

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

Anton Potočnik

SEMINAR

Ionske pasti

Mentor: as. dr. Dušan Babič

Marec 2008

Povzetek

Področje atomske fizike zadnjih nekaj deset let bogati tehnologija ionskih pasti. S pomočjo le teh so bili narejeni izredno natančni eksperimenti, med katerimi sta pomembnejša meritev giro-magnetnega razmerja za elektron in proton, izmerjeno na dvanajst decimalnih mest natančno, ter razmerje mas proton-elektron, izmerjeno na sedem decimalnih mest natančno. V tem seminarju si bomo natančneje ogledali delovanje Penningove in Paulove ionske pasti, s katerimi so naredili te znamenite eksperimente ter opisali splošen postopek uporabe na primeru masne spektroskopije nabitih delcev.

Kazalo

1	Uvod	3
2	Vrste ionskih pasti	3
2.1	Penningova past	3
2.2	Paulova past	5
2.3	Ostale pasti	8
3	Pomembne meritve	9
4	Masna spektroskopija	10
4.1	Priprava ionov	10
4.2	Hlajenje ionov	11
4.3	Detekcija ionov	11
5	Zaključek	13

1 Uvod

V fiziki želimo meriti fizikalne količine čim bolj natančno. Točne oz. natančne meritve je mogoče dobiti tako, da izberemo merilno metodo, ki izloči čim več fizikalnih efektov, ki nas ne zanimajo ali celo motijo. V atomski fiziki je takšna uspešna metoda uporaba ionskih pasti. S to metodo v vakuumu z električnim in magnetnim poljem lovimo nabite delce določene vrste, jih ohladimo, izoliramo od zunanjih vplivov in na njih opravimo določeno meritev.

Meritve tako pripravljenih vzorcev so natančne tudi do dvanajst decimalnih mest [7], nabiti vzorci pa so lahko zelo različni: od elektronov, pozitronov, protonov, manjših in večjih molekul pa do nabitih makroskopskih delcev [4]. Te pasti niso uspešne le zaradi raznolikosti delcev, ki jih lahko lovimo, temveč tudi zaradi raznolikosti meritev, ki jih lahko izvajamo, npr. meritve mase, magnetnega momenta, frekvence elektronskih prehodov, itd.

Visoka natančnost meritev in velika raznolikost eksperimentov, ki uporabljajo ionske pasti sta pripomogla, da se ionske pasti uporabljajo že od konca tridesetih let prejšnjega stoletja (Penning, 1936 [2]) pa do danes, kar je že več kot sedemdeset let. V tem dolgem času je bilo z uporabo ionskih pasti narejenih veliko eksperimentov. Med njimi so bili nekateri tudi zelo odmevni, zaradi česar je bila kasneje *Hansu Dehmeltu* in *Wolfgangu Paulu* leta 1989 podeljena *Nobelova nagrada* [1] za tehnologijo ionskih pasti.

Zelo podobna ionskim pastem obstaja še metoda *atomskih pasti*, s katero lovimo delce brez naboja. Ta metoda z močnim magnetnim gradientom lovi nevtralne delce, ki imajo magnetni moment. Danes se večinoma uporablja kot zadnja faza pri hlajenju atomov za doseganje Bose-Einsteinove kondenzacije. Z metodo atomskih pasti lahko prav tako izvedemo zelo natančne meritve, vendar jih v tem seminarju ne bomo obravnavali, omejili se bomo le na ionske pasti.

2 Vrste ionskih pasti

Ione lahko z uporabo magnetnih in električnih polj ulovimo in zadržimo v prostoru na različne načine. Za najenostavnejšo past je zadosti že primerno oblikovano magnetno polje oz. magnetna steklenica. Vendar se je s časoma izkazalo, da sta najbolj uporabna dva načina, *Penningova* [2] in *Paulova ionska past* [3] oz. izpeljanke iz teh dveh.

2.1 Penningova past

F. M. Penning je prvi sestavil ionsko past tako, da je združil statično kvadrupolno električno polje, ki omeji gibanje delca v eni smeri ter statično homogeno magnetno polje, ki poskrbi za ujetje še v preostalih dveh smereh (slika 2, levo). Ta vrsta pasti se uporablja predvsem za lovljenje in shranjevanje elektronov oz. lahkih delcev ter za ciklotronske raziskave le teh.

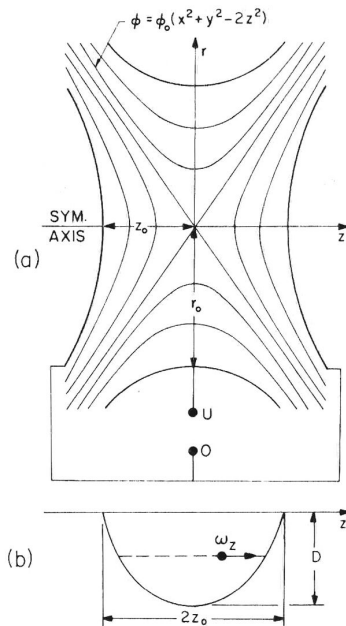
Kvadrupolno električno polje (1) naredimo s hiperbolično oblikovanimi elektrodami s simetrijsko osjo z (slika 1),

$$\phi(x, y, z) = \phi_0 (x^2 + y^2 - 2z^2). \quad (1)$$

V Penningovi pasti dodamo še homogeno magnetno polje B_0 prav tako v smeri osi z .

