

# Egzotiční atomi



# Uvod

- Atomska fizika odigrala je ključnu ulogu u razvoju fizike u vrijeme izgradnje kvantne mehanike. Poslije otkrića jezgre, a naročito nakon četrdesetih godina ovoj stoljeća u atomskoj fizici nema nekih bitnih novosti u razvoju. Otkriće lasera ponovni oživljava interes za atomske efekte. Aktivno istraživanje ponovno se provodi u domeni tzv. Rydbergovih atoma. U tim se sistemima laserskim efektima dimenzije atom mogu bitno povećati - gotovo u dimenzije makrosvijeta.

# Rydbergovi atomi

- An atom in a Rydberg state has a valence electron in a large orbit far from the ion core; in such an orbit the outermost electron feels an almost hydrogenic, Coulomb potential,  $V_C$  from a compact ion core consisting of a nucleus with  $Z$  protons and the lower electron shells filled with  $Z-1$  electrons. An electron in the spherically symmetric Coulomb potential has potential energy
- The similarity of the effective potential 'seen' by the outer electron to the hydrogen potential is a defining characteristic of Rydberg states and explains why the electron wavefunctions approximate to classical orbits in the limit of the correspondence principle. There are three notable exceptions that can be characterized by the additional term added to the potential energy
- An atom may have two (or more) electrons in highly excited states with comparable orbital radii. In this case the electron-electron interaction gives rise to a significant deviation from the hydrogen potential. For an atom in a multiple Rydberg state, the additional term,  $U_{ee}$ , includes a summation of each *pair* of highly excited electrons
- If the valence electron has very low angular momentum (interpreted classically as an extremely eccentric elliptical orbit) then it may pass close enough to polarise the ion core, giving rise to a  $1/r^4$  core polarization term in the potential.
- If the outer electron penetrates the inner electron shells, it will 'see' more of the charge of the nucleus and hence experience a greater force
- The long lifetimes of Rydberg states with high orbital angular momentum can be explained in terms of the overlapping of wavefunctions. The wavefunction of an electron in a high  $l$  state (high angular momentum, 'circular orbit') has very little overlap with the wavefunctions of the inner electrons and hence remains relatively unperturbed.

# Egzotični atomi definicija

- Drugo dinamično područje atomskih efekata jest studij egzotičnih atoma. Egzotični atomi nastaju vezanjem negativnih teških čestica ( $\mu^-$ ,  $\pi^-$ ,  $\kappa^-$ ,  $\rho^-$ ,  $\Sigma^-$  ...) u Bohrove orbite oko atomskih jezgara putem kulonskog potencijala. Egzotični atomi ponekad se zovu njihovim posebnim imenima teške čestice: mionski, pionski ...atomi.

# Egzotični atomi - nastanak

- Negativna teška čestica dobivena ozračivanjem materijala (ugljika, bakra...) snopom visoke energije i, separirana od drugih čestica, uvodi se u novi materijal. Procesom gubitka energije, ionizacijom materijala kroz koji prolazi, teška se čestica u vremenu od  $10^{-11}$  do  $10^{-9}$  s usporava do vrijednosti impulsa koji bi imala u visokim pobuđenim stanjima Bohrove orbite u atomu tog materijala. U vremenu od  $10^{-15}$  do  $10^{-14}$  s teška čestica biva uvučena u Bohrovu orbitu. U približno isto tako kratkom vremenu ona kaskadira niz orbite u kulonskom polju atoma.

