna.

Prve nuklearne reakcije su izvedene pomoću fluksa α čestica koje emituju prirodno radioaktivni izotopi, a mete su bili stabilni izotopi lakih elemenata. Tako je Rutherford (1919) izveo prvu nuklearnu transformaciju, ozračivanjem ^{14}N sa α česticama koje emituje ^{214}Po :



ili

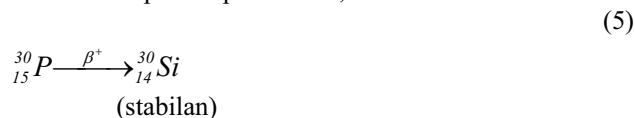


Dobijeni produkt ^{17}O je stabilan izotop kiseonika.

Tek 1934. godine izvedena je nuklearna reakcija čiji je produkt bio radioaktivan. Bračni par Curie, Joliot, korišćenjem α čestica koje emituje ^{210}Po , je izveo nuklearnu reakciju sa radioaktivnim produktom:



a ^{30}P se dalje raspada emisijom β^+ čestica sa vremenom poluraspada $T = 2,25 \text{ min}$:



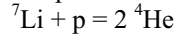
Ovim otkrićem je ostvarena mogućnost proizvodnje veštačkih radioaktivnih izotopa, koji danas imaju veliku primenu u nauci i tehnici.

Cockroft i Walton (Kokroft, Valton, 1932.) su prvi pokazali da se u ulozi projektila za izvođenje nuklearnih reakcija, sem prirodnih izvora zračenja, mogu koristiti ubrzane čestice ili joni, u

akceleratorima. Tako je ozračivanjem ${}^7\text{Li}$ sa fluksom ubrzanih protona ($E_p = 0,3 \text{ MeV-a}$) došlo do reakcije:



ili



jer α čestica nije ništa drugo do jezgro helijuma.

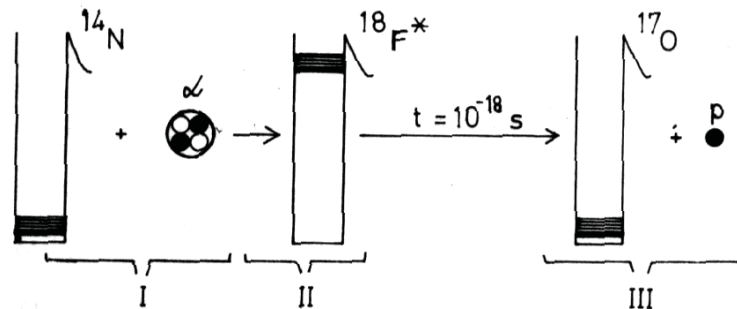
Korišćenjem akceleratora za ubrzavanje projektila, njihov broj za primenu u nuklearnim reakcijama se jako povećao. Tako se danas kao projektili koriste ubrzani p , n , d , t , He^{2+} i teški joni kao na pr., joni ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ itd.

Mehanizam nuklearnih reakcija

Bohr (Bor, 1936) je dao tumačenje mehanizma po kome se odvija proces nuklearne reakcije. U I fazi sudar i apsorpcija projektila u jezgru mete dovodi do građenja složenog jezgra. Složeno jezgro je u veoma pobuđenom stanju zbog viška energije u odnosu na osnovno stanje u jezgru stabilnog izotopa datog hemijskog elementa. Ovaj višak energije je posledica unete kinetičke energije projektila i energije veze, koja se oslobađa njegovim ugrađivanjem u jezgro.

Primer: Veoma gruba procena količine energije u prelaznom jezgru nastalom u reakciji datoj jed. 3. (sl. 1.) svodi se na sledeće: projektili u ovoj reakciji (α čestice) imaju energiju od oko 8 MeV-a. Energija veze po nukleonu u stabilnom ${}^{19}\text{F}$ je približno 7 MeV-a. Ugrađivanjem 4 nukleona iz α čestice oslobodi se energija od oko 28 MeV-a. Ukupni doprinos energiji u odnosu na osnovno stanje je, znači, 36 MeV-a. Zato je složeno jezgro ${}^{18}\text{F}^*$, nastalo kao međuprodukt u reakciji ${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O}$, u veoma ekscitovanom stanju.

