

3. Izotopi

3.1. Periodni sistem elemenata

Jedno od ranih postignuća atomske fizike u prošlom veku- ili možda pre, hemičara koji su radili zajedno sa fizičarima – jeste objašnjenje periodnog sistema elemenata na osnovu atomske strukture.

Ovaj sistem (Tabela 3.1) je prvi predložio *Mendeljejev* 1869. godine i nezavisno od njega, *Lothar Meyer*. On se gradi redjanjem elemenata u skladu sa porastom naelektrisanja jezgra (ili atomskog broja), Z , tako da se hemijski slični atomi postavljaju jedan ispod drugog u vertikalnim stupcima (kolonama). Na ovaj način, dobija se osam vertikalnih kolona sa podgrupama i sedam horizontalnih redova ili perioda. Svaka pozicija je zauzeta atomom koji je ovde postavljen zbog svojih hemijskih osobina. Da bi bili sigurni, u sistemu je svih četrnaest elemenata tzv. retkih zemalja (lantanidi) smešteno u jednu istu poziciju $Z=58$, a svi aktinidi u jednu poziciju $Z=89$. Kako periodičnost, tako i ova odstupanja biće objašnjena pomoću elektronske strukture atoma u drugom delu knjige (Glava 19).

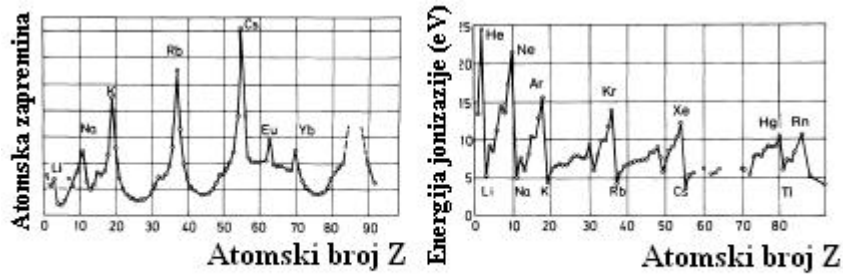
Korišćenjem akceleratora teških jona, kao što je u GSI u Darmstadt-u, u Nemačkoj, moguće je otkriti dodatne transuranske elemente. Do kraja 1995 god., proizvedeni su elementi do atomskog broja 111. Ovi elementi imaju nestabilna jezgra i mnogi su tako kratkoživeći da su njihove osobine najvećim delom nepoznate; čak ni proces njihovog imenovanja još nije završen.

Periodni sistem je redjanje elemenata prema periodično promenljivim hemijskim i fizičkim osobinama. Kao primer, ovde pokazujemo atomske zapremine i energije jonizacije u funkciji naelektrisanja jezgra Z (Slika 3.1). Hemijske osobine koje se periodično ponavljaju su, na primer, monovalentost alkalnih atoma, ili nepostojanje reaktivnosti kod inertnih gasova. Ove empirijske pravilnosti indiciraju odgovarajuće pravilnosti u atomskoj strukturi.

Prvi pokušaj objašnjenja ove periodičnosti je bila *Proust-ova* (1815) (Prust) hipoteza prema kojoj su svi atomi izgradjeni od vodonika. Ova slika je kasnije doradjivana i modifikovana kako su sledila dalja otkrića elementarnih čestica, prvo elektrona, a onda i protona. Tek posle 1932. postalo je jasno da se atomsko jezgro sastoji od protona, ali i od neutrona. Broj elektrona u atomu je manji nego maseni broj, jer jezgro sadrži isto onoliko protona koliko u elektronskim ljuskama ima elektrona, ali takodje sadrži i neutrone.