# Egzotični atomi - kaskadiranje

- Naša informacija o egzotičnim atomima potječe od X-zračenja emitiranog u toku tog kaskadiranja teške čestice. Iako se istraživanje tih sistema odvija uz vrlo rigorozne kvantnomehaničke proračune, ipak kvalitativne ideje o metodama ovog područja možemo pratiti na Bohrovu modelu atoma. Za egzotični atom, koji se sastoji od jezgre normalnog atoma s nabojem  $Z$  i negativno nabijene teške čestice u orbiti, postoje jednostavni izrazi kojima ga možemo opisati. Na primjer, energije vezanja  $E_B$  i radijus orbite  $r$  jesu:

$$E_B = -\mu c^2 \frac{(Z\alpha)^2}{2n^2}$$

$$r_n = \frac{\hbar}{\mu c} \frac{n^2}{\alpha Z}$$

# Bohrova slika

$$E_B = -\mu c^2 \frac{(Z\alpha)^2}{2n^2}$$

$$r_n = \frac{\hbar}{\mu c} \frac{n^2}{\alpha Z}$$

gdje je  $\mu$  relativna masa u sistemu,  $c$  brzina svjetlosti,  $\alpha$  konstanta fine strukture, a  $n$  je glavni kvantni broj.

Očito su energije prijelaza zbog velike mase teške čestice, dva do tri reda veličine veće, a radijusi staza za isti faktor umanjani u odnosu na analogne veličine za obične atome.

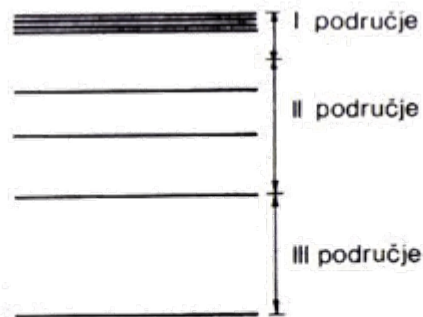
Za mjerenje energije potrebni su, dakako, detektori različiti od onih za detekciju X-zračenja iz običnih atoma. Ovdje mjerimo energije u području od 8 keV do 10 MeV. Radijusi staza mogu ulaziti u jezgru. Na primjer, u slučaju miona u orbiti atoma olova, radijus jezgre je  $7 \cdot 10^{-15}$  m, a radijus mionske staze u najnižem energijskom stanju je  $4 \cdot 10^{-15}$  m.

# Mionski i hadronski atomi

- Atomi formirani s mionom i atomi formirani s hadronom bitno se razlikuju. Kada je mion jednom u Bohrovoj orbiti atoma, spušta se u najnižu stazu, gdje, zbog vrlo slaboga nuklearnog međudjelovanja s jezgrom, uglavnom doživi raspad. Hadronski, pak, atomi imaju drukčiji kraj. Kada se radijus hadronske orbite dovoljno približi dimenzijama jezgre, hadron u orbiti ostvaruje jaku interakciju s jezgrom.
- U tom procesu hadron se najčešće anihilira. Ilustracije radi, najlakši hadroni, pioni već u litiju ne dolaze do najnižeg s-stanja, nego se već iz p-orbite anihiliraju. Hadronske atome karakterizira tzv. posljednji prijelaz. Naime, kaskadiranje niz Bohrove orbite naglo prestaje jer je projektil (hadron) nestao u jezgri. Posljednji prijelaz koji je još vidljiv dobiva i odgovarajuće ime.



# Spektri X-zračenja egzotičnih atoma



**Slika 15.1.** Podjela spektra egzotičnih atoma. Najviše orbite osjećaju utjecaj valentnih elektrona. Na nižim nivoima prestaje elektronski utjecaj, a na kraju se pojavljuje utjecaj jezgre.

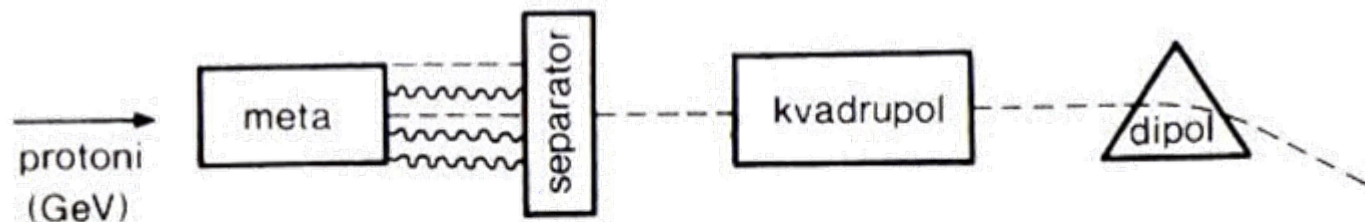
- I. područje spektra egzotičnog atoma pod utjecajem elektronskih orbita,
- II. područje u kojem elektroni malo utječu; počinje utjecaj konačnih dimenzija jezgre,
- III. područje u kojem dominiraju efekti konačnih dimenzija jezgre odnosno hadronska interakcija.