Ovaj višak energije se veoma brzo raspoređuje na sve nukleone složenog jezgra, zbog čega se oni vrlo intenzivno kreću i međusobno sudaraju.



Slika 1. - Mehanizam nuklearne reakcije po Bohru. I - prva faza, sudar i apsorpcija projektila u jezgru mete; II - druga faza, raspadanje složenog i jako pobuđenog jezgra; III - treća faza, nastajanje produkata nuklearne reakcije.

Vreme života složenog jezgra u ovako pobuđenom stanju zavisi od ukupne energije ekscitacije. Što je ona veća, vreme života je kraće i obrnuto. U primeru datom na sl. 1., složeno jezgro ${}^{18}\text{F}^*$ ima vreme života samo 10^{-18} s , a radioaktivni izotop ${}^{18}\text{F}$ je β^+ emiter i ima vreme poluraspada 110 minuta. Iz tog upoređenja se jasno vidi da u složenom prelaznom jezgru nukleoni imaju veću energiju

od nukleona u radioaktivnom jezgru a što uslovljava njegovu manju postojanost i kraći život. Evo nekoliko primera za vreme života složenih jezgara u funkciji kinetičke energije projektila:

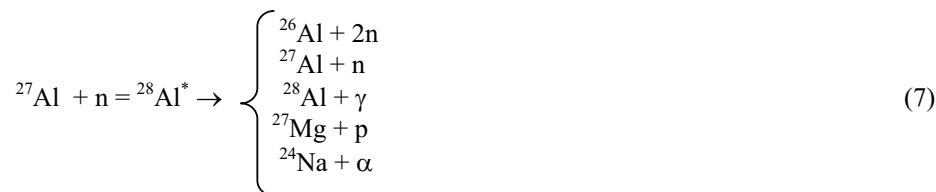
projektil	n	n, p, d	n, p, d
kinetička energija projektila	0,1 – 1 eV	10 KeV-a	>10 KeV-a
vreme života u sekundama	10^{-15}	10^{-19}	10^{-20}

Zbog ovako kratkih vremena života, u jednačinama kojima se predstavljaju nuklearne reakcije, složeno jezgro, kao međuprodukt, se izostavlja. Procesi u složenom jezgru su II faza po Bohru.

Zbog međusobnog sudaranja nukleona u složenom jezgru, postoji određena verovatnoća da se višak energije koncentriše na nekom nukleonu (n ili p) ili na grupi nukleona (α čestica) a ako je ta energija veća od visine potencijalne jame i energije veze nukleona, onda se složeno jezgro raspada gradeći produkte: novo jezgro i odgovarajuću česticu (III faza).

Čestica-prodakt pri izletanju iz složenog jezgra može da odnese svu energiju ekscitacije ili samo jedan njen deo. U ovom drugom slučaju, nastalo jezgro-prodakt je i dalje u pobuđenom stanju pa pod određenim uslovima može da emituje u kratkom vremenskom intervalu i drugu česticu itd. (reakcije u kojima dolazi do emisije $2n$, np , nd , itd.). Ako je energija ekscitacije jezgra-produkta takva da se ono raspada sa konstantnom ali merljivom brzinom (vreme poluraspada) uz emisiju radioaktivnog zračenja, onda su to radioaktivna jezgra.

Prelazno jezgro može da različihte produkte što zavisi od verovatnoće sa kojom je dati prelaz favorizovan. Veći broj mogućih prelaza je utoliko verovatniji ukoliko čestice-projektile imaju veću kinetičku energiju. Tako, na pr., ako se bombarduju jezgra ^{27}Al sa brzim neutronima ($E_n \sim 10$ MeV-a) mogući načini raspadanja prelaznog jezgra $^{28}\text{Al}^*$ su sledeći:



Efikasni presek

Verovatnoća odigravanja određene nuklearne reakcije zove se efikasni presek, σ , koji označava “površinu” sa kojom jezgra-mete učestvuju u apsorpciji čestica - projektila (neelastični sudar).