Relativna atomska masa A_{rel} je ranije mogla da se meri samo hemijskim metodama. Otkriveno je da, osim vodonikovog atoma, atomske mase ostalih atoma nisu mogle da se objasne bez kontradikcije. Ako je Prustov model korektan, onda atomske mase treba da su celi brojevi. Za najveći deo elemenata, oni i jesu u dobroj aproksimaciji celobrojni; A i A_{rel} su skoro jednaki. Medjutim ima izuzetaka; relativna atomska masa- atomska težina- hlora je na primer $A_{rel}=33.5$ u prirodnom hlору. Štaviše, otkriveno je da olovo iz raznih ruda ima razne atomske težine. Danas znamo da je ovo posledica toga što je olovo stvoreno kao krajnji produkt raspada različitih radioaktivnih nizova.

Ova opažanja su bila startna tačka za istraživanja koja su dovela do otkrića *izotopa*. Izraz *izotop* označava činjenicu da atomi sa raznim masenim brojevima mogu da imaju istu poziciju u periodnom sistemu elemenata, tj. mogu da imaju isto naelektrisanje jezgra Z . Pozicija elementa u periodnom sistemu je određena brojem protona u atomskom jezgru. Različiti maseni brojevi rezultuju od različitog broja neutrona u atomskom jezgru. Postojanje izotopa je otkriveno i detaljno proučeno pomoću masene spektroskopije.



Slika 3.1. Zapremine atoma i energije jonizacije kao funkcije položaja u periodnom sistemu elemenata. Posebno su istaknuti velike zapremine atoma alkalnih metala i energije jonizacije atoma plemenitih gasova.

3.2. Masena spektroskopija

3.2.1. Metod parabole.

Fizičke tehnike za tačno merenje atomskih masa i za odvajanje atoma sa različitim masama su većinom zasnovane na određivanju količnika e/m , tj. količnika naelektrisanja i mase. Za ovu svrhu, koristi se skretanje jonizovanih atoma koji se kreću kroz električno \mathbf{E} i magnetsko polje \mathbf{B} . Najstariji metod i najlakši za razumevanje je metod parabole (Thomson 1913). Snop jona iz gasnog pražnjenja prolazi kroz električno polje kondenzatora i magnetsko polje \mathbf{B} koje je orijentisano paralelno električnom polju (Slika 3.2.). U ravni posmatranja, čestice istog naelektrisanja i masa, ali sa raznim brzinama, su rasporedjene duž parabole čiji je početak u tački gde bi prošao neskrenut snop. Ovo se može pokazati na sledeći način: homogeno električno polje \mathbf{E} , koje se primenjuje u y pravcu izaziva skretanje u tom pravcu. y koordinata položaja čestice se nalazi iz jednačine ubrzanja (II Njutnov zakon)

$$\ddot{y} = (e/m)E \quad (3.1)$$

y koordinata se nalazi iz rešenja (3.1).

$$y = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \frac{l^2}{v^2} \quad (3.2)$$

gde je poslednja jednačina dobijena izražavajući vreme koje je čestica provela u električnom polju preko brzine v i dužine l kondenzatora. Ovo je dozvoljeno sve dok je magnetsko polje \mathbf{B} dovoljno slabo i poluprečnik putanje, r , dovoljno mali. Kako je skretanje čestice u y pravcu inverzno proporcionalno kinetičkoj energiji $mv^2/2$, kondenzator se naziva i energetski filter.

