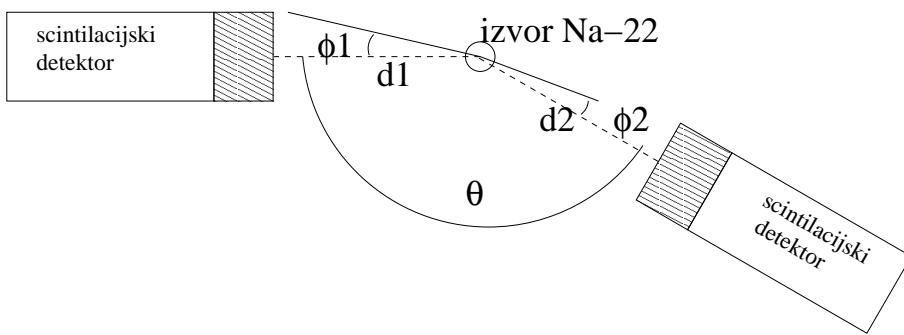


# 6. KOTNA KORELACIJA ANIHILACIJSKIH ŽARKOV $\gamma$

Michel Adamič & Rok Pestotnik  
2021

## 6.1 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  $\gamma$  in izmeri njihovo kotno korelacijo



Slika 6.1: Eksperimentalna postavitev.

## 6.2 Anihilacija pozitrona

Pozitron  $e^+$ , ki je po Diracu luknja v morju pozitivnih energij, se pri srečanju s svojim antidelcem elektronom  $e^-$  anihilira. Energija, ki se pri tem sprosti, se razširi v prostor v obliki elektromagnetskega valovanja.

Ko si skušamo natančneje predočiti približevanje elektrona in pozitrona, nas zanima, ali morda ne pride najprej do nastanka vodikovemu atomu podobne tvorbe v kateri elektron in pozitron krožita okoli skupnega težišča in se delca anihilirata šele pozneje.

Raziskave so pokazale, da tak vezan sistem  $e^+ - e^-$  res obstaja. Imenovali so ga pozitronij. Oglejmo si njegovo osnovno stanje, v katerem sta pozitron in elektron najbližje drug drugemu. Kot pri vodikovemu atomu ima to stanje tudi pri pozitroniju orbitalno vrtilno količino  $l = 0$ . Glede na to, da imata elektron in pozitron spin  $1/2$ , se osnovno stanje razcepi na dve podstanji: eno ima vrtilno količino 0 (singlet), drugo pa ima vrtilno

količino 1 (triplet). Vezalna energija osnovnega stanja je 6,8 eV. Tripletno stanje je za okrog  $10^{-3}$  eV manj vezano kot singletno stanje.

Poglejmo si anihilacijo v singletnem stanju. Predpostavimo, da pozitronij miruje (če se giblje, obravnavamo njegovo anihilacijo v težiščnem sistemu, nato pa količine preračunamo v laboratorijski sistem). Ker je vrtilna količina sistema enaka 0, so si v prostoru vse smeri enakovredne. Pri anihilaciji nastali foton lahko odleti v katerokoli smer. Vendar pa zaradi ohranitve gibalne količine pri anihilaciji ne more nastati en sam foton; istočasno mora nastati še eden in odleteti v nasprotno smer kot prvi. Le tako je pred anihilacijo in po njej gibalna količina sistema enaka 0.

Kako pa je z vrtilno količino? Da tudi ta ostane za ves sistem po anihilaciji enaka 0, morata biti oba fotona ali levo ali pa desno cirkularno polarizirana.

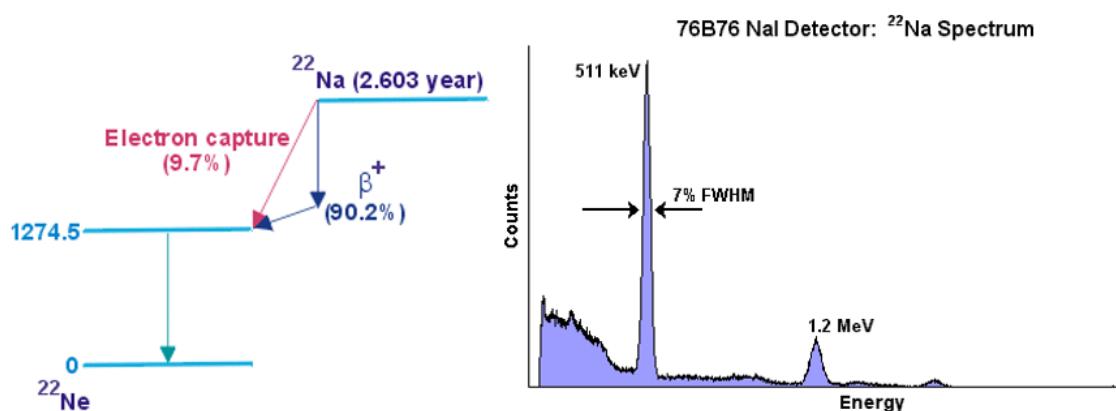
Pri anihilaciji v tripletnem stanju ohranitve gibalne količine niti vrtilne količine ne moremo doseči samo z dvema fotonomi  $\gamma$ . Nastati morajo najmanj trije fotoni  $\gamma$ .

Z ozirom na to, da je verjetnost, da najdemo pozitronij v singletnem stanju 1/4 in verjetnost, da ga najdemo v tripletnem 3/4, bi pričakovali, da bomo bolj pogosto opazili anihilacijo v tri fotone  $\gamma$  kot v dva fotona  $\gamma$ . V resnici pa ni tako. Upoštevati je namreč treba, da življenska doba pozitronija ni ista v obeh stanjih. V singletnem stanju je okrog  $10^{-10}$  s v tripletnem pa približno 1000-krat daljša, to je okrog  $10^{-7}$  s. V tem času pa pozitronij doživi trke z atomi in pri tem iz tripletnega stanja preide v singletno.

### 6.3 Osnova eksperimenta

Pri vaji uporabljamo radioaktivni vir  $^{22}\text{Na}$ , ki prek razpada  $\beta^+$  služi kot vir pozitronov  $e^+$ . Pozitron se anihilira z elektronom, pri čemer hkrati nastaneta dva kolinearna fotona  $\gamma$  z energijo 511 keV, ki letita v nasprotno smer. 511 keV gama žarki iz  $^{22}\text{Na}$  so torej časovno in kotno korelirani, kar bi radi izmerili s postavitvijo, ki jo prikazuje slika 6.1. Koincidence zaznanih fotonov bomo izmerili z natančnim dvokanalnim časovno-digitalnim pretvornikom, krajše TDCjem, ki je na voljo na merilni platformi Red Pitaya. Preden se lotiš izvedbe vaje, natančno preberi priložena navodila za njegovo uporabo (6.7).

### 6.4 Potek dela



Slika 6.2: Razpadna shema  $^{22}\text{Na}$  (levo) in scintilacijski spekter  $^{22}\text{Na}$  (desno).