# Područja:

- U I. području naseljenost nivoa u kaskadi bitno će ovisiti o elektronskim konfiguracijama atoma. Postojat će utjecaj kemijskih, čvrstostanjskih i drugih efekata (na primjer, tlaka plina).
- II. područje pod dominacijom je kulonskih utjecaja jezgre. Ovdje već može utjecati i polarizacija vakuuma. To područje je najprikladnije za određivanje statičkih svojstava egzotične probe kao što su, na primjer, masa, magnetski moment ili se može eventualno testirati kvantna elektrodinamika.
- III. područje različito je za mionske i hadronske atome. Mionska stanja vrlo su osjetljiva na monopolnu raspodjelu u jezgri. Može se određivati radijus jezgre. Također je moguće putem hiperfine strukture određivati više momente jezgre. Za jaku interakciju imamo dva efekta; ovisno o svom predznaku, interakcija može stanja dizati ili spuštati, a također proširiti širinu linije.

# Eksperimentalni uređaj

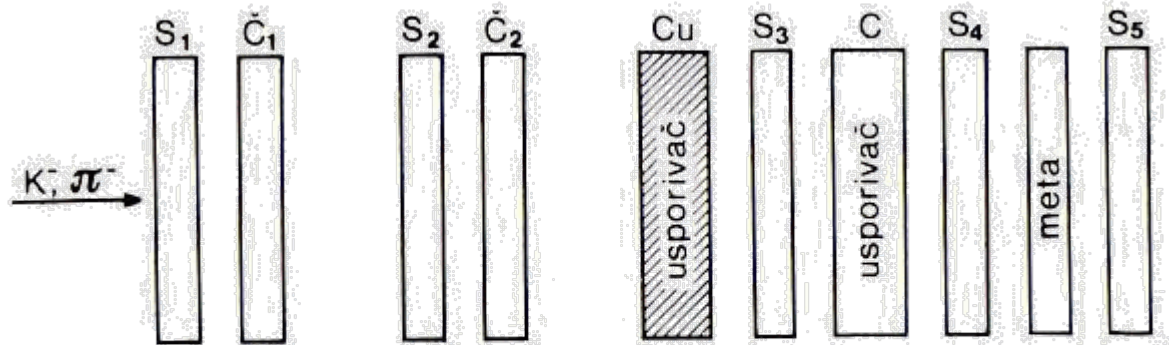
- Za dobivanje snopa koriste se obično protoni s kinetičkom energijom reda veličine 1 GeV koji padaju na produkcijsku metu. Iz mnoštva čestica koje nastaju u sudaru protona iz snopa i jezgre iz materijala mete najprije se djelomično monokromalizira, a zatim i separatorom izdvaja jedna vrsta egzotičnih čestica (sl. 15.2). Monokromatizacija se izvodi magnetskim poljima okomitim na smjer snopa. Pritom se koristi efekt da nabijene čestice istog impulsa imaju isti radijus kružne staze. Kombinirajući magnetsko polje i otvore za prolaz snopa, može se izabrati za prolaz samo čestice određenog impulsa.