Konstanta ϕ_0 v kvadrupolnim potencialu (1) je zvezana z globino potencialne jame ($D = \phi(0, 0, 0) - \phi(0, 0, z_0)$) v z smeri, z zvezo $D = 2z_0^2\phi_0$, ta pa je povezana z napetostjo na elektrodah,

$$U = \phi(r_0, 0) - \phi(0, z_0) = \phi_0 [2z_0^2 + r_0^2] = D \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r_0}{z_0} \right)^2 \right]. \quad (2)$$



Slika 1: (a) Postavitev elektrod za kvadrupolno električno polje s simetrijsko osjo v z smeri. (b) Prikaz električnega potenciala v smeri osi z . Nabit delec je ulovljen v paraboličnem potencialu. V smeri pravokotno na z os je polje nasprotnega predznaka in če ni magnetnega polja, delec v tej smeri uide [5].

Gibanje nabitih delcev v Penningovi pasti lahko “razstavimo” na tri dele (slika 2 desno), ki jim pripadajo ustrezne frekvence. Delec, ki se giblje v smeri osi z , čuti električni parabolični potencial in bo zato v tej smeri osciliral s frekvenco ω_z ,

$$\omega_z^2 = \frac{4e\phi_0}{m}, \quad (3)$$

kjer sta e električni naboj in m masa nabitega delca.

Gibanje v ravnini x - y smeri sestoji iz dveh delov: krožnice s središčem v izhodišču, v primeru, ko elektrostatska sila $-eE_r$ skoraj uravnovesi magnetno silo evB_0 in radijem odvisnim le od začetne hitrosti delca v tej ravnini, in pa ciklotronskega kroženja okoli magnetnih silnic. Rešitvi problema v x - y ravnini,

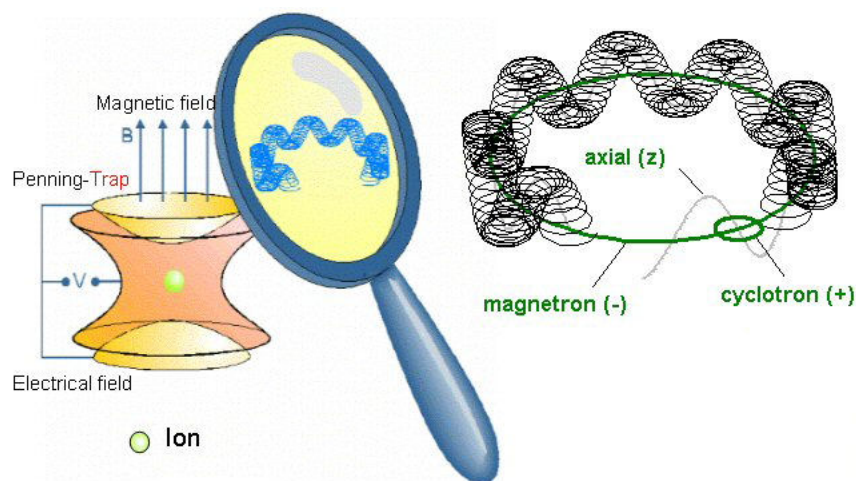
$$m\omega^2 r = F_m - F_e,$$

sta torej dve frekvenci: *magnetronska frekvenca* ω_m , ki je konstanta pasti (neodvisna od vzorca),

$$\omega_m = 2\frac{\phi_0}{B_0}, \quad (4)$$

ter *ciklotronska frekvenca* ω_c , definirana kot

$$\omega_c = \frac{eB_0}{m}, \quad (5)$$



Slika 2: Na levi je shema Penningove pasti, na desni pa so narisane tri orbite z ustreznimi resonančnimi frekvencami: ω_z , ω_m in ω_c [8].

nekoliko zmanjšana za magnetronsko frekvenco, vendar zaradi različnih velikostnih redov to zane-marimo.

Za parametre, običajno uporabljene v eksperimentih, so tiri delcev približno superpozicija treh gibanj: hitro krožečega ciklotronskega kroženja okrog magnetnih silnic, nihanja vzdolž magnetnih silnic in počasnega magnetronskega kroženja pravokotno na os z ; z ustreznimi frekvencami (slika 2, desno),

$$\omega_c \gg \omega_z \gg \omega_m.$$

Ta približek velja dobro le, kadar so frekvence gibanj v različnih velikostnih razredih (tipične vrednosti so v tabeli 1).

Penningova past se odlikuje predvsem po dolgih shranjevalnih časih, ker pri sami metodi prostorskega omejevanja nabitih delcev pri nizkih tlakih ni nobenega mehanizma, ki bi te delce segreval (jim dovajal energijo) tako, da bi s časoma lahko ušli. Penningova past je zato uporabna za shranjevanje subatomske delcev. V CERN-u npr., uporabljajo Penningovo pastjo za shranjevanje antiprotonov [9].