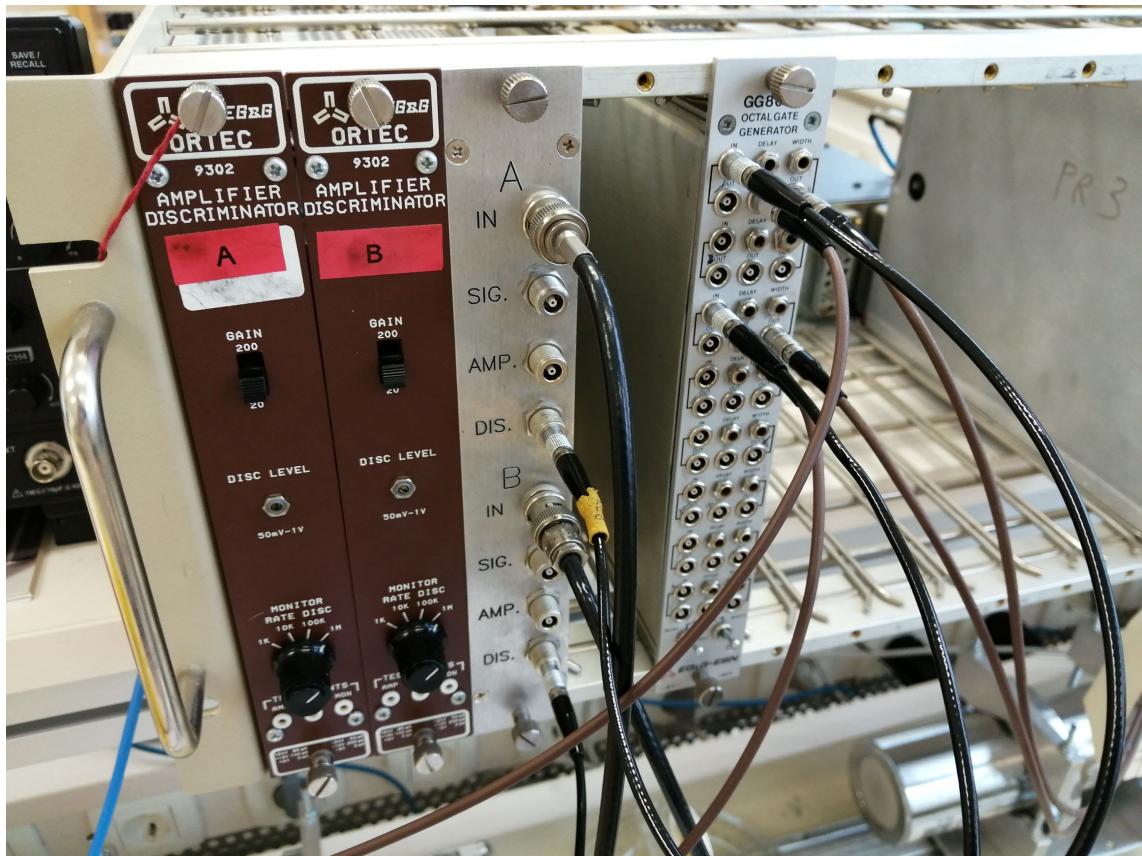
Vse meritve opraviš s sunki iz enega oziroma dveh scintilacijskih detektorjev. Jedra  $^{22}\text{Na}$  razpadajo v 90,2 % primerov z  $\beta^+$  razpadom in v 9,7 % primerov z ujetjem elektrona v vzbujeno jedro  $^{22}\text{Ne}$ , ki z izsevanjem 1,2 MeV fotona gama preide v osnovno stanje (glej razpadno shemo na sliki 6.2). Pozitroni se v snovi ustavijo in pri anihilaciji dobimo kolinearna žarka z energijo 511 keV. S sunki iz fotovrha, ki pripada tem žarkom, opraviš vse poskuse. Od ostalih sunkov jih ločiš s pomočjo diskriminatorja, tako da nastaviš njegov nivo na vrednost, ki v spektru ustreza dolini pod fotovrhom. Določiš jo z opazovanjem sunkov na osciloskopu: iz modula NIM (ojačevalec in diskriminator ORTEC 9302 - slika 6.3) analogni ojačeni izhod AMP napelji na prvi kanal osciloskopa, logični izhod DIS pa na drugi vhod, ki ga uporabi tudi za proženje osciloskopa. Pazi na pravilno zaključitev. Standard NIM temelji na negativni tokovni logiki, kjer logično '1' predstavlja tok  $-16\text{ mA}$ , ki mora biti zaključen preko  $50\text{ }\Omega$  upora, da dobimo nivo  $-0,8\text{ V}$ . Digitalni osciloskop, ki ga uporabljamo, ponuja tako standardno  $1\text{ M}\Omega$  kot tudi  $50\text{ }\Omega$  zaključitev, ki jo izbereš v meniju za posamezen kanal. Z vrtenjem vijaka DISC LEVEL na modulu ORTEC 9302 nastaviš nivo diskriminacije. Nariši v zvezek kakšen je tipični časovni potek signalov! Lahko narediš tudi posnetek zaslona osciloskopa (za navodila glej sliko 6.7). **Ne pozabi nastaviti tudi diskriminatorja na drugem kanalu!**

#### 6.4.1 Priprava merilnega inštrumenta

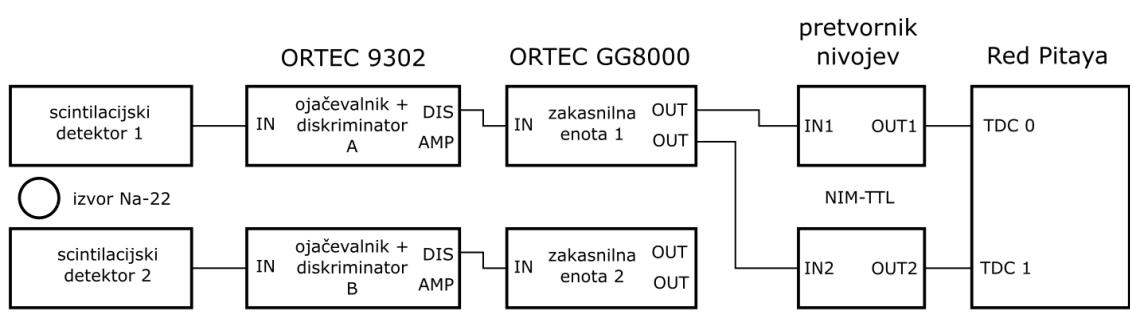
Za kalibracijo časovno-digitalnega pretvornika moramo na njegova vhoda pripeljati naključno porazdeljene sunke radioaktivnih razpadov, za kar uporabimo postavitev, ki jo prikazuje slika 6.4. Izhod iz diskriminatorja je prekratek za nadaljnjo obravnavo, zato ga peljemo na enega izmed 8 identičnih kanalov modula EG&G-ESN GG8000, ki hkrati služi kot oblikovalnik sunkov, zakasnilna enota in razdelilec. Po standardu NIM so vhodno-izhodne impedance vhodov oziroma izhodov  $50\text{ }\Omega$ , kar je treba pri povezovanju upoštevati. Če želimo signal razcepiti/razdeliti na dva, moramo to storiti z ustreznim modulom, ki je temu namenjen, sicer tvegamo, da zaradi nepravilne zaključitve logična vezja ne bodo delovala. V našem primeru za to uporabljamo zakasnilno enoto (GG8000, slika 6.3), kjer na vhod pripeljemo vhodni signal, na izhodu pa dobimo dva signala OUT (srednji in desni konektor) in (PAZI!!!) skrajno levo invertirani OUT signal. Izhodna signala sta glede na vhodnjega zakasnjeni za čas, ki ga nastavimo z izvijačem na vijaku DELAY, njuno dolžino pa nastavimo z vijakom WIDTH.