Tabela 1. Periodni sistem elemenata

H 1 1.008												He 2 4.0026																	
1s	1											1s	2																
	Li 3 6.939	Be 4 9.012												B 5 10.81	C 6 12.01	N 7 14.01	O 8 16.00	F 9 19.00	Ne 10 20.18										
2s	1	2	—											2	2	2	2	2	2	2s	2								
2p	—	—	—											1	2	3	4	5	6	2p	6								
	Na 11 23.00	Mg 12 24.31												Al 13 26.98	Si 14 28.09	P 15 30.97	S 16 32.06	Cl 17 35.45	Ar 18 39.95										
3s	1	2	—											2	2	2	2	2	2	2	3s	2							
3p	—	—	—											1	2	3	4	5	6	3p	6								
	K 19 39.10	Ca 20 40.08	Sc 21 44.96	Ti 22 47.90	V 23 50.94	Cr 24 52.00	Mn 25 54.94	Fe 26 55.85	Co 27 58.93	Ni 28 58.71	Cu 29 63.55	Zn 30 65.38	Ga 31 69.72	Ge 32 72.59	As 33 74.92	Se 34 78.96	Br 35 79.90	Kr 36 83.80											
3d	—	—	1	2	3	5	6	7	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	3d	10								
4s	1	2	2	2	2	1	2	2	2	1	—	—	2	2	2	2	2	2	2	2	4s	2							
4p	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4p	6							
	Rb 37 85.47	Sr 38 87.62	Y 39 88.91	Zr 40 91.22	Nb 41 92.91	Mo 42 95.94	Tc 43 98.91	Ru 44 101.07	Rh 45 102.9	Pd 46 106.4	Ag 47 107.9	Cd 48 112.4	In 49 114.8	Sn 50 118.7	Sb 51 121.8	Te 52 127.6	I 53 126.9	Xe 54 131.3											
4d	—	—	1	2	4	5	6	7	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	4d	10							
5s	1	2	2	2	1	1	1	1	1	—	—	—	2	2	2	2	2	2	2	2	5s	2							
5p	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5p	6							
	Cs 55 132.9	Ba 56 137.3	La 57 138.9	Hf 72 178.5	Ta 73 181.0	W 74 183.9	Re 75 186.2	Os 76 190.2	Ir 77 192.2	Pt 78 195.1	Au 79 197.0	Hg 80 200.6	Tl 81 204.4	Pb 82 207.2	Bi 83 209.0	Po 84 210	At 85 210	Rn 86 222											
5d	—	—	1	2	3	4	5	6	7	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5d	10							
6s	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6s	2							
6p	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6p	6							
	Fr 87 (223)	Ra 88 (226)	Ac 89 (227)	Ku 104 (258)	Ha 105 (260)											Th 90 232.0	Pa 91 231.0	U 92 238.0	Np 93 237.0	Pu 94 239.1	Am 95 (243)	Cm 96 (247)	Bk 97 (247)	Cf 98 (251)	Es 99 (252)	Fm 100 (257)	Md 101 (258)	No 102 (259)	Lr 103 (260)
6d	—	—	1	2?	3?	4	5	6	7	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	6d	10						
7s	1	2	2	2?	2?	2?	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	7s	2						
7p	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7p	6						

Elementi i atomski broj
 — Atomska masa u u; za neke nestabilne elemente dat je maseni broj najstabilnijeg izotopa.
 Elektronska konfiguracija.

Homogeno polje **B** koje se takodje primenjuje u y pravcu, izaziva skretanje u x pravcu. Ovo skretanje se može izračunati na sledeći način: čestica koja udje u homogeno polje B je primorana da se kreće po kružnoj orbiti u ravni normalnoj na pravac polja. Kako je polje B, prostorno ograničeno, čestica prodje samo segment kružne orbite i onda nastavi da se kreće po pravoj liniji. Rezultujuće skretanje u x pravcu se može odrediti iz poluprečnika krivine kružne orbite, koja se dobija izjednačavajući intenzitete Lorenzove sile u magnetskom polju $\mathbf{F} = e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ i centrifugalne sile $\mathbf{F}_c = m\mathbf{v}^2 \mathbf{r} / r^2$.

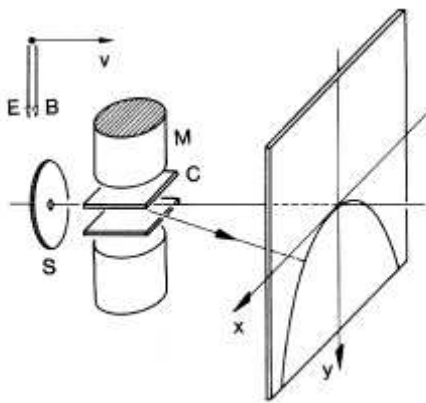
$$r = mv / eB \tag{3.3}$$

Za centrifugalno ubrzanje $a_c = v^2 / r$ dobija se (zamenjujući 3.3 u izraz za radijus) sledeća relacija