Ta past ima tudi slabe strani. Za delovanje namreč potrebuje močno magnetno polje, kar povzroči močan Zeemanov efekt, ki pri eksperimentih pogosto ni zaželen. Druga slabost Penningove pasti je nestabilnost magnetronske orbite. V kolikor močno trčita dva delca v radialni smeri, bo vsaj eden izmed njiju z veliko verjetnostjo ušel iz pasti.

2.2 Paulova past

Da bi se rešil magnetnega polja in z njim povezanega Zeemanovega pojava, je Wolfgang Paul naredil ionsko past podobno Penningovi, le da je namesto magnetnega polja uporabil izmenično kvadrupolno električno polje. Za izmenično nehomogeno električno polje se da relativno preprosto pokazati, da na nabite delce deluje sila vedno v smeri manjšega polja, neodvisno od predznaka naboja delca [5]. Paulovo past si lahko predstavljamo tudi z analogijo kroglice na vrteči se sedlasti

Velikost elektrod:	$2z_0 = 2cm, r_0/z_0 = \sqrt{2}$
Jakost magnetnega polja:	$B_0 = 0.78T$
DC delavna napetost:	$U = 2D = 12.8V$
Ciklotronska frekvenca:	$\omega_c/2\pi = 22.4GHz$
Aksialna frekvenca:	$\omega_z/2\pi = 58MHz$
Magnetronska frekvenca:	$\omega_m/2\pi = 75kHz$

Tabela 1: Tipični parametri pri Penningovi pasti za zadrževanje termaliziranih elektronov. Pri teh podatkih in pritisku ozadja $2.7 \times 10^{-9} Pa$ je bilo 10^4 elektronov ujetih več ur [5].

površini [10]. Pri frekvenci nič oz. majhni frekvenci se bo kroglica vedno odkotalila po sedlu navzdol. Pri neki mejni frekvenci se bo sedlo vrtelo tako hitro, da kroglici ne bo uspelo uiti iz učinkovite parabolične jame.

Pokažimo to še z računom. Dodajmo statični napetosti na hiperboličnih elektrodah še izmenično komponento. Zapišimo potencial podobno kot v primeru Penningove pasti ($\phi_{DC} = -\phi_0$, $r^2 = x^2 + y^2$), le da mu dodamo še izmenični del

$$\phi(r, z) = (\phi_{DC} - \phi_{AC} \cos(\Omega t)) (2z^2 - r^2).$$

Napetosti na elektrodah in potenciali so še vedno povezani z enačbo 2. Sedaj, ko imamo potencial, lahko zapišemo enačbi gibanja

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} - 2 \frac{e}{m} (\phi_{DC} - \phi_{AC} \cos(\Omega t)) r &= 0, \\ \frac{d^2 z}{dt^2} + 4 \frac{e}{m} (\phi_{DC} - \phi_{AC} \cos(\Omega t)) z &= 0. \end{aligned}$$

V idealnem kvadrupolnem potencialu so enačbe za smer z in smer r neodvisne. Če vpeljemo še substitucijo

$$\begin{aligned} x &= \Omega t/2, \\ a_z &= -2a_r = 16 \frac{e}{m} \frac{\phi_{DC}}{\Omega^2}, \\ q_z &= -2q_r = 8 \frac{e}{m} \frac{\phi_{AC}}{\Omega^2}, \end{aligned}$$

se enačbi prepiseta v *Mathieu-jevo diferencialno enačbo*

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + (a - 2q \cos(2x)) u = 0, \quad (6)$$

kjer lahko u zamenjamo z r ali z . Za Mathieu-jevo diferencialno enačbo je znano, da nima povsem analitičnih rešitev, in da so rešitve bodisi stabilne (delec je ujet v pasti) bodisi nestabilne (delec uide iz pasti), odvisno od vrednosti parametrov a in q (slika 3). Eksaktne rešitve dobimo z numeričnim reševanjem diferencialne enačbe, vendar nas te ne zanimajo. Zanima nas predvsem stabilnost oz.

Velikost elektrod:	$z_0 = 2.5cm, r_0 = 3.5cm$
AC delovna napetost:	$U_{AC} = 175V$
DC delavna napetost:	$U_{DC} = 7V$
Frekvenca:	$\Omega/2\pi = 1MHz$
Aksialna frekvenca:	$\bar{\omega}_z/2\pi = 110kHz$
Vakuum	$p = 4 \times 10^{-6}Pa$
Število ionov	$n = 3 \times 10^7$
Čas zadrževanja ionov	$T = 8s$

Tabela 2: Tipični parametri pri Paulovi pasti za zadrževanje $[He^4]^+$ ionov [5].

past zapustili. Pri visoko-ločljivih meritvah to s pridom izkoriščajo, saj vsaka prisotnost delcev, ki jih ne želimo meriti, pokvari natančnost meritve.

