

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky
Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze



Pixelové detektory pro registraci
tvrdého záření X produkovaného na
tokamaku Golem ubíhajícími
elektrony

Pixel detectors for detection of hard
X rays produced on tokamak Golem
by run-away electrons

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Vypracoval: Bc. Štěpán Malec
Vedoucí práce: Ing. Vladimír Linhart, Ph.D
Rok: 2021



Katedra: fyziky

Akademický rok:

2020/2021

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Student: Bc. Štěpán Malec

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Vedoucí úkolu: Ing. Vladimír Linhart, Ph.D.

Název úkolu (česky/anglicky):

Pixelové detektory pro registraci tvrdého záření X produkovaného na tokamaku Golem ubíhajícími elektrony

Pixel detectors for detection of hard X rays produced on tokamak Golem by run-away electrons

Pokyny pro vypracování:

1. Zprovozníte předložené pixelové detektory a naučte se je ovládat prostřednictvím skriptovacího jazyka Python na Raspberry Pi.
2. Zprovozněné detektory zakomponujete do měřicího systému tokamaku Golem.
3. Navrhněte a otestujte kalibrační proceduru předložených detektorů, kterou bude možné provádět přímo v laboratoři tokamaku Golem.
4. Zvláštní pozornost věnujte teplotnímu driftu v kalibraci a navrhněte metodu teplotní stabilizace.
5. Zjištěné poznatky popište jak ve výzkumném úkolu, tak případně na webu Tokamak Golem Wiki.
6. Připravte si programové nástroje v jazycích Python a C/C++ pro analýzu naměřených dat.
7. Měřením demonstруйте funkčnost celého detekčního systému.
8. Diskuzí s odborníky na fyziku plazmatu navrhněte experimenty, ve kterých bude možné tento funkční systém využít.

Součástí zadání výzkumného úkolu je jeho uložení na webové stránky katedry fyziky.

Literatura:

1. R. Pecinovský: „Python“, GRADA Publishing, a.s., 2020.
2. Standardy:
 - a. ISO/IEC 9899:2018 (standard jazyka ANSI C)
 - b. ISO/IEC DIS 14882:2017 (standard jazyka C++)

Datum zadání: 23. 10. 2020

Datum odevzdání: 30. 06. 2021

vedoucí katedry

Poděkování

Velice rád bych poděkoval vedoucímu mého výzkumného úkolu Ing. Vladimírovi Linhatovi, Ph.D za rady, které mi dával v průběhu psaní této práce a za pomoc s přípravou experimentů. Velké díky patří také Ing. Votěchovi Svobodovi, CSc. za možnosti využití tokamaku Golem pro testování detektorů. Poděkování patří také Ing. Ondřejovi Fickerovi a Ing. Jaroslavovi Čerovskému za jejich rady při zpracování dat naměřených na tokamaku. Za přístup a využívání přístrojů v laboratoři na MFF UK jsem vděčný doc. RNDr. Peteru Kodyšovi, CSc. a Cesarovi Boldrinimu děkuji za předvedení funkcí přístrojů v laboratoři. Děkuji také doc. Ing. Petrovi Průšovi, Ph.D. za jeho rady k psaní akademických prací.

Bc. Štěpán Malec

Obsah

Úvod	7
1 Pixelové detektory Advapix Timepix3	9
1.1 Zprovoznění a ovládání pixelových detektorů s čipem Timepix3	10
1.1.1 Instalace a popis aplikace PIXet Pro	10
1.1.2 Instalace Pixet Pro na raspberry Pi	12
2 Instalace detektorů na tokamak Golem	15
2.1 Úvod	15
2.2 Příprava detektorů pro měření na tokamaku Golem	15
2.3 Závěr	20
3 Měření na tokamaku Golem	23
3.1 Úvod	23
3.2 Měření	23
3.2.1 Výsledky	24
3.3 Závěr	26
4 Vliv teploty na kvalitu energetických spekter měřených pixelovými detektory Timepix3	29
4.1 Úvod	29
4.2 Vybavení laboratoře	29
4.3 Měření	30
4.3.1 Si detektor	30
4.3.2 CdTe detektor	31
4.4 Výsledky	32
4.5 Teplotní stabilizace	32
5 Doba sběru nosičů náboje	33
5.1 Úvod	33
5.2 Měření	34
5.3 Závěr	34
Závěr	37
Literatura	38
Přílohy	41

A	Teplovní drift pixelových detektorů Timepix3 - Si detektor	41
B	Teplovní drift pixelových detektorů Timepix3 - CdTe detektor	47
C	Časové vývoje počtu událostí během výbojů na tokamaku Golem	51
D	Časové vývoje energií detekovaných událostí během výbojů na tokamaku Golem	63
E	Energetická spektra detekovaných událostí při výbojích na tokamaku Golem	75
F	Frekvence výskytů událostí při výbojích na tokamaku Golem	87

Úvod

Tato práce pojednává o využití pixelových detektorů s čipem Timepix3 na tokamaku Golem, kde je plánováno tyto detektory používat pro registraci rentgenového záření produkovaného ubíhajícími elektrony.

Tento výzkumný úkol je volným navázáním na bakalářskou práci Charakterizace rentgenového záření produkovaného ubíhajícími elektrony na tokamaku Golem, která byla věnována řešerši odborných článků na téma ubíhajících elektronů, zejména jejich detekci prostřednictvím vyprodukovaného rentgenového záření.

Provedená rešerše v bakalářské práci poskytla informace o používaných detektorech pro registraci rentgenového záření na tokamacích. Nejčastěji používané jsou scintilační detektory, nejvíce NaI(Tl). Z dlouhodobého hlediska je snaha do měřicího systému tokamaku Golem zařadit také polovodičové pixelové detektory kvůli jejich vysoké rozlišovací schopnosti jednotlivých událostí. Z toho důvodu je v bakalářské práci provedeno porovnání polovodičových pixelových detektorů s detektory scintilačními. Z porovnání vyplynul přínos použití polovodičových pixelových detektorů pro aplikaci na tokamaku Golem, proto je následně popsán princip polovodičových detektorů.

Aby byla ověřena funkčnost předložených polovodičových detektorů s čipem Timepix3, v bakalářské práci bylo provedeno několik spektroskopických měření. Byla měřená energetická spektra předložených zářičů. Z výsledků měření vyplynulo, že bude třeba proměřit vliv teploty na kvalitu naměřených energetických spekter těchto detektorů a vyřešit jejich teplotní stabilizaci. V závěru práce je představen princip Comptonovy kamery a následně provedena simulace ověřující její princip.

Náplní této práce je zprovoznění předložených pixelových detektorů s read-out čipem Timepix3. Detektory je dle zadání třeba zprovoznit také na Raspberry Pi a ovládat je pomocí skriptovacího jazyka Python. S ovládáním detektorů pomocí skriptovacího jazyka Python úzce souvisí znalost jednotlivých příkazů pro nastavování parametrů za účelem provedení konkrétního měření. Po uvedení předložených detektorů je popsána instalace softwaru PIXet Pro na Raspberry Pi a poté je popsáno zprovoznění měřicího systému na tokamaku Golem. Následuje uvedení některých experimentů provedných s pixelovými detektory s čipem Timepix3. Zvláštní pozornost je věnována vlivu teploty na kvalitu energetických spekter a dále je navržena metoda pro teplotní stabilizaci. Analýza naměřených dat je prováděna pomocí skriptů napsaných v jazyce Python a C++.

Kapitola 1

Pixelové detektory Advapix Timepix3

Advapix Timepix3 je komplexní detekční zařízení, které je schopno zaznamenat každou interakci částice ionizujícího záření s detektorem. R/O čip je možné nastavit do různých módů, jedním z nich je i detekce událost po události. Je měřena poloha, energie a čas detekce každého zaznamenaného kvanta záření. Detektor je vybaven maticí 256×256 nezávislých spektrometrů (pixelů) o velikosti $55 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$, které jsou buď křemíkové, nebo kadmium-teluridové, obě varianty jsou k dostání s různými tloušťkami senzorů. Uvažuje se i o dalších typech senzorů, ale ty nejsou v současné době komerčně dostupné. Timepix3 je univerzální integrovaný obvod vhodný pro vyčítání jak polovodičových, tak plynových detektorů [6]. Je možná volba režimu sběru dat. Dva hlavní režimy měření jsou 1) simultánní 10 bitový ToT a 18 bitový ToA a 2) 10 bitové počítání událostí a 14 bitový integrovaný ToT. Jednotlivé režimy sběru dat:

- ToT - Time over threshold - čas, kdy je detekovaný signál nad tresholdem
- ToA - Time to arrival - čas od spuštění měření do překročení tresholdu
- ToA + ToT - simultánní 10bitový ToT a 18bitový ToA
- Event + iToT - počítání jednotlivých událostí a integrovaný ToT

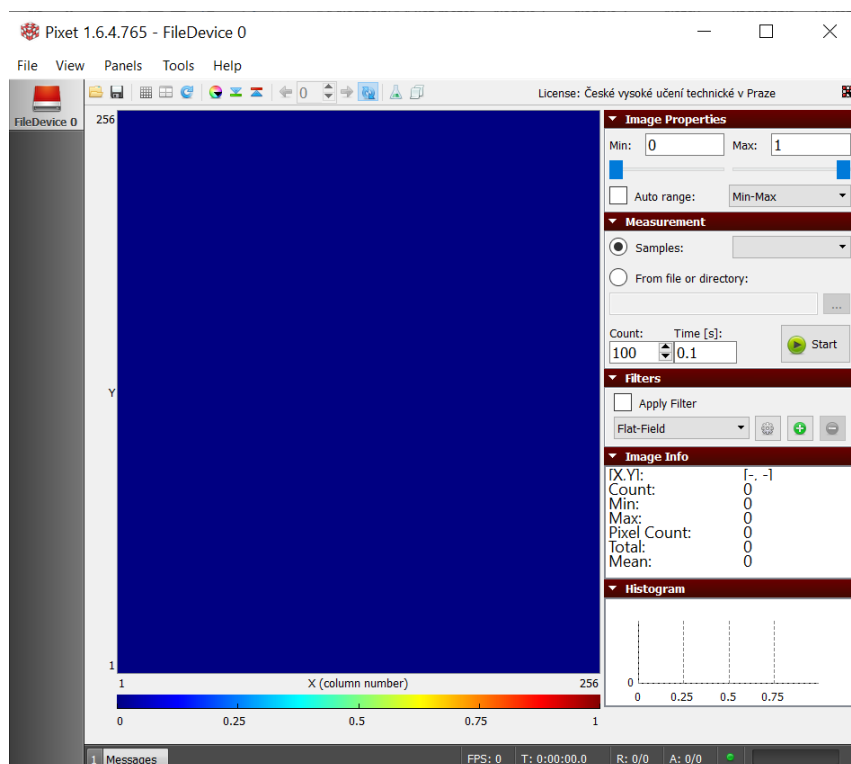
V této práci je ve všech měřeních využíván režim ToA + ToT. Chceme určit polohu, energii a čas každé interakce, což umožňuje pouze režim ToA + ToT. ToA měří polohu a čas interakce. ToT měří energii interakce. Díky architektuře Timepix3 se 130 nm CMOS technologií je možné data vyčítat až rychlostí $40 \text{ Mhits} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ [6], což je vhodné pro použití na tokamaku Golem. Detektor s read-out čipem Timepix3 je vhodný pro zobrazování rentgenového záření a rekonstrukce stop částic.

1.1 Zprovoznění a ovládání pixelových detektorů s čipem Timepix3

V této sekci je popsána instalace a spuštění aplikace PIXet Pro jak pro počítač s operačním systémem Windows, tak pro Raspberry Pi s operačním systémem Raspbian, ve kterém PIXet Pro nelze spustit jako desktopovou aplikaci. Také je zde popsáno základní používání aplikace PIXet Pro pro účely měření na tokamaku Golem.

1.1.1 Instalace a popis aplikace PIXet Pro

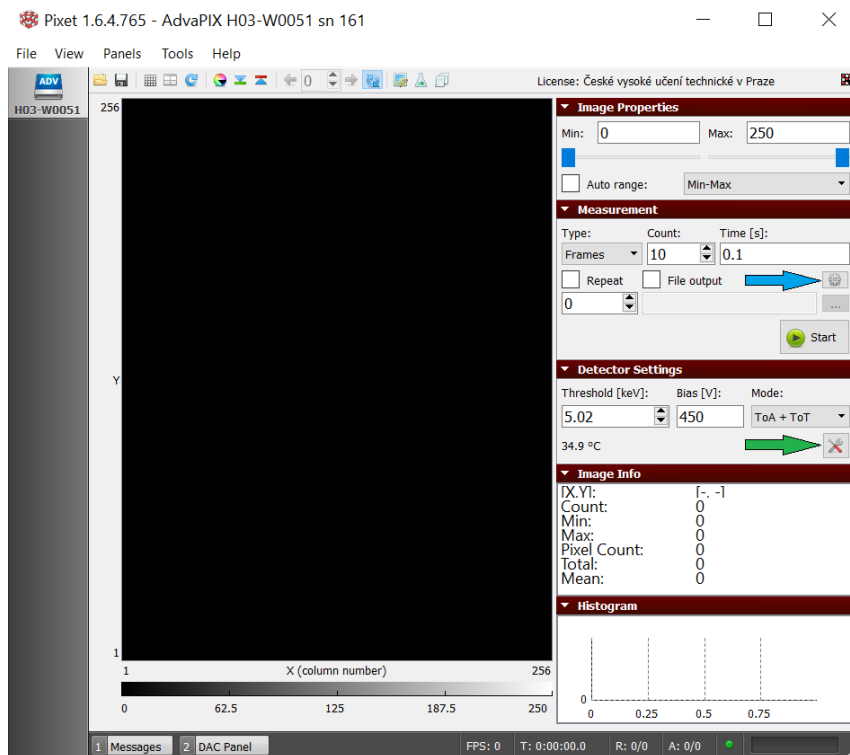
Pro provoz pixelových detektorů s čipem Timepix3 je třeba mít na pracovním počítači s operačním systémem Windows/Linux/Mac nainstalovanou aplikaci PIXet Pro od společnosti Advacam. PIXet Pro je možné stáhnout ze stránky <https://downloads.advacam.com/>. Instalace PIXetu je velmi jednoduchá – stačí se pouze držet pokyny v průvodci instalace, který se spustí po stažení. Okno spuštěné aplikace PIXet Pro je na Obr. 1.1.



Obrázek 1.1: Okno programu PIXet Pro pro ovládání pixelových detektorů od společnosti Advacam.

Po připojení detektoru a otevření aplikace by se měl automaticky načíst konfigurační soubor pro daný detektor, ovšem je nutné zkontrolovat, zda je načtený správný soubor (.xml soubor pro konkrétní detektor). V případě načtení chybného souboru nebo nenačtení žádného konfiguračního souboru jej vybereme manuálně. Načtení

správného konfiguračního souboru provedeme kliknutím na tlačítko File (horní lišta v aplikaci PIXet Pro, vlevo) $\Rightarrow$ Load config... $\Rightarrow$ složka s umístěným PIXet Pro $\Rightarrow$ složka factory $\Rightarrow$ Název_detektoru.xml. Na Obr. 1.2 je zobrazena aplikace PIXet Pro s připojeným detektorem.

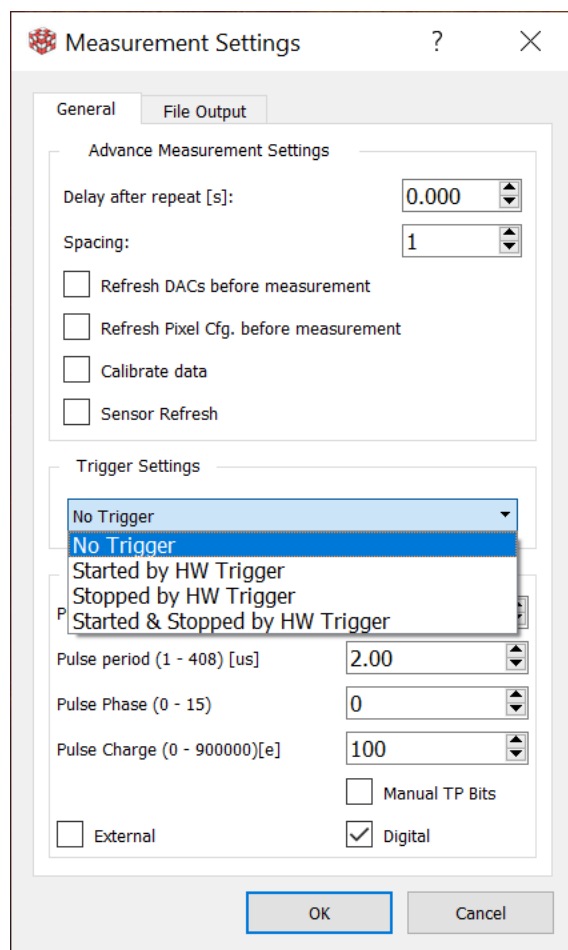


Obrázek 1.2: Okno aplikace PIXet Pro s připojeným detektorem.

Po načtení konfiguračního souboru se v okně aplikace objeví hodnota tresholdu energie, obvykle je tato hodnota kolem 5 keV a tuto hodnotu lze měnit. Také můžeme nastavovat napětí (bias) na senzoru a režim sběru dat. Po rozbalení ikony Mode se zobrazí nabídka jednotlivých režimů - ToA + ToT, ToA, enent + iToT. Dále lze nastavit typ měření (Type - frames, integral, test pulses, pixels, pixels & test pulses), počet opakování (Count) a dobu měření v sekundách (Time). Měření se zahájí stisknutím tlačítka Start. Pro případ zahajování měření triggerem jej nastavíme kliknutím na ikonu malého ozubeného kola (modrá šipka na Obr. 1.2), rozbalením nabídky Trigger Settings a výběrem požadované funkce triggeru (viz Obr. 1.3).

Dále nastavíme, jak má detektor na spouštěcí signál reagovat. Po kliknutí na ikonu zkříženého klíče a šroubováku (zelená šipka na Obr. 1.2) vybereme z nabídky v horní liště Readout a nastavíme parametr TrgStg, který je zvýrazněný na Obr. 1.4. Na výběr jsou možnosti 0 = logická 0, 1 = logická 1, 2 = reakce na náběžnou hranu, 3 = reakce na sestupnou hranu.

V této sekci byly popsány základní funkce desktopové aplikace PIXet Pro, zejména ty, které byly využívány pro měření v této práci.



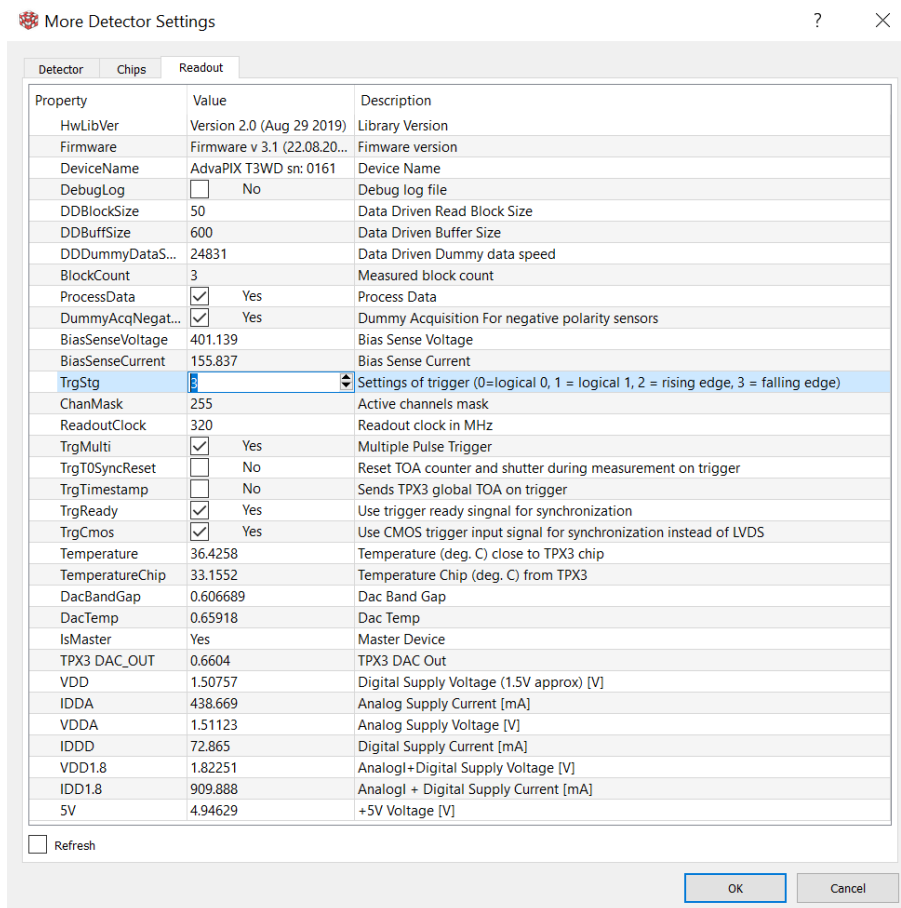
Obrázek 1.3: Rozbalená nabídka Trigger Settings pro volbu funkce triggeru.

1.1.2 Instalace Pixet Pro na raspberry Pi

Nyní bude popsána instalace PIXet Pro na Raspberry Pi s operačním systémem Raspbian. Jelikož pro Raspberry Pi není dostupná desktopová aplikace, měření detektory s čipem Timepix3 je možné provádět pouze prostřednictvím skriptu napsaného v jazyce python. Tedy, na Raspberry Pi nelze aplikaci klasicky nainstalovat, a je třeba se držet postupu, který byl doporučen IT oddělením společnosti Advacam.

