

Kotna korelacija anihilacijskih žarkov γ

Samo Krejan

januar 2026

1 Uvod

Pozitron e^+ se pri srečanju s svojim antidelcem elektronom e^- anihilira. Energija, ki se pri tem sprosti se razširi v prostor v obliki elektromagnetevalovanja. Zanima nas natančnejsa obravnavana te anihilacije. Zanima nas ali morda ne pride najprej do nastanka v vodikovem atomu podobne tvorbe v kateri elektron in pozitron krožita okoli skupnega težišča in se anhilirata šele pozneje. Izkaže se, da takšno vezano stanje res obstaja in se imenuje **positronij**.

V osnovnem stanju positronija sta si delca najbližje skupaj. Kot pri vodikovem atomu ima to stanje orbitalno vrtilno količino $l = 0$. Glede na to, da imata elektron in pozitron spin $1/2$, se osnovno stanje razcepi na singletno stanje z vrtilno količino 0 in tripletno stanje, ki ima vrtilno količino 1. Vezalna energija osnovnega stanja je 6.8 eV. Tripletno stanje je za okoli 1 meV manj vezano od singletnega.

Predpostavimo, da positronij miruje (sicer bi pa obravnavali v *CMS* in bi nato pretvorili v *LAB*) in da je v singletnem stanju. Ker je vrtilna količina sistema enaka 0, so si v prostoru vse smeri enakovredne. Pri anihilaciji nastali foton lahko torej odleti v katerokoli smer. Zaradi oranjanja vrtilne količine pa mora nastati še en foton, ki odleti v nasprotno smer. Oba fotona sta ali levo ali desno cirkularno polarizirana.

Za ohranjanje vrtilne količine pri anihilaciji v tripletnem stanju bi potrebovali, da nastanejo najmanj 3 fotoni. To ni tak problem zaradi razlike v življenski dobi obeh sranj. V tripletnem stanju je 1000-krat daljša. V tem času pa pozitronij doživi trke z atomi in iz tripletnega stanja preide v singletno.

Pri vaji se uporablja ^{22}Na , ki preko β^+ razpada služi kot vir pozitronov. Ta se anihilira z elektronom pri čemer nastaneta dva kolinerarna fotona z energijo 511 keV.

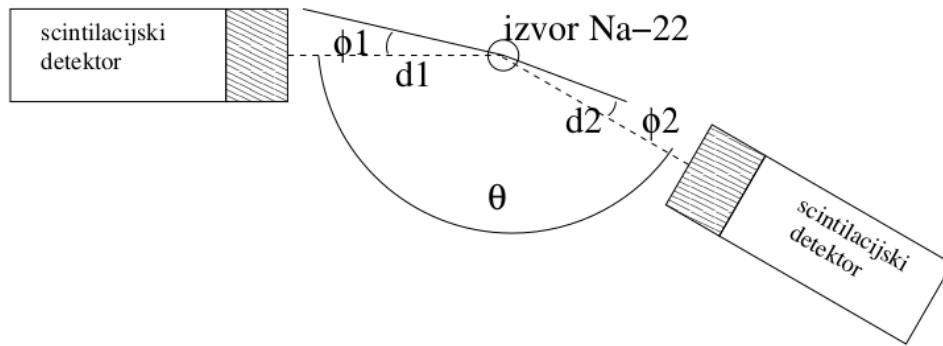
2 Potrebščine

- ^{22}Na sevalec,
- 2 scintilatorska detektorja,
- časovno digitalni pretvornik *Red – Pitaya*,
- 2 modula *ORTEC* 9302 (ojačevalec in diskriminator),

- 8-kanalni razdelilec z zakasnilno enoto *GG800*

3 Naloga

1. Inicializiraj časovno-digitalni pretvornik na plošči Red Pitaya in opravi kalibracijo.
2. Izmeri ločljivost časovno-digitalnega pretvornika.
3. Izmeri porazdelitev časovnih intervalov med razpadi radioaktivnega vira.
4. Poišči koincidence anihilacijskih žarkov γ in izmeri njihovo kotno korelacijo.



Slika 1: Kotna postavitev scintilatorjev.