Poleg dobrih lastnosti Paulove pasti, kot sta shranjevanje delcev brez uporabe magnetnega polja ter možnost natančnega filtriranja nezaželenih delcev, ima ta past tudi nekaj slabih lastnosti. Za globino efektivnega potenciala (enačba 8) smo že pokazali, da je ta manjša kot pri Penningovi pasti. Zato bi morali povečati izmenično napetost na elektrodah, vendar smemo to storiti le v mejah, ki so določene z grafom stabilnosti. Ker zaradi tega globine ne moremo poljubno povečevati, lahko najhitrejši delci uidejo iz pasti še posebej, če je past polna. To pomeni, da se število ujetih delcev s časom zmanjšuje. Poleg tega se v Paulovi pasti delci segrevajo zaradi izmeničnega električnega polja in trkov med njimi, kar še poveča verjetnost, da bodo dobili dovolj energije in ušli iz pasti. Zaradi teh omejitev je eksperimentiranje s Paulovo pastjo vedno povezano z majhnim številom nabitih delcev, kar pogosto oteži detekcijo.

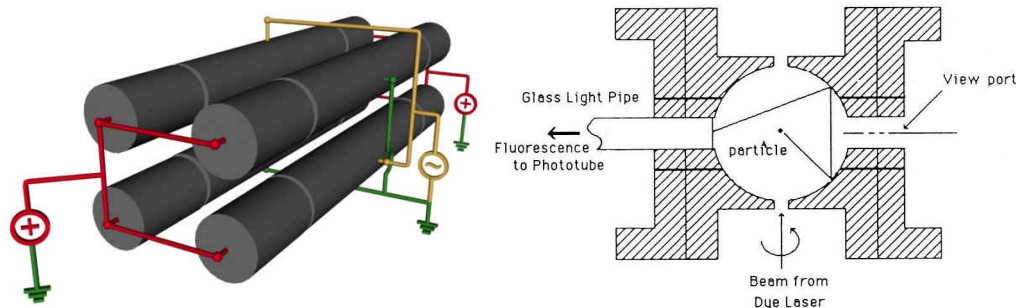
Parametri pasti (napetosti in frekvenca) so določeni predvsem z vrsto delcev, ki jih želimo uloviti v past. Npr. za ione je frekvenca Ω v megaherčnem režimu [5] (za tipične parametre in frekvence glej tabelo 2), zato Paulovo past imenujemo tudi *radio frekvenčna* ali *RF past*, za makroskopske delce pa se to območje spusti tudi do 100Hz ali manj [4, 11].

2.3 Ostale pasti

Paulova in Penningova past so bile prve enostavne pasti, izdelane že pred petdesetimi leti. Od takrat so se pojavile še druge oblike in kombinacije teh pasti, in sicer večkrat v specializiranih oblikah za točno določene eksperimente. Te nove pasti v prvi vrsti skušajo zmanjšati slabosti prejšnjih dveh.

Ena od slabosti prejšnjih dveh pasti je majhno število delcev, ki je lahko ujetih v past. Ta težava se delno reši s *kombinirano Paulovo in Penningovo pastjo*. Takšna past zgleda podobno kot Penningova le, da statičnemu električnemu polju dodamo še izmenično komponento. Dobre lastnosti, ki jih s tem pridobimo, so globlja potencialna jama in širše območje stabilnosti pasti: širši spekter naboja ter širši spekter mase delcev, ki so lahko hkrati v pasti. V takšni pasti bi bil mogoč nastanek antivodika iz hkrati shranjenih pozitronov ter antiprotonov [14].

Še en način, kako povečati število delcev v pasti, je uporaba ti. *linearne Paulove pasti*. Ta past je sestavljena iz kvadrupolnih palic, ki konfinirajo nabite delce v radialni smeri ter statičnega potenciala na koncih palic, ki zadržijo ione v aksialni smeri (slika 4, levo). Dobre lastnosti linearne Paulove pasti so velika shranjevalna kapaciteta nabitih delcev; majhno RF segrevanje, ker se večino delcev nahaja v bližini simetrijske osi, kjer je polje majhno; dobra optična vidljivost področja, kjer se ioni nahajajo; ter enostavna sestava pasti [12]. Napravo, ki uporablja linearno Paulovo pastjo,



Slika 4: Levo: linearna Paulova past [12], desno: sferična Paulova past [13].

je danes mogoče dobiti tudi na tržišču pod imenom *LXQ Linear Ion Trap Mass Spectrometer* [16].

Dostikrat se pasti uporabljajo za optično merjenje lebdečih nabitih delcev v sredini pasti, pri čemer nas sama dinamika gibanja ne zanima. Pri teh meritvah je pomembna predvsem optična vidljivost ujetih delcev ter možnost detektiranja sipane svetlobe. Prav za ta namen so naredili *Spherical Void Electrodynamical Levitator* ali SVEL past (slika 4, desno). Sestava takšne pasti je podobna Paulovi, le da so hiperbolične elektrode zamenjane s konveksnimi. Polje v notranjosti tako ni več idealno kvadrupolno, je pa to še vedno približno res v sredini pasti, kjer se nahajajo ujeti delci. V SVEL pasti stene krožne votline pokrijejo s tankim dielektričnim nanosom, ki je močno difuzno ter ima dobro refleksijo. Na ta način je mogoče natančno izmeriti integral neelastičnega sipalnega sevanja, kar je pomembno pri npr. fluorescenci ali Rammanovem sipanju [13].