Med module NIM in TDCjem na Red Pitayi moramo vstaviti še pretvornik nivojev (slika 6.5), ki signale iz negativne tokovne logike NIM pretvarja v pozitivno napetostno logiko TTL, ki jo lahko pripeljemo na vhode FPGA. Ti kot logično '1' interpretirajo signale nad  $+2\text{ V}$ , za 'dogodek' pa TDC smatra prehod iz 0 v 1. **POZOR! Povezave med pretvornikom nivojev in Red Pitayo so fiksne in jih ne spreminjaš, sicer lahko uničiš čip.** Pretvornik nivojev prav tako potrebuje napajanje, zato ga ne pozabi vklopiti v vtičnico.

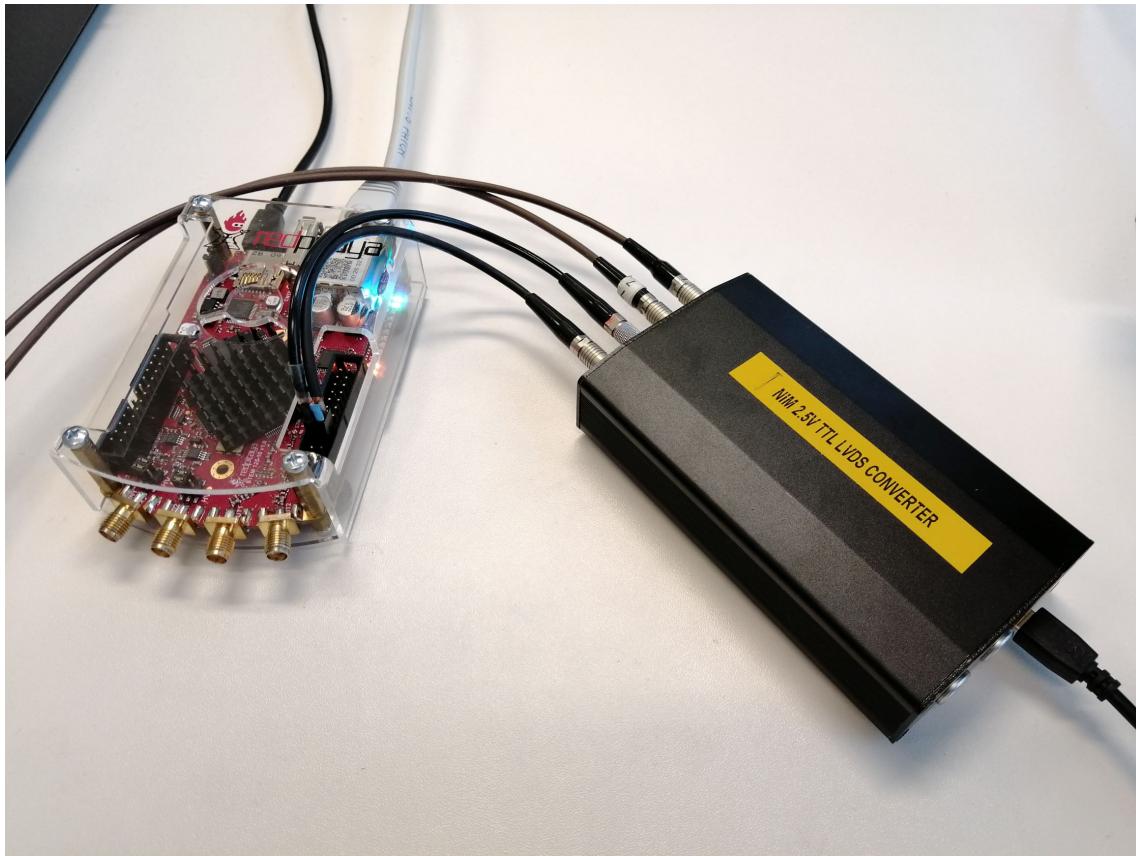
- Nastavi širino (WIDTH) signalov OUT iz obeh diskriminatorjev na približno 100 ns. Pomagaj si z osciloskopom (pazi na  $50\text{ }\Omega$  zaključitev).
- Oba vhoda TDC pelji na razdeljeni izhod istega diskriminatorja, tako kot vidiš na sliki 6.4.
- Izvedi inicializacijo in kalibracijo časovno-digitalnega pretvornika, kot je opisano v navodilih za njegovo uporabo. Scintilatorja naj bosta čim bližje viru, da bo frekvence sunkov višja.



**Slika 6.3:** Modula ORTEC 9302, ojačevalec in diskriminator, imata vhod in izhode na zadnji strani. Zaradi enostavnosti rokovanja so signali napeljani na sprednjo ploščo. Desno vidimo še 8-kanalni razdelilec oziroma enoto GG8000.



**Slika 6.4:** Shema povezav za kalibracijo in meritev časovne ločljivosti TDCja.



**Slika 6.5:** Pretvornik nivojev (desno) in Red Pitaya (levo). Kablov na tej sliki se pri vaji ne dotikaj!

#### 6.4.2 Določitev časovne ločljivosti TDCja

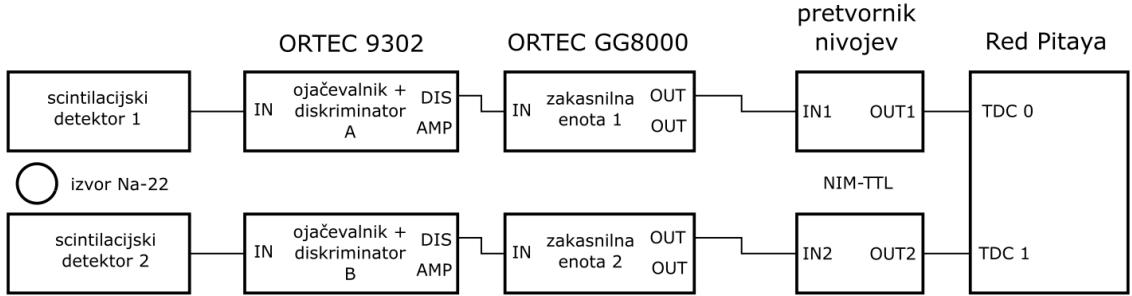
Z identično vezavo (slika 6.4) izmerimo še medkanalno ločljivost časovno-digitalnega pretvornika. Oba kanala (TDC0 in TDC1) sta namreč vezana na isti signal, zato bi teoretično med njima ob vsakem sunku morali izmeriti identični časovni interval. V praksi so izmerki nekoliko raztreseni okoli povprečja, kar predstavlja ločljivost TDCja. Doprinos pretvornika nivojev je zanemarljiv.