Ova raspoloživa površina za neku reakciju ne sme da se shvati kao geometrijska površina jer jedno isto jezgro za različite projektile ili za iste projektile koji imaju različite energije, ima efikasne preseke manje ili veće od geometrijskog preseka.

Efikasni presek za sudar brze čestice i jezgra je reda veličine geometrijskog efikasnog preseka, pa on u tom slučaju ima prosečnu vrednost 10^{-24} cm². Ovaj geometrijski presek zove se *barn* i predstavlja jedinicu za merenje efikasnog preseka:

$$1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2 \quad (8)$$

Manja jedinica od barna je milibarn ($1 \text{ mb} = 10^{-3} \text{ b}$) ili mikrobarn ($1 \mu\text{b} = 10^{-6} \text{ b}$).

Ako je za neku reakciju efikasni presek veći od 1 b, to znači da je verovatnoća za odigravanje te reakcije veća, pa jezgra u njoj učestvuju sa većom “površinom” preseka od geometrijskog (slučaj

reakcija sa sporim projektilima), a ako je manji od 1 b, onda je verovatnoća za tu reakciju manja i jezgro se ponaša kao da ima manju površinu preseka.

Koliki je efikasni presek za neki određeni tip reakcije (određeni izotop i određeni projektil) može se zaključiti iz *prinos nuklearne reakcije*. Prinos predstavlja broj nastalih jezgara-produkata (N) u 1 cm³ mete, koja sadrži N_0 , homogeno raspoređenih stabilnih jezgara određenog izotopa. Ako 1 cm² mete pogađa n projektila u sekundi (fluks q), onda je prinos:

$$N = \sigma N_0 q \quad (9)$$

gde je σ efikasni presek u cm², odnosno, verovatnoća za datu nuklearnu reakciju:

$$\sigma = \frac{N}{N_0 q} \text{ cm}^2 \quad (10)$$

jer predstavlja broj registrovanih događaja (N) u odnosu na ukupno mogući broj događaja ($N_0 q$).

Ako su u meti, sem željenog izotopa, prisutni i drugi stabilni izotopi iz prirodne smeše (na pr. umesto ⁶³Cu, hemijski element Cu, koji je smeša ⁶³Cu i ⁶⁵Cu) onda sa datim projektilima svaki od izotopa reaguje sa drugom verovatnoćom uz građenje različitih produkata reakcije.

Neka se u 1 cm³ bakarne folije nalazi N_0 atoma bakra, pa ako je zastupljenost jednog izotopa k onda će zastupljenost drugog biti $(1-k)$ i prinos produkata:

$$N_1 = \sigma_1 k N_0 q \quad (11)$$

i

$$N_2 = \sigma_2 (1-k) N_0 q \quad (12)$$

gde su σ_1 i σ_2 parcijalni efikasni preseki za izotopsku smešu dva izotopa.

Čestice-projektile se u manjoj ili većoj meri troše (zavisno od efikasnog preseka) u reakcijama sa svim izotopima u smeši. To može da dovede do slabljenja fluksa s jedne strane i do građenja više produkata različitih nuklearnih osobina. Za izvođenje i ispitivanje određene nuklearne reakcije, neophodno je da meta bude izotopski čista, jer se tako jedino može precizno utvrditi broj i vrste nastalih produkata.

Energija nuklearnih reakcija

U procesu nuklearnih reakcija dolazi do oslobađanja energije ili do apsorpcije energije (sličnost sa hemijskim reakcijama). Zato se u jednačini, koja opisuje neku nuklearnu reakciju, mora uzeti u obzir i energija reakcije, Q :



Ako se u reakciji oslobađa energija, $+Q$, reakcija je egzoenergetska, a ako je potrebno dodati energiju da bi do reakcije došlo, $-Q$, reakcija je endoenergetska. Ovako definisana energija reakcije, Q , odnosi se na interakciju jedne čestice sa jednim jezgrom.