3 Pomembne meritve

Zaradi sposobnosti dobrega izoliranja nabitih delcev od okolice in možnosti ohladiitve so ionske pasti ogromno prispevale k razumevanju fizikalnih zakonitosti. V drugi polovici dvajsetega stoletja so z njimi opravili več pomembnih meritev z veliko natančnostjo.

Na univerzi v Washingtonu leta 1983 so v Penningovi pasti s hkratnim merjenjem aksialne ($\bar{\omega}_z$), magnetronske ($\bar{\omega}_m$) ter ciklotronske ($\bar{\omega}_c$) frekvence elektronov in protonov izmerili razmerje mas elektrona in protona na sedem mest natančno [7],

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836.15300 \pm 25 \times 10^{-5}.$$

Van Dyck je leta 1979 v Penningovi pasti meril resonančno frekvenco, pri kateri se elektronu obrne magnetni dipolni moment ter frekvenco, ki dvigne elektron v višje kvantizirano ciklotronsko stanje. Pri eksperimentu je bil v pasti ujet en sam elektron. Iz teh dveh natančno izmerjenih frekvenc je nato izračunal giromagnetno razmerje za elektron, dve leti kasneje pa so naredil podoben eksperiment še za pozitron,

$$\begin{aligned} g(e^-)/2 &= 1.001,159,652,200 \pm 40 \times 10^{-12}, \\ g(e^+)/2 &= 1.001,159,652,222 \pm 50 \times 10^{-12}. \end{aligned}$$

Meritev dipolnega magnetnega momenta elektrona oz pozitrona je natančna na *dvanajst decimalnih mest*, kar je trenutno najbolj natančno določena fundamentalna konstanta. S tema podatkom so pokazali tudi, da je razmerje giromagnetnega razmerja elektronov in pozitronov enako na dvanajst decimalnih mest natančno [7],

$$g(e^+)/g(e^-) = 1 + (22 \pm 64) \times 10^{-12}$$

kar kaže na zelo dobre simetrijske lastnosti fundamentalnih zakonov. S pomočjo teh eksperimentalnih podatkov ter kvantne elektrodinamike se da natančno izračunati tudi konstanto fine strukture

$$\alpha^{-1} = 137.035,993 \pm 10 \times 10^{-6},$$

ki se dobro ujema z $\alpha = e/h$.

Ionske pasti so igrale pomembno vlogo tudi pri časovnem oz. frekvenčnemu standardu. Uporaba mikrovalovnih ali optičnih prehodov shranjenih ionov je za frekvenčni standard dobra predvsem zaradi dolgih koherenčnih časov ter majhnih perturbacij. Vendar je zaradi majhnega števila ionov, ki so lahko shranjeni, razmerje signal-šum nizko, kar je verjetno razlog, da današnji standard ne temelji na ionskih pasteh. Z uporabo ionskih pasti je bilo v devetdesetih letih prejšnjega stoletja predlaganih več standardov, npr. 40.5GHz hiperfina prehod v $^{199}\text{Hg}^+$ ionih shranjenih v Penningovi pasti [7]. Danes se uporablja za frekvenčni standard prehod med dvema hiperfinima osnovnima stanjema v atomih ^{133}Cs , ki so ujeti v magneto-optični pasti [15].

Ionske pasti so torej zelo dobro in pomembno orodje za natančno merjenje nabitih mikroskopskih in makroskopskih delcih. Njihova pomembna vloga se kaže v zgoraj opisanih meritvah, katerih natančnost se do danes ni bistveno izboljšala. Na tržišču sta na voljo tudi dve merilni napravi na podlagi ionskih pasti, *LXQ Linear Ion Trap Mass Spectrometer* [16] ter *API 5000TM LC/MS/MS system* [17], kar kaže, da se ta tehnologija danes še vedno uspešno uporablja.

4 Masna spektroskopija

Pri Paulovi pasti smo pokazali, da je mogoče z izmenično napetostjo določene frekvence na kvadrupolnih elektrodah izbirati katere delce imamo v pasti. Videli smo, da je bila na ta način opravljena zelo natančna meritev razmerji mas protona in elektrona. Oglejmo si sedaj še splošen primer postopka visokoločljivostne masne spektroskopije s Penningovo pastjo.

4.1 Priprava ionov

Najprej moramo nabite delce, s katerimi želimo opraviti meritve, dobiti v past, kar lahko naredimo na več načinov. Pogosta metoda je ionizacija nevtralnih atomov npr. H_2 , ki so predhodno v pasti, s curkom elektronov. Na ta način v pasti nastanejo sekundarni elektroni, ioni (npr. H^+) ter ostali ioni, npr. H_2^+ , H_3^+ in He^+ , katerih se želimo znebiti. V Paulovi pasti to ni težko: parametre nastavimo tako, da bo gibanje težjih ionov nestabilno in bodo zašli iz pasti. V Penningovi in tudi v Paulovi pasti pa lahko uporabimo močno resonančno polje določene frekvence tako, da podobno kot prej, težji, nezaželeni delci absorbirajo dovolj energije, da pobegnejo iz pasti.