- Z medkanalno meritvijo izmeri ločljivost časovno-digitalnega pretvornika. Pazi, da pravilno omejiš obseg merilnega območja; vrh, ki ga iščeš, je najbližji ničli.
- Funkcija ‘Autoscale’ naj bo vključena, število binov lahko pustiš na 200. Ločljivost TDCja se podaja kot RMS vrednost raztrosa izmerkov, ki jo kot ‘Stdev’ dobiš s klikom na gumb ‘Statistics’.

#### 6.4.3 Meritev radioaktivnega razpada

Zdaj, ko je karakterizacija TDCja opravljena, lahko vsak kanal priklopiš na svoj scintiliacijski detektor, tako kot kaže slika 6.6. S to postavitvijo bomo delali do konca vaje.

Z enokanalno meritvijo, torej merjenjem časovnih intervalov med zaporednimi razpadi, bi radi preučili naključno naravo radioaktivnega razpada, ki velja za Poissonov proces.



**Slika 6.6:** Shema povezav sistema za meritev koincidenčnih dogodkov.

- Izberi en kanal TDC (ni važno kateri) in izmeri porazdelitev časovnih intervalov med sosednjimi sunki. Merilno območje sprva pusti privzeto ( $\pm 48$  ms) z vključenim ‘Autoscale’.
- Nato fiksiraj merilno območje na isto okno, kot ga je izbrala avtomatska skala, ter izključi ‘Autoscale’. Program v tem načinu deluje hitreje, zato bo štetje sunkov bolj točno. Fiksiraj še čas meritve, na primer na 30 sekund, ter ponovi meritev.
- Shrani histogram (‘Export’) za kasneje obdelavo.

Poissonovo porazdelitev zapišemo kot

$$P_N^{\bar{N}} = \frac{\bar{N}^N}{N!} e^{-\bar{N}}, \quad (6.1)$$

kjer je  $P$  verjetnost, da se v nekem časovnem intervalu zgodi  $N$  dogodkov, medtem ko jih v povprečju pričakujemo  $\bar{N}$ . V primeru meritve radioaktivnega razpada so dogodki izmerjeni sunki, definiramo pa lahko še povprečno število zaznanih sunkov na sekundo kot hitrost sunkov,  $R = \bar{N}/t$ . Zanima nas, kakšna je verjetnostna gostota za porazdelitev časov med razpadi. Znotraj čakalnega časa ni sunkov ( $N = 0$ ), za kar je verjetnost

$$P_0^{\bar{N}} = \frac{\bar{N}^0}{0!} e^{-\bar{N}} = e^{-\bar{N}} = e^{-Rt} = q. \quad (6.2)$$

Verjetnost, da ne zaznamo razpada, torej eksponentno upada s časom  $t$ . Verjetnost, da ga zaznamo, je potem takem

$$p = 1 - q = 1 - e^{-Rt}. \quad (6.3)$$

Verjetnostno gostoto dobimo z odvajanjem po času, kar nam naposled da

$$\frac{dp}{dt} = R e^{-Rt}, \quad (6.4)$$

$$\ln \left( \frac{dp}{dt} \right) = \ln R - Rt. \quad (6.5)$$

Čakalni časi med zaporednimi pulzi so torej porazdeljeni po eksponentni porazdelitvi, ki je značilna za Poissonov proces. V našem primeru izmerimo diskretno verzijo  $\frac{\Delta p}{\Delta t}$  verjetnostne gostote (6.4), kjer je  $\Delta p$  število sunkov v posameznem predalu histograma, normirano s številom vseh sunkov v oknu (‘Time intervals’),  $\Delta t$  pa širina predala.

- Histogram izmerjene gostote verjetnosti logaritmira in se s prilagajanjem premice prepričaj, da je porazdelitev čakalnih časov res eksponentna. Preveri, če se začetna vrednost in naklon premice po enačbi (6.5) ujemata s povprečno hitrostjo sunkov  $R$ , ki si jo izmeril/a s števcem!

#### 6.4.4 Kotna korelacija anihilacijskih žarkov gama

Pri meritvi koïncidenčnih žarkov morajo biti izvor  $^{22}\text{Na}$  in oba scintilatorja na isti pre-mici. Za zadostno število koïncidenc naj bosta scintilatorja sprva nameščena čim bližje izvoru. Zakasnitvi na obeh zakasnilih enotah (DELAY) naj bosta enaki; najlažje, da obe zavrtiš na minimum.

- Signalna obeh kanalov iz prostih izhodov OUT napelji na osciloskop in naredi posnetek zaslona meritve - glej sliko 6.7.
- Najprej izvedi medkanalno meritev s polnim merilnim območjem ( $\pm 48 \text{ ms}$ ) in vključenim 'Autoscale'. Prepričaj se, da razumeš rezultat meritve, preden nadaljuješ.
- Zoži merilno območje izključno na koïncidenčni vrh, ki se nahaja na času 0. Nato izključi 'Autoscale' (zaradi bolj natančnega štetja dogodkov) in fiksiraj čas meritve (na primer na 30 sekund). Število izmerjenih dogodkov v izbranem oknu (vrednost 'Time intervals' v števcu) predstavlja število koïncidenc.

Nekaj izmerjenih koïncidenc v izbranem oknu je tudi naključnih. Če hitrost sunkov, torej njihovo število na sekundo, na prvem kanalu znaša  $R_1$  in na drugem  $R_2$ , potem je pri širini merilnega okna  $\tau$  hitrost naključnih koïncidenc enaka

$$R_{12} = R_1 R_2 \tau. \quad (6.6)$$

- Z izvijačem povečaj zamik med kanaloma (DELAY), da se koïncidenčni vrh 'odpelje' izven merilnega območja, tako da TDC vidi le še naključne koïncidence (pomagaj si tudi z osciloskopom). Prepričaj se o veljavnosti enačbe (6.6).

Nazadnje izmerimo še kotno korelacijo anihilacijskih žarkov. Zamik med kanaloma zavrti nazaj na 0, potem pa scintilatorja nekoliko oddalji od izvora, da s tem povečaš kotno ločljivost naprave. Razmisli, od česa je odvisna kotna ločljivost meritve!