Instalace byly prováděny v roce 2020, ale jelikož se software PIXet Pro relativně rychle vyvíjí, bude nutné při dalších instalacích na Raspberry Pi zažádat IT oddělení Advacamu o novou verzi PIXet pro a o aktualizovaný postup instalace na Raspberry Pi.

Pro instalaci programu PixetPro se stačí řídit poznámkami, které jsou uvedené v souboru README.txt, který je umístěn na <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki//Diagnostics/Radiation/Timepix/StepanMalec/>. PixetPro nelze na Raspberry Pi spustit jako desktopovou aplikaci, proto je nutné všechna nastavení a parametry detektoru nastavovat pomocí příkazů ve skriptovacím jazyce python. (Příkazy lze dohledat v helpu po spuštění desktopové aplikace,



Obrázek 1.4: Zvýraznění nastavení parametru TrgStg pro nastavení reakce detektoru na spouštěcí signál.

ale pouze na zařízení, na které lze nainstalovat desktopovou aplikaci.)

Obsah souboru README.txt:

```
# enable SSH server after boot
sudo systemctl enable ssh

# start SSH server
sudo systemctl start ssh

# instalace
copy pixet to e.g. pixetarm directory in home directory

# install Pixet:
cd pixetarm
sudo copy ./libokFrontPanel.so /usr/lib/
sudo bash ./install_driver_rules.sh

# now you can connect device
# run measurement:
python3 test.py
```

Příkazem `sudo systemctl enable ssh` povolíme SSH server a příkazem `sudo systemctl start ssh` jej spustíme. Následně zkopírujeme pixet do složky v domovském adresáři (například do vytvořené složky `pixetarm`). Příkazem `cd pixetarm` se dostaneme do složky, kde je umístěn pixet. V případě že nefunguje `sudo cp ./libokFrontPanel.so /usr/lib/`, je třeba vyzkoušet ještě `sudo cp ./libokFrontPanel.so /usr/lib/`. Pro instalaci jsou nutné soubory, které byly poskytnuty IT oddělením společnosti Advacam. Složka `pixetarm` na <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki//Diagnostics/Radiation/Timepix/StepanMalec/> obsahuje veškeré soubory potřebné k instalaci PIXet Pro na Raspberry Pi. Příkaz `sudo bash ./install_driver_rules.sh` spustí instalaci PIXet Pro. Po ukončení instalace můžeme připojit detektor a vyzkoušet, zda nainstalovaný software funguje, to můžeme zjistit spuštěním předem připraveného skriptu, například `test.py`. Skript můžeme spustit pomocí příkazu `python3 test.py`. V případě, že měření proběhne správně se po ukončení zobrazí hlášení `aquisition result: 0`. V případě chyby se většinou zobrazí hlášení `aquisition result: -1024`, což znamená, že je chybně nainstalovaný PIXet Pro, ale že se vyskytuje nějaká chyba ve skriptu pro měření. V případě nesprávně proběhlé instalace softwaru PIXet Pro by žádné měření vůbec neproběhlo.

Pokud máme k dispozici Raspberry Pi s již nainstalovaným a funkčním PIXet Pro, můžeme udělat image SD karty a uložit jej na novou SD kartu, kterou vložíme do nového Raspberry Pi, tím získáme identický systém jako na původním Raspberry Pi. Po připojení detektoru a spuštění skriptu pro vlastní měření by vše mělo řádně fungovat.

Kapitola 2

Instalace detektorů na tokamak Golem

2.1 Úvod

Jedním z hlavních cílů této práce je instalace polovodičových pixelových detektorů s čipem Timepix3 na tokamak Golem, kde mají být detektory ovládané prostřednictvím Raspberry Pi. Jak již bylo uvedeno, ovládání detektorů s čipem Timepix3 pomocí Raspberry Pi je možné pouze skripty napsanými v jazyce Python, je tedy nutné vytvořit skripty pro měření a ovládání detektorů v jazyce Python. Spuštění měření musí být synchronizováno se začátkem výboje. Synchronizace je realizována spouštěcím signálem, který spouští i ostatní diagnostiky na tokamaku Golem. Detektory je třeba nastavit tak, aby se s příchodem tohoto signálu spustilo měření.

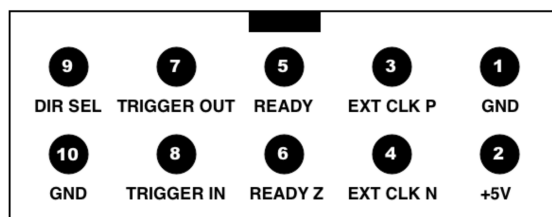
Dále jsou v této kapitole znázorněny soubory s naměřenými surovými daty a je zde popsán princip převodu na data, ze kterých již je možné vyvozovat fyzikální závěry.

2.2 Příprava detektorů pro měření na tokamaku Golem

Na tokamaku Golem je měření detektorů zahajováno příchodem spouštěcího signálu. Tento signál má v laboratoři tokamaku napětí 6 V, ale do modulů detektorů může být na vstup pro spouštěcí signál přivedeno maximálně napětí 3 V. Je tedy třeba napětí před vstupem do modulů snížit. Snížení napětí je realizováno pomocí děliče napětí sestaveného z rezistoru 200 a 300 k Ω .

Je velmi důležité znát model používaného detektoru, jelikož každý model má vstup pro spouštěcí signál na jiných pinech. Na Obr. 2.1 je rozvržení pinů detektorů, které máme k dispozici ve škole.

Pro úplnost jsou na Obr. 2.2 a Obr. 2.3 tabulky s popisem pro jednotlivé piny i pro novější modely detektorů.



Obrázek 2.1: Popis pinů detektorů timepix3 verze APXMD3-Xxx180119. [5]

Pin	Name	Signal type	Pin	Name	Signal type
1	GND		2	+5V	
3	CLK p	LVDS (2.5V)	4	CLK n	LVDS (2.5V)
5	E2	CMOS 0-2.5V	6	E1	CMOS 0-2.5V
7	Trigger Out	CMOS 0-2.5V	8	Trigger In	CMOS 0-2.5V
9	Dir select	CMOS 0-2.5V	10	GND	

Obrázek 2.2: Tabulka pro verzi APXMD3-Xxx180119. [4]

Pin	Name	Signal type	Pin	Name	Signal type
1	GND		2	+5V	
3	Master Disable	CMOS 0-2.5V/5V	4	CLK n	LVDS (2.5V)
5	CLK p	LVDS (2.5V)	6	T0/Sh-sel	CMOS 0-2.5V
7	Th/Sh p	LVDS (2.5V)	8	Th/Sh n	LVDS (2.5V)
9	Ready	CMOS 0-2.5V	10	T0/Sh-CMOS	CMOS 0-2.5V

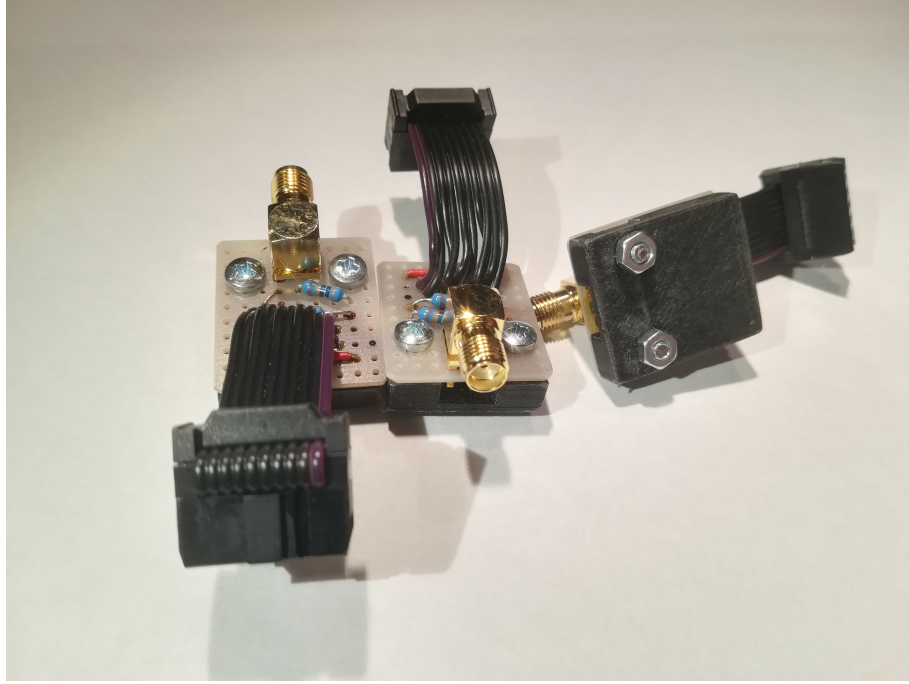
Obrázek 2.3: Tabulka pro verzi APXMD3-Xxx200128. [4]

Po určení verze použitého detektoru můžeme navrhnout dělič napětí pro spouštěcí signál. Verze detektoru je natištěna na zadní straně modulu spolu s dalšími technickými parametry, jako je tloušťka senzoru, velikost pixelu a další.

Na vstup děliče je přivedeno napětí z koaxiálního kabelu pomocí SMA konektoru a výstupem je konektor 2×5 pinů kompatibilní s konektorem na detektoru. Zadní strana děličů je opatřena plastovým krytem, aby nemohlo dojít k náhodnému zkratu. Na Obr. 2.4 jsou hotové děliče napětí.

Skripty používané pro měření na tokamaku golem jsou *armingSi.py* a *armingCdTe.py*, jsou dostupné na <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki//Diagnostics/Radiation/Timepix/StepanMalec/>. Každý skript spouští pixet na Raspberry Pi, nastaví parametry detektoru, provede měření podle zadaných parametrů a po dokončení měření pixet ukončí.

Počet měření se ve skriptu nastavuje proměnnou `acqCount` a doba měření v sekundách se nastavuje proměnnou `acqTime`, tyto proměnné vystupují v příkazu pro provedení vlastního měření. Napětí na senzoru se nastavuje příkazem `dev.setBias(400)`, číslo v kulatých závorkách udává hodnotu napětí na senzoru ve voltech. Pro Si de-



Obrázek 2.4: Hotové děliče napětí pro verzi APXMD3-Xxx180119.

tektor se nastavuje hodnota napětí $< 0; 500 > \text{V}$ a pro CdTe detektor se nastavuje $< -500; 0 > \text{V}$. V případě, že je zadaná hodnota napětí mimo rozsah daného detektoru, je automaticky nastavena maximální, nebo minimální možná hodnota napětí pro daný detektor podle toho, která hodnota je blíže hodnotě zadané. Nastavení módu měření je prováděno pomocí příkazu *dev.setOperationMode(0)*, kde parametr $0 = \text{ToA} + \text{ToT}$, $1 = \text{ToA}$, $2 = \text{event} + \text{iToT}$, a $3 = \text{ToT}$. Na tokamaku Golem je měření spouštěno pomocí spouštěcího signálu. Detektor je tedy nutné nastavit na to, aby měření bylo spuštěno spouštěcím signálem (triggerem), to se nastaví proměnnou *acqMode*, která vystupuje v příkazu pro provedení vlastního měření. Možnosti parametrů pro proměnnou *acqMode* jsou uvedeny v Tab. 2.1.

<code>acqMode = pixet.PX_ACQMODE_NORMAL</code>	spustí měření se spuštěním měřícího scriptu
<code>acqMode = pixet.PX_ACQMODE_TRG_HWSTART</code>	měření je spuštěno příchodem spouštěcího signálu
<code>acqMode = pixet.PX_ACQMODE_TRG_HWSTARTSTOP</code>	měření je spuštěno a zastaveno spouštěcím signálem
<code>acqMode = pixet.PX_ACQMODE_TRG_SWSTART</code>	měření je spuštěno softwarovým triggerem

Tabulka 2.1: Možnosti parametrů proměnné *acqMode*.

Pro použití detektorů na tokamaku Golem nás zajímá příkaz *acqMode = pixet.PX_ACQMODE_TRG_HWSTART*, se kterým je ještě nutné nastavit, zda je měření spuštěno při náběžné nebo sestupné hraně spouštěcího signálu. To se provádí příkazem *parTrgStg.setByte(2)*, parametr 2 = reakce na náběžnou hranu, parametr 3 = reakce na sestupnou hranu spouštěcího signálu. Po nastavení názvu souboru s naměřenými daty a složky, kam se tento soubor má uložit je možné zahájit měření spuštěním scriptu. Název souboru je uložen v proměnné *fileName*. Zahájení samotného měření je provedeno příkazem

rc = dev.doAdvancedAcquisition(acqCount, acqTime, acqType, acqMode, fileType, fileFlags, fileName).

Při iniciaci výboje tokamaku je spuštěn také skript pro měření pixelového detektoru s čipem Timepix3. Samotné měření je spuštěno příchodem spouštěcího signálu. Ve skriptu pro měření je třeba nastavit, aby detektor reagoval na náběžnou hranu spouštěcího signálu, to je provedeno pomocí příkazu *parTrgStg.setByte(2)*. Předem je nastavena doba, po kterou bude detektor měřit, po uplynutí tohoto času se měření automaticky zastaví a data jsou uložena na Raspberry Pi, odkud jsou kopírována na web výboje tokamaku Golem a následně smazána z Raspberry Pi. Čas měření lze ve skriptu nastavit pomocí proměnné *acqTime*, která vystupuje v příkazu pro iniciaci měření. Čas je udáván v sekundách. Dalšími příkazy lze nastavit např. napětí na senzoru, název výstupního souboru atd. Nejčastěji námi používané příkazy jsou uvedeny výše. Veškeré příkazy jsou uvedené v ne příliš přehledném helpu při spuštění desktopové aplikace PIXet Pro.

Pro propojení detektoru a zdroje spouštěcího signálu byly zhotoveny propojky z 3 mm koaxiálních kabelů, které mají stejnou délku. Stejná délka kabelů je proto, aby spouštěcí signál dorazil do všech detektorů ve stejný okamžik a měření započala ve stejném čase. Spouštěcí kabely mají na jednom konci BNC konektor a na druhém, pro vstup do děliče napětí u detektoru, SMA konektor.

Po ukončení měření máme na stránkách výboje k dispozici soubor *.t3pa* se surovými daty, který je před dalším zpracováváním výsledků nutné zpracovat na *.t3pa_cls* v případě křemíkového detektoru nebo na *.t3pa_2scls* soubor v případě kadmium-teluridového detektoru. Jsou to clusterové a spread-clusterové soubory, ze kterých už je možné vyvozovat nějaké fyzikální výsledky. Soubory *.t3pa* obsahují pouze veličiny se kterými pracuje detektor, tyto veličiny je nutné přepočítávat na fyzikální veličiny, na příklad přepočet „tiků“ na čas v ns. Ukázka *.t3pa* souboru je na Obr. 2.5. Na

Index	Matrix	Index	ToA	ToT	FToA	Overflow
0	10442	189188	8	16	0	
1	45169	189244	14	9	0	
2	10698	189188	17	19	0	
3	10443	189188	18	19	0	
4	10699	189188	30	20	0	
5	48481	190275	18	14	0	
6	48737	190275	19	13	0	
7	60012	193700	6	13	0	
8	59757	193700	20	18	0	
9	60013	193700	8	14	0	
10	59756	193700	16	18	0	

Obrázek 2.5: Ukázka souboru *.t3pa* s naměřenými surovými daty.

Obr. 2.5 vidíme šest sloupců - Index, Matrix Index, ToA, ToT, FToA a Overflow. Ve sloupci Index jsou pořadová čísla nastalých událostí, Matrix Index označuje číslo pixelu, ve kterém daná událost nastala. Čísla ve sloupci Matrix Index mohou nabývat hodnot 0 - 65535. 65536 je celkový počet pixelů matice 256×256 . Číslo řádku a

sloupce pixelu získáme z Matrix index pomocí

$$\text{RowNo} = \text{MatrixIndex}/256, \quad (2.1)$$

$$\text{ClmNo} = \text{MatrixIndex}\%256, \quad (2.2)$$

kde symbol „/“ v rovnici (2.1) značí celočíselné dělení a „%“ v rovnici (2.2) představuje zbytek po celočíselném dělení. Následuje sloupec nesoucí název ToA. Veličiny ToA a FToA představují časové veličiny s nimiž pracuje detektor a je z nich vypočítáván čas události v ns pomocí vzorce

$$T [\text{ns}] = \frac{\text{ToA} - \text{FToA}}{16} \cdot 25, \quad (2.3)$$

kde konstanta 25 je čas v ns vypočtený z vyčítací rychlosti chipu 40 MHz. Čip $16 \times$ násobí frekvenci 40 Mhz, která je dodaná externě. Ve čtvrtém sloupci jsou zapsané hodnoty veličiny ToT, z níž se po přepočtu získává energie v keV. Energii v keV získáme vyjádřením E z rovnice

$$\text{ToT} = a \cdot E + b + \frac{c}{E - t}, \quad (2.4)$$

kde vystupující parametry a , b , c , t jsou elementy z kalibračních matic. Pro každý pixel existuje jistá kalibrace, která je daná právě těmito parametry. Informace o kalibraci byly převzaty z článku [8].

Po výpočtu času a energie ze surových dat je ještě třeba udělat tzv. clustering. Clustering spočívá v uskupení koincidenčních událostí ze sousedních pixelů do clusterů. Jednotlivé clustery představují jednotlivé události, které byly detektorem naměřené. Za koincidenční události považujeme takové, které nastanou během časového intervalu 100 ns, jelikož tato doba je zhruba rovna době sběru nosičů nábojů, která je $T_{\text{Sberu teor}} = 15,9$ ns pro Si detektor $1000 \mu\text{m}$ (vycházíme z rovnice (5.5)). Clustering je prováděn pro křemíkové detektory, pro CdTe detektory se provádí uskupení do rozšířených clusterů (tzv. spread-clustering), který spočívá v uskupování jednotlivých clusterů do spread-clusterů, jelikož v CdTe senzoru může dojít k úniku rentgenofluorescenčních fotonů, které mohou být absorbovány v senzoru nedaleko místa interakce primární částice se senzorem, čímž se vytvoří nový cluster. Korekce CdTe detektorů na rentgenofluorescenční fotony je detailně popsána v článku [7]. Ve chvíli, kdy jsou clustery a spread-clustery dokončené, jsou vytvořeny nové soubory s příponou .t3pa_cls pro Si detektor a .t3pa_scls pro CdTe detektor.

Kalibrace provedená od výrobce detektorů je zatím dostatečná. Detektory je ale třeba stabilizovat na teplotě, při které byla kalibrace prováděna, jinak může docházet ke zkreslování měřených spekter. Detailní popis kalibrace pixelových detektorů s čipem Timepix3 je proveden v článku [8].

Ukázka .t3pa_cls souboru je na Obr. 2.6. Symboly # označují začátek clusteru, číslo ihned za symbolem # představuje číslo daného clusteru. Nunmasked je počet nemaskovaných pixelů, Nmasked je počet maskovaných pixelů a Ntot představuje celkový počet pixelů, které interagovaly při detekci dané události. Tfirst a Tlast značí

čas první a poslední interakce dané události, dT je rozdíl těchto časů a představuje dobu události. Etot je součet energií zaznamenaných interakcí a představuje celkovou energii dané události (clusteru). Na Obr. 2.6, na prvním řádku, za symbolem % jsou názvy veličin vystupujících v jednotlivých interakcích (řádky, které nezačínají symbolem #) každého clusteru.

```
% Index Matrix Index      [ RowNo, ClmNo ]      ToA      FToA      ( ToA_in_ns )      ToT      ( ToT_in_keV )      Overflow

# 1, Nunmasked = 3, Nmasked = 0, Ntot = 3
# Tfirst = 2.078750000000000e+04 ns, Tlast = 2.079062500000000e+04 ns, dT = 3.125000 ns, Etot = 64.428148 keV
2      4575      [ 17, 223 ]      832      8      ( 2.078750000000000e+04 ns )      100      ( 37.867914 keV )      0
1      4831      [ 18, 223 ]      832      7      ( 2.078906250000000e+04 ns )      35      ( 14.733453 keV )      0
0      4574      [ 17, 222 ]      832      6      ( 2.079062500000000e+04 ns )      29      ( 11.826781 keV )      0

# 2, Nunmasked = 3, Nmasked = 0, Ntot = 3
# Tfirst = 4.360156250000000e+04 ns, Tlast = 4.360781250000000e+04 ns, dT = 6.250000 ns, Etot = 63.577435 keV
5      30775      [ 120, 55 ]      1745      15      ( 4.360156250000000e+04 ns )      99      ( 37.617059 keV )      0
4      30776      [ 120, 56 ]      1745      13      ( 4.360468750000000e+04 ns )      44      ( 14.715446 keV )      0
3      31031      [ 121, 55 ]      1745      11      ( 4.360781250000000e+04 ns )      22      ( 11.244929 keV )      0
```

Obrázek 2.6: Náhled souboru .t3pa_cls s vytvořenými clustery. Každý cluster představuje jednu událost.