Če ionov ne naredimo v pasti, temveč jih vbrizgamo od zunaj, moramo poskrbeti, da v notranjosti oddajo energijo, sicer se bodo sčasoma izgubili. Energijo lahko oddajo s sevalnim zaviranjem ali pa z medsebojnimi trki. Pri trku ponavadi en delec odnese več energije in past zapusti, drug pa v njej ostane.

Drugi načini za izdelavo ionov v pasti so še foto-induciran nastanek ionskega para ali pa z močnim laserjem ustvarjena plazma, pri čemer nastane zelo veliko število ionov [7].

4.2 Hlajenje ionov

Ionske pasti ne moremo narediti poljubno globoke, zato delci z dovolj veliko energijo v repu Maxwellske porazdelitve iz pasti konstantno uhajajo. Po dolgem času imamo v pasti le majhno število ionov in s tem pri detekciji slabo razmerje signal-šum. Da se temu čimbolj izognemo, moramo takoj po polnitvi pasti delce ohladiti. Drugi razlog, zakaj želimo ohladiti vzorec, pa je manjša interakcija med delci ter manjši Dopplerjev efekt, kar zelo poveča razmerje signal-šum in s tem natančnost meritev.

Prva faza ohlajanja je ponavadi *stimulirano izhlapevanje*. Globino potencialne jame počasi znižujemo tako, da le najhitrejši delci uhajajo iz pasti in s seboj odnašajo kinetično energijo. Takšno ohlajanje je precej učinkovito. V kolikor je pri sobni temperaturi napetost na elektrodah $100V$ in to počasi znižamo na $1V$, se bo temperatura vzorca spustila na $\sim 30K$ [6].

Če število ionov v pasti ni zelo veliko, si ne moremo privoščiti ohlajanja z izhlapevanjem. Lahko pa uporabimo metodo ohlajevanja s trki z zelo lahkiimi, nevtralnimi atomi, prisotnimi v pasti. Bolj kot so ti atomi lahki, hitreje se ioni ohlajajo, zato ponavadi uporabljajo plin 4He pri $p = 0.1Pa$. Takšno ohlajanje povzroči perturbacijo stanj v ionih, zato dostikrat ni uporabno.

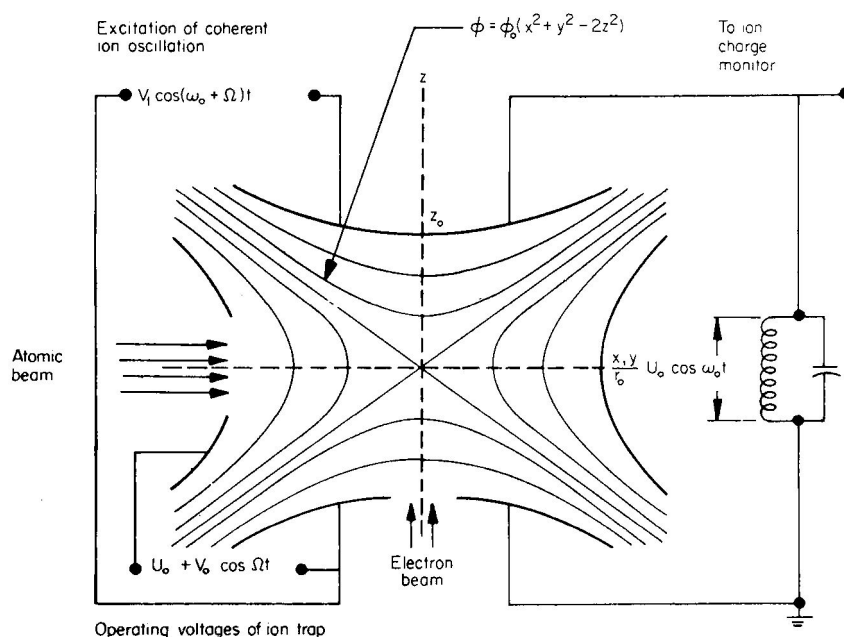
Metoda ohlajanja, ki jo zelo pogosto uporabljamo, je *radiacijsko ohlajanje*. Princip delovanja si lahko predstavljamo z neskončnim kondenzatorjem, zanemarljive kapacitete, v katerem niha električni naboj. Ko povežemo elektrodi kondenzatorja z velikim uporom, se zaradi nihanja elektrona inducira šibek tok. Tok Joulovo segreva upor, kar povzroči, da se nihajočemu elektronu energija eksponentno zmanjšuje. V praksi namesto neskončnega kondenzatorja uporabimo aksialni elektrodi ionske pasti, ki ju povežemo z vzporedno vezanim LC členom (slika 5). Ko nastavimo LC konstanto člena ustrezno resonančni frekvenci gibajočih se ionov v aksialni smeri, se jim hitrost v tej smeri začne zmanjševati. Temperature, ki jih s tem dosežemo, so v območju nekaj deset Kelvinov pri pritisku ozadja $p = 4 \times 10^{-9}Pa$.