$$a_c = eBv/m$$

Kako se čestica kreće samo kroz relativno kratak segment kruga, može se zameniti njeno ubrzanje u x pravcu sa centrifugalnim ubrzanjem a_c . Ukupno skretanje za vreme t je dato sa

$$x = a_c t^2 / 2$$



Slika 3.2. Shematska prezentacija metoda parabola. Jonski snop, kolimisan otvorom S , se skreće magnetom M i kondenzatorom C u pravcima x i y . Jednačina (3.5) opisuje putanju čestica na ekranu neposredno posle izlaska iz magneta i kondenzatora. Ako se ekran smesti na većem rastojanju pojavljuje se distorzija parabole usled projekcije. Obe grane parabole su korektna rešenja ako polje B promeni znak.

U ovoj jednačini, zamenimo a_c sa eBv/m i vreme leta sa količnikom l/v , gde je l rastojanje predjeno u polju. Onda se dobija skretanje u x pravcu

$$x = \frac{eBl^2}{2mv} \quad (3.4)$$

Skretanje u x pravcu je inverzno proporcionalno impulsu mv čestice. Zbog ovoga se, često, skretanje izazvano magnetima naziva filter impulsa. Iz izraza za x i y može se eliminisati v , tako da se dobija jednačina za putanju skretanja čestice:

$$y = \frac{2E}{l^2 B^2} \cdot \frac{m}{e} x^2 \quad (3.5)$$

Ovo je jednačina parabole, $x^2=2py$, sa parametrom $p=e l^2 B^2/2mE$. Ovaj parametar ima istu vrednost za jone istog količnika m/e i ne zavisi od brzine. Primer merenja je prikazan na slici 3.3.

Ukupni intenzitet pojedinačnog snopa koji proizvodi jednu parabolu je mera relativne obilnosti odgovarajućeg jona ili izotopa. Kako joni, uopšteno govoreći, imaju različite brzine, jer se oni stvaraju u pećima ili u cevima za gasno pražnjenje,

oni joni koji imaju isto m/e će se rasporediti duž cele dužine određenog segmenta parabole.

Aston je 1920. godine koristio ovaj metod za proučavanje kompozicije prirodnog neona, koji se sastoji od tri tipa atoma sa masenim brojevima 20, 21 i 22; ovo je bila prva jasna demonstracija postojanja izotopa pomoću masene spektroskopije (Tabela 3.2).

Svakako najvažniji rezultat merenja metodom parabola je sledeći: mnogi elementi se sastoje od nekoliko izotopa, to su atomi sa istim naelektrisanjem jezgra Z i sa različitim masenim brojevima A . Jezgra sa određenim vrednostima A i Z se nazivaju *nuklidi*.



Slika 3.3. Separacija smeše hidrougljeničnih jona metodom Tomsonovih parabola. Za kalibraciju koriste se joni poznatih masa. Intenziteti sekcija pojedinih parabola odgovaraju relativnom iznosu u smeši jona. (Foto, ljubaznošću Conrad u W. Finkelburg. Springer Berlin 1976, slika 12).

Table 3.2. Izotopski sastav neona. Vrednosti date za A_{rel} nisu određene metodom parabola već tačnijim metodama dvostruko fokusirajućeg masenog spektrometra.