**Slika 15.2.** Skica eksperimentalnog uređaja za dobivanje snopa teških čestica i njihovu monokromatizaciju.

# Trasiranje kaona

- Magnetskim dipolima vodi se snop a kvadrupolima fokusira. Rješenje tipičnog detekcijskog uređaja ovisi o teškoj čestici. Opišimo primjer K snopa onečišćenog  $\pi$  česticama dok želimo gledati kaonske atome



**Slika 15.3.** Shema aparature za kaonske atome. S su scintilatori. Č su Čerenkovljevi detektori. Usporavanje kaona osigurava materijal poput bakra ili ugljika. Rezultat stvaranja kaonskog atoma registrira se posebnim detektorom sa strane.

# Kaonski snop - praćenje

- Te oznake znače da su nabijenu česticu "istovremeno" opazili scintilatori od S1 do S4, a S5 je nije registrirao, jer se u meti ispred čestica zaustavila. Čerenkovijevi detektori Č1 i Č2 podešeni su tako da registriraju i obilježe samo jednu vrstu čestica od mogućih  $\pi^-$  i  $K^-$ . Tako ćemo znati kada je kaon zaustavljen u meti. Bakreni moderator brzo usporava snop nabijenih čestica, a ugljikov nešto sporije. Navedeni teleskopski sistem, a riječ je o više detektora, dat će za svaki projektil informaciju o tome da li se projektil zaustavio i je li bio kaon. Oko mete nalazit će se detektori X-zračenja (obično germanij). Koincidentno opaženo X-zračenje sa zaustavljanjem kaona potječe od kaonski formiranog atoma, koji je pri prijelazu između svoja dva stanja emitirao opaženo x-zračenje. Skupljanjem spektra takvog x zračenja pripremljeni su eksperimentalni podaci o kaonskom atomu.

# Upotreba egzotičnih atoma u mjerenju

- Postojanje egzotičnih atoma i njihovo teorijsko razumijevanje mogu se iskoristiti za mjerenje nekih fizičkih parametara koje drugim metodama ne možemo bolje odrediti. Naime, moguće je formirati egzotične atome kakvi nam trebaju. Snimaju se zatim njihovi spektri u području koje veoma ovisi o izabranom nepoznatom parametru. Dobiveni eksperimentalni spektri uspoređuju se s dobro razrađenom teorijom u kojoj je tražena veličina (na primjer magnetski moment teške čestice) jedina nepoznata veličina. U ovom odjeljku navodimo više takvih primjera.

# Određivanje mase

- Projektilima  $\pi^-$ ,  $\kappa^-$ ,  $p^-$ ,  $\Sigma^-$  može se relativno precizno odrediti masa. Promatraju se prijelazi u II. području. Izabere se nekoliko prijelaza i mjere energije prijelaza maksimalnom preciznošću. Obično se odabiru stanja u kojima je polarizacija vakuuma malena korekcija. Zatim se metodom najmanjeg kvadrata određuje masa čestice tako da optimira slaganje teorije s jednim parametrom (masa) i eksperimenta.

# Određivanje magnetskih momenata

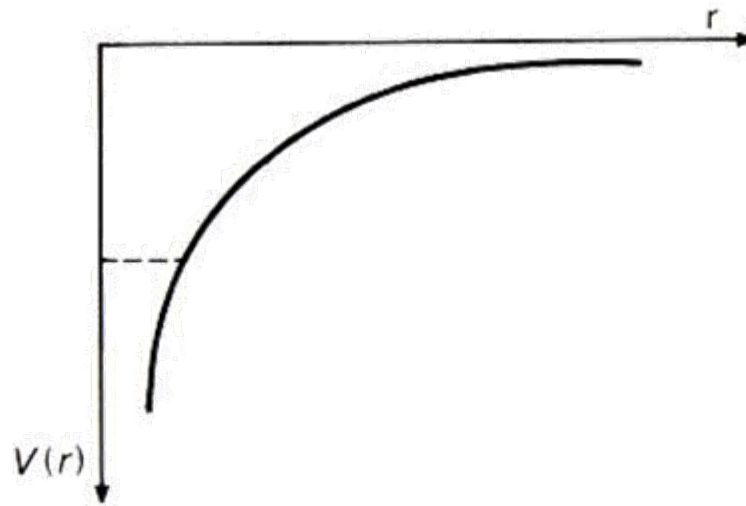
- Za mjerenje magnetskih momenata projektila  $p^-$ ,  $\Sigma^-$  ne raspolažemo osim ove mogućnosti drugim pogodnim mogućnostima. Ako pomoću njih formiramo odgovarajuće egzotične atome u jakom magnetskom polju, opazit ćemo uobičajeno zeemansko cijepanje. Veličina zeemanskog cijepanja proporcionalna je magnetskom momentu egzotične čestice u orbiti. O zeemanskom cijepanju može se prikupiti više podataka. Pri usporedbi teorije i podataka opet će samo jedan parametar, a to je magnetski moment čestice, biti predmetom optimalizacije.