4 Meritve

4.1 Ločljivost TDC-jev

Za oceno ločljivosti oba TDC-ja priklopimo na isti signal (en izmed scintilatorjev). Ko pomerimo porazdelitev medkanalnih časov, bomo nekje blizu 0 videli oster vrh. V idealnem primeru bi bil tak vrh točno na ničli in bi imel širino 0. V dejanskem primeru dobimo nek spekter. Ločljivost lahko ocenimo kot RMS odmik od idealnega sovpadanja. V programu razberemo, da je ta RMS odmik (oz. standardna deviacija)

$$\sigma_t = 2.4 \text{ ns}.$$

4.2 Enokanalna meritev

Na obeh TDC-jih pomerimo spekter časov med razpadi. Spektra vidimo na sliki 5. Če nanju v logaritemski obliki prilagodimo premico, dobimo naklona, ki predstavljata aktivnosti

$$R_1^{(\text{fit})} = (1195 + / - 4) \text{ s}^{-1},$$

$$R_2^{(\text{fit})} = (1408 + / - 5) \text{ s}^{-1}.$$

Na drug način lahko število vseh sunkov pogledamo celokupno in delimo s časom meritve. Pogledamo tudi odstopanja od vrednosti, ki smo jih dobili iz naklona premice.

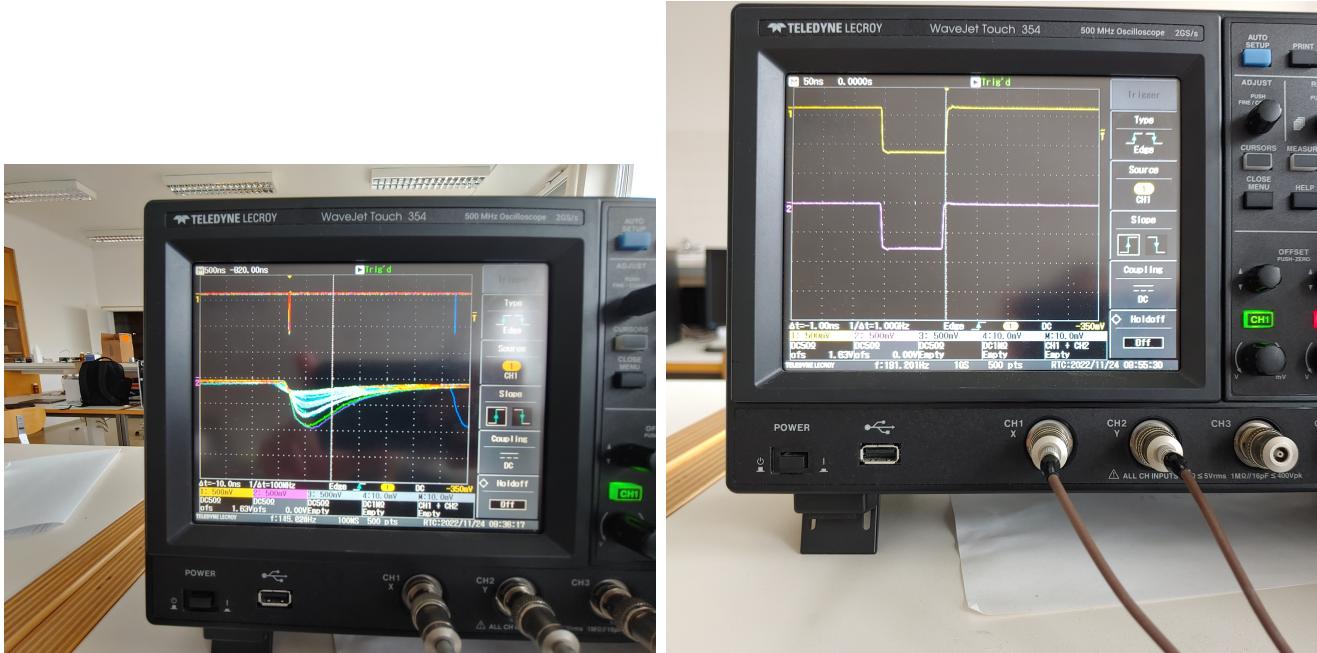
$$R_1^{(\text{vse})} = 1183 \text{ s}^{-1}, \quad \delta = 0.01,$$

$$R_2^{(\text{vse})} = 1189 \text{ s}^{-1}, \quad \delta = 0.02.$$

Vrednosti, s katerimi bomo nadaljevali račun, vzamemo kar kot sredinsko vrednost obeh metod, za napako pa vzamemo kar odstopanje δ .