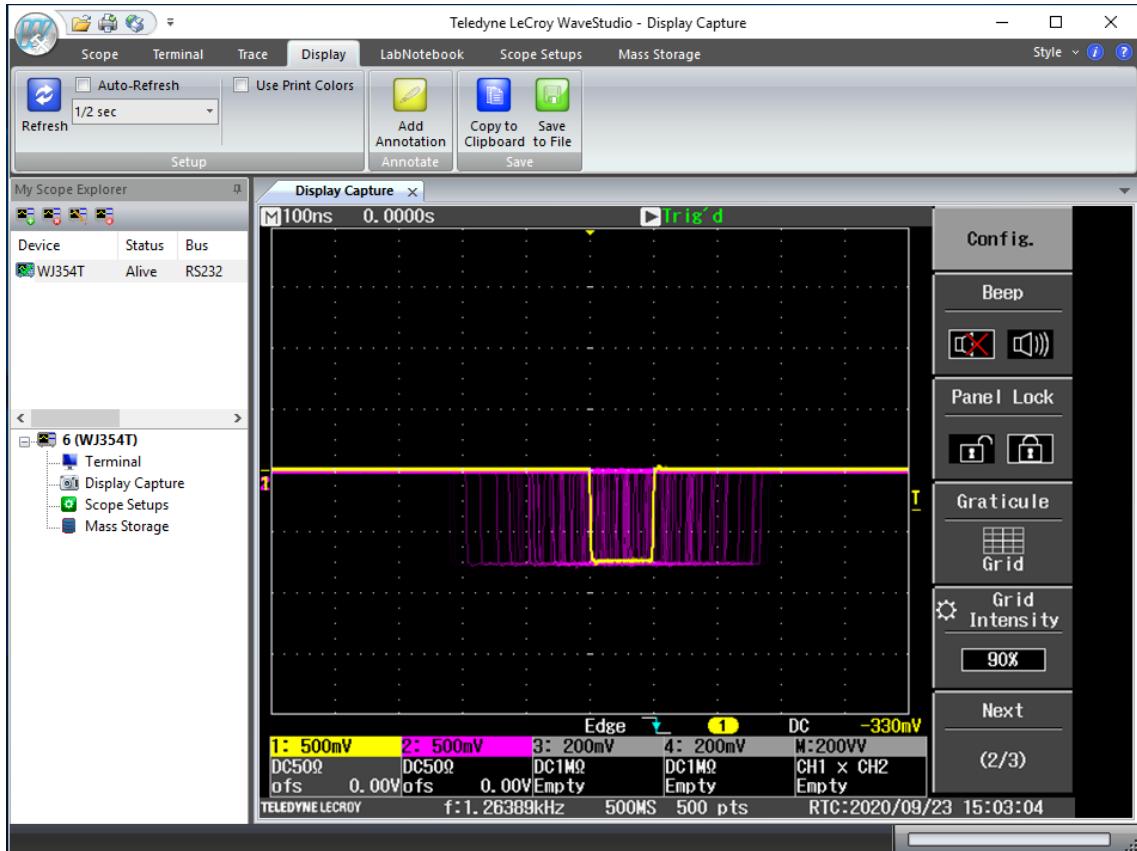
- Pri kotu nič izmeri časovni raztres oziroma širino koïncidenčnega vrha.
- Izmeri število koïncidenc za različne kote med scintilacijskima detektorjema.

Pri velikih kotih število koïncidenc ne upade povsem na nič. Razlog gre pripisati sipanju žarkov gama in že izmerjenim naključnim koïncidencam.

### 6.5 Dodatek/vprašanja

Če ti po koncu vaje ostane čas, se lahko še malo poigraš s postavitvijo in nastavitevami TDCja. Par zanimivih idej:

1. Vrni se na enokanalno meritev, kjer si meril/a porazdelitev časovnih intervalov med zaporednimi sunki. Če omejiš merilno okno na zelo majhne čase (pod  $1 \mu\text{s}$ ), boš opazil/a, da pod določeno vrednostjo ni izmerkov. To je mrtvi čas merilnega sistema. Koliko znaša in ali lahko s pomočjo osciloskopa najdeš komponento, ki je 'kriva' za to? Mrtvi čas TDCja na Red Pitayi je približno 14 ns.
2. Širina koïcidenčnega vrha je mnogo večja od ločljivosti TDCja. Zakaj je temu tako? Poskušaj z osciloskopom poiskati vir tresenja signala. Kaj bi morali storiti, da bi bile koïncidence bolj ostro definirane?



**Slika 6.7:** Posnetek zaslona osciloskopa lahko naredimo preko računalnika s programom WaveStudio s klikom na gumb ‘Display Capture’ v meniju levo. Sliko si lahko shranimo s ‘Save to File’ v meniju zgoraj. Opomba: osciloskop se po vsaki komunikaciji z računalnikom avtomatsko zaklene, ponovno ga odklenemo s pritiskom na ‘Panel Lock’ na zaslonu na dotik.

## 6.6 Seznam uporabljenih modulov NIM

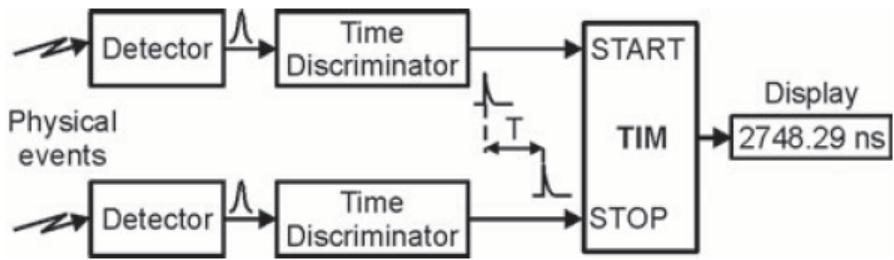
1. Visokonapetostni izvor CAEN N471 [1]
2. Ojačevalnik z diskriminatorjem ORTEC 9302 [2]
3. Zakasnilna enota EG&G-ESN GG8000 [3]

## 6.7 Priloga: navodila za uporabo časovno-digitalnega pretvornika na Red Pitayi

### 6.7.1 Uvod

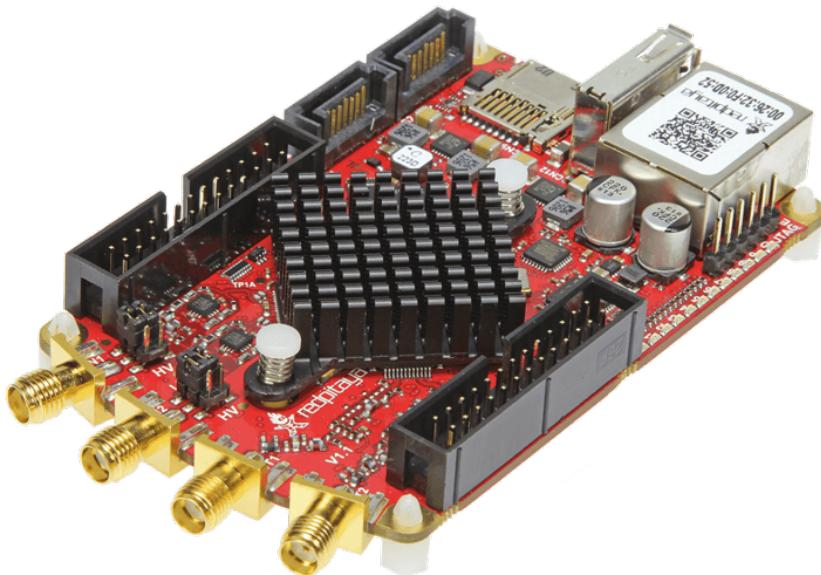
Časovno-digitalni pretvornik ali po angleško TDC (*Time-to-Digital Converter*) je naprava za natančno merjenje časovnih intervalov med dogodki. Primer tipične izvedbe prikazuje slika 6.8, kjer z dvokanalnim TDCjem merimo časovno razliko med prihodom začetnega (START) in končnega (STOP) pulza. Takšno postavitev z dvema kanaloma bomo uporabljali tudi mi za detekcijo koincidenčnih anihilacijskih žarkov gama.