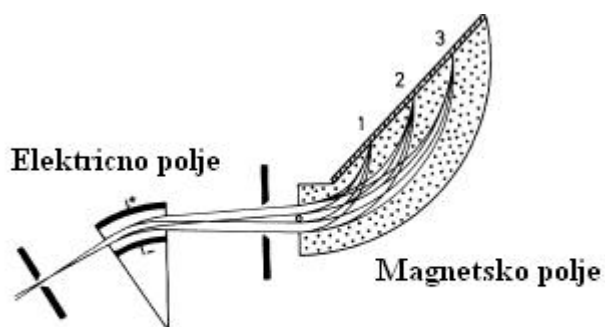
^{20}Ne	90.92%	$A_{rel}=19.99244$
^{21}Ne	0.26 %	$A_{rel}=20.99385$
^{22}Ne	8.82	$A_{rel}=21.99138$

3.2.2. Poboljšanja masnih spektrometara

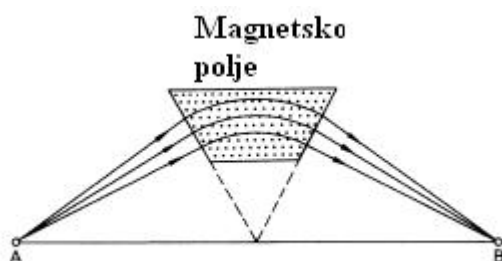
Prvo bitno poboljšanje Thomsonovog masenog spektrografa je postignuto 1919. godine od strane Astona, uvodeći fokusiranje po brzinama. On nije koristio paralelno električno i magnetsko polje, već normalno \mathbf{E} i \mathbf{B} . Polje \mathbf{E} cepa snop incidentnih čestica prema odnosu m/e , ali takodje i prema raznim brzinama. Pogodnim izborom jačine polja, može se osigurati da polje \mathbf{B} dovede sve čestice sa raznim brzinama u određenu tačku prostora, tako da čestice sa raznim odnosom m/e ostaju odvojene. Čestice sa istim količnikom e/m se skupljaju u jednu tačku detektora, a ne duž jednog paraboličnog segmenta, kao što je slučaj u metori parabole (Sl. 3.4).

Aparatura sa brzinskim fokusiranjem ima veću osetljivost nego metod parabole, tj. može detektovati manje iznose jona, i tako, dobiti bolju masenu rezoluciju. Rezolucija koju je postigao Aston (1919) je oko 130 za količnik $m/\Delta m$, tj. masa podeljena sa razlikom masa.

Drugo veliko poboljšanje je bilo uvođenje fokusiranja po pravcu (Demster 1918). Pomoću pogodno dimenzioniranog sektorskog polja moguće je osigurati da se joni sa istim količnikom m/e , ali sa nešto različitim incidentnim uglovima, koji zbog toga skreću za različite iznose, ponovo skupe u jednu tačku.

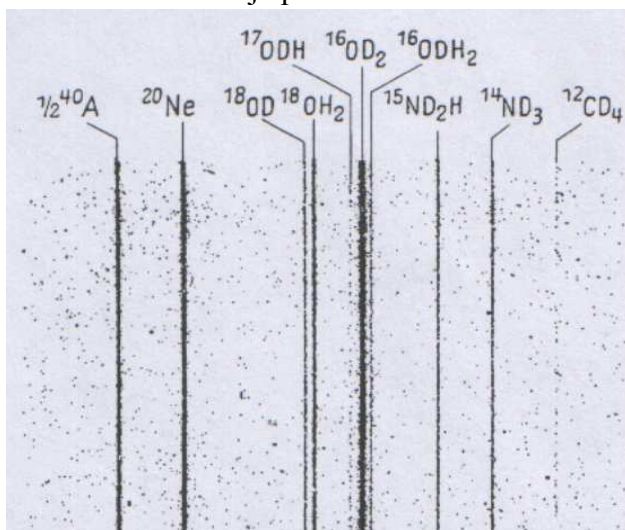


Slika 3.4. Fokusirajući maseni spektrograf konstruisan od strane Astona. Tačke 1,2 i 3 označavaju mesta na kojima se sakupljaju tri tipa čestica sa trima različitim odnosima m/e .



Slika 3.5. Fokusiranje u polju sektorskog magneta. Čestice koje prolaze duži put u magnetskom polju su više skrenute.