$$R_1 = (1190 \pm 12) \text{ s}^{-1},$$

$$R_2 = (1400 \pm 20) \text{ s}^{-1}.$$



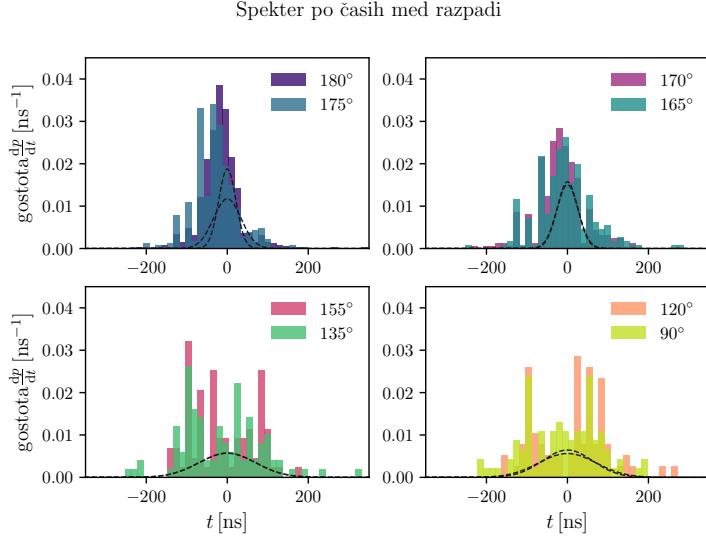
Slika 2: Signali, sunki iz scintilacijskega detektorja na osciloskopu. Amplituda sunka je sorazmerna z energijo elektrona. Na drugi sliki vidimo signale iz diskriminatorja in oblikovalca signalov. Nastavite so take, da sta oba signala dolga 100 ns in da je njih zamik 0.

4.3 Medkanalna meritve

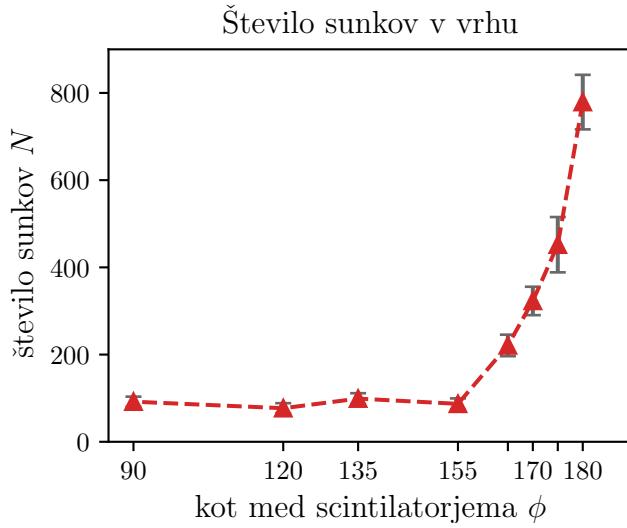
Zdaj pomerimo porazdelitev medkanalnih časov, prvo pri kotu 180° (glej sliko 1), nato pa še pri nekaj drugih.

Napako števila sunkov ocenimo na nekoliko za lase privlečen način. Na spekter prilagodimo Gaussovko in pogledamo RSS (*ang. root sum of squares*) vrednost odmikov med njo in prilagojenim spektrom.

Razvidno je, da so števila sunkov v celotnem vrhu odvisna od kota med scintilatorjem. Daleč največ sunkov je pri kotu 180° , tj. pri načinu, ko γ -fotona odletita v nasprotnih smereh. Tak način razpada označuje singletno stanje.



Slika 3: Spektri medkanalnih časov v koincidenčnem vrhu za različne kote θ (slika 1). S črno so narisane Gaussovke, prilagojene na spekter.



Slika 4: Odvisnost celokupnega števila sunkov v odvisnosti od kota med scintilatorjema. Kot 180° označuje razpad singletnega stanja.