Za doseganje še nižjih temperatur se uporablja *lasersko hlajenje*, ki sta ga leta 1975 prva predstavila Wineland in Dehmelt [7]. Harmonsko vezan ion je mogoče ohladiti tako, da na njega posvetimo z monokromatskim laserjem s frekvenco, ki je malo nižja od frekvence močnega elektronskega prehoda v ionu. Ion, ki potuje proti laserskemu žarku, vidi Dopplerjevo premaknjeno frekvenco svetlobe bliže resonanci prehoda, kar povzroči povečano sipanje fotonov na ionu. Zaradi absorpcije gibalnega momenta, se mu hitrost postopoma zmanjšuje. V kolikor se pa ion giblje z laserskim žarkom, vidi Dopplerjevo premaknjeno frekvenco svetlobe dlje od resonance prehoda, zato do sipanja skoraj ne pride. S to metodo je mogoče ohladiti ione tipično na $0.1K$ oz. $1mK$.

4.3 Detekcija ionov

Ko imamo ione ohlajene, nas običajno zanima njihova temperatura. Za to se uporablja kar vezje, ki smo ga predstavili v prejšnjem podrazdelku (slika 5). V termaliziranem vzorcu je zaradi naključne faze gibanja ionov v aksialni smeri napetost na LC členu podobna termičnemu šumu. Ker sta LC člen in gibanje ionov sklopljena, je temperatura vzorca sorazmerna povprečnemu kvadratu te napetosti. Temperatura delcev se določi tudi z merjenjem širine črt večjih elektronskih prehodov v ionih, saj je ta zaradi Dopplerjevega efekta odvisna od hitrosti ionov.

Poleg temperature je zelo pomemben tudi število ionov, ki so ujeti v pasti. Za merjenje števila

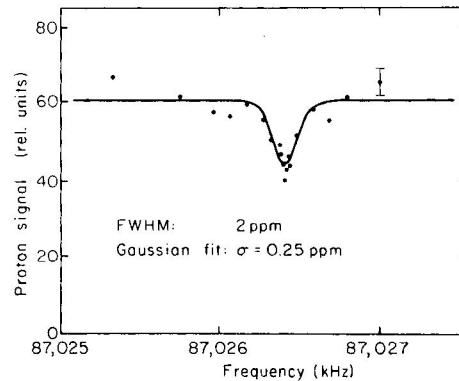


Slika 5: LC člen ob Penningovi pasti za merjenje temperature in količine naboja v pasti [6].

ionov lahko ponovno uporabimo vezje z LC členom (slika 5). Če je v pasti en sam ion, ki niha vzdolž aksialne osi, je nihajoča napetost na LC členu odvisna od hitrosti in naboja iona. Če je v pasti več ionov, je zaradi naključne faze gibanja ionov to težje izmeriti. Problem rešimo tako, da s kratkim električnim sunkom prestavimo težišče ionov iz izhodiščne lege in opazujemo kako ta niha, dokler se zaradi trkov ponovno ne ustavi. Z merjenjem napetosti določimo skupen naboj ionov in s tem število ionov v pasti. V kolikor nas pa zanima število ionov v pasti in jih v nadaljevanju ne potrebujemo več, se lahko poslužimo bolj destruktivne metode. Z močnim električnim poljem popolnoma izpraznimo vsebino ionske pasti in pri izhodu preštejemo delce z detekcijskim števcem. Ta metoda je bolj natančna kot prejšnja, vendar vse ujete ione uniči.

Sedaj, ko imamo pripravljen vzorec, se lahko posvetimo meritvi mas delcev v pasti. Masa nastopa v enačbi za aksialno in ciklotronsko resonančno frekvenco, zato jo lahko določimo z meritvijo ene o teh dveh. Na prvi pogled bi izbrali aksialno frekvenco, saj jo lahko merimo direktno preko napetosti na LC členu. Vendar zaradi slabe natančnosti dimenzij pasti (enačba 2) mase ne moremo izračunati dovolj natančno (enačba 3), zato se odločimo za ciklotronsko frekvenco.

Natančna meritev ciklotronske resonančne frekvence poteka v korakih. Z majhnimi koraki se sprehodimo preko celotnega pričakovanega območja ciklotronske frekvence in opazujemo odziv ionov. Posamezen korak poteka tako, da najprej past napolnimo z ustreznimi ioni, nato vklopimo močan RF signal izbrane frekvence. Na koncu z zelo močnim električnim sunkom odstranimo vse delce iz pasti in jih na poti ven preštejemo z detekcijskim števcem. Če smo pri izbrani frekvenci bili v bližini ciklotronske resonance, je nekaj ionov absorbiralo dovolj energije, da so iz pasti ušli, zato je število prešteti delcev na koncu nekoliko manjše kot sicer. (slika 6). S povprečenjem meritev in s prilagajanjem Gaussove funkcije tem podatkom, lahko s to metodo izmerimo ciklotronsko frekvenco



Slika 6: Graf protonske ciklotronske resonance. Narisana je odvisnost končnega števila ionov, povprečenega po večih meritvah, v odvisnosti od frekvence [7]. V bližini ciklotronske resonančne frekvence lahko opazimo manjše število detektiranih ionov na koncu, saj so nekateri ušli že v fazi močnega RF signala izbrane frekvence.

in posledično maso delcev tudi do šest mest natančno [7].