Spread-clusterový soubor je zobrazen na Obr. 2.7. Každý spread-cluster je ohraničen symboly „=“ a na prvních dvou řádcích, za symboly #, jsou informace o celé jedné události (spread-clusteru). Číslo ihned za symbolem # je číslo daného spread-clusteru, za ním následuje Number of clusters, což značí počet clusterů, ze kterých je událost sestavena a řádek končí číslem Cluster size vyjadřujícím celkový počet interagujících pixelů ve všech clusterech dané události. Na druhém řádku, obdobně jako v jednotlivých clusterech, je uveden čas první interakce, čas poslední interakce, celková doba trvání a celková energie spread-clusteru. Na dalších řádcích jsou uvedeny všechny clustery tvořící daný spread-cluster.

```
=====
# 16, Number of clusters = 2, Cluster size = 3
# Tfirst = 1.090156250000000e+04 ns, Tlast = 1.095781250000000e+04 ns, dT = 56.250000 ns, Etot = 28.744881 keV

# 20, Nunmasked = 1, Nmasked = 0, Ntot = 1
# Tfirst = 1.090156250000000e+04 ns, Tlast = 1.090156250000000e+04 ns, dT = 0.000000 ns, Etot = 12.825465 keV
24      24070      [ 94, 6 ]      437      15      ( 1.090156250000000e+04 ns )      13      ( 12.825465 keV )      0

# 21, Nunmasked = 2, Nmasked = 0, Ntot = 2
# Tfirst = 1.091562500000000e+04 ns, Tlast = 1.095781250000000e+04 ns, dT = 42.187500 ns, Etot = 15.919416 keV
25      24329      [ 95, 9 ]      438      22      ( 1.091562500000000e+04 ns )      9      ( 10.752240 keV )      0
22      24585      [ 96, 9 ]      440      27      ( 1.095781250000000e+04 ns )      2      ( 5.167176 keV )      0
=====
```

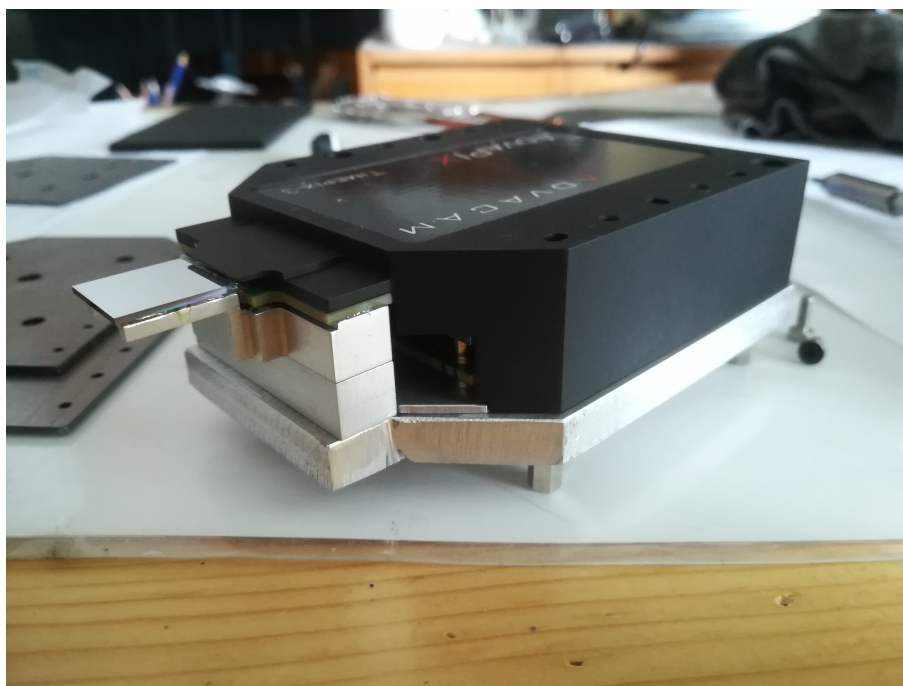
Obrázek 2.7: Náhled spread-clusterového souboru .t3pa_scls. Každý spread-cluster představuje jednu událost.

2.3 Závěr

V této kapitole byla představena instalace polovodičových pixelových detektorů s čipem Timepix3 na tokamak Golem. Je zde popsána adaptace detektorů pro spouštění měření spouštěcím signálem, jehož napětí je příliš vysoké a před vstupem do

detektorů musí být sníženo. Pro snížení napětí slouží vyrobené děliče napětí, které jsou připojeny do konektoru v detektoru.

V budoucnu bychom z detektorů Timepix3 rádi udělali trvalou diagnostiku HXR na tokamaku Golem. To bude souviset s přípravou uchycení detektorů na konstrukci, kde by se detektory daly skládat i tak, aby senzory byly těsně nad sebou, tedy aby systém mohl fungovat jako Comptonova kamera. Bohužel jsme zjistili, že detektory se nedají skládat těsně vedle sebe, jelikož po demontáži krytu senzoru brání sestavě do Comptonovy kamery malý hranol, který je pravděpodobně určen k chlazení čipu. Tento hranol je viditelný na Obr. 2.8, kde je zachycený detektor s čipem Timepix3 s přimontovaným chladičem připraveným k upevnění na nosné konstrukci. Při navrhování nosné konstrukce detektorů bylo bráno v úvahu, aby bylo možné jeden detektor otočit o 180° tak, že senzory detektorů k sobě přiléhají lícními stranami. Nebo je možné 2 detektory umístit proti sobě a tím odpadá nutnost překlopení jednoho detektoru. Překlopení detektorů bude nutné až při sestavě tří a více detektorů. Na Obr. 2.9 jsou díly připravované nosné konstrukce pro detektory Timepix3. Chladiče připevněné k detektorům mají vyrobené kanálky pro průtok chladící kapaliny.



Obrázek 2.8: Detektor timepix3 s odmontovaným krytem senzoru a přimontovaným chladičem kompatibilním s připravovanou nosnou konstrukcí.



Obrázek 2.9: Díly připravované nosné konstrukce k vytváření sestav detektorů timepix3 u tokamaku Golem.

Kapitola 3

Měření na tokamaku Golem

3.1 Úvod

Cílem těchto měření je ověření funkčnosti polovodičových detektorů s čipem Timepix3, na tokamaku Golem, ovládaných pomocí počítačů Raspberry Pi, na nichž je nainstalovaná aplikace PIXetPro. Jelikož na Raspberry Pi není možné nainstalovat desktopovou aplikaci, všechna nastavení měření jsou prováděna příkazy v měřicím skriptu napsaném v jazyce Python.

3.2 Měření

Vzhledem k tomu, že zatím nevíme, na jakém místě budou pixelové detektory s čipem Timepix3 v laboratoři tokamaku umístěné, rozhodli jsme se pro jejich dočasné připevnění na chemické stojany, které umožňují relativně snadnou manipulaci s detektory, a provést měření v různých místech laboratoře i v jejím předsálí. Modul je napájen 5 V a je dodáván včetně síťového adaptéru a kabelu USB 3.0.

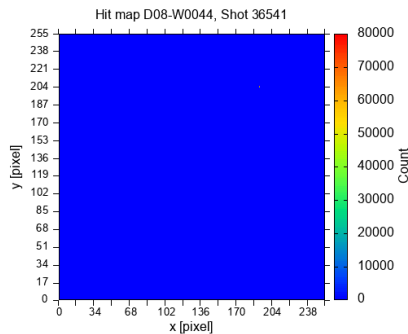
Měření probíhala s CdTe detektorem 2000 μm a dvěma Si detektory 1000 μm . Jeden Si detektor byl zapůjčen společností Advacam. Na křemíkové sensory bylo aplikováno napětí 450 V a na CdTe sensor bylo aplikováno napětí -450 V. Pro každý detektor bylo připraveno samostané raspberry Pi s nainstalovaným programem PIXet Pro a skripty pro měření. Po ukončení měření jsou naměřená data uložena na Raspberry Pi, odkud jsou stahována, mazána a následně ukládána na web <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/> aktuálního výboje do složky určené pro pixelové detektory s čipem timepix3. Po ukončení měření jsou surová data stahována a dále vyhodnocována.

Po uložení naměřených dat na stránky konkrétního výboje se pro Si detektory spustí vyhodnocovací procedura, která převádí .t3pa soubory na .t3pa_cls soubory. V případě, že tento převod nestačí proběhnout do 30 sekund od ukončení výboje, je procedura ukončená a na stránce konkrétního výboje zůstávají pouze .t3pa soubory se surovými daty, které je možné dodatečně stáhnout a zpracovat. Soubory, které

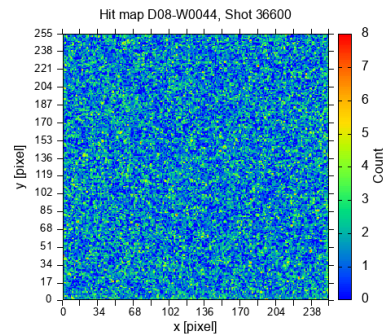
se nepodaří zpracovat do oněch 30 sekund po výboji, často obsahují mnohem více dat, ale ve většině případů se jedná pouze o šum nebo o případy, kdy „blikají“ některé pixely a tato měření jsou často nepoužitelná. Ve chvíli, kdy jsou k dispozici .t3pa_cls soubory můžeme data dále zpracovávat, jelikož tyto soubory obsahují veškeré informace o detekovaných událostech během výboje.

Během měření je třeba kontrolovat, zda detektory správně fungují, tedy jestli se na stránkách výboje po měření objevují .t3pa soubory s naměřenými daty a zda tyto soubory nejsou příliš velké, což často značí šumící pixely. V případě, že se vyskytnou nějaké problémy je nejjednodušším řešením restartovat detektor (odpojit ho od Raspberry Pi a zdroje energie a poté ho opět připojit (viz výše) a následně vyzkoušet, zda byla obnovena funkčnost měření.

Prvním indikátorem správného měření by mohlo být zobrazení surových naměřených dat do takzvaných hit-map. Do 2D histogramu zobrazíme pouze počty hitů, které zaznamenaly jednotlivé pixely. Toto předzpracování vychází z .t3pa souborů a může být provedeno ještě před převodem z .t3pa souborů na .t3pa_cls a .t3pa_scls soubory. Na Obr. 3.1 je zobrazeno měření, při kterém „šumělo“ několik pixelů. Tyto šumící pixely naprosto zastínily vyčítání ostatních událostí a je naměřen prakticky jen šum z několika pixelů. Takové měření je dále nepoužitelné a převod dat z takového měření na t3pa_cls nebo .t3pa_scls soubor s velkou pravděpodobností selže (doba převodu je neúnosně dlouhá). Na Obr. 3.2 je zobrazeno měření, které není zatížené šumícími pixely a jehož převod na .t3pa_cls nebo .t3pa_scls soubor je bezproblémový a relativně rychlý.



Obrázek 3.1: Ukázka měření při kterém v detektoru „šumí“ několik pixelů. Taková naměřená data jsou šumem znehodnocena.



Obrázek 3.2: Ukázka měření, které není zatíženo šumem a s naměřenými daty lze dále pracovat.

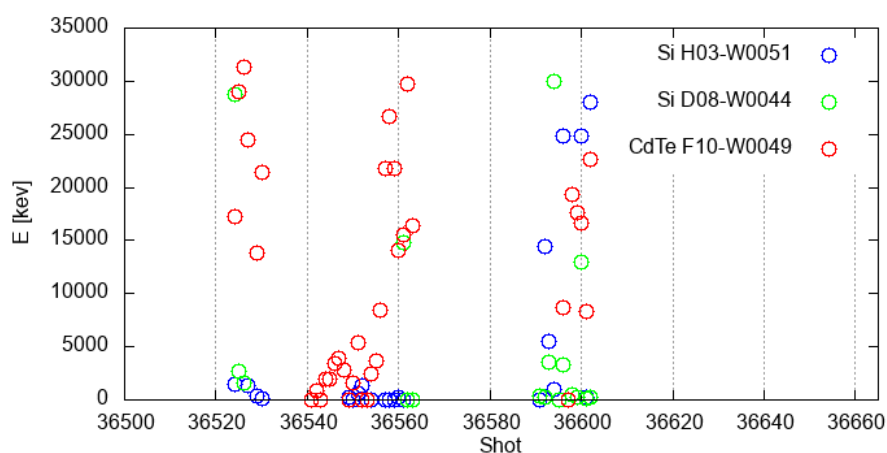
3.2.1 Výsledky

Data zpracovávána do různých grafů a histogramů jsou získávána z .t3pa_cls souborů v případě Si detektorů a z .t3pa_scls v případě CdTe detektorů. Přílohy C, D, E, F jsou uspořádány tak, že v každém sloupci jsou výsledky z daného detektoru a

každý řádek má společné číslo výboje. Bylo zjištěno, že měření nezačínají ve stejném okamžiku. Je pravděpodobné, že to způsobuje spouštěcí signál, jehož náběžná hrana je dlouhá až několik μs , v kombinaci s vyrobenými děliči napětí tohoto signálu. V děličích jsou použité rezistory, které se standardně vyrábějí s přesností 1 %, ty v kombinaci s náběžnou hranou spouštěcího signálu dlouhou až několik μs způsobí, že v každém detektoru prahová hodnota spouštěcího signálu nastane v jiném čase. Tento problém by se dal vyřešit použitím jednoho společného děliče napětí pro všechny detektory.

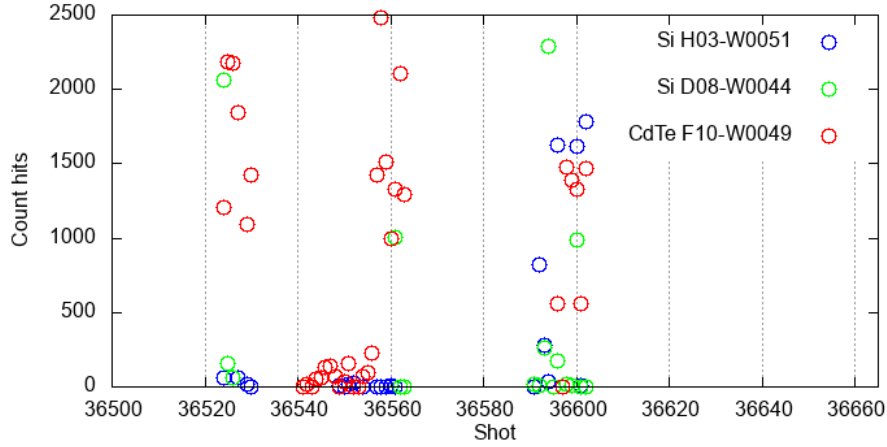
V Příloze C jsou zobrazené histogramy časového vývoje počtu detekovaných událostí ve 100 ns oknech během daných výbojů. V Příloze D jsou zobrazené histogramy časového vývoje energií detekovaných událostí ve 100 ns oknech během daných výbojů. Na počátku výboje je často detekováno velké množství událostí (vyšší než na konci výboje), toto pozorování koreluje s výsledky zveřejněnými v článku [9]. Při pohledu na časový vývoj energie v průběhu výboje je vidět, že největší maximum často nastává na počátku výboje a další maximum na konci, ačkoli na konci výboje není detekováno takové množství událostí jako na začátku. Z toho by vyplývalo, že na konci výboje je vygenerováno sice méně částic než na začátku, ale s vyšší energií. Při průrazu plazmatu je nejvyšší napětí na závit (nejvyšší elektrické pole) a hustota plazmatu je velice nízká, to by mohlo být důvodem detekce vyššího počtu událostí s nižší energií na začátku výboje. Detekce menšího počtu událostí s vyšší energií na konci výboje může být způsobena delším časem urychlování elektronů během výboje a tedy dosažení vyšších energií. Tato pozorování jsou více patrná u CdTe detektoru a zatím je nelze považovat za konečný závěr.

Pro porovnání detekovaných energií z jednotlivých výbojů jsou v Obr. 3.3 vloženy součty všech energií událostí detekovaných během jednotlivých výbojů a totéž je provedeno v Obr. 3.4, kde jsou vloženy počty událostí detekovaných během jednotlivých výbojů.



Obrázek 3.3: Součty energií všech detekovaných událostí během jednotlivých výbojů.

V příloze E jsou zobrazená spektra detekovaných energií. Jeden bin má šířku 10 keV. Z těchto spekter lze usuzovat energie nejčastěji detekovaných událostí. Největší zastoupení mají události o energiích do 20 až 30 keV.



Obrázek 3.4: Součty detekovaných událostí z jednotlivých výbojů.

V příloze F jsou zobrazeny frekvence výskytů událostí (Count rate) během daného výboje. V grafech jsou zobrazeny dva přístupy. Jeden přístup je zobrazen černými body propojenými černou čarou a spočívá v pevném nastavení časového okna a určení Count rate z událostí, které byly detekovány během tohoto času. Pro všechny detektory bylo zvoleno časové okno délky 0,3 ms. Nevýhodou tohoto přístupu může být nedostatečná statistika událostí během zvoleného časového okna. Druhý přístup je zobrazen žlutými sloupci a spočívá ve stanovení konstantního počtu událostí v časovém okně. Délka časového okna je v tomto případě variabilní. Výhodou tohoto přístupu je, že v každém binu je tatáž statistika. Pro Si detektor bylo zvoleno 2000 událostí pro jeden bin a pro CdTe detektor bylo zvoleno 3000 událostí pro jeden bin.

Jedním z poznatků měření na tokamaku Golem pixelovými detektory, řízenými prostřednictvím Raspberry Pi je, že často dochází k těžko specifikovatelným poruchám a systém je třeba restartovat, aby opět mohlo být provedeno plnohodnotné měření. Předem se nedá nijak určit, zda následující měření bude úspěšné či nikoli. Jedním ze způsobů možného vylepšení funkčnosti by pravděpodobně bylo restartovat měřicí systém po každém měření. Další možností je nahradit Raspberry Pi stolním počítačem s operačním systémem Linux, na kterém bude nainstalována desktopová aplikace PIXet Pro. Problémy fungování PIXet Pro na Raspberry Pi mohou být způsobeny i tím, že společnost Advacam dále nevyvíjí PIXet Pro určený pro Raspberry Pi.

3.3 Závěr

Těmito měřeními bylo prokázáno, že na tokamaku Golem je možné provozovat polovodičové pixelové detektory s čipem Timepix3, každý řízený jedním Raspberry Pi. Během měření, mezi jednotlivými výboji, je třeba kontrolovat zda měřicí systém správně funguje a případně jej restartovat. Z tohoto důvodu není momentálně možné, aby měřicí systém fungoval bez přítomnosti operátora, který dohlíží na funkčnost tohoto měřicího systému. Momentálně je připravován počítač s OS Linux určený

pouze pro tyto pixelové detektory, jelikož se zdá, že by celý měřicí systém mohl být stabilnější a také bude možná instalace desktopové aplikace PIXet Pro. Právě díky desktopové aplikaci bude možné snadněji odhalit detektor, který neměří zcela správně (například se v něm „rozšuměli“ některé pixely). V případě, že po restartu detektoru šumící pixely nezmizí, v aplikaci PIXet Pro je možné tyto problematické pixely zamaskovat, aby neovlivňovaly další měření. Případy s šumícími pixely by mělo být možné vizuálně odhalit také pomocí hit map, které je možné vytvořit ještě před zpracováváním surových dat. Pro budoucí měření bude také třeba vytvořit jeden společný dělič napětí pro všechny použité detektory. Tím by se mělo zajistit současné spuštění měření na všech detektorech. Vyřešil by se tak problém přesnosti výrobní tolerance použitých rezistorů v jednotlivých děličích a náběžná hrana spouštěcího signálu dlouhá několik μs by také už neměla být překážkou.

Kapitola 4

Vliv teploty na kvalitu energetických spekter měřených pixelovými detektory Timepix3

4.1 Úvod

Během testování pixelových detektorů s čipy timepix3 vzniklo podezření, že při jejich použití se vlivem jejich zahřívání mění detekovaná energie událostí, ačkoli byl použitý stejný zdroj záření. Tento jev jsme se rozhodli proměřit stabilizací detektorů na daných teplotách. Na MFF UK v těžkých laboratořích v Tróji je pro tyto účely vhodně vybavená laboratoř. Z toho důvodu měření probíhala právě tam. Cílem je proměřit vliv teploty na energii detekovaných událostí pixelovými detektory s čipem Timepix3 a demonstrovat, jak se mění tvar naměřených energetických spekter s teplotou a v případě CdTe detektoru také s aplikovaným napětím na senzor.

4.2 Vybavení laboratoře

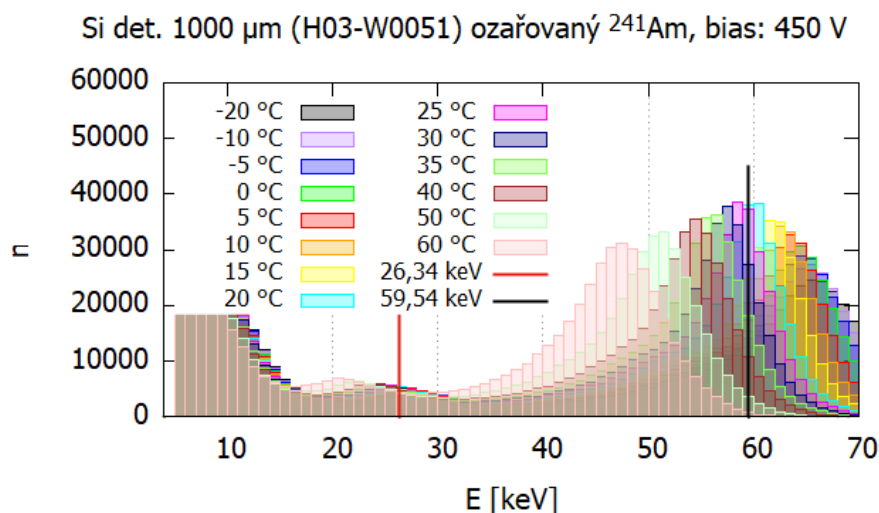
Laboratoř na MFF UK v Tróji je vybavena chladicím termostatem CF31 od společnosti Julabo, který má topný výkon 2 kW a je vybaven čerpadlem pro dopravu chladiva mimo zařízení [3]. Rozsah provozních teplot je od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotní stabilita je $\pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ kolem požadované teploty. Jako chladicí kapalina je v chladicím zařízení použita kapalina Thermal G [2], také od společnosti Julabo. Tato kapalina může být použita při aplikacích od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tuhnutí nastává při $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota varu je $+108\text{ }^{\circ}\text{C}$, také má nízkou viskozitu ($4,07\text{ mm}^2/\text{s}$ při $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) a je prakticky bez zápachu. Dalším používaným zařízením byl mrazák LIEBHERR LGT 2325 MediLine [1]. Nastavitelný teplotní rozsah je od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a mrazák disponuje objemem 215 l.