Da li je neka reakcija egzoenergetska ili endoenergetska, može se grubo proceniti iz defekta mase za datu reakciju, tj. iz balansa masa produkata i reaktanata. Tako je za navedenu reakciju (jed. 13):

zbir masa reaktanata, m _r		zbir masa produkata, m _p	
¹⁴ N	14,0031	¹⁷ O	16,9991
+	α <u>4,0026</u>	+	<u>p</u> 1,0078
	18,0057 a.j.m.		18,0069 a.j.m.

zbir masa reaktanata, m _r		zbir masa produkata, m _p	
¹⁴ N	14,0031	¹⁷ O	16,9991
+	α <u>4,0026</u>	+	<u>p</u> 1,0078
	18,0057 a.j.m.		18,0069 a.j.m.

pa je defekt mase:

$$\Delta m = m_r - m_p = -1,2 \cdot 10^{-3} \text{ a.j.m.}$$

a energija Q :

$$Q = 931 \Delta m = -1,1 \text{ MeV}$$

što znači da je ova reakcija endoenergetska. Zato α čestice moraju da imaju kinetičku energiju veću od 1,1 MeV, jer će samo u tom slučaju doći do reakcije date jed. 13 (α čestice su u ovoj reakciji imale energiju oko 8 MeV-a).

U slučaju reakcije date jed. 6, ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$, oslobađa se energija $Q = +17,33 \text{ MeV-a}$, pa je reakcija egzoenergetska u kojoj oslobođenu energiju odnose dve emitovane α čestice u vidu energije kretanja.

Reakcije sa neutronima

Sem već opisanih reakcija tipa (α,p) do kojih dolazi kada se laki elementi ozračuju sa α česticama (jed.3), pokazalo se da neka laka jezgra kao što su Be i Li reaguju sa istim projektilima ali uz emisiju zračenja nepoznatih osobina (velika prodornost, ne apsorbuje se u olovu).

Proizvedeno zračenje u reakciji (α,γ) je prolazom kroz materije bogate vodonikom izbacivalo γ velikih energija (4,3 MeV-a) a slično je reagovalo i pri prolazu kroz neke druge lake elemente (Li, B, C, N).

Prvo je pretpostavljeno da je to elektromagnetno zračenje velikih energija (za izbacivanje p iz parafina sa $E_p = 4,3 \text{ MeV-a}$ γ foton bi trebalo da ima energiju 47 MeV-a).

Ova hipoteza je brzo odbačena, jer je energija $E_\gamma = 47 \text{ MeV-a}$ suviše velika da bi se objasnila reakcijom ${}^7\text{Be} + \alpha$.

Chadwick (Čedvik,1932.) je nepoznatom zračenju dao ime neutron. Veliku prodornost neutrona je objasnio njihovom električnom neutralnošću, a izbacivanje p iz materijala bogatih vodonikom je pripisao masi mirovanja neutrona koja bi trebalo da bude veoma slična sa masom protona.

Vrednost mase mirovanja neutrona određena je na više načina od kojih će jedan biti opisan. Masa neutrona se dosta pouzdano dobija iz upoređenja mase deuterijuma, D, i mase molekula vodonika, H_2 kao i podatka o energiji veze nukleona u D, B_D (energija veze H_2 je zanemarena zbog male vrednosti u odnosu na B_D). Interakcijom, neutrona, n , sa atomom vodonika, ${}^1\text{H}$, dolazi do reakcije:



a



Oduzimanjem jed. 18 od jed. 17, dobija se:

$$\begin{aligned} {}^1\text{H} + n - 2 {}^1\text{H} &= \text{D} + B_D - {}^1\text{H}_2 & \text{odnosno:} \\ n - {}^1\text{H} &= B_D - ({}^1\text{H}_2 - \text{D}) \end{aligned} \quad (19)$$

Razlika masa (${}^1\text{H}_2 - \text{D}$) određena masenim spektrometrom je iznosila u energetske jedinicama 1,44 MeV-a, $B_D = 2,22 \text{ MeV-a}$, pa je:

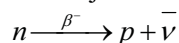
$$n - {}^1\text{H} = 2,22 - 1,44 = \underline{0,78 \text{ MeV-a}}$$

a iz korelacije, $E = 931 \cdot \Delta m$, dobija se razlika u masi:

$$\Delta m = n - {}^1\text{H} = 0,78/931 = \underline{0,00084 \text{ a.j.m.}}$$

Zbog veće mase mirovanja (većeg sadržaja energije), slobodni neutron (kada nije u sastavu

jezgra) pokazuje radioaktivne osobine. U vakuumu je detektovan raspad slobodnih neutrona:

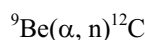


sa vremenom poluraspada $T = 12,8$ min.