U modernim visoko rezolutnim masenim spektrometrima, koriste se oba metoda-fokusiranje po pravcu i fokusiranje po brzinama, što je dovelo do onoga što se zove dvostruko fokusiranje. Preciznost postignuta danas za relativnu atomsku masu je ispod 10^{-7} u. Isti kriterijum se primenjuje kao i za optičke spektrografe: korišćenjem uskih proreza dobija se visoka rezolucija, ali po cenu smanjivanja intenziteta. Ovo predstavlja principijelan problem za eksperimentalce. Ova visoka rezolucija je potrebna u nuklearnoj fizici, npr. za merenje tzv. defekta masa, ali i pri problemima u analitičkoj i strukturnoj hemiji (Paragraf 3.2.4). Rezolucija $m/\Delta m$, koja se može postići danas, tj. mogućnost odvajanja dve mase sa vrednostima m i $m+\Delta m$ je veća od 100000. Primer je prikazan na slici 3.6.

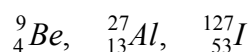


Slika 3.6 Primer visoko rezolutne masene spektroskopije: separacija 10 različitih jona sa masenim brojem 20 čije atomske ili molekulske težine leže između 19.9878 i 20.0628. Slika je dobijena dvostruko fokusirajućim masenim spektrometrom od strane Mattuach-a i saradnika. (Iz Finkeinburg: Atomphysics, 11, 12th Izdanje, Springer, Berlin, 1976, Slika 15.)

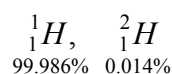
3.2.3. Rezultati masene spektrometrije

U atomskoj fizici, masena spektrometri su od primarnog interesa kao instrumenti za analizu izotopskog sastava hemijskih elemenata.

Elementi često imaju nekoliko izotopa, na primer hlor; izotop sa masenim brojem 35 se pojavljuje sa obilnoću od 75.4 %; drugi stabilni izotop sa masom $A=37$ ima obilnost 24.6. Rezultujuća relativna atomska masa smeše izotopa je $A_{rel}=35.457$. Postoje elementi sa samo jednim stabilnim izotopom, na primer



ali i oni sa dva stabilna izotopa



i konačno postoje elementi sa više stabilnih izotopa. Na primer, živa, ${}_{80}\text{Hg}$ ima 7 stabilnih izotopa sa A između 196 i 204. Nekoliko daljih primera je dato u Tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Neki primeri izotopa

Hem. simbol	Maseni broj	Relativna at. tež.	Apsolutna atomska masa u 10^{-27} kg
${}^1\text{H}$	1	1.007825	1.67342
${}^2\text{H}$	2	2.014102	3.34427
${}^{12}\text{C}$	12	12.000000	19.9251
${}^{16}\text{O}$	16	15.99415	26.5584
${}^{35}\text{Cl}$	35	34.96851	58.0628
${}^{37}\text{Cl}$	37	36.965898	61.37929

3.2.4. Moderne primene masene spektrometrije

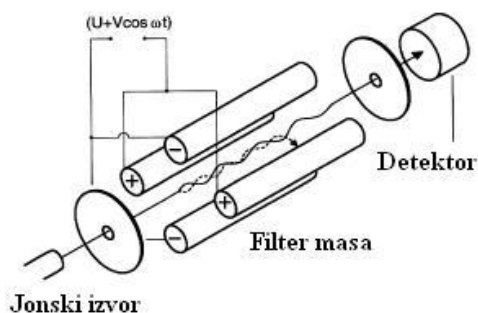
Pored preciznih merenja u atomskoj i nuklearnoj fizici, masena spektrometrija sa ograničenom masenom rezolucijom se danas koristi u mnogim primenama u nauci i tehnologiji.

U hemiji, pojednostavljeni dvostruko fokusirajući spektrometri se koriste za analitičke svrhe. Molekularni fragmenti koji se stvaraju pri elektronskim ili jonskim bombardovanjem molekula se mogu identifikovati: iz njihove distribucije može se obaviti identifikacija originalnog molekula.

U fizici, hemiji i tehnologiji, jednostavni kompaktni spektrometri se koriste za analizu gasova preostalih u vakumskim sistemima. Za ovu svhu, masena rezolucija od $m/\Delta m = 100$ je obično dovoljna.