Kot meritni instrument bomo uporabljali slovensko razvojno ploščo Red Pitaya [5], ki jo vidimo na sliki 6.9. V prvem približku gre za mini Linux računalnik z dvojedrnim ARM



**Slika 6.8:** Meritev časovnega intervala. Slika povzeta po [4].

Cortex-A9 procesorjem, se pravi nekaj podobnega kot priljubljeni Raspberry Pi. A v resnici Red Pitaya ponuja še veliko več. Bazira namreč na polno programirljivem čipu Zynq-7010 proizvajalca Xilinx [6], ki na istem kosu silicija poleg procesorja vsebuje tudi tako imenovano *programirljivo polje vrat* ali po angleško *Field Programmable Gate Array*, krajše FPGA. Osnova te tehnologije je polje oziroma matrika velikega števila programirljivih logičnih celic, ki jih lahko z uporabo ustreznega razvojnega orodja preoblikujemo in povežemo v poljubno digitalno vezje, ki je hkrati zelo zmogljivo in poceni. Sistem Zynq nam torej omogoča, da lahko procesorju kadarkoli dodajamo enote s kakršnokoli funkcionalnostjo, ki jo v tistem trenutku potrebujemo. V našem primeru bomo na polju FPGA implementirali dvokanalni časovno-digitalni pretvornik, ki je bil izdelan v sklopu mojega magistrskega dela.



**Slika 6.9:** Red Pitaya STEMlab 125-14. Srce, Xilinxov čip Zynq-7010, se skriva pod črnim hladilnikom. Slika od [5].

### 6.7.2 Inicializacija časovno-digitalnega pretvornika

Celoten TDC je v programskem smislu sestavljen iz treh delov, ki morajo biti vklopljeni, preden lahko začnemo opravljati meritve. To so:

- na FPGA implementirano vezje z dvema kanaloma TDC,

- strežniški program, ki teče na sistemu Linux in izmerjene časovne značke preko Ethernet kabla pošilja osebnemu računalniku,
- grafični uporabniški vmesnik v MATLABu, s katerim upravljamo s TDCjem ter obdelujemo in izrisujemo izmerjene časovne intervale.

Izvorno kodo vseh komponent lahko najdete na githubu [7].

Ob vklopu Red Pitaye na napajanje se ob zagonu operacijskega sistema avtomatsko sproži programiranje FPGA in požene strežniški program. Na plošči bo čez nekaj trenutkov začela utripati rdeča lučka, ki v ritmu bitja srca naznanja, da Linux dela. Ko zasvetita še dve rumeni lučki, je dvokanalni TDC naložen in pripravljen na uporabo.

Zdaj lahko v Windowsih poženeš aplikacijo *TDCgui*, ki se nahaja na namizju. MATLAB se nekaj časa zaganja (1-2 minuti), zato bodi potrebljiv/a. Odpre se okno grafičnega vmesnika, kjer v glavi vneseš parametre povezave TCP/IP (naslov 192.168.1.15, vrata 1001) ter klikneš na gumb ‘Connect’. Če je vse v redu, lahko na desni že bereš temperaturo čipa Zynq; glej sliko 6.10. Preveri še, da direktorij v oknu ‘Path’ kaže na obstoječo mapo, ki jo boš uporabljal/a za shranjevanje in branje datotek.

### 6.7.3 Kalibracija

Uporabljeni TDC temelji na principu časovne interpolacije, kjer čas v grobem merimo s štetjem urinih ciklov, za fine meritve znotraj posameznega cikla pa skrbi integrirana zakasnina linija, ki je sestavljena iz 192 diskretnih elementov na FPGA. Ko na vhod TDCja pripeljemo sunek, ta s končno hitrostjo potuje po liniji, ki se vzorci ob naslednjem urinem ciklu. Iz razdalje, ki jo signal prepotuje po liniji, lahko torej zelo natančno izmerimo čas prihoda sunka znotraj urinega cikla. Preden pa lahko začnemo uporabljati inštrument, je treba zakasnino linijo kalibrirati, torej izmeriti zvezo med diskretno prepotovanom razdaljo (med 1 in 192) in fizičnim časom v pikosekundah. To opravimo v prvem zavihku grafičnega vmesnika, imenovanem ‘Calibration’, kot lahko vidimo na sliki 6.10.

Potrebno je izmeriti zakasnitev posameznih elementov v zakasnini liniji, kar storimo s tako imenovanim statističnim testom. Na vhod TDCja pripeljemo naključno generirane sunke, recimo od radioaktivnega razpada. S klikom na gumb ‘Enable’ poženemo kanale, ki jih želimo kalibrirati – hkrati je lahko aktivnih več kanalov, njihovo stanje pa označuje zelena lučka na levem robu panela. Ob tem dobimo naključno razporejene zadetke vzdolž linije, pri čemer je večja verjetnost, da zadanemo ‘širše’ elemente, torej tiste z večjo zakasnitočijo. Histogram zadetkov posameznih zakasnitvenih elementov lahko v realnem času spremlijamo v oknu grafičnega vmesnika (slika 6.10). Ko zberemo dovolj (vsaj nekaj 10000 sunkov) statistike, kliknemo na gumb ‘Calibrate’ in MATLAB ustvari kalibracijsko tabelo za izbrani kanal. Ne pozabi tega storiti za oba kanala! Če je kalibracija uspešna, se statusna lučka (ob ustavljenem kanalu) obarva modro.

Širina  $W_i$  posameznega zakasnitvenega elementa  $i$ , merjena v pikosekundah, je enostavno

$$W_i = \frac{N_i}{N} \cdot T, \quad (6.7)$$

kjer je  $N$  število vseh nabranih sunkov,  $N_i$  število sunkov v elementu  $i$  in  $T$  perioda ure jedra TDC. Pretvorba iz fine meritve  $i$  v pikosekunde je potem:

$$T_i = \sum_{k=1}^{i-1} W_k + \frac{W_i}{2}, \quad (6.8)$$

kjer seštejemo širine vseh prejšnjih zakasnitvenih elementov in polovico  $i$ -tega, da dobimo čas  $T_i$ , ki ga shranimo v kalibracijsko vpogledno tabelo. Rezultate kalibracije vključno



**Slika 6.10:** MATLAB aplikacija z odprtim zavihkom za kalibracijo.

z izmerjenimi širinami elementov, kalibracijsko funkcijo in nelinearnostjo linije si lahko ogledamo s klikom na gumb ‘Plot calibration data’. Hitrost potovanja signala po zakasnili liniji je zelo neenakomerna, zato kalibracijska funkcija ni premica, kot bi dobili v idealnem primeru. S klikom na gumb ‘Export’ lahko še shranimo meritve za vse kanale hkrati, ki se zapišejo v datoteko .mat v mapi, ki je specificirana v oknu ‘Path’. To pride zelo prav, saj nam ob naslednjem zagonu aplikacije ni potrebno ponovno opravljati statističnega testa, pač pa z ‘Import’ samo uvozimo že izmerjene histograme in kliknemo ‘Calibrate’.