Zbog intenzivne interakcije neutrona sa jezgrima u sredini prostiranja, njegov život u slobodnom stanju je veoma kratak (10^{-3} - 10^{-6} s) u poređenju sa vremenom poluraspada slobodnih neutrona, pa se u prirodi ne može zapaziti njegova radioaktivnost.

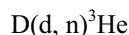
Izvori neutrona. Za dobijanje neutrona koriste se nuklearne reakcije lakih jezgara sa α i γ zračenjem iz radioaktivnih izvora. Te su reakcije tipa (α, n) i (γ, n) .

Najčešće korišćen izvor ovakvog tipa se dobija kada se spraseni metal Be homogeno pomeša sa $^{226}\text{RaBr}_2$ (3-10 g Be +1 g Ra). Izotop ^{226}Ra , kao i njegovi potomci sa kojima je u ravnoteži, emituje α čestice, pa dolazi do nuklearne reakcije:



U ovoj reakciji nastaje 460 neutrona pod dejstvom 10^6 α čestica, koji imaju energije do 13 MeV-a.

Za pripremu izvora neutrona se koriste i nuklearne reakcije izazvane dejstvom ubrzanih čestica u akceleratoru. Izvor u kome je metal čvrst D_2O (teški led) proizvodi neutrone pod dejstvom ubrzanih deuterona, d , na sledeći način:



Nastali broj neutrona ovom reakcijom zavisi od energije upadnih deuterona. Tako 10^7 d čija je energija 1MeV, proizvodi 80 n .

Navedeni izvori su veoma malog fluksa neutrona, pa se zato oni koriste u laboratorijskom radu ili za inicijalno "paljenje" lančane reakcije u reaktoru.

Najsnažniji izvori neutrona su nuklearni reaktori u kojima fluks ima vrednosti od 10^{10} - 10^{13} neutrona po cm^2 u sekundi. Nastajanje neutrona u ovom slučaju je posledica reakcije tipa (n, f) , gde je sa f označena fisija u kojoj nastaju neutroni.

Efikasni presek nuklearnih reakcija sa neutronima, veoma zavisi od njihove energije, pa podela neutrona po njihovim energijama istovremeno predstavlja i podelu reakcija:

-termalni neutroni	$E < 1$ eV
-spori neutroni	$E < 1$ KeV
-neutroni srednjih energija	$1 \text{ KeV} < E < 0,5 \text{ MeV}$
-brzi neutroni	$0,5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$
-veoma brzi neutroni	$E > 10 \text{ MeV}$

VEŽBA POSLE III KOLOKVIJUMA

I vežba

Odvajanje radioaktivnog $^{56}\text{MnO}_2$ iz KMnO_4 ozračenog neutronima

Prvo napraviti nosač – neaktivni MnO_2 : nekoliko kristalića KMnO_4 rastvoriti, zgrejati i staloziti mangan dioksid sa 1M NaOH i nekoliko kapi alkohola. Talog profiltrirati i isprati sa akoholom.

10 ml rastvora KMnO_4 se nalazi u kanalu za ozračivanje u neutronsom izvoru. Izvaditi rastvor iz neutronske izvora. Odvojiti 1 ml ozračenog rastvora i meriti aktivnost na scintilacionom brojaču. U preostalih 9 ml rastvora dodati svež MnO_2 , iscentrifugirati. Posle centrifugiranja odvojiti 1 ml rastvora i izmeriti aktivnost pod istim uslovima. Dobljene aktivnosti preko zakona radioaktivnog raspada normalizovati na vreme kraja ozračivanja ($T_{1/2} = 2,6 \text{ h}$).

Izračunati retenziju i faktor obogaćenja.

Uslovi merenja na scintilacionom brojaču: "visoki napon" 1,04 V; linearno pojačanje 64, meriti integralno.