5 Zaključek

Ionske pasti igrajo zadnjih petdeset let v atomski fiziki pomembno vlogo. Z njimi so bili v tem času narejeni izredno natančni eksperimenti, ki so preverjali veljavnost fundamentalnih fizikalnih zakonov. Tehnologija je tako uspešna, da se danes ionske pasti uporabljajo na mnogih področjih, od atomske fizike pa do molekularne biologije.

V zadnjih nekaj letih, ko je postalo kvantno procesiranje in kvantno računalništvo zelo popularno, so se pojavile tudi številne ideje, kako bi z uporabo ionskih pasti naredili tak računalnik. Kubit bi bili shranjeni v stabilnih elektronskih prehodih posameznih ionov, ti pa bi med seboj interagirali s Coulonsko silo. Kvantne informacije bi procesirali in transportirali s kolektivnim kvantiziranim gibanjem ionov v pasteh, z laserjem pa bi lahko sklopili interna stanja v ionih ali interna z eksternimi stanji gibanja, s čimer bi dosegli kvantno prepletenost kubitov. Z uporabo ionskih pasti je bila predlagana že celotna arhitektura kvantnega računalnika [18]. Leta 2006 so prvič predstavili tudi mikro ionske pasti na silicijevim čipu [19], kar bo zagotovo pripomoglo k lažjemu skaliranju števila kubitov navzgor in zmanjšalo dekoherenco. To sta namreč trenutno dva poglobljena problema v kvantnem računalništvu.

V kolikor se izkaže, da ionske pasti niso najbolj primerne za izdelavo kvantnih računalnikov, se bodo kljub temu v zgodovino zapisale kot zelo pomembne, saj so že do zdaj mnogo pripomogle k razumevanju sveta v katerem živimo.

Literatura

- [1] *Nobel Prize in Physics 1989*. Dostopno na naslovu:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1989/illpres/

- (Citirano: 24. 2. 2008)
- [2] M. Penning, *Physica (Utrecht)* 3, 873 (1936).
 - [3] Paul W., Steinwedel H. *Ein neues Massenspektrometer ohne Magnetfeld*. *Zeitschrift für Naturforschung A* 8 (7): 448-450 (1953).
 - [4] Wuerker, R. F. *Electrodynamic containment of charged particles*. *J. Appl. Phys* 30(3), 342 in 411 (1959).
 - [5] Dehmelt, H. G. *Radiofrequency spectroscopy of stored ions (I.)*. *Adv. At. Mol. Phys.* 3, 53 (1967).
 - [6] Dehmelt, H. G. *Radiofrequency spectroscopy of stored ions (II.)*. *Adv. At. Mol. Phys.* 5, 109 (1969).
 - [7] Wineland, D. J., Itano, W. M., Van Dyck, Jr, R. S. *High-resolution spectroscopy of stored ions*. *Adv. At. Mol. Phys.* 19, 135 (1983).
 - [8] Penning Traps. Dostopno na naslovu: http://titan.triumf.ca/equipment/penning_trap/ (Citirano: 26. 2. 2008)
 - [9] Wikipedia. *Penning Trap*. Dostopno na naslovu: http://en.wikipedia.org/wiki/Penning_trap. (Citirano: 26. 2. 2008)
 - [10] Rueckner, W., Goergi, J., Goodale, D., Rosenberg, D., Tavilla, D. *Rotation saddle Paul trap*. *Am. J. Phys.* 63, 186 (1995).
 - [11] Winter, H. in Ortjohan, H. W. *Simple demonstration of storing macroscopic particles in a "Paul trap"*. *Am. J. Phys.* 59, 807 (1991).
 - [12] *Preparation and Storage of Ultracold Complex Molecules*. Dostopno na naslovu: http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/ResearchInst/ultracold_complex_molecules.htm. (Citirano: 26. 2. 2008)
 - [13] Arnold, S. in Folan, L. M. *Spherical void electrodynamic levitator*. *Rev. Sci. Instrum.* 58, 1732 (1987).
 - [14] Guo-Zhong Li et al. *The combined trap and some possible applications*. *Phys. Scr.* 46 587-592 (1992).
 - [15] Wikipedia. *Atomic clock*. Dostopno na naslovu: http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock. (Citirano: 26. 2. 2008)
 - [16] Thermo scientific. *LXQ Linear Ion Trap Mass Spectrometer*. Dostopno na naslovu: <http://www.thermo.com/com/cda/product/detail/1,,10122446,00.html>. (Citirano: 26. 2. 2008)
 - [17] Applied Biosystems. *API 5000 LC/MS/MS system*. Dostopno na naslovu: http://marketing.appliedbiosystems.com/mk/get/Jurassic_LANDING. (Citirano: 26. 2. 2008)
 - [18] Kielpinski, D., Monroe, C., Wineland, D. J. *Architecture for a large-scale ion.trap quantum computer*. *Nature* 417, 709 (2002).
 - [19] Stick, D. et al. *Ion trap in a semiconductor chip*. *Nature Physics* 2, 36 (2006).