Zakasnitve signala znotraj vezja so funkcija temperature, zato je na desni na voljo termometer, ki vsako sekundo bere temperaturo silicija. Ob zagonu Red Pitaye počakaj kakšnih 10 minut, da se čip segreje, preden opravljaš kalibracijo. Pri sobni temperaturi se zadeva tipično ustali na približno 60 °C, največja dovoljena temperatura obratovanja pa je 85 °C.

Kdor bi rad o delovanju TDCja in lastnostih zakasnilne linije izvedel več, je vladno vabljen k branju mojega magisterija [8], ki je prosti dostopen na spletnem Repozitoriju Univerze v Ljubljani.

#### 6.7.4 Meritve časovnih intervalov

Ko so zakasnilne linije kalibrirane, lahko začnemo opravljati časovne meritve. Odpremo naslednji zavihek ‘Measurement’, ki je prikazan na sliki 6.11. Najprej moramo na levi izbrati časovno-digitalne pretvornike, s katerimi bomo izvedli meritev – kanala START in STOP. Če sta kanala različna, gre za **medkanalno** meritev, če pa v obeh menijih izberemo isti kanal, tako kot na sliki 6.11, gre za **enokanalno** meritev. Zgoraj izberemo še meritno območje, ki se razteza do največ  $\pm 48$  ms. Časovni intervali, ki padejo izven izbranega okna, so zavrnjeni. V meniju GATE določimo, koliko intervalov bi radi izmerili, oziroma, kako dolgo naj meritev traja. Če čas pustimo na 0, je trajanje neomejeno.

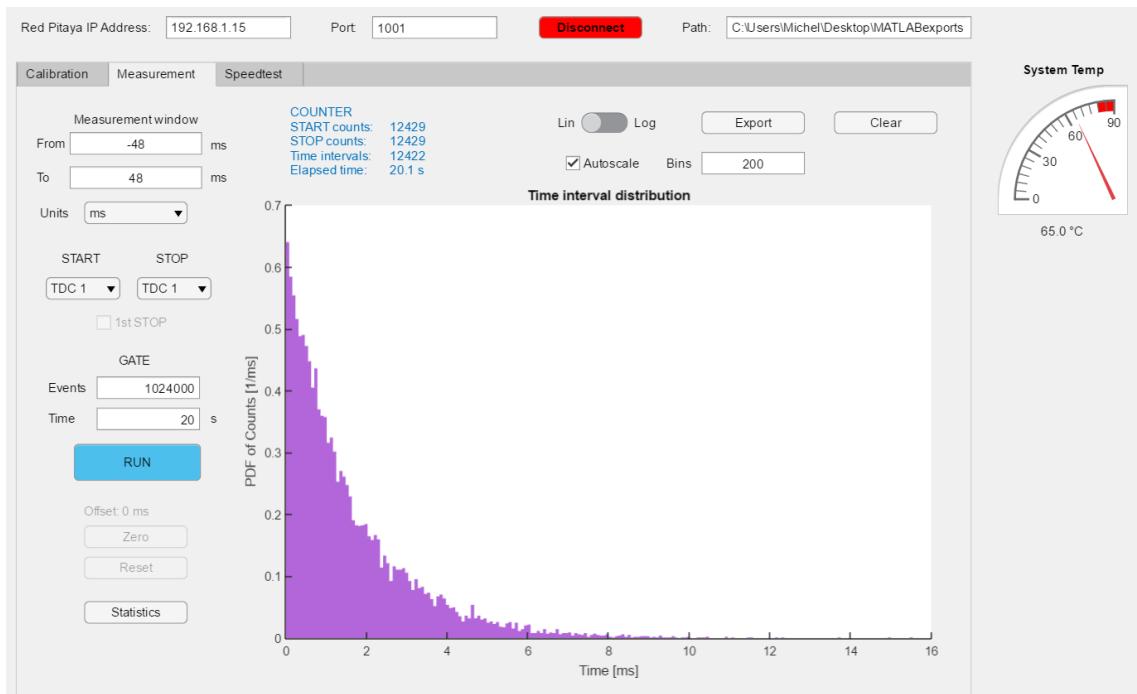
Meritev poženemo/ustavimo z gumbom ‘RUN’. Opomba: ravnokar omenjene nastavitve in meritev sama se hranijo za vsako kombinacijo kanalov START-STOP, zato lahko mirno preklapljam med različnimi kanali brez izgube podatkov. Če bi radi izbrisali posamezno meritev, je treba pritisniti gumb ‘Clear’.

Na histogramu v realnem času vidimo rezultat meritve, ki je ponazorjen v obliki gostote verjetnosti (angl. *probability density function*). Vrednost v posameznem predalu histograma je torej

$$PDF_i = \frac{N_i}{N \cdot \Delta t}, \quad (6.9)$$

kjer je  $N_i$  število izmerkov v predalu  $i$ ,  $N$  število vseh izmerkov v oknu,  $\Delta t$  pa širina posameznega predala. Na voljo imamo tudi števec COUNTER (z modro), ki kaže število izmerkov v izbranem oknu (‘Time intervals’) in število vseh prebranih sulkov na posameznem kanalu. Desno se nahajajo nastavitve grafike, od vrste navpične skale (linearna/logaritemsko) do zrnatosti histograma – števila binov. Pomembna in zelo priročna funkcija je ‘Autoscale’, ki časovno skalo avtomatsko omeji na izmerjene podatke. Če je ta funkcija izklopljena, je skala fiksna in enaka izbranemu merilnemu območju. Za večino meritvev se priporoča, da je avtomatska skala vklopljena.

Ko smo z meritvijo zadovoljni, jo lahko v obliki enakega histograma shranimo z gumbom ‘Export’, ki v zgoraj nastavljenem direktoriju ustvari datoteko .txt za kasnejšo obdelavo. Lahko si shranimo tudi sliko histograma s pomočjo skritega menija desno zgoraj ob grafu.



**Slika 6.11:** Primer enokanalne TDC meritve, kjer smo merili porazdelitev časovnih intervalov med sosednjimi razpadi radioaktivnega vira. Kot pričakovano za Poissonov proces, je porazdelitev eksponentna.

## Enokanalna TDC meritve

Primer vidimo na sliki 6.11. V tem režimu je aktiven le en TDC kanal, TDC1, merimo pa časovni razmak med sosednjimi sunki na vhodu TDCja. Izmerjeni intervali so po definiciji vedno pozitivni. Izmerjeno število sunkov na kanalu START je seveda enako STOP, ker gre za isti kanal.