Dalje primene ovih relativno prostih spektrometara je proizvodnja čistih atomskih i molekularnih snopova. Nedavno, za ovu svrhu su počeli da se primenjuju, visoko frekventni maseni spektrometri. U ovim, tzv. *time of flight* spektrometrima, naelektrisane čestice se različito ubrzavaju visoko frekventnim elektromagnetskim

poljem zavisno od njihovog specifičnog naelektrisanja, i prolaze kroz spektrometar sa različitim brzinama. Različito vreme leta (kroz spektrometar) je mera količnika e/m .



Slika 3.7. Shematski prikaz kvadripolnog filtera masa. Jonski snop, koji se kreće u $+z$ pravcu skreće se visoko frekventnim promenljivim naponom. Da bi snop prošao kroz filter nužno je zadovoljavanje izvesne relacije između odnosa e/m , frekvencije ω , i napona U i V . Isprekidane su linije putanja koje ne zadovoljavaju dati uslov.

U kvadripolnim masenim filterima, superpozicija jednosmernog i promenljivog potencijala na četiri unakrsno vezane, parabolične elektrode rezultuje u nehomogenom visokofrekventnom polju u prostoru između elektroda. Statičko električno polje se superponira na visokofrekventno polje. Samo čestice sa određenom masom i energijom mogu da prodju kroz filter date geometrije i frekvence (Slika 3.7)

3.2.5. Separacija izotopa

Separacija izotopa je pre problem tehnologije i nuklearne fizike nego atomske fizike, koja je glavna tema ove knjige. Iz ovog razloga, samo ćemo kratko tretirati ovaj problem.

U principu, bilo koji metod koji može da odvoji čestice na osnovu fizičkih osobina zavisnih od njihove mase, se može iskoristiti za separaciju izotopa. Koji će se metod primeniti u pojedinačnoj primeni zavisi od ekonomije i stanja tehnologije. Zahtevi su ipak vrlo različiti.

Odvajanje dva vodonikova izotopa ${}^2_1\text{H}$ i ${}^1_1\text{H}$ sa razlikom masa od 100 % je relativno lako, ali je nasuprot tome, separacija ${}^{235}_{92}\text{U}$ i ${}^{238}_{92}\text{U}$ znatno teža. U poslednjem slučaju razlika masa je samo 1.25 %. Na dalje će samo najvažniji metodi biti ukratko opisani.

Elektromagnetska separacija sa masenim spektrografima je obično skupa i spora. Prinos koji se dobija je obično 1 mg po satu na struji od oko 10^4 A. Na primer 35 g Cl jednostruko naelektrisanih jona odgovara 96500 As prenetom naelektrisanju. Na struji od 10^{-4} A, 35 g Cl će se nataložiti u toku

$$\frac{9.65 \cdot 10^4 \text{ As}}{10^{-4} \text{ A}} = 9.65 \cdot 10^8 \text{ s} = 30 \text{ godina}$$

Ova tehnika se ipak mnogo primenjuje za separaciju izotopa, na primer za separaciju uranovih izotopa, s ciljem proizvodnje uranskih fisionih bombi. Investicije u tehnologiju i energiju su ovde enormne.

Separacija pomoću difuzije kroz porozne membrane je zasnovana na činjenici da u gasu, čestice različitih masa, m_1 i m_2 , imaju na sobnoj temperaturi različite brzine, v_1 i v_2 . Važi sledeća jednačina:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad \text{jer} \quad m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2$$

tj. srednja kinetička energija obe vrste čestica je ista. Laki atomi se zato kreću, usrednjeno uzev, brže i difunduju lakše. Da bi se dobila efikasna separacija izotopa, mora se primeniti mnogo difundujućih slojeva u nizu. Ovaj metod je prva važna tehnologija za separaciju urana; gasno jedinjenje UF_6 je korišćeno za obogaćivanje urana izotopom ^{235}U u odnosu na ^{238}U .