PRIMERI ZADATAKA ZA III KOLOKVIJUM

1: Da li će se raskinuti hemijska veza u CH_3Br pri ozračivanju tog jedinjenja neutronima? Energija veze C-Br je 2,3 eV. Iz prelaznog jezgra se izbacuju dva γ kvanta u suprotnim smerovima sa energijama 4 MeV i 3 MeV.

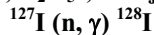
R1:

$$E_u = 536 \cdot \frac{(E_{\gamma 1}^2 + E_{\gamma 2}^2 + 2E_{\gamma 1}E_{\gamma 2} \cos \theta)}{M} \text{ eV}$$

$$E_u = 6,7 \text{ eV}$$

Kako je energija uzamaka veća od energije veze hemijska veza će se raskinuti.

2: Meta je jedinjenje etil jodid, $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$, u kojoj I reaguje sa termalnim neutronima po reakciji:



$E_\gamma = 4,8 \text{ MeV}$. Hemijska veza je 2,5 eV. Da li će I prekinuti hemijsku vezu ukoliko dolazi do translacije molekula kao celine?

R2:

$$E_u' = E_u - E_t$$

$$E_u = \frac{536 \cdot E_\gamma^2}{M_{\text{prod.}}} \text{ eV} \qquad E_t = \frac{536 \cdot E_\gamma^2}{M_{\text{prod.}} + A_{\text{ost.molekula}}} \text{ eV}$$

$$E_u' = 536 \cdot E_\gamma^2 \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{M + A} \right) = E_u \frac{A}{M + A}$$

$$M = 128$$

$$A = 2 \cdot 12 + 5 \cdot 1 = 29$$

$$E_u' = 17,82 \text{ eV}$$

$$E_u = 96,48 \text{ eV}$$

$$E_t = 78,66 \text{ eV}$$

Doći će do kidanja hemijske veze.

3: Izomernim prelazom $^{65\text{m}}\text{Zn}$ emituje se γ kvant energije 0,436 MeV. Da li će doći do kidanja hemijske veze u jedinjenju $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$, etil-cink, ako je ona oko 3-4 eV? $M_{\text{Zn}} = 65,4 \text{ g/mol}$

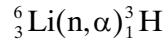
R3: $M = 65$

$$A = 2 \cdot (2 \cdot 12 + 5 \cdot 1) = 58$$

$$E_u = 0,739 \text{ eV}$$

Neće doći do kidanja hemijske veze.

4: Odrediti energiju uzmarka atoma T pri nuklearnoj reakciji



ako je energija α čestice 2,1 MeV.

$$\text{R4: } E_u = \frac{m_\alpha}{M_{\text{prod.}}} \cdot E_\alpha \text{ MeV}$$

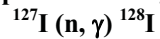
$$E_u = \frac{m_\alpha}{M_T} \cdot E_\alpha \text{ MeV} = \frac{4}{3} \cdot 2,1 \text{ MeV} = 2,38 \text{ MeV}$$

5: Odrediti energiju uzmarka pri raspadu ${}^{226}\text{Ra}$. Energija α čestice je 4,8 MeV.

$$\text{R5: } E_u = \frac{m_\alpha}{M_{\text{prod.}}} \cdot E_\alpha \text{ MeV} = \frac{4}{222} \cdot 4,8 \text{ MeV}$$

$$E_u = 0,086 \text{ MeV}$$

6: Odrediti energiju uzmarka pri nuklearnoj reakciji:



ako je energija γ kvanta 4,8 MeV.

$$\text{R6: } E_u = \frac{536 \cdot E_\gamma^2}{M} \text{ eV} = \frac{536 \cdot (4,8)^2}{128} \text{ eV} = 96,48 \text{ eV}$$

7. Kolika energija se oslobodi pri nuklearnoj reakciji ${}^7_3\text{Li}(p, \alpha)$ ako dolazi do potpunog cepanja 1g litijuma? ($M_p=1,007276$ a.j.m, $M_{7\text{Li}}=7,01601$ a.j.m, $M_\alpha=4,0026$ a.j.m, 1 a.j.m= $1,66057 \cdot 10^{-27}$ kg).