# Određivanje jezgrina radijusa

- Spektar energijskih stanja u atomu teorijski počinjemo računati uz pretpostavku da čestica u orbiti osjeća kulonski potencijal točkaste jezgre bez dimenzija, kao na slici 15.4. Ako je jezgra konačnih dimenzija s nabojem jezgre na njezinoj površini, potencijal više ne pada beskonačno duboko, nego se zaustavlja na udaljenosti koja odgovara radijusu jezgre (horizontalna crtkana linija na slici 15.4).

# Konačni radijusi jezgara



**Slika 15.4.** Efekt konačnog radijusa jezgre (crtkana linija). Konačne dimenzije jezgre umanjuju privlačenje čestica u orbiti u odnosu prema idealnom točkastom kulonskom potencijalu.

# Određivanje radijusa jezgara

- Očita je posljedica te pretpostavke na položaj atomskog nivoa: u području jezgre privlačenje se smanjilo, što mora rezultirati u energijskom pomaku nivoa prema višim energijskim stanjima. Taj efekt u  $1s$  stanju mionskog atoma olova može dignuti energiju i do 10 MeV. U  $1p$  stanju taj efekt je 180 keV. Postupak određivanja jezgrina radijusa teče ovako: usporedimo položaj energijskog nivoa utvrđenog eksperimentalno s onim koje bi teorijski imalo isto stanje uz točkastu jezgru. Variramo zatim vrijednost radijusa jezgre, na kojoj prestaje dalji pad potencijala dok ne dobijemo u rezultatu slaganje s eksperimentom.

# Mionski prijelazi u deformiranim jezgrama

- Promatramo  $1p-1s$  prijelaze u sfernim jezgrama. Tu postoji samo dublet  $1p_{1/2} \rightarrow s$  i  $1p_{3/2} \rightarrow s$ .
- Ako je pak riječ o deformiranoj jezgri, cijepanje je znatno veće. Može se vidjeti i do deset linija. Mehanizam cijepanja je sljedeći: Neka je mion u stanju  $1P_{3/2}$ . Prijelazom  $1p_{3/2} \rightarrow 1p_{1/2}$  može se ostvariti energija za pobuđenje jezgre. Jezgrina stanja različitih vrijednosti spina interagiraju kvadropulnom interakcijom s mionom. Moguće je više rezultatnih  $F = j_{\mu} + j_j$  spinova za sistem mion-jezgra gdje su  $j_{\mu}$  ukupna suma količina gibanja miona a  $j_j$  je spin jezgre. Svakoj vrijednosti  $F$  odgovara poseban energijski nivo. Navedeno cijepanje može poslužiti za mjerenje magnetskog momenta pobuđenih stanja.

# Pionski atomi

- Energijski pomaci u pionskim atomima obično su oko 50 keV. Širine nivoa mogu se povećati do približno 20 keV.
- *Mehanizam proširenja*: ako uz normalnu mogućnost raspada (parcijalna širina apsorpcije  $\Gamma_1$ ) dobijemo novu mogućnost raspada (parcijalna širina za pionsku apsorpciju  $\Gamma_2$ ), tada je ukupna širina  $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$
- Vidimo da efekti anihilacije izravno šire liniju nivoa egzotičnog atoma. Veličina proširenja izravna je mjera jačine matričnog elementa za apsorpciju u jezgri. S druge strane, pomak nivoa pionskog atoma često nastaje od realnog hadronskog potencijala u međudjelovanju piona i jezgre. Očito, taj je pomak i predznakom i veličinom mjera za interakciju pion-jezgra koja ne završava u anihilaciji.

# Mionska spinska rotacija; $\mu$ SR

- Mionska spinska rotacija vrlo je specifična metoda za mjerenje posebnih magnetskih polja formiranih unutar materijala, i ne samo onih na području jezgre ili atoma. U suštini za rad ( $\mu$ SR-metodom nisu potrebni egzotični atomi. Ipak je uobičajeno  $\mu$ SR-metodu povezivati s područjem egzotičnih atoma. Naime, mionski snop se tvori na istim akceleratorima na kojima se istražuju egzotični atomi. Detekcijske aparature upotrijebljene u  $\mu$ SR-metodi su također potekle iz područja karakterističnog za egzotične atome.

# Mjerna metoda $\mu$ SR temelji se na dvije eksperimentalne činjenice

1. mioni stvoreni u raspadu pozitivnih piona su potpuno polarizirani,
2. pozitroni koji nastaju mionskim raspadom emitirani su pretežno u smjeru u kojem je bio mionski spin.

Globalno mjerenje  $\mu$ SR-melodom teče ovako:

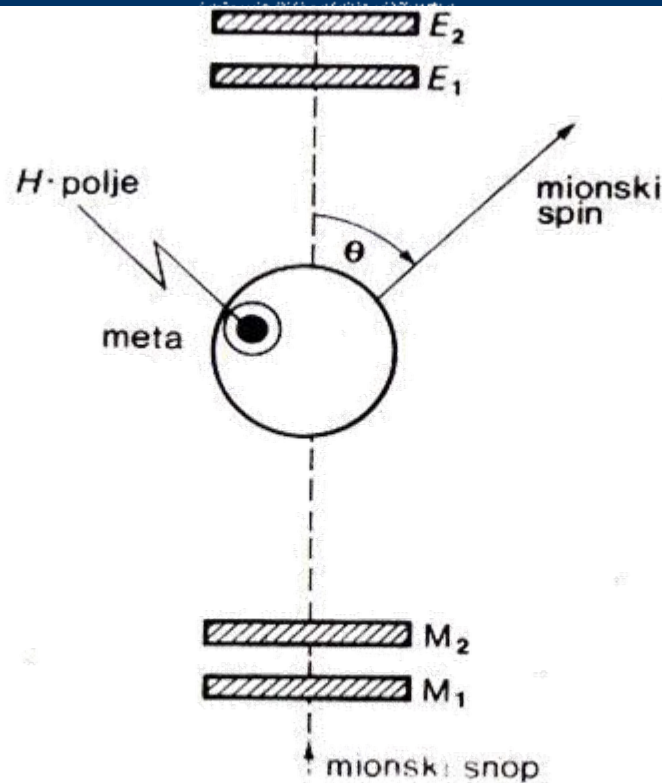
Iz snopa pozitivnih piona raspadom uz 1. svojstvo formira se snop polariziranih miona. Smjer polarizacije je ujedno i smjer miona.

Polarizirani mioni zaustavljaju se u materijalu čija svojstva želimo ispitivati. Dok nema magnetskih polja, kutna distribucija pozitrona nastalih raspadom miona bila bi naglašeno u smjeru originalne mionske polarizacije. Ako je u materijalu prisutno magnetsko polje, mionski spin će rotirati Larmorovom frekvencijom:

$$\omega = 1,355 \text{ MHz/T} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

To znači da će i asimetrična raspodjela emitiranih pozitrona rotirati istom frekvencijom.

# Shema aparature



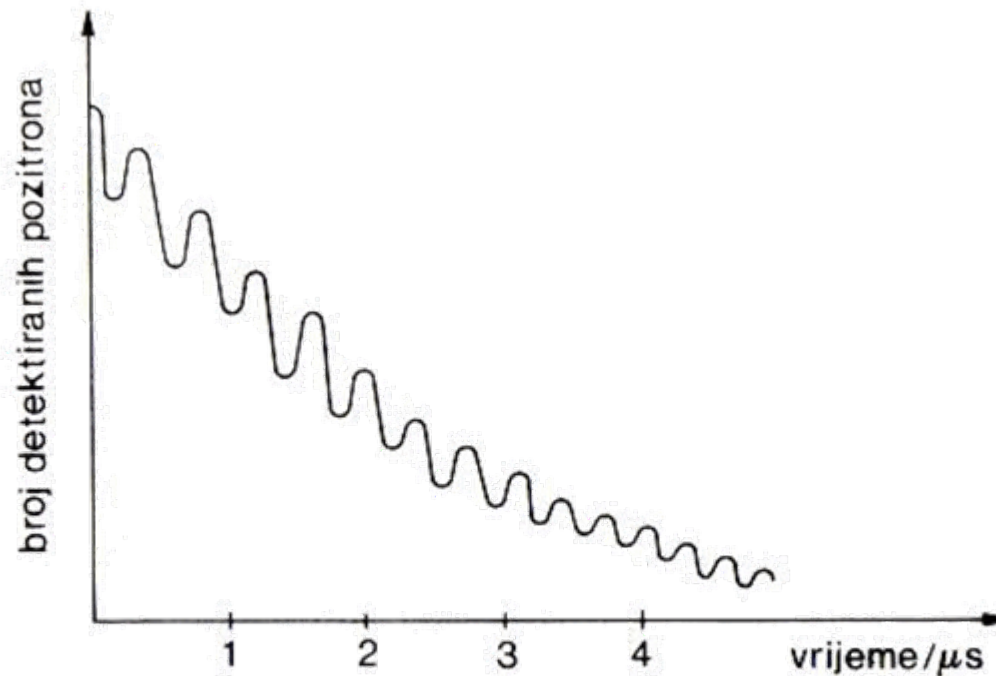
**Slika 15.5.** Skica eksperimentalnog uređaja za rotaciju mionskog spina. M su detektori ulaznog mionskog snopa a E detektori za emisiju pozitrona.



# Opis funkcije aparature

- Tipični eksperimentalni uređaj je na slici 15.5. Ulazak mionskog snopa prati se detektorima  $M_1$  i  $M_2$ . Mioni se zaustavljaju u meti. Radi prisutnosti verikalnog magnetskog polja mionski spin rotira prema formuli (1) u horizontalnoj ravnini započinjući rotaciju od upadnog smjera snopa. Smjer emitiranih pozitrona detektira se detektorima  $E_1$  i  $E_2$ . Rezultat takvog mjerenja prikazan je na slici (15.6). Vidimo dvije karakteristike broja registriranih pozitrona. Eksponencijalni pad u broju detektiranih pozitrona dolazi od raspada miona. Oscilacije u intenzitetu rezultat su rotacije mionskog spina. Iz eksperimentalno izmjerene frekvencije Larmorove precesije mionskog magnetskog momenta (1) određujemo polje unutar materijala.

# Rezultati mjerenja



**Slika 15.6.** Rezultat mjerenja  $\mu\text{SR}$ -metodom. Prikazan je broj detektiranih pozitrona kao funkcija vremena. U prosjeku taj broj opada eksponencijalno zbog mionskog raspada. Oscilacije oko prosjeka su posljedica Larmorove precesije mionskog spina.

# Komplementarne metode:

- Ova metoda posebno je pogodna za fiziku čvrstog stanja. Naime, usporeni pozitivni mion ne veže se ni na koji partikularni objekt (jezgra ili atom) nego boravi u međuprostorima materijala sve do svoga raspada. To ujedno znači da su sve tri metode NMR, ESR i  $\mu$ SR, za mjerenje magnetskih polja preko Larmorove precesije, komplementarne.