## Medkanalna TDC meritve

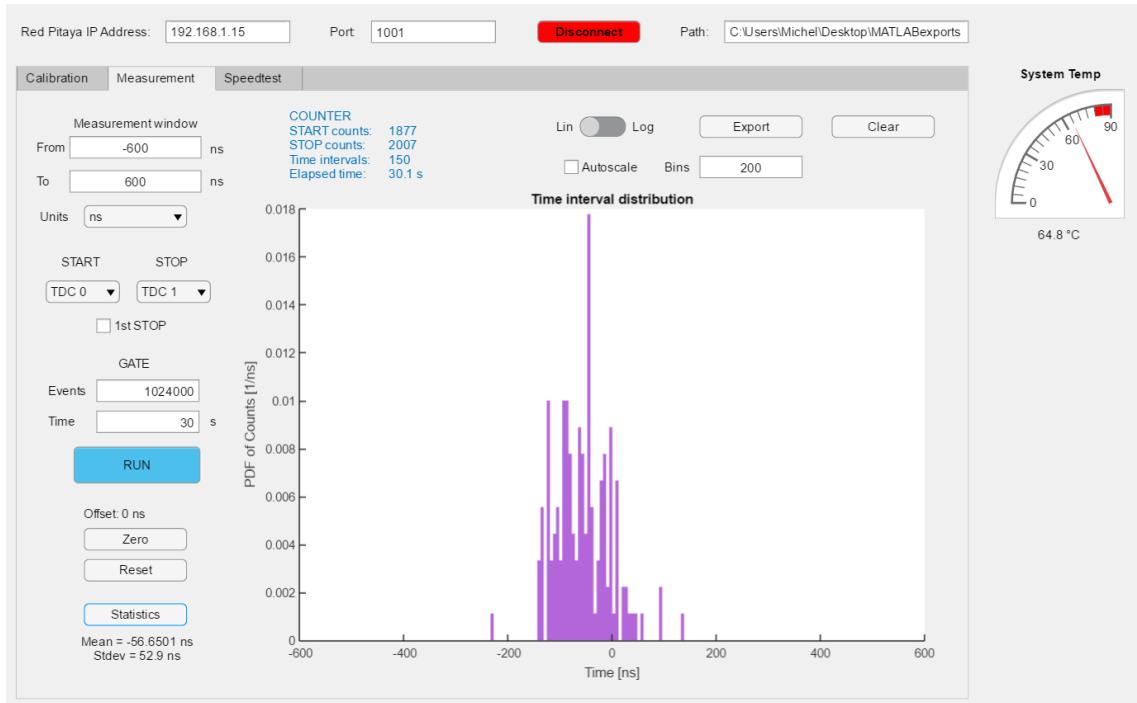
Med vajo bomo TDC večinoma uporabljali v dvokanalnem START-STOP režimu, tako kot shematsko prikazuje slika 6.8. V tem primeru merimo časovno razliko med značkami na STOP in START kanalu, torej STOP minus START, kar je idealno za iskanje koincidenc med kanalom. Primer medkanalne meritve vidimo a sliki 6.12.

Izmerjeni intervali zdaj lahko segajo tudi v negativno smer, če sunki STOP prehitevajo START. Specifičnost medkanalnih meritov, na katero je treba paziti, je inherentna dvojnost meritov, kar nazorno prikazuje slika 6.13. Ob privzetem neomejenem merilnem območju je število točk dvakratnik dejanskih dogodkov, (skoraj) vsak izmerek pa ima ‘dvojčka’ nekje daleč stran na nasprotni osi. Naloga operaterja je, da omeji merilno območje na interval, ki je fizikalno smiseln. Na primer, če vemo, da sunke STOP pošiljamo na TDC za sunki START, potem merilno območje omejimo zgolj na pozitivno polos, in tako naprej. Lep primer je tudi slika 6.12, kjer smo merilno območje omejili na  $\pm 600$  ns za iskanje koincidenc.

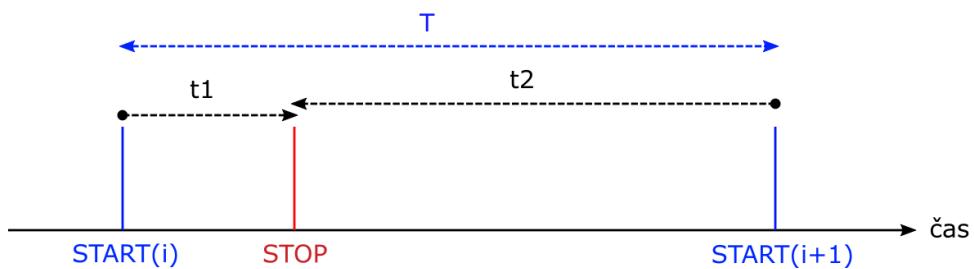
Levo spodaj ob histogramu je za hitro analizo vrhov na voljo gumb ‘Statistics’, ki izračuna povprečje izmerkov v oknu in njihov raztros okoli povprečja (glej sliko 6.12). Na levi sta še meni za odštevanje povprečja ‘Offset’ in funkcija ‘1st STOP’ (tik pod izbiro kanalov), ki sta na voljo le pri medkanalnih meritvah. Ob kliku na gumb ‘Zero’ se izmerki zamaknejo tako, da je njihovo povprečje enako nič, ‘Reset’ pa jih povrne na originalne izmerjene vrednosti. Opcija ‘1st STOP’ se uporablja za filtriranje značk STOP in je pri tej vaji ne bomo potrebovali. Prav tako ne bomo potrebovali tretjega zavrhka aplikacije, ‘Speedtest’, ki je namenjen testiranju hitrosti delovanja časovno digitalnega pretvornika.

### 6.7.5 Nekaj dodatnih napotkov

Tekom izdelave magisterija sem ugotovil, da aplikacije v MATLABu ne blestijo po hitrosti in 100-odstotni zanesljivosti. V zelo redkih primerih se lahko zgodi, da grafični vmesnik naleti na napako ozira preneha delovati, k čemur lahko pripomore (pre)hitro klikanje na gumbe. V tem primeru enostavno ponovno zaženi aplikacijo, uvozi shranjeno kalibracijo in normalno nadaljuj z meritvami. Ko končaš z vajo, prekini povezavo s TDCjem (gumb ‘Disconnect’) in Red Pitayo izklopi iz napajanja.



**Slika 6.12:** Primer medkanalne TDC meritve, kjer merimo časovno razliko med sunki na kanalih STOP in START. Izmerjeni vrh, ki je centriran približno okoli ničle, so koincidence anihilacijskih žarkov gama.



**Slika 6.13:** Medkanalna meritev – dogodek na kanalu STOP proizvede dva izmerjena časovna intervala,  $t_1$  in  $t_2$ , glede na to, ali za referenco vzamemo značko START pred ali za njim. Če je razmak med sosednjima značkama START v danem trenutku enak  $T$ , potem velja  $t_2 = -(T - t_1)$ . Vsak dogodek torej proizvede pozitivni interval  $t_1$  in negativnega  $t_2$ . Naloga operaterja je, da prepozna, katera meritev je fizikalno smiselna in temu primerno prilagodi merilno območje.