4.3 Měření

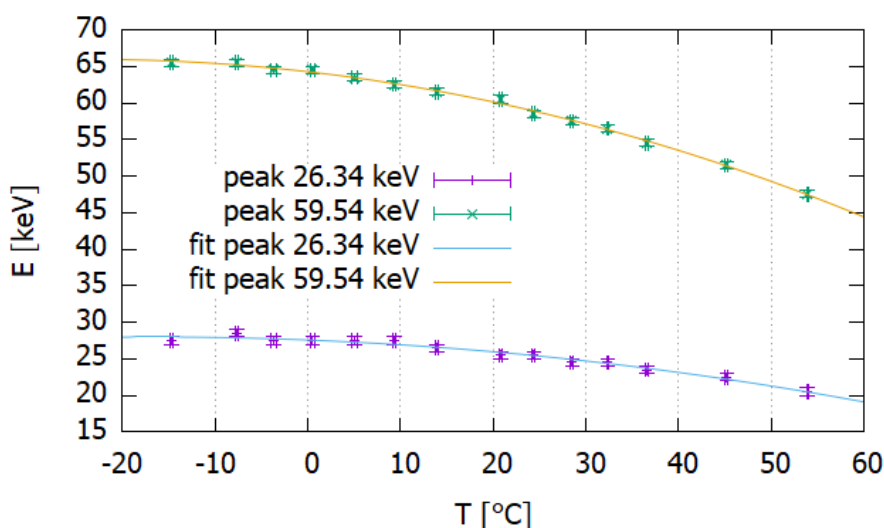
Z detektoru byl odšroubován zadní kryt a místo něj byl připevněn chladič, kterým může cirkulovat chladicí kapalina. Chladič je vybaven dvěma rychloupínacími spojkami, pomocí kterých je realizováno propojení s hadičkami vybavenými protikusem stejných propojek. Modul s chladičem byl pomocí hadiček připojen k chladicímu zařízení s regulací teploty kapaliny a kapalina protékající chladičem ochlazovala nebo zahřívala detektor na požadovanou teplotu. Změnu teploty je třeba korigovat tak, aby se teplota senzoru měnila rychlostí zhruba $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ za minutu. V případě rychlého ohřátí nebo zchlazení senzoru by mohlo dojít k jeho nenávratnému poškození. Měření bylo realizováno při teplotách $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro teploty nižší než $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl detektor vložen do mrazáku vychlazeného na $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby se zamezilo kondenzaci vody na senzoru detektoru. Po dosažení požadované teploty kapaliny bylo vlastní měření zahájeno po 20 minutové prodlevě z důvodu, aby se senzor detektoru stabilizoval na teplotě, jakou měla chladicí kapalina. Vložením příkazu `dev.temperature()` do měřícího scriptu je možné změřit aktuální teplotu senzoru. Teplota byla měřena $5\times$ před měření a $5\times$ po měření, vždy s časovou prodlevou 1 s. Takto naměřená teplota byla poté statisticky vyhodnocena. Oba proměřované detektory, CdTe $2000\text{ }\mu\text{m}$ a Si $1000\text{ }\mu\text{m}$, byly ozařovány vzorkem ^{241}Am , který má ve svém energetickém spektru dvě maxima. První maximum při 26,34 keV a druhé při 59,54 keV. Oblasti našeho zájmu jsou tedy energie do 70 keV.

4.3.1 Si detektor

Měřením a porovnáním kvality spekter bylo určeno, že pro energie do 70 keV je optimální napětí aplikované na Si senzor $1000\text{ }\mu\text{m}$ $\text{bias} = 450\text{ V}$ a doba jednoho měření 10 s (Acquisition time [s] = 10 s). Detektor s Si senzorem byl proměřován v rozmezí teplot od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jednotlivá naměřená spektra jsou uvedena v Příloze A. Na Obr. 4.1 jsou zobrazena všechna naměřená energetická spektra detektorem s Si senzorem a jsou zde vyznačeny energie peaků ^{241}Am . Ze zobrazených spekter je patrné, že detekovaná energie klesá vůči reálné hodnotě energie se zvyšující se teplotou. Tato skutečnost je ještě zřetelnější vyneseme-li hodnoty maxim jednotlivých peaků do samostatného grafu (viz Obr. 4.2). Vynášíme maximální energii vzatou jako energii nejvyššího sloupce daného peaku (sloupec s nejvyšším počtem zaznamenaných událostí) s chybou $\pm 1/2$ šířky sloupce. Nafitujeme-li takto zobrazené hodnoty energetických maxim kvadratickou funkcí, získáme vzorec pomocí kterého můžeme predikovat detekovanou energii měřeného peaku při určité teplotě. Fity jsou zobrazeny na Obr. 4.2. Pro peak 26,34 keV fitováním získáme vztah $E(T) = (-0,0015 \pm 0,0003) \cdot T^2 + (-0,05 \pm 0,01) \cdot T + (27,6 \pm 0,1)$ závislosti detekované energie v keV na teplotě ve stupních celsia. Pro peak 59,54 keV fitováním získáme vztah $E(T) = (-0,0031 \pm 0,0002) \cdot T^2 + (-0,145 \pm 0,009) \cdot T + (64,3 \pm 0,1)$ závislosti detekované energie v keV na teplotě ve stupních celsia.



Obrázek 4.1: Naměřené histogramy pro různé teploty s vyznačenými energiemi maxim ^{241}Am .



Obrázek 4.2: Nafitované energie maxim z naměřených energetických spekter. Fitováno funkcí $E(T) = A \cdot T^2 + B \cdot T + C$.

4.3.2 CdTe detektor

V případě detektoru s CdTe senzorem 2000 μm se nedalo zcela jasně určit, pro kterou hodnotu napětí aplikovaného na senzor je kvalita naměřených spekter nejlepší, proto byl detektor proměřován s aplikovaným napětím v rozsahu -300 V až -500 V s krokem 50 V. Oproti Si detektoru, kdy byl zářič vkládán ze předu detektoru, je nyní ^{241}Am vkládán do díry ve chladiči ze zadní části detektoru, jelikož při tloušťce 2 mm polovodiče CdTe se může stát, že předtím, než by byla daná událost vyčtena, budou náboje difundovat do stran od místa interakce (byly by zaznamenány v jiném

pixelu) a tím by se zkreslovala naměřená spektra.

V naměřených spektrech je patrný pouze jeden velmi široký peak. Nejlepší výsledky pro CdTe detektor jsou, zdá se, při teplotě 45 °C. Je tedy možné, že kalibrace CdTe detektoru byla prováděna bez chlazení. Tento detektor se totiž sám od sebe při provozu zahřeje zhruba na teplotu 40 - 50 °C, proto je třeba teplotu monitorovat, aby nedošlo k přehřátí, které by vedlo k destrukci senzoru. K destrukci by mohlo dojít při překročení teploty asi 60 °C. Naměřená spektra CdTe detektoru se senzorem 2000 μm jsou v Příloze B.

4.4 Výsledky

Pro detektor s Si senzorem 1 mm byla naměřená energetická spektra, u kterých se maximální hodnota energie daného peaku snižovala se vzrůstající teplotou. Energie těchto maxim ^{241}Am byly nafitovány kvadratickou funkcí, čímž byly získané vztahy pro predikci naměřené energie daných peaků při dané teplotě.

V případě CdTe detektoru se senzorem 2 mm naměřená spektra nedosahovala takové kvality jako spektra naměřená Si detektorem. Proto se v dalších měřeních budeme zabývat tím, co by mohlo ovlivňovat kvalitu spekter CdTe detektoru, jelikož v naměřených spektrech nejsou peaky příliš ostré. Domníváme se, že kvalita spekter může být ovlivněna tokem částic dopadajících na senzor. V příštích měřeních tedy bude použit zdroj záření, který není tak intenzivní, jako vzorek použitý při měření spekter prezentovaných v této práci. Po těchto měřeních by mělo být možné říci jestli, a jak moc ovlivňuje intenzita zdroje záření kvalitu naměřených spekter.

4.5 Teplotní stabilizace

Na naměřených spektrech je vidět, že energetická maxima se v případě křemíkového detektoru s rostoucí teplotou posouvají k vyšším energiím. V případě CdTe detektoru se nedá jednoznačně říci, jak se naměřená spektra posouvají, jelikož vrcholy kolem energetických maxim ^{241}Am jsou značně „rozmazané“ a vhodná teplota pro teplotní stabilizaci je určena zejména ze tvaru naměřených spekter. V případě křemíkového detektoru jsou tvary naměřených spekter prakticky stejné, jen se liší svojí amplitudou a energií.

Z naměřených energetických spekter ^{241}Am je patrné, že kalibrace Si detektoru byla prováděna při teplotě 23 - 25 °C a kalibrace CdTe detektoru byla pravděpodobně provedena při zhruba 45 °C.

Pro získávání konzistentních výsledků z měření bude třeba detektory teplotně stabilizovat na teplotě při které byla prováděna jejich kalibrace. Chlazení detektorů bude prováděno pomocí chladičů připevněných na zadních stranách detektorů. V každém chladiči jsou vyrobené kanálky pro průtok chladicí kapaliny, jejíž teplota je udržována na požadované teplotě pomocí speciálního chladicího přístroje (chladicího termostatu - chilleru [3]).

Kapitola 5

Doba sběru nosičů náboje

5.1 Úvod

Cílem tohoto měření bylo experimentální ověření teoreticky vypočtené doby sběru nosičů náboje pro daný senzor. Znalost tohoto údaje bude potřeba při vyhodnocování naměřených dat Comptonovou kamerou, kde pro optimální vyhodnocení je třeba v jednom časovém okně mít maximálně jednotky událostí (ideálně pouze jednu událost). Toho dosáhneme zkracováním časových oken, ale časové okno zároveň nesmí být kratší než je doba sběru nosičů náboje, jelikož by některé události nemusely být správně vyčteny.

Doba sběru nosičů náboje je určena pomocí detekce mionů, které jsou identifikovány podle jejich charakteristických rovných stop vytvořených při průchodu senzitivním materiálem detektoru, díky kterým lze jasně určit polohu počátku a konce interakce mionu s detektorem. Dobu sběru nosičů náboje z dané interakce určíme jako rozdíl prvního a posledního zaznamenaného času dané události, tedy

$$t_{Sberu} = t_{Last} - t_{First}, \quad (5.1)$$

kde t_{Sberu} představuje dobu sběru dat nosičů náboje dané události, t_{First} je první detekovaný čas události a t_{Last} je poslední detekovaný čas dané události.

Nejdelší naměřená doba sběru nosičů náboje by neměla převyšovat teoretickou mez pro daný senzor, kterou získáme vyjádřením $t_{Sberu\ teor}$ z rovnice

$$v = \frac{d}{t_{Sberu\ teor}}, \quad (5.2)$$

kde v je rychlost nosičů náboje v materiálu daného senzoru a d je tloušťka senzoru. v je dána rovnicí

$$v = \mu \cdot E, \quad (5.3)$$

kde μ je pohyblivost elektronu v daném polovodiči a E intenzita elektrického pole, tedy

$$E = \frac{U}{d}. \quad (5.4)$$

U je aplikované napětí na senzor. Vyjádřením $t_{Sberu\ teor}$ a dosazením v a E z rovnic (5.3) a (5.4) získáme vztah pro dobu sběru nosičů náboje

$$t_{Sberu\ teor} = \frac{d^2}{\mu U}. \quad (5.5)$$

V polovodiči CdTe je pohyblivost elektronu $\mu = 1100 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [10]. Použitý detektor má tloušťku CdTe senzoru $d = 2 \text{ mm}$ a bylo aplikováno napětí $U = -437 \text{ V}$. Po dosazení těchto hodnot do vzorce (5.5) získáme hodnotu doby sběru nosičů náboje $t_{Sberu\ teor} = 83,2 \text{ ns}$.

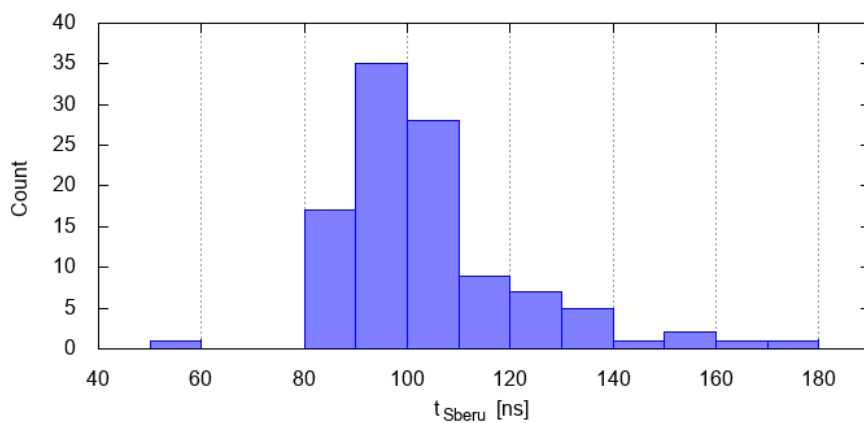
5.2 Měření

Měření bylo realizováno se zaslepeným průzorem na senzor detektoru, aby se zamezilo interakcím denního světla. Miony, pravděpodobně vzniklé interakcí kosmického záření s atmosférou, byly detekovány spolu s přirozenou radiací prostředí a při zpracování dat následně vyselektovány. Jednotlivá měření byla dlouhá 30 minut, aby soubory s naměřenými daty nebyly příliš rozsáhlé. Po vyselektování mionů je třeba ještě zanedbávat miony, jejichž stopa končí nebo začíná na okraji senzoru. To znamená, že mion prošel boční stěnou určitého pixelu a tudíž neprolétl celou tloušťkou senzoru, se kterou bylo počítáno při teoretickém výpočtu doby sběru nosičů náboje.

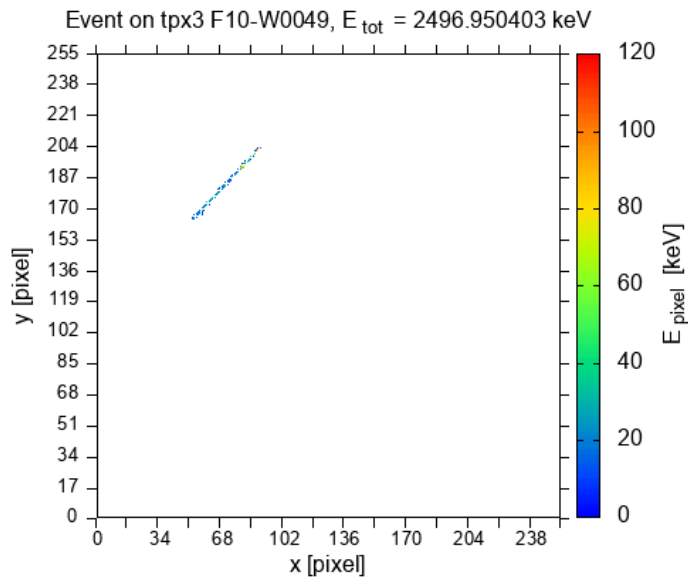
Bylo zaznamenáno celkem 108 mionů interagujících s detektorem, které neprocházely okrajem senzoru. Byla změřena doba sběru nosičů náboje a statisticky vyhodnocena. Průměrná doba sběru nosičů náboje je $t_{Sberu} = 105 \pm 2 \text{ ns}$. Naměřené doby sběru jsou vyneseny v histogramu na Obr. 5.1. Takové spektrum naměřené doby sběru nosičů náboje by mohlo být zapříčiněno i časovým rozmazáním, které může být způsobeno zařízením pro zpracování signálu. Nejdelší doba sběru nábojů od stopy mionu, který byl detekován a neprotíná boční stěnu senzoru, byla určena na $t_{Sberu} = 179,7 \text{ ns}$ a deponované energie této interakce v detektoru byla $E_{tot} = 2497 \text{ keV}$, interakce je zobrazena na Obr. 5.2.

5.3 Závěr

Průměrná doba sběru nosičů náboje detektoru CdTe $2000 \mu\text{m}$ byla určena na $t_{Sberu} = 105 \pm 2 \text{ ns}$, což je o zhruba 20 ns více než tatáž hodnota určená teoretickým výpočtem ($t_{Sberu\ teor} = 83,2 \text{ ns}$) a otevírá cestu pro další měření a zjišťování příčiny, proč tomu tak je. Nejdelší zaznamenaná doba sběru nosičů náboje je dokonce $t_{Sberu} = 179,7 \text{ ns}$. Při těchto měřeních byl použitý CdTe detektor bez chlazení, ale jelikož byl vystaven pouze přirozené radiaci, počet detekovaných událostí nebyl vysoký a tedy nedocházelo k jeho přílišnému zahřívání. Pro získání přesnějších výsledků bude třeba na detektor instalovat chladič připojený k chladicímu zařízení a celý detektor teplotně stabilizovat na pokojové teplotě. Pokud i další měření odhalí výrazně delší dobu sběru nosičů náboje, bude třeba prodloužit časová okna pro Comptonovu kameru ze zamýšlených 100 ns výše.



Obrázek 5.1: Naměřené doby sběru nosičů náboje z interakcí mionů s detektorem CdTe 2000 μm .



Obrázek 5.2: Interakce mionu s detektorem, při které byla naměřena nejdelší doba sběru nosičů náboje.

Závěr

V této práci jsou popsány polovodičové pixelové detektory s čipem Timepix3. Detektory jsou zprovozněny a je popsána instalace softwaru PIXet Pro na počítače s operačním systémem Windows, Linux, Mac. Následně je popsáno prostředí desktopové aplikace PIXet Pro pro účely měření na tokamaku Golem. Následuje popis instalace PIXet Pro na Raspberry Pi s operačním systémem Rasbian, na který není možné nainstalovat desktopovou aplikaci PIXet Pro. Při použití Raspberry Pi pro měření pixelovými detektory s čipem Timepix3 jsou detektory ovládány pouze prostřednictvím skriptů psaných v jazyce Python. Příkazy pro ovládání detektorů prostřednictvím skriptů jsou paradoxně dohledatelné pouze v helpu desktopové aplikace.

Po zprovoznění detektorů na Raspberry Pi bylo třeba vytvořit dělič napětí a koaxiální kabely, aby se detektory daly zakomponovat do měřicího systému tokamaku Golem. Zároveň bylo navrženo uchycení detektorů, které v budoucnu bude sloužit k vytváření sestav z těchto detektorů. Měřením na tokamaku Golem se ukázalo, že bude vhodné mít pro všechny detektory jeden společný dělič napětí, jelikož kombinace nepřesností použitých rezistorů v dělicích s několika mikrosekund dlouhou náběžnou hranou spouštěcího signálu způsobuje, že měření nejsou zahajována ve stejný okamžik. Výsledky měření na tokamaku Golem jsou uvedeny v přílohách C, D, E, F.

Vliv teploty na kvalitu energetických spekter pixelových detektorů s čipem Timepix3 byl proměřován v těžkých laboratořích v Tróji, kde je pro tento účel vhodně vybavená laboratoř. Byl proměřen teplotní drift křemíkového a kadmium-teluridového detektoru a byla navržena teplotní stabilizace, která spočívá v udržování teploty detektorů na takové hodnotě, při které byla prováděna jejich kalibrace. Naměřená energetická spektra vzorku ^{241}Am jsou uvedena v příloze A a B.

V poslední kapitole byla proměřována doba sběru nosičů náboje CdTe detektoru. Teoreticky vypočtená doba sběru nosičů náboje byla stanovena na 83,2 ns, ale průměrná naměřená doba sběru nosičů náboje je $t_{\text{Sberu}} = 105 \pm 2$ ns. Jelikož při tomto experimentu nebyl detektor teplotně stabilizován, je možné že výsledky jsou zkresleny i díky této skutečnosti.

Literatura

- [1] LGT 2325 MediLine. *Home.liebherr.com* [online]. Liebherr [cit. 2021-8-29]. Dostupné z: <https://home.liebherr.com/en/aus/apac/commercial/research-and-laboratory/freezers/details/lgt-2325.html>
- [2] Thermal G. *Julabo.com* [online]. 77960 Seelbach, Germany: JULABO, 2021 [cit. 2021-8-29]. Dostupné z: <https://www.julabo.com/sites/default/files/produktdatenblatt/THERMAL-G-8940125-ES.pdf>
- [3] CF31 Criotermostato Compacto. *Julabo.com* [online]. 77960 Seelbach, Germany: JULABO, 2021 [cit. 2021-8-29]. Dostupné z: <https://www.julabo.com/es/productos/criotermostatos/criotermostatos-compactos/cf31>
- [4] *ADVAPIXTPX3 Datasheet: Model No.: APXMD3-Xxx170704, APXT3M-Xxx180119, APXT3M-Xxx200128*. ADVACAM s.r.o., Praha, Czech Republic, 2020.
- [5] *ADVAPIXTPX3 Synchronization Guide: Model No.: APXT3M-Xxx180119*. ADVACAM s.r.o., Praha, Czech Republic, 2019.
- [6] *Medipix collaboration* [online]. Geneva 23, Switzerland: Cern, 2021 [cit. 2021-8-29]. Dostupné z: <https://medipix.web.cern.ch/taxonomy/term/257>
- [7] KHALIL, M., D. TURECEK, J. JAKUBEK, J. KEHRES, E.S. DREIER a U.L. OLSEN. Intrinsic XRF corrections in Timepix3 CdTe spectral detectors. *Journal of Instrumentation*. 2019, **14**(01), C01018-C01018. ISSN 1748-0221. Dostupné z: doi:10.1088/1748-0221/14/01/C01018
- [8] JAKUBEK, Jan. Precise energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold mode. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2011, **633**(633), S262-S266. ISSN 01689002. Dostupné z: doi:10.1016/j.nima.2010.06.183
- [9] RASOULI, C., D. IRAJI, A. H. FARAHBOD, K. AKHTARI, H. RASOULI, H. MODARRESI a M. LAMEHI. Runaway electron energy measurement using hard x-ray spectroscopy in “Damavand” tokamak. *Review of Scientific Instruments*. 2009, **80**(1), 1-6. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.3064917

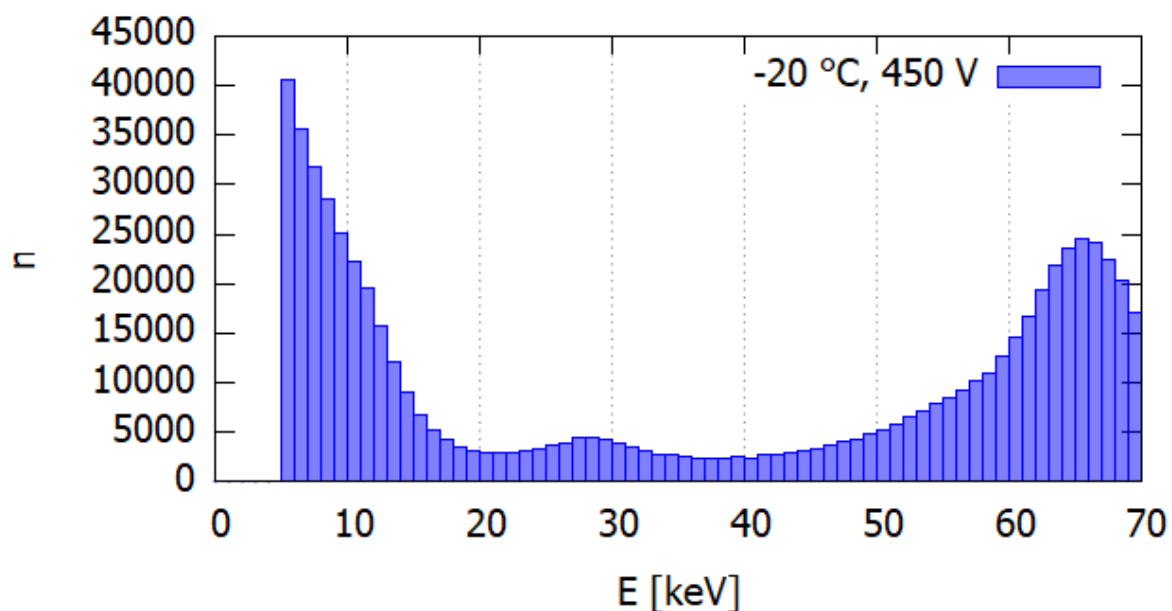
- [10] KNOLL, Glenn F. *Radiation detection and measurement*. 4th ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2010. ISBN 978-0-470-13148-0.

Příloha A

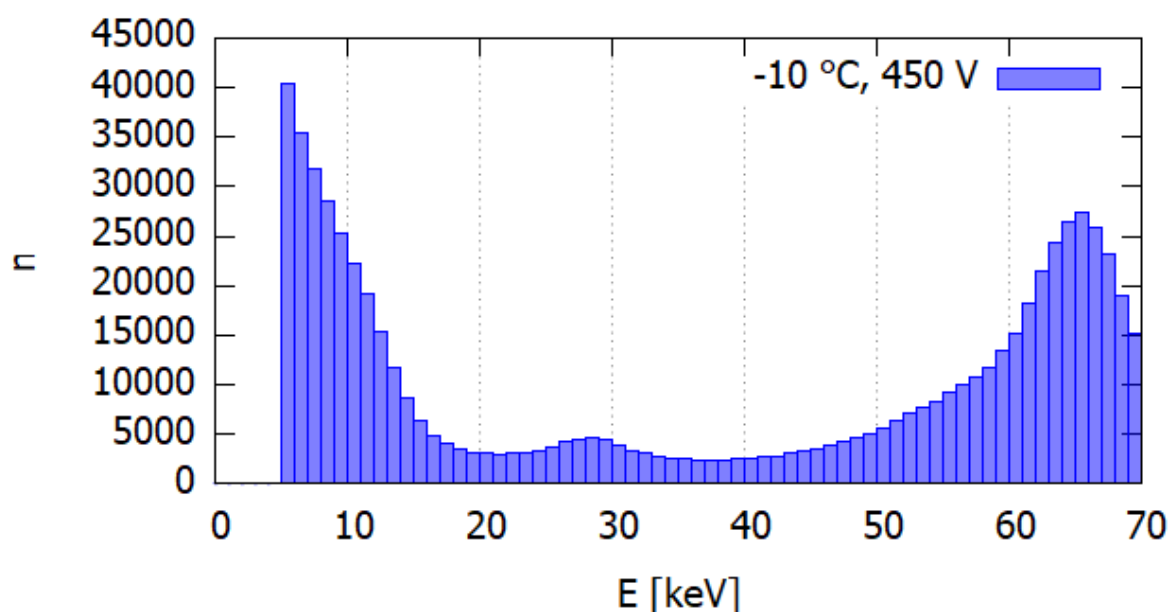
Teplotní drift pixelových detektorů Timepix3 - Si detektor

V této příloze jsou uvedena jednotlivá energetická spektra získaná Si detektorem se senzorem 1000 μm ozařovaného vzorkem ^{241}Am .

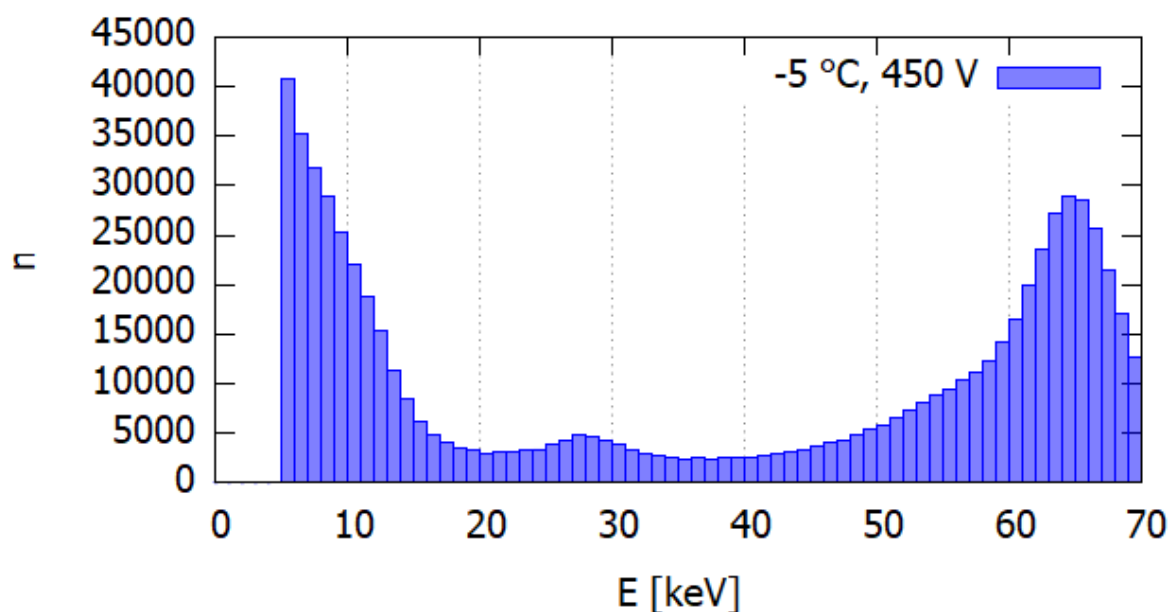
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



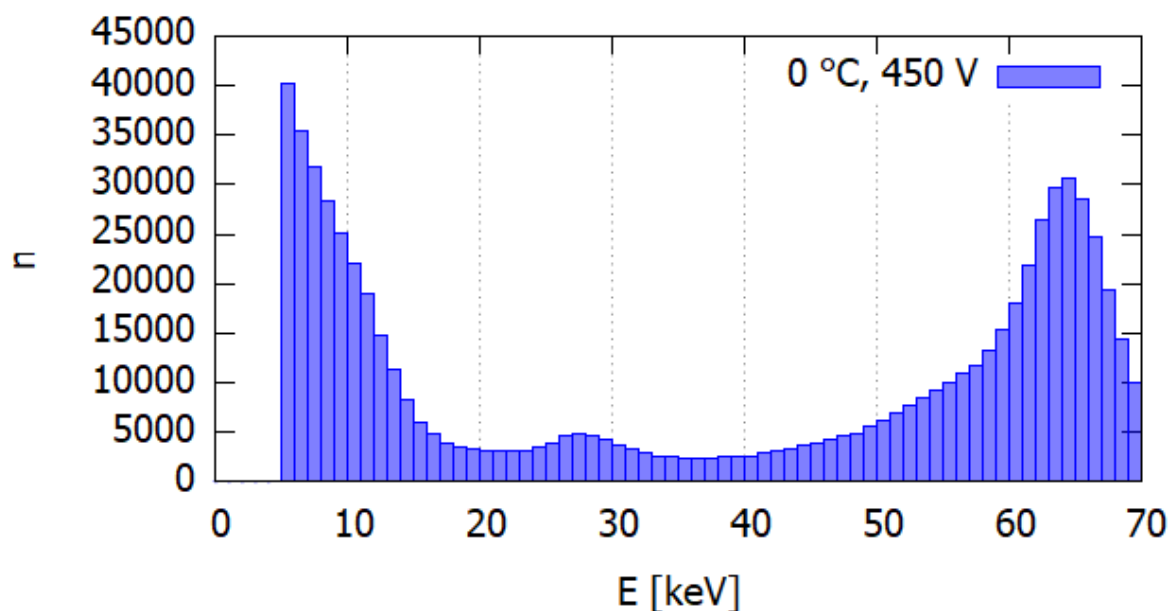
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



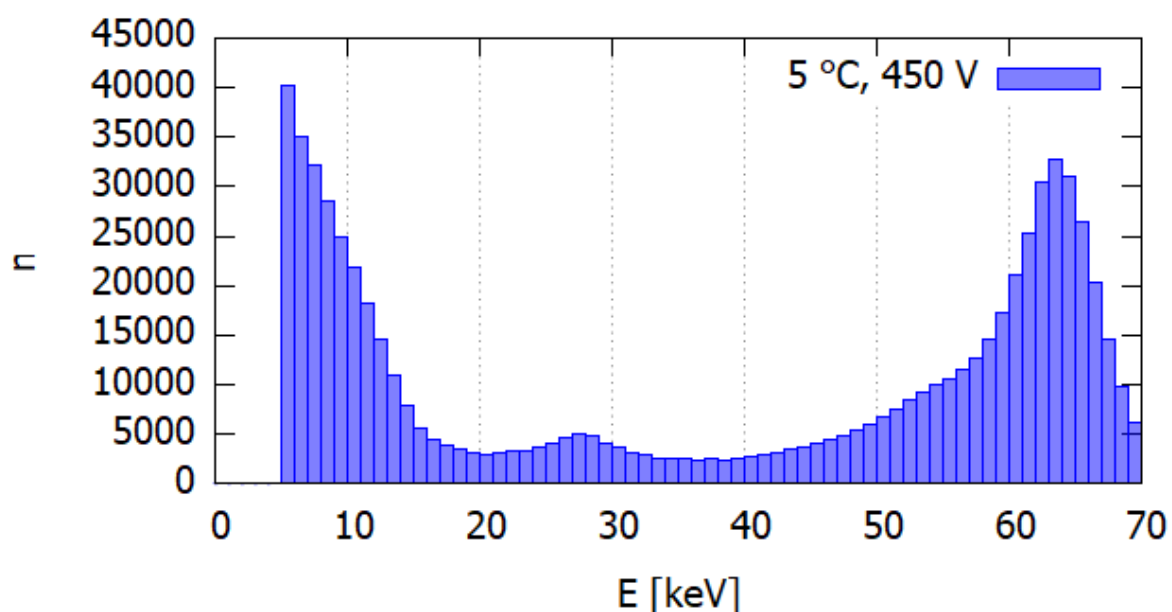
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



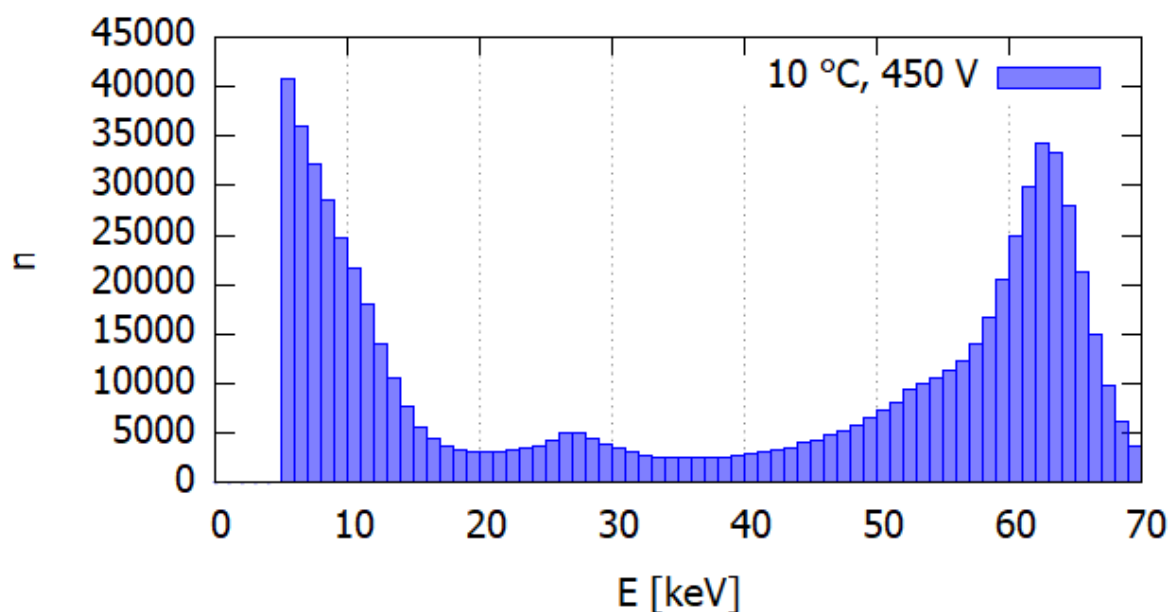
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



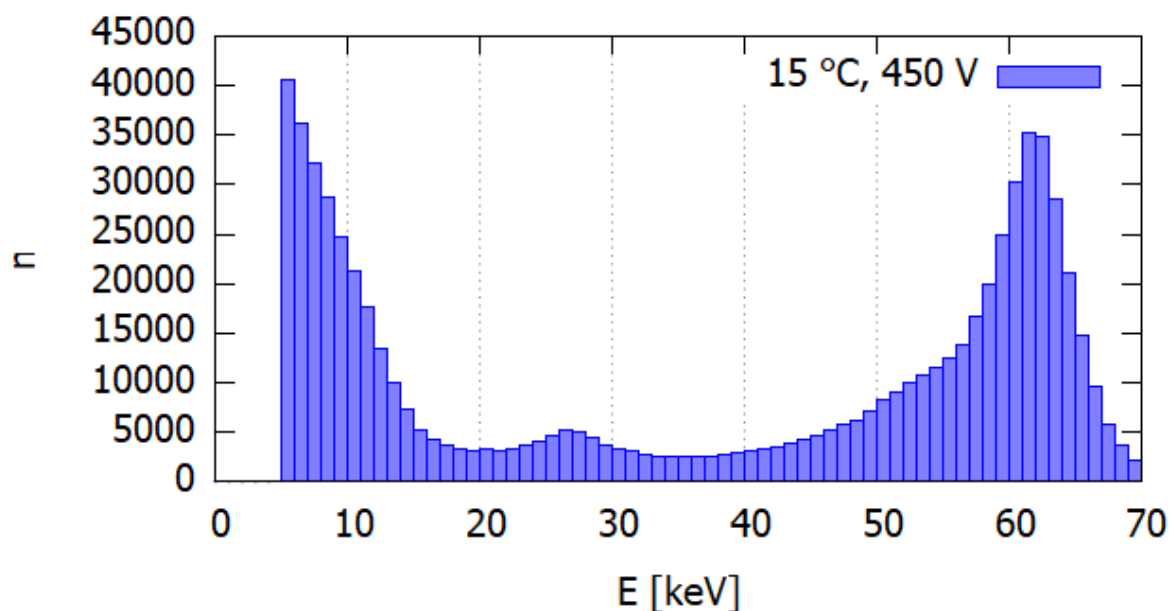
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



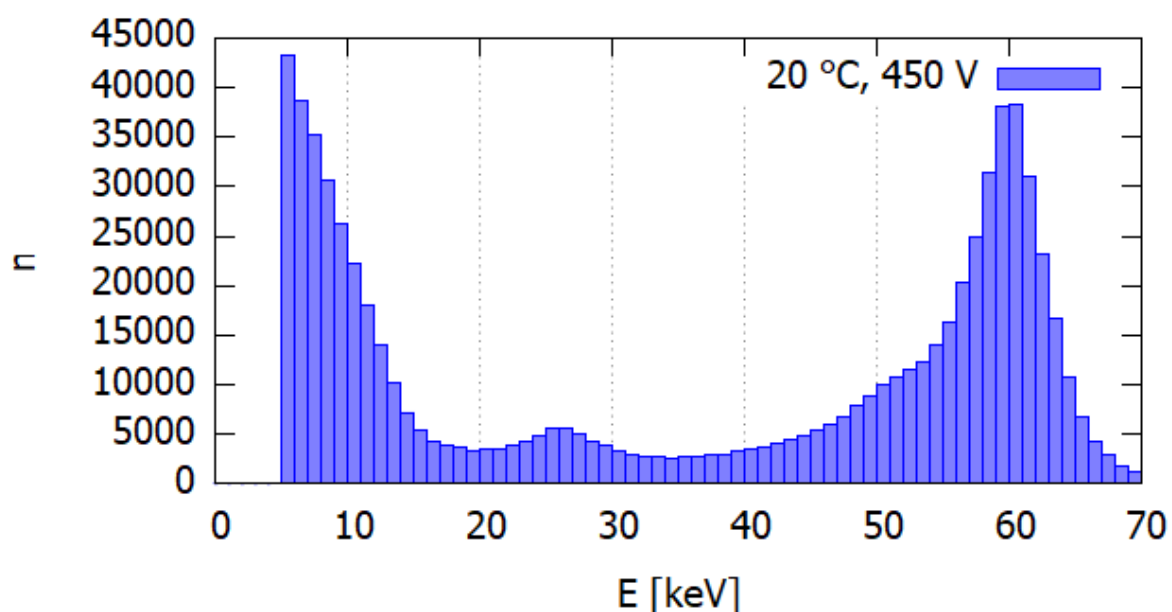
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



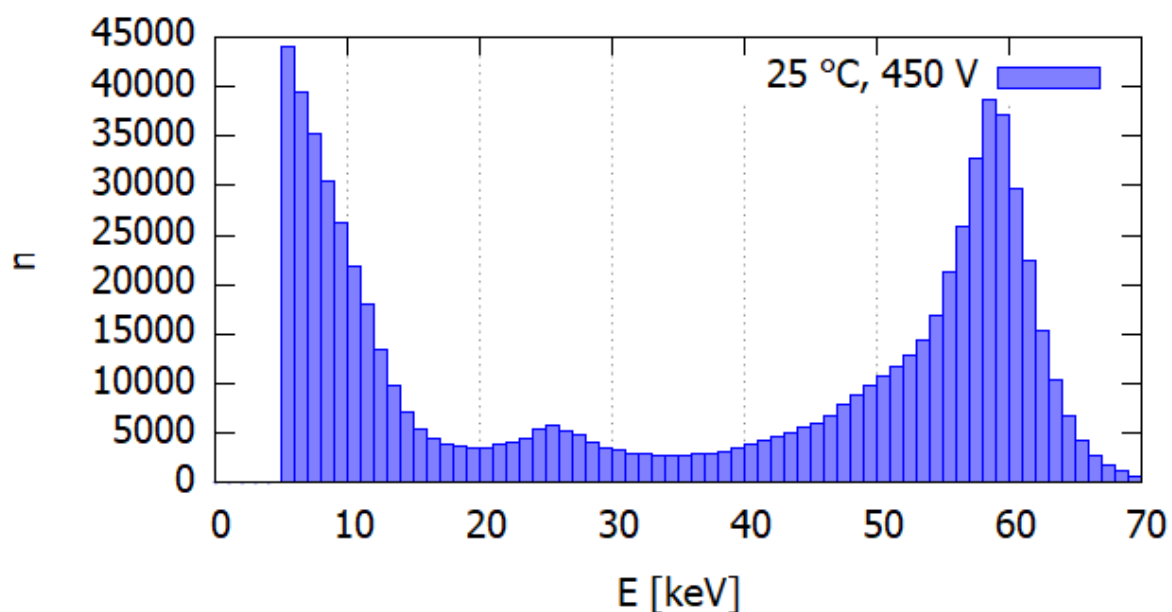
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



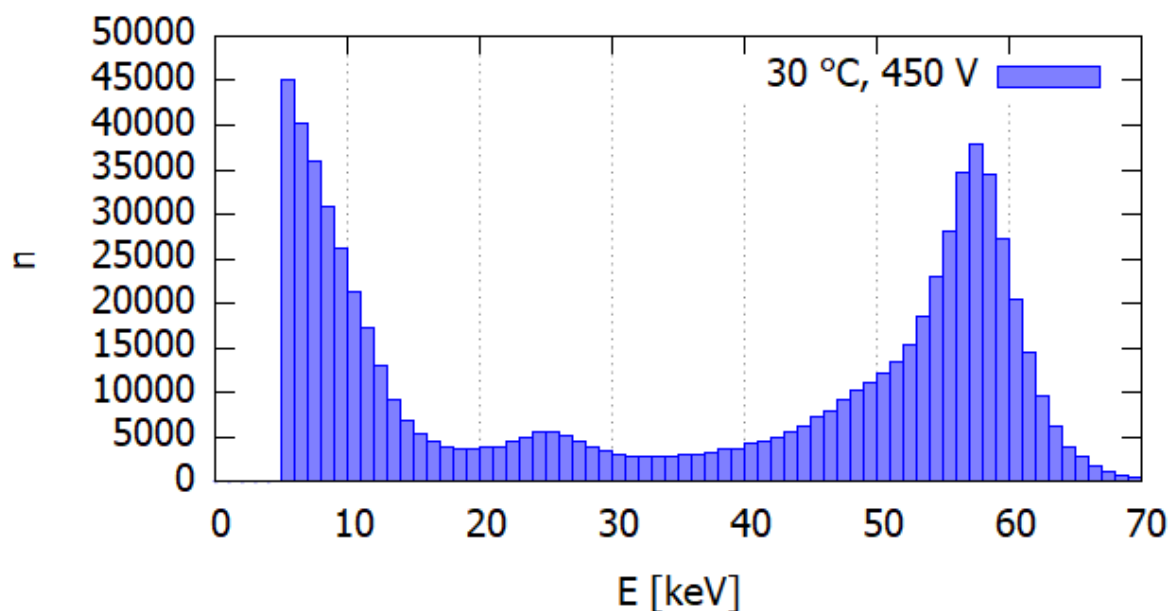
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



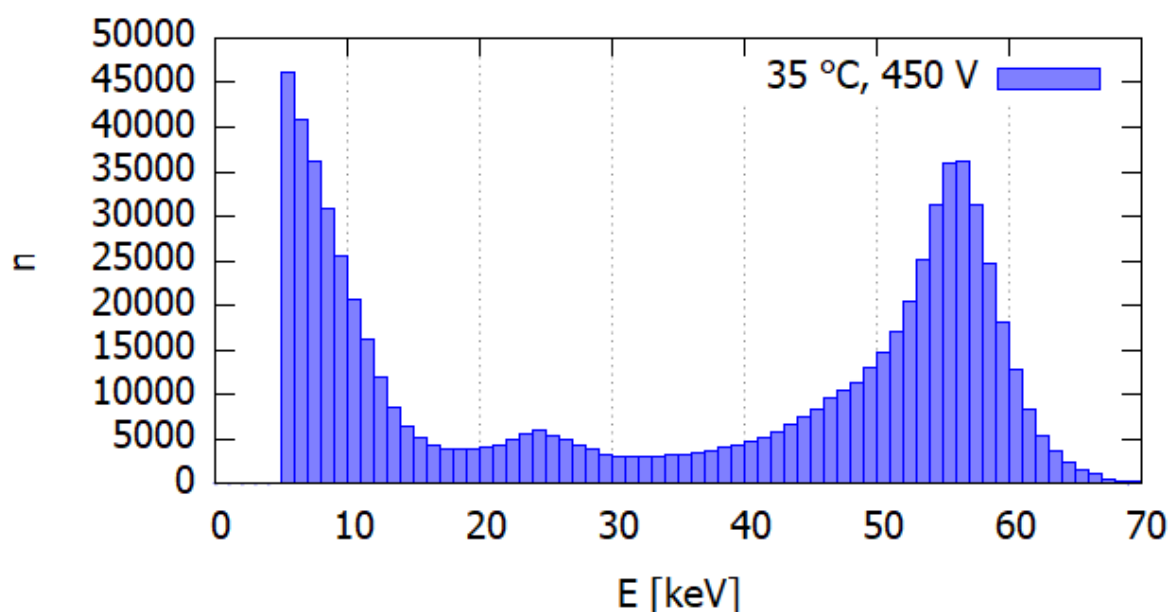
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



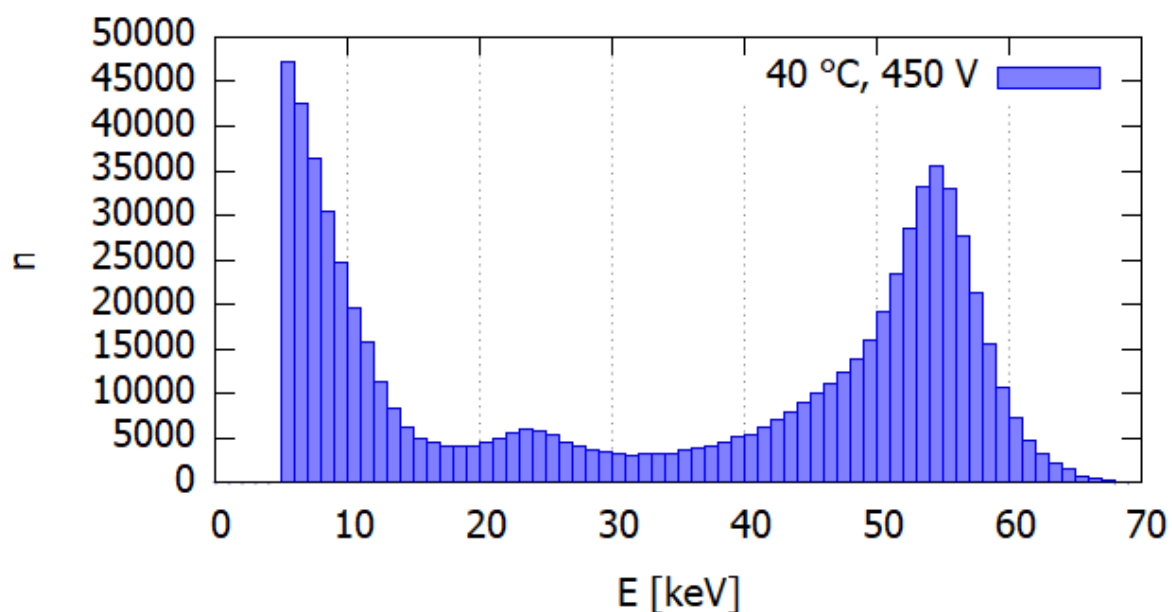
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



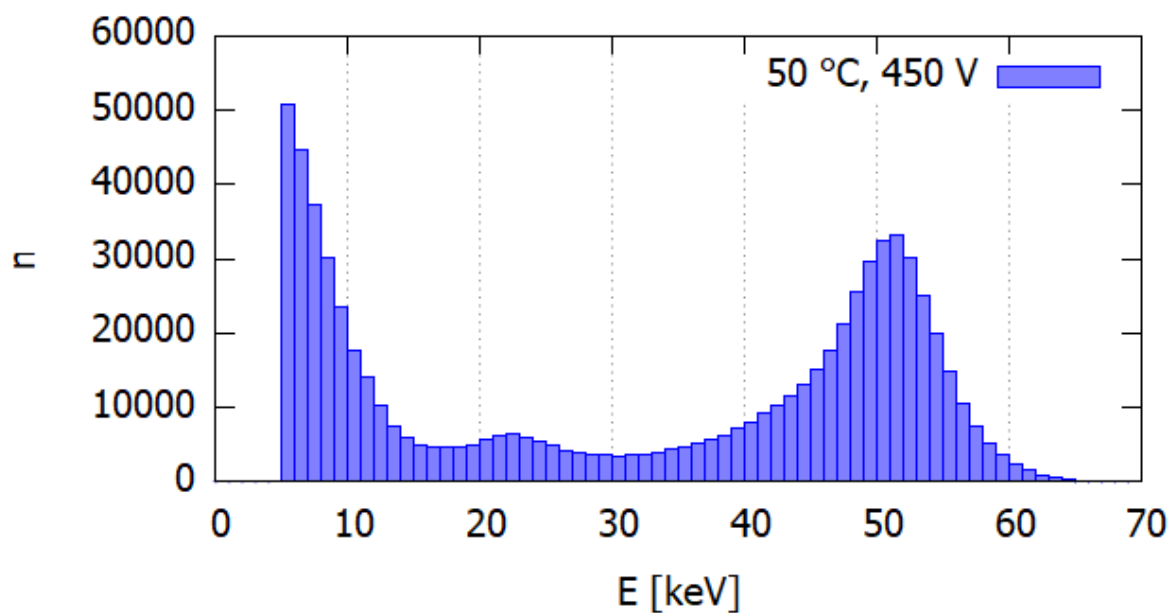
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



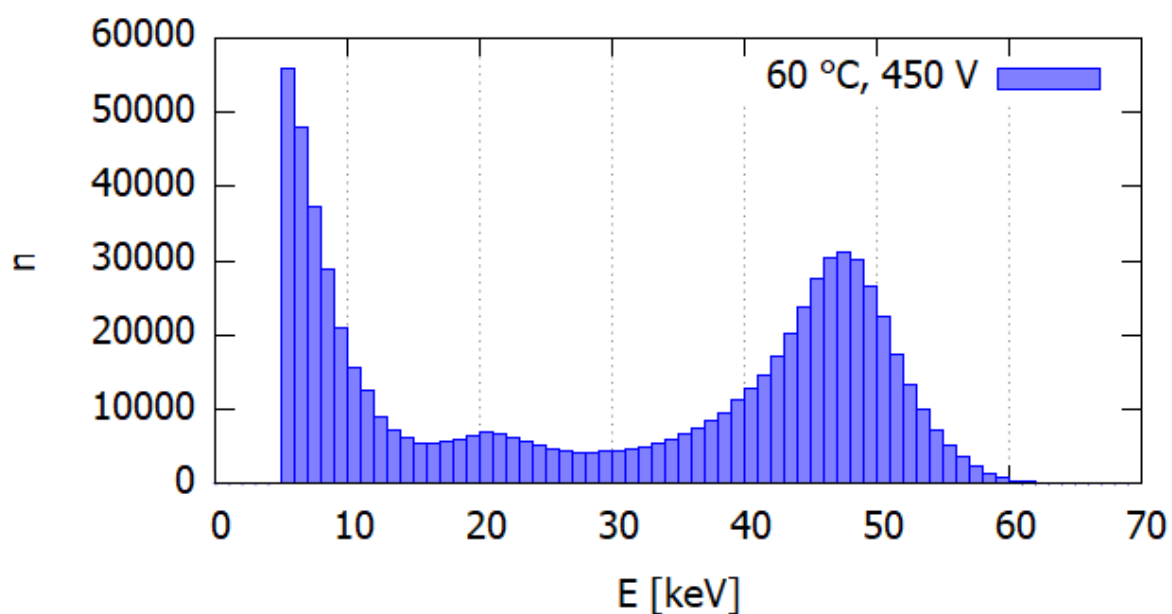
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am



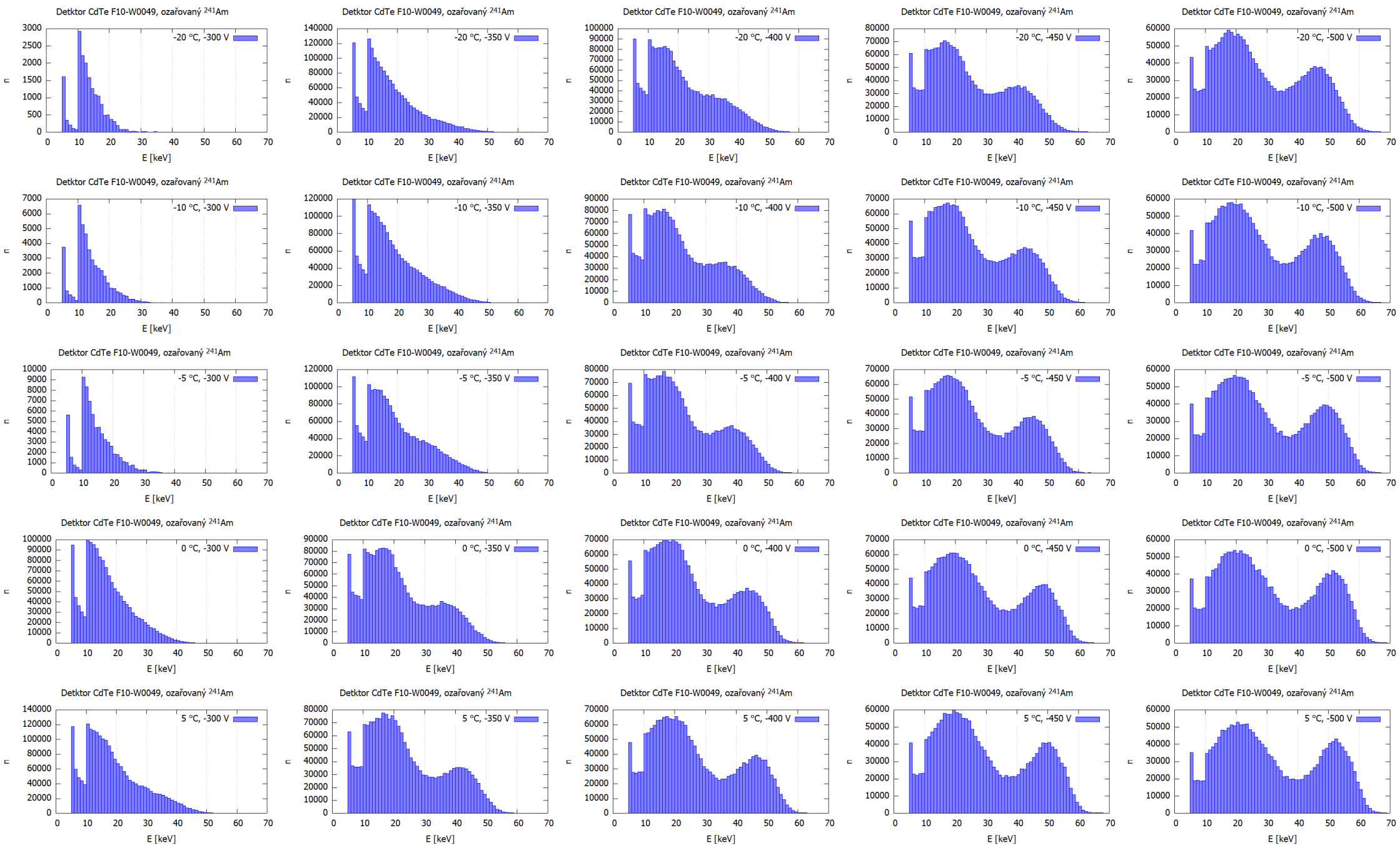
Detektor Si H03 - W0051, ozařovaný ^{241}Am

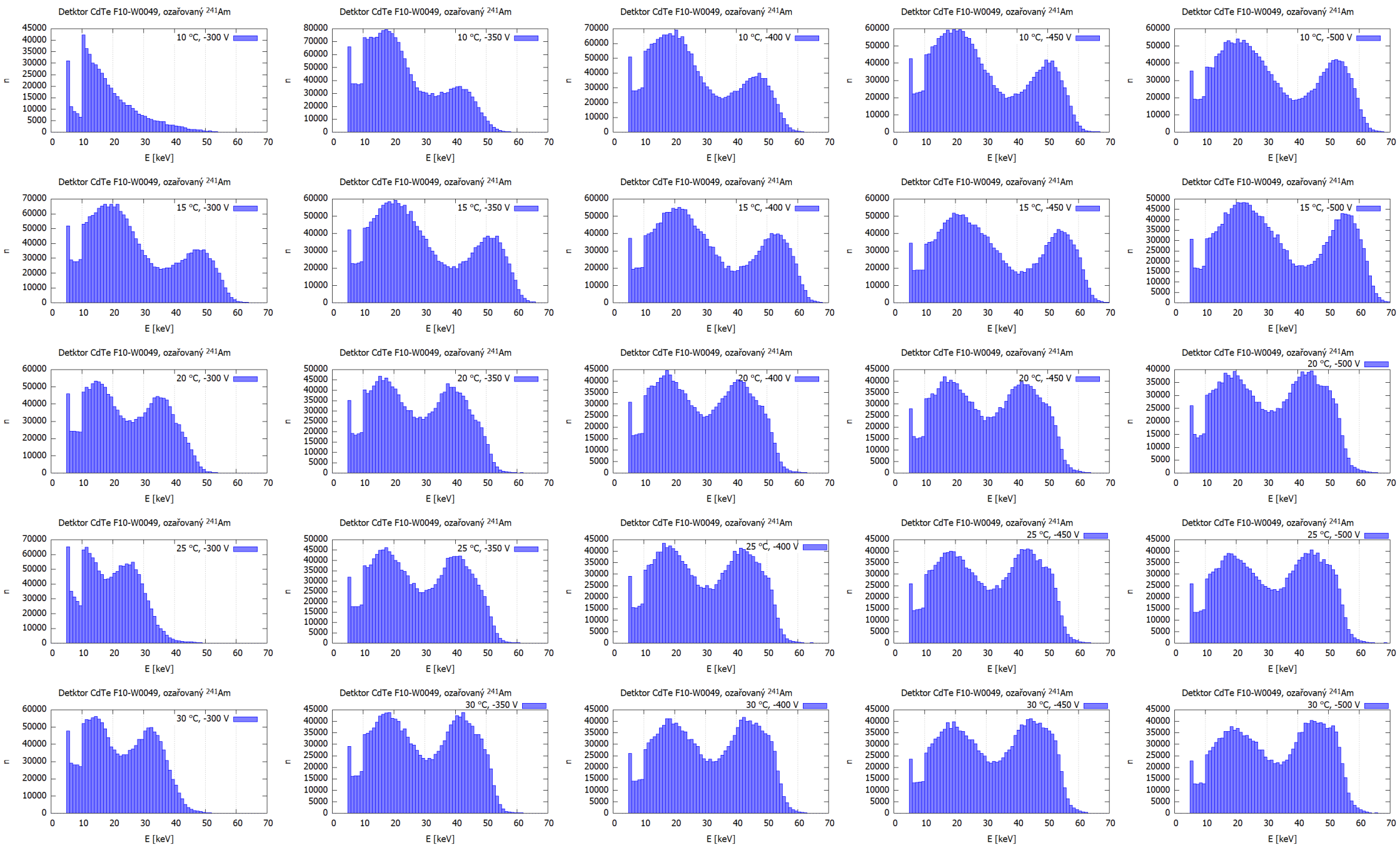


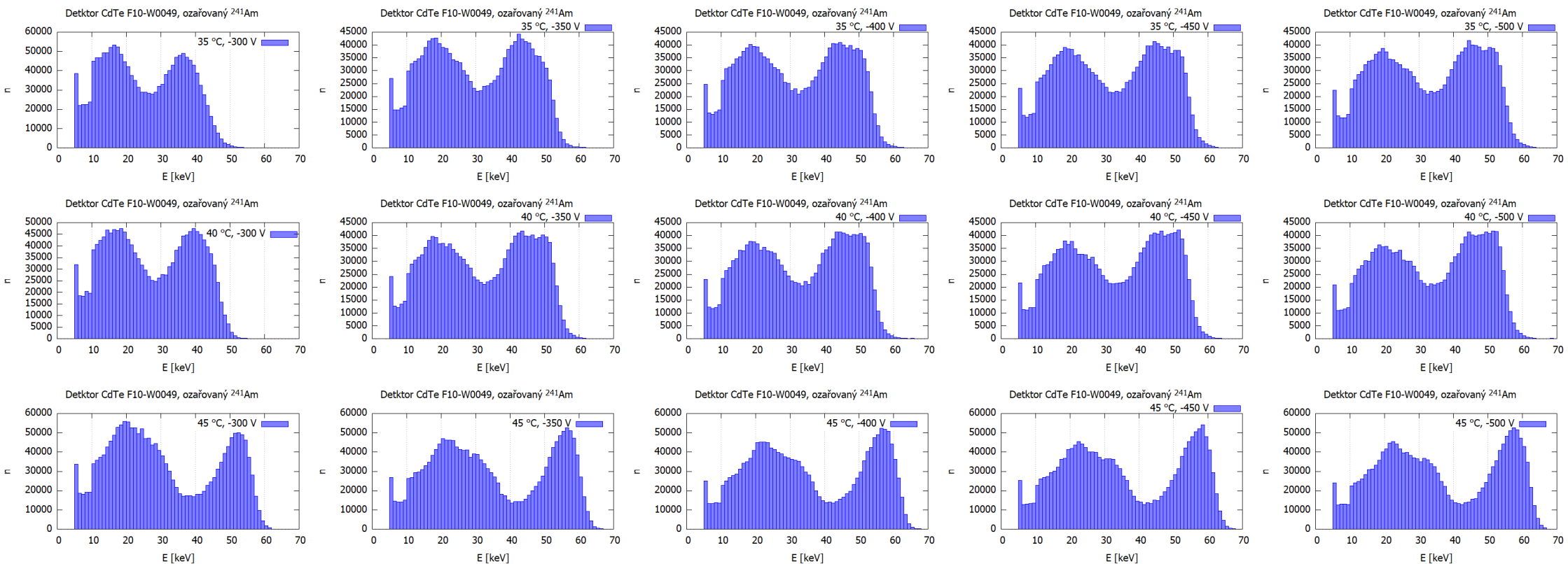
Příloha B

Teplotní drift pixelových detektorů Timepix3 - CdTe detektor

V této příloze jsou uvedena jednotlivá energetická spektra získaná CdTe detektorem se senzorem 2000 μm ozařovaného vzorkem ^{241}Am .



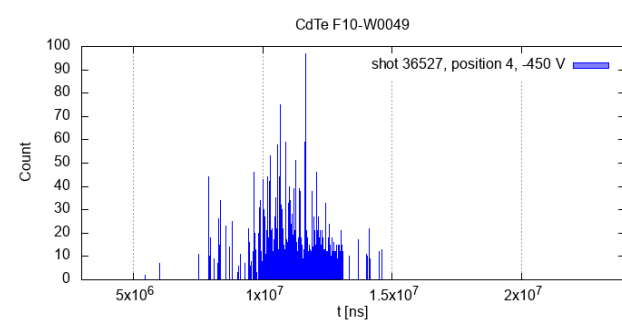
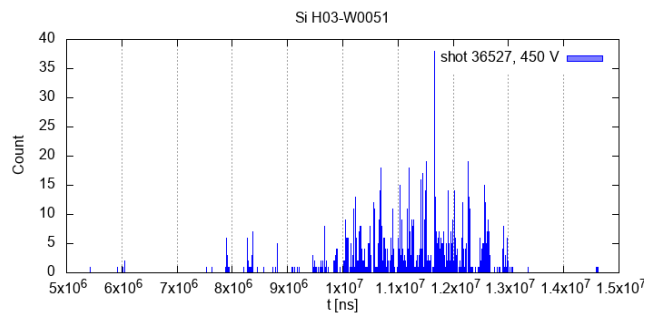
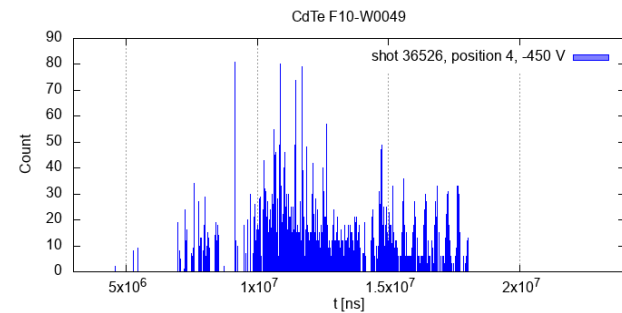
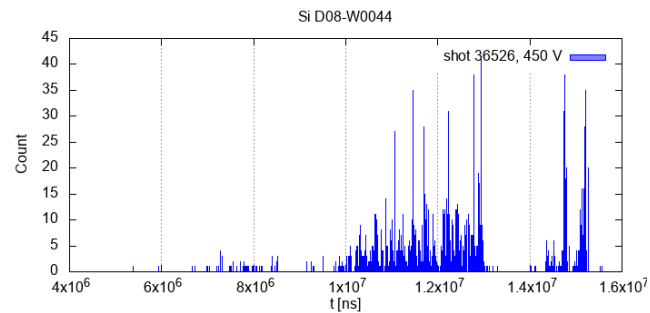
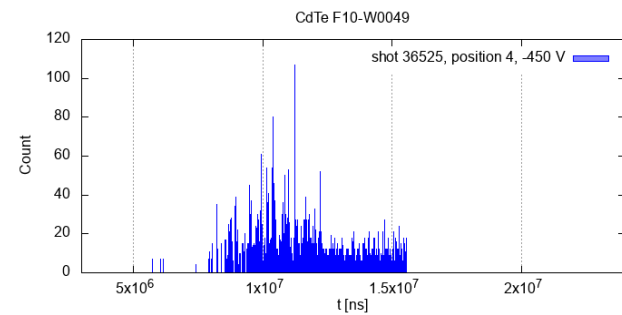
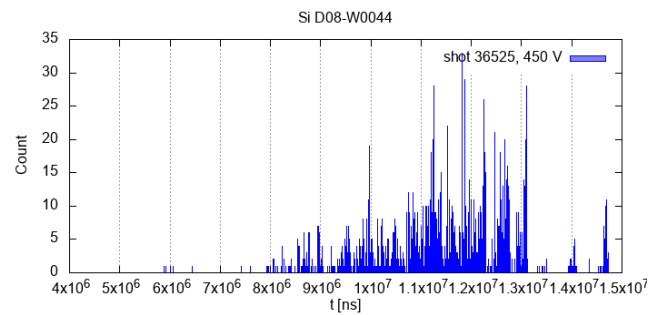
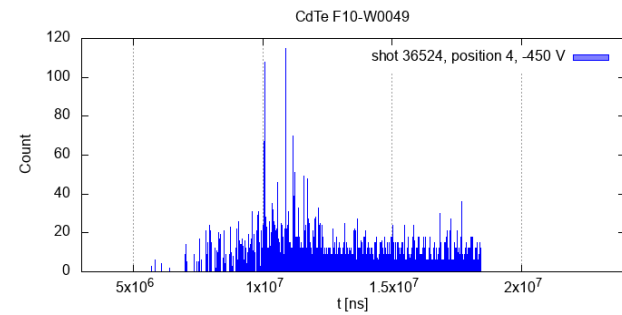
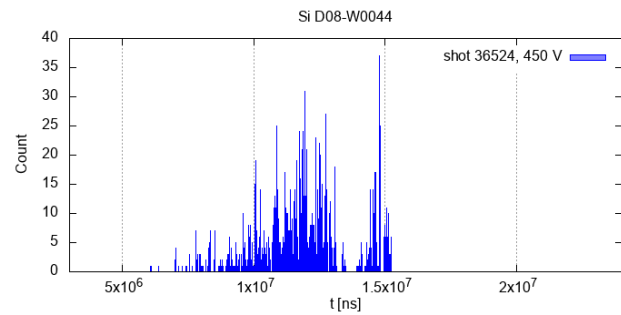
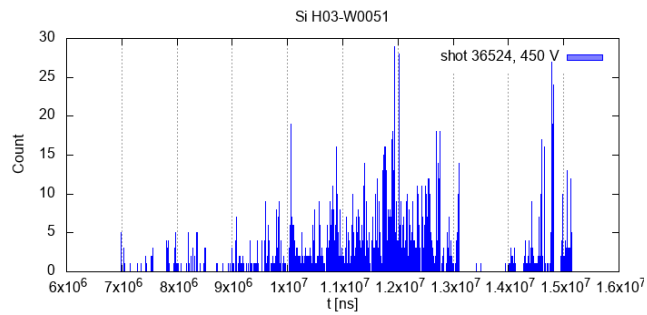


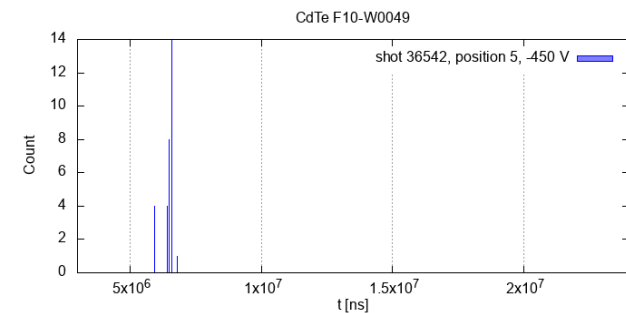
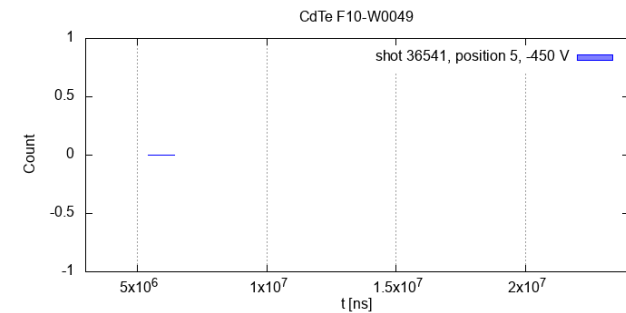
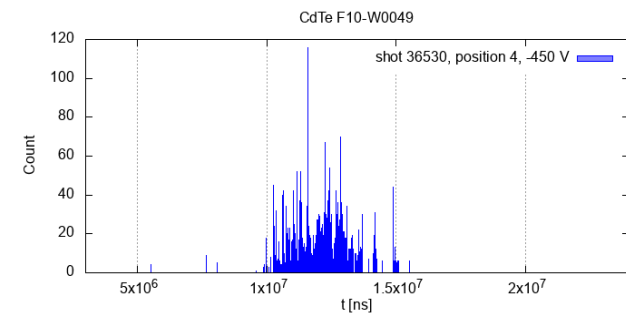
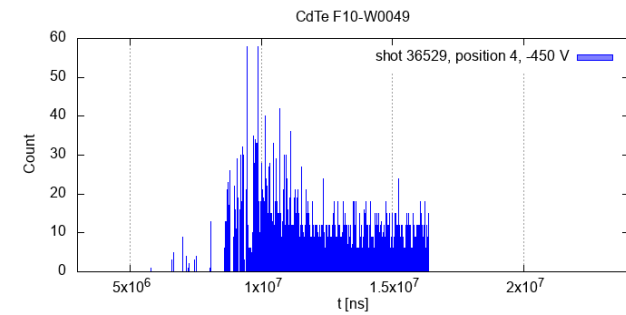
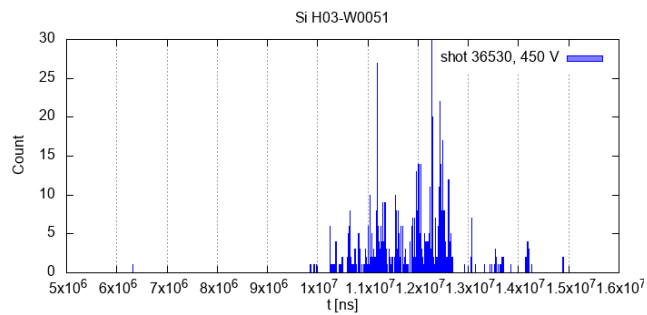
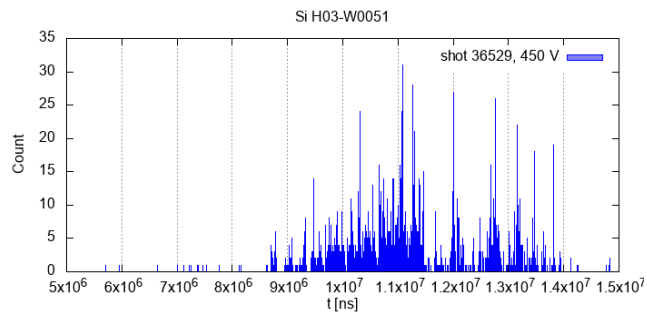


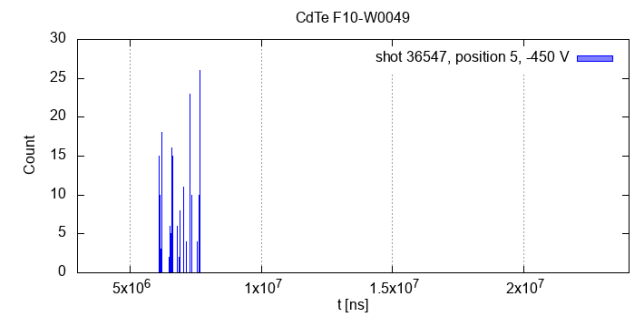
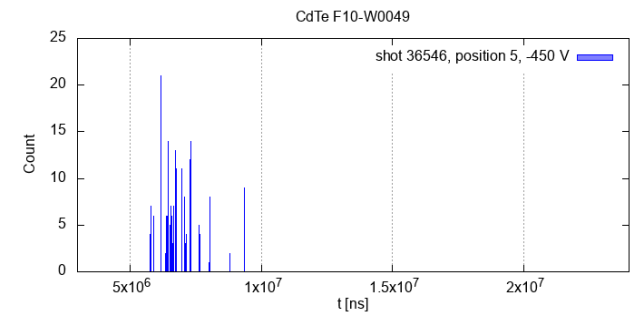
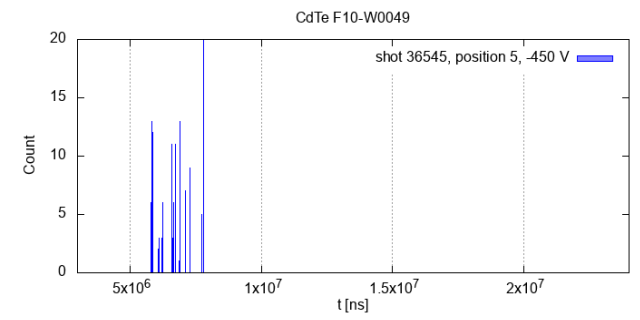
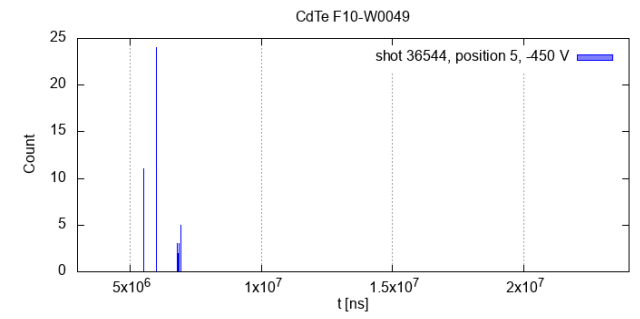
Příloha C

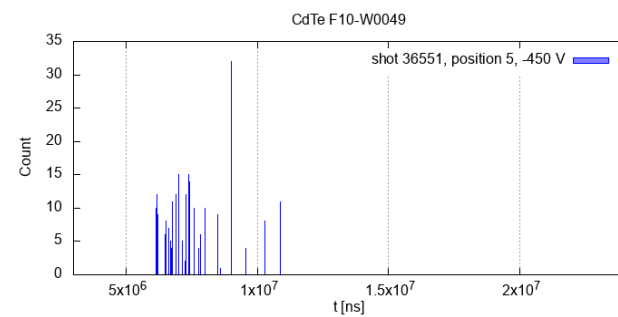
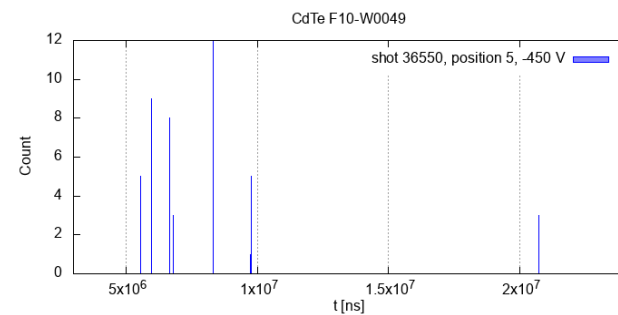
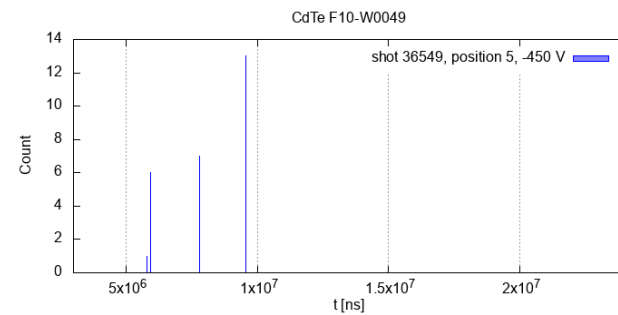
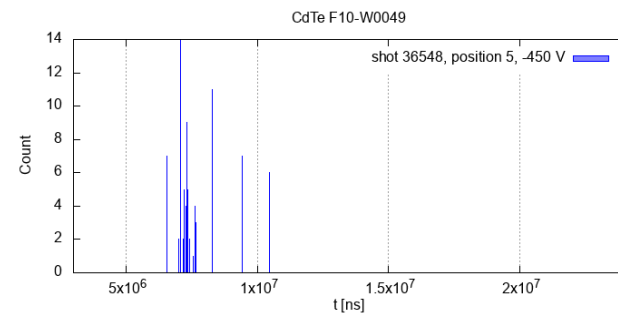
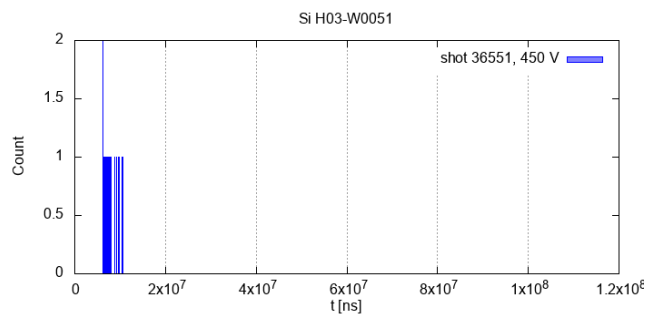
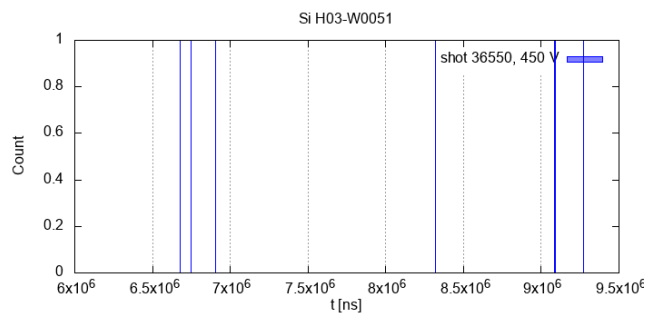
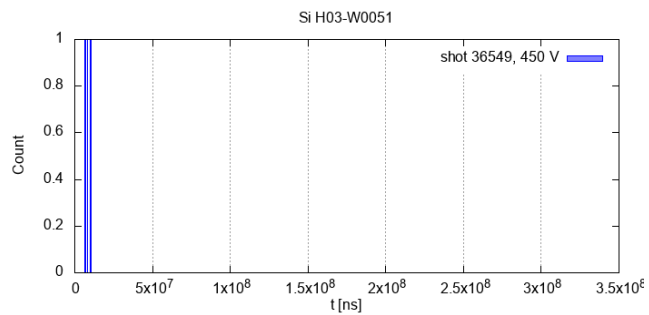
Časové vývojé počtu událostí během výbojů na tokamaku Golem

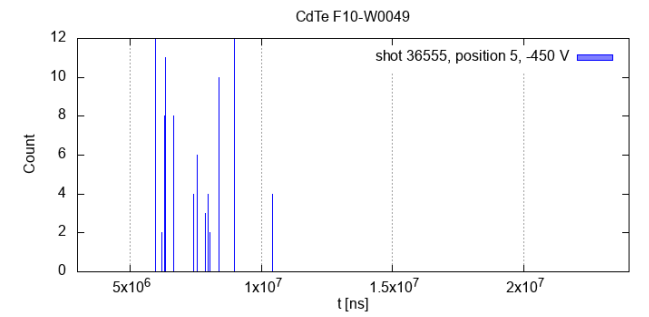
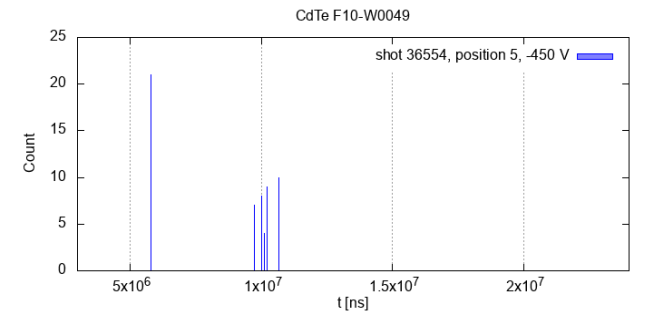
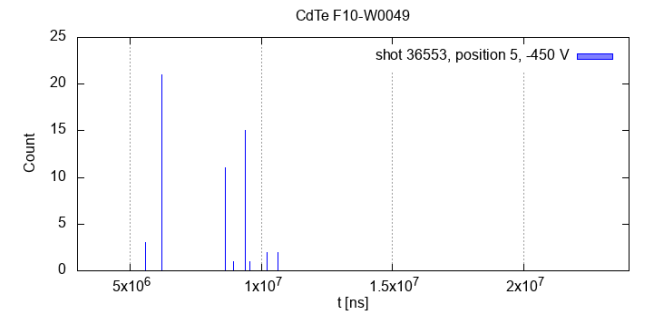
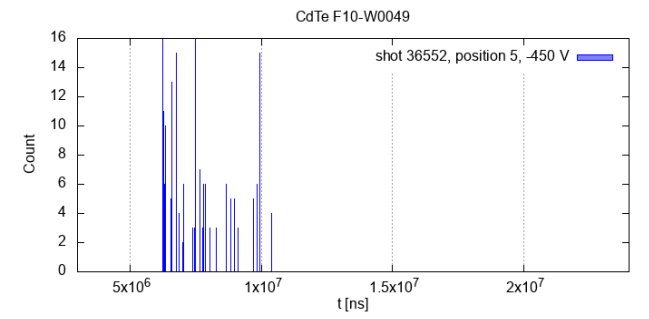
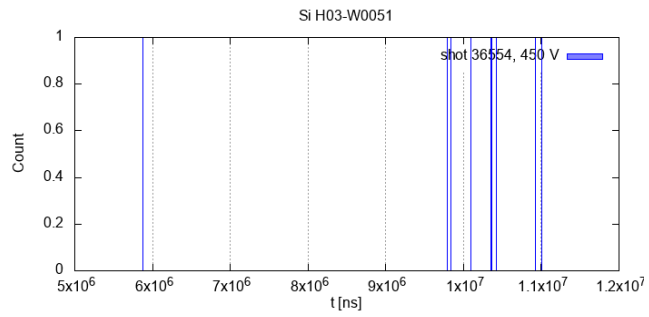
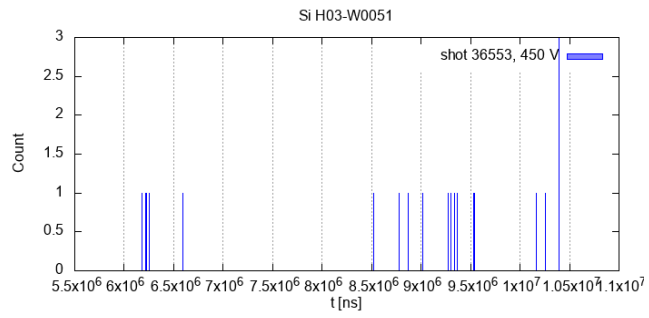
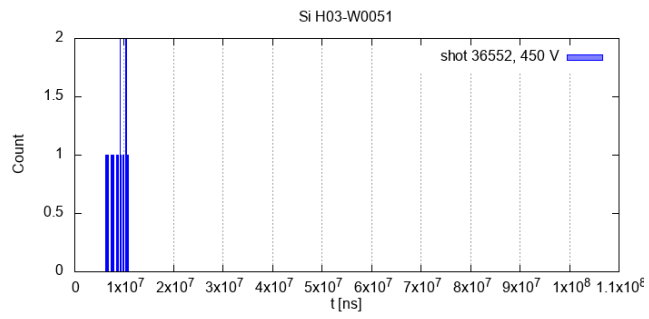
Zde jsou vloženy histogramy zobrazující časový vývoj počtu událostí během výbojů na tokamaku Golem. Šířka jednoho binu je 100 ns. Detekce probíhala polovodičovými pixelovými detektory s čipem Timepix3.

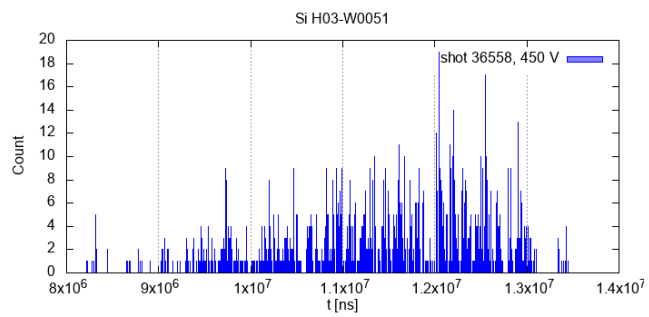
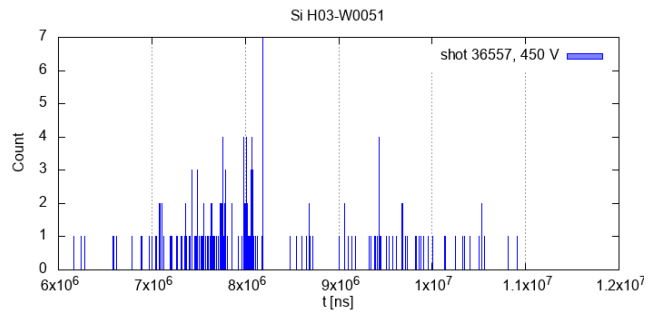
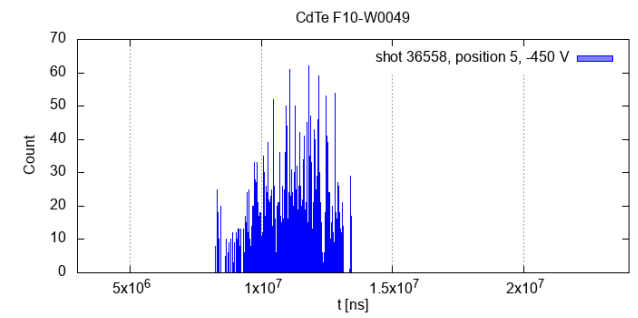
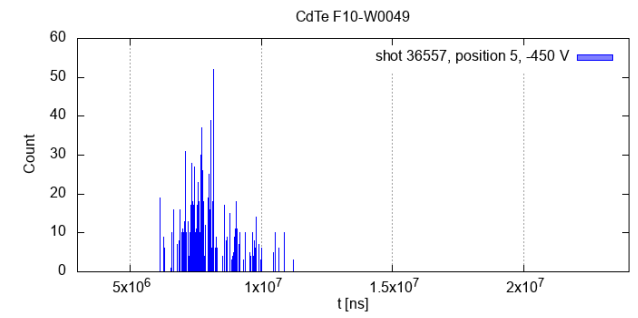
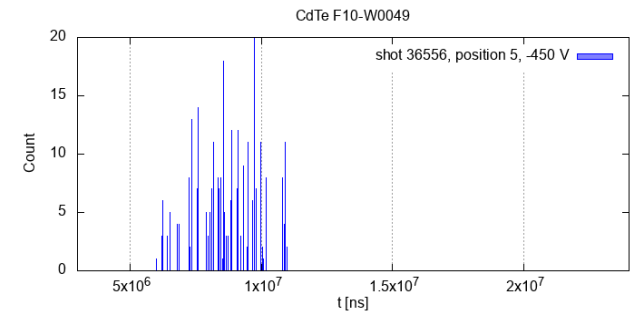
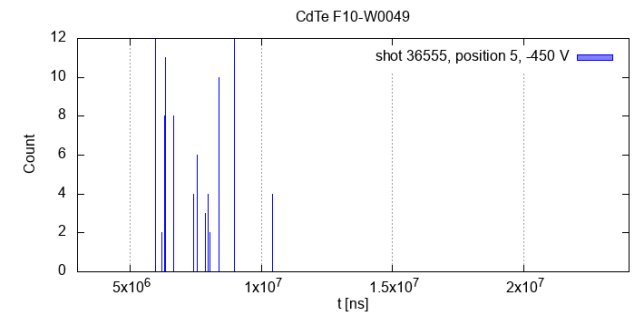


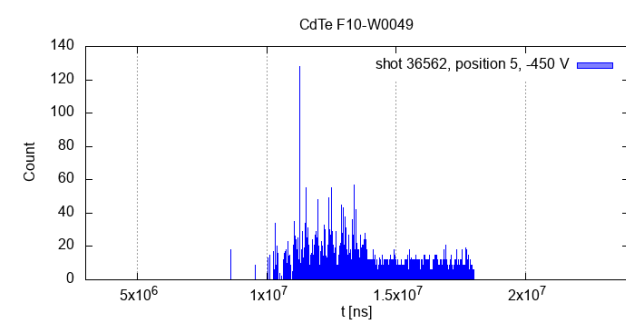
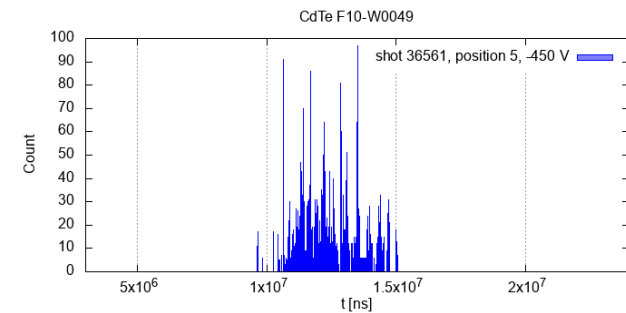
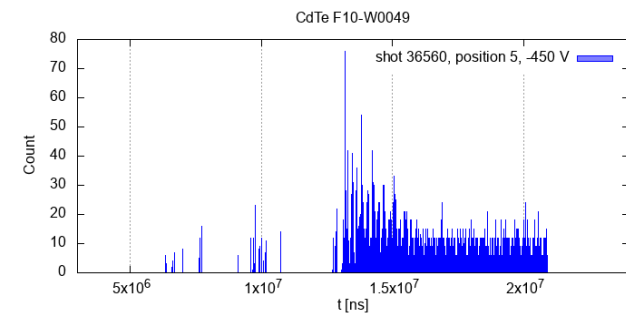
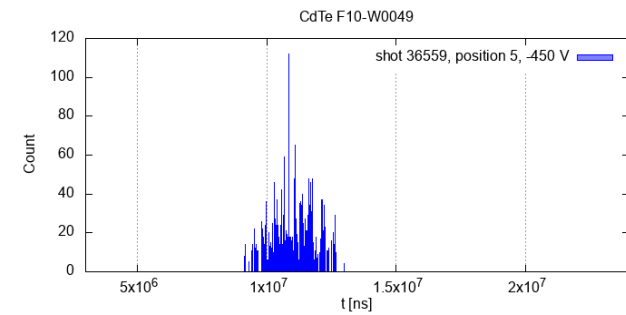
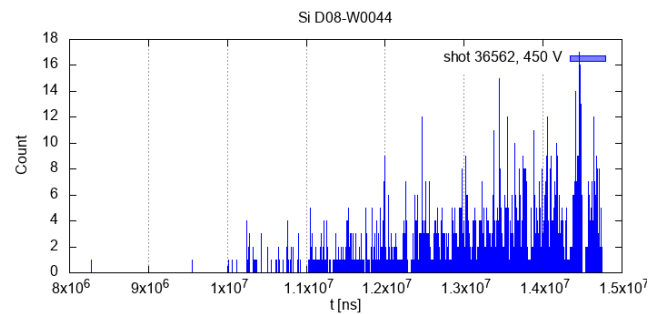
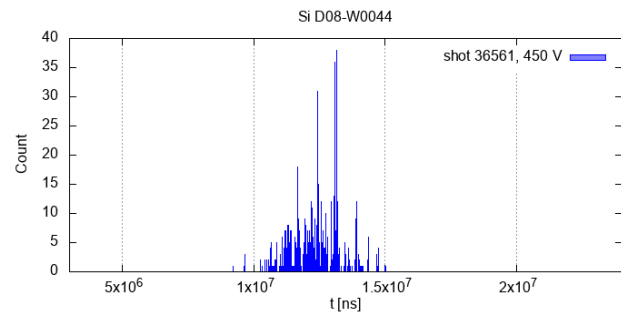
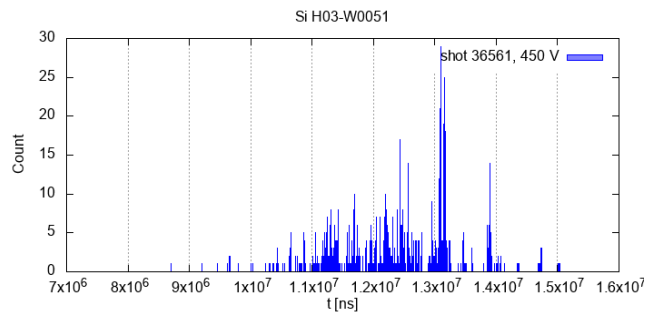
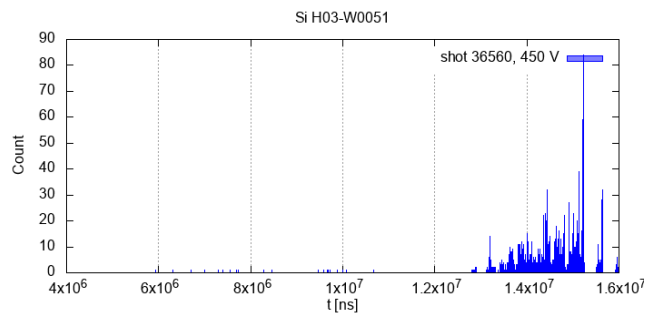
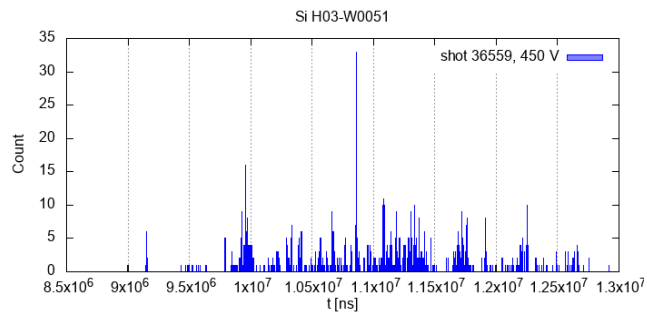


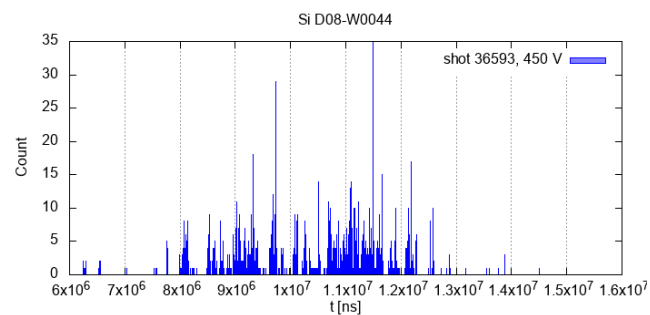
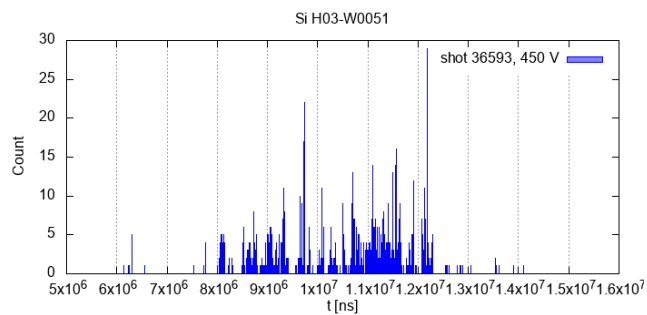
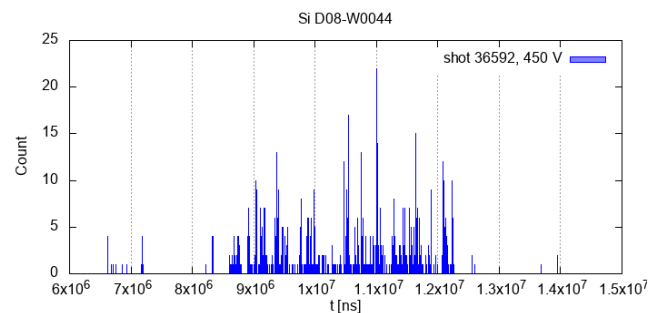
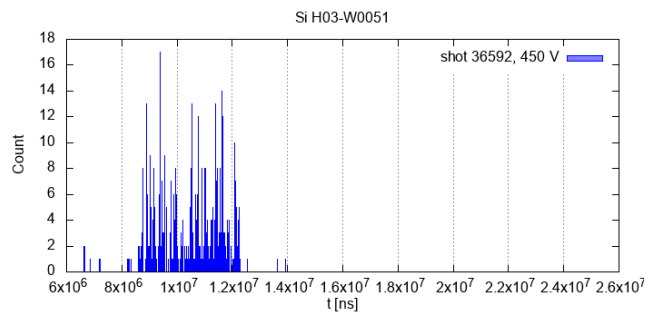
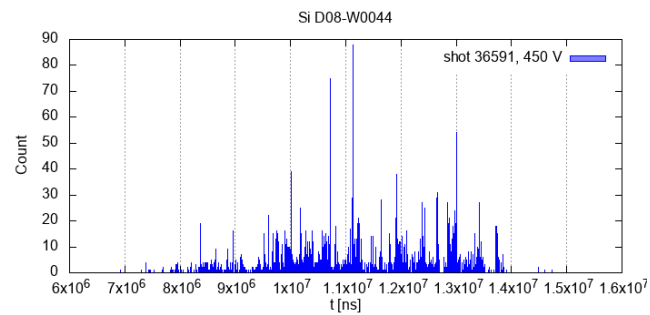
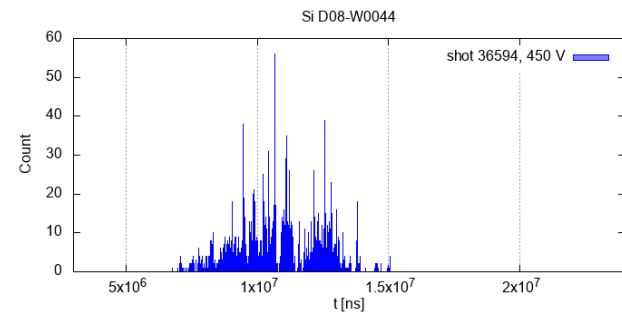
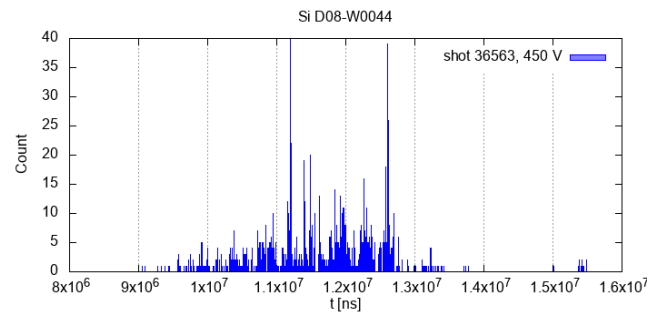
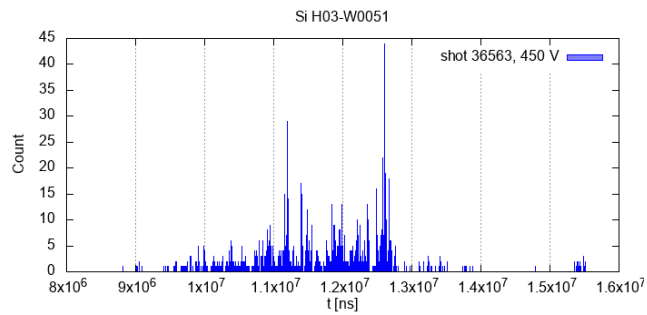


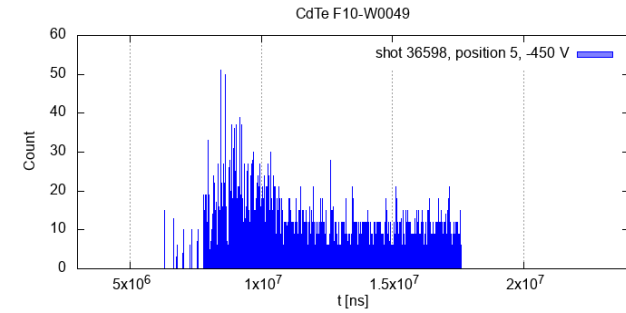
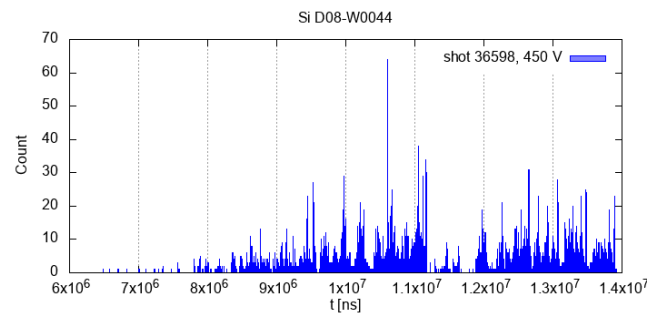
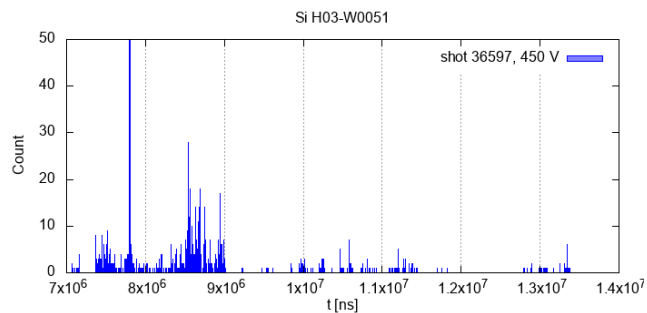
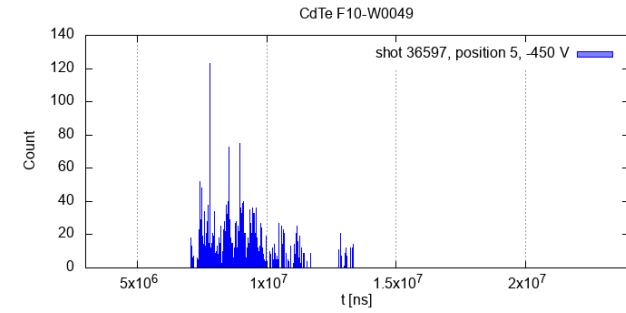