Gasne centrifuge se takodje mnogo koriste za separaciju urana. Ovde je teži izotop pod dejstvom jače centrifugalne sile. Lakši izotop se više obogaćuje u oblasti ose centrifugiranja. Za efikasnu separaciju, koristi se više stepena jedan iza drugog. Najozbiljniji tehnički problem je jačina materijala koji se koriste, s obzirom na ekstremna ubrzanja koja su ovde potrebna.

Separacione cevi koriste termodifuziju; zasnovane su na principu da temperaturni gradijent u smeši gasova dovodi do odvajanja u smeši; efekat je pojačan konvekcijom. Duž ose dugačke cevi umetnuta je žica grejača. Lakši izotop se obogaćuje termalnom difuzijom u sredini i na vrhu, teži izotop se sakuplja konvekcijom na spoljašnjim zidovima i na dnu cevi.

Frakciona destilacija koristi činjenicu da teži izotopi, u opšte, imaju višu tačku ključanja. Na primer tačka ključanja teške vode D_2O je za oko 1.42°C viša nego za H_2O . Ova metoda se koristi u više ponovljenih koraka.

U elektrolizi, molekuli težih izotopa se teže razgradjuju nego izotopi lakšeg izotopa. Ova tehnika se koristi za obilnu separaciju teškog i lakog vodonika.

Postoje, takodje, hemijske reakcija u kojima molekuli sa različitom izotopskom kompozicijom reaguju sa raznim intenzitetima. U takvim slučajevima, izotopska separacija se može postići preko hemijskih reakcija. Laserska fotohemija, koja je omogućena postojanjem vrlo uskih svetlosnih izvora u formi lasera, se takodje koristi za separaciju izotopa. U ovoj metodi, izvesni izotopi u smeši molekula izgradjenih od raznih izotopa, se mogu selektivno fotoekscitirati, i tako dovesti do fotohemijskih reakcija selektivnih molekula. Neke interesantne nove tehnike za separaciju izotopa su razvijene poslednjih godina na osnovu ovog principa.

Problemi

3.1. Pokazati da se transversalno homogeno magnetsko polje može koristiti za sortiranje naelektrisanih čestica prema njihovim impulsima, i za selektiranje monoenergetskih čestica prema njihovoj masi. Sve čestice imaju isto naelektrisanje.

3.2. Snop jona koji sadrži $^1\text{H}^+$, $^2\text{H}^+$, i $^3\text{H}^+$ se ubrzava potencijalnom razlikom od 1000 V i usmeren je normalno na linije sila magnetskog polja od 0.05 T. Na kom su rastojanju komponente snopa kada prodju 5 cm kroz homogeno magnetsko polje i meri se na rastojanju od 25 cm od početka magnetskog polja?

3.3. Snop pozitivnih jona prolazi kroz $l=4$ cm električno $E=500$ V/m i paralelno magnetsko polje $B=0.01$ T. Joni putuju normalno na pravac ova dva polja (metod parabole). Oni onda prolaze kroz prostor bez polja $l'=18$ cm i padaju na ravan fluorescentni ekran. Koji su parametri parabole na ekranu ako se snop sastoji od jednom naelektrisanih atoma vodonika i vodonikovih molekula sa brzinama koje odgovaraju naponu ubrzanja između 1000 V i 4000 V? Kako izgleda slika na ekranu ako oba, pozitivni i negativni joni padaju na ekran.

3.4. Izotopska obilnost ^{235}U i ^{238}U u prirodnom uranu je 0.72 % i 99.28 %. Ako se izotopi odvajaju difuzijom, izotopska smeža posle jednog koraka separacije je 0.754 % ^{235}U . Koliko se koraka separacije mora preduzeti da se dostigne obogaćivanje ^{235}U do 50 %? i 99%?.

Napomena: Koeficijent separacije α =(relativna koncentracija pre separacije/relativna koncentracija posle separacije) je nezavisan od izotopske smeše.