4.4 Naključne koincidence

Če obrnemo DELAY vijak na eni izmed enot GG8000, se koincidenčni vrh odpelje izven merilnega območja, ki smo ga nastavili. Tedaj je zaznana porazdelitev pretežno le še naključne koincidence. Če sta R_1 , R_2 aktivnosti eksponentne porazdelitve, izmerjene na enem in drugem TDC-ju posebej (slika 5 zgoraj), velja za aktivnost naključni koincidenc produktna zveza

$$R_{12} = R_1 R_2 \tau, \quad (1)$$

pri čemer je τ širina merilnega okna $[-500, 500]$. Pričakujemo torej, da bo

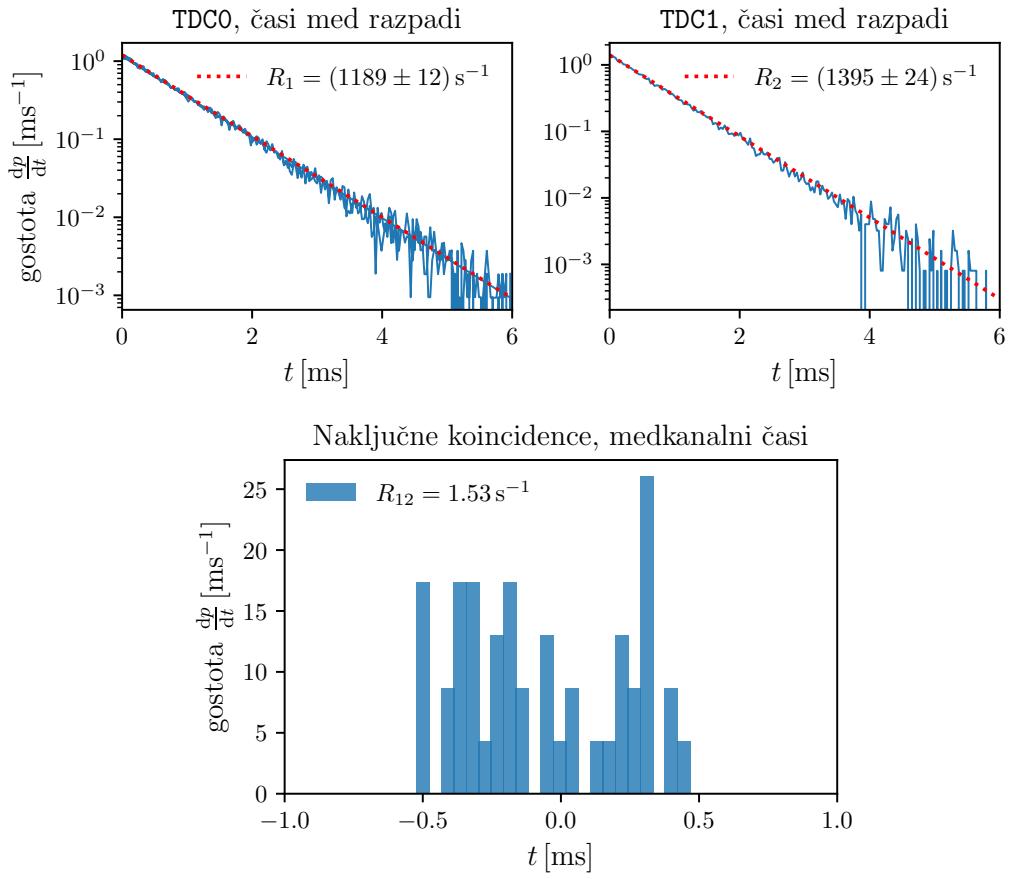
$$R_{12} = (1.66 \pm 0.03) \text{ s}^{-1}.$$

A iz medkanalne meritve (slika 5 spodaj), dobimo aktivnost

$$R_{12} = 1.53 \text{ s}^{-1}.$$

Da bi lahko določili napako te druge meritve, bi jo morali nekajkrat ponoviti. Ker pa od naše predvidene vprednosti $(1.66 \pm 0.03) \text{ s}^{-1}$ odstopa več kot predvideno, sklepam, da je velikostnega reda

$$\Delta R_{12} \approx 0.1 \text{ s}^{-1}.$$



Slika 5: Da preverimo zvezo 1, izmerimo čase med razpadi na prvem in drugem TDC-ju posebej, nato pa medkanalno izmerimo še naključne koincidence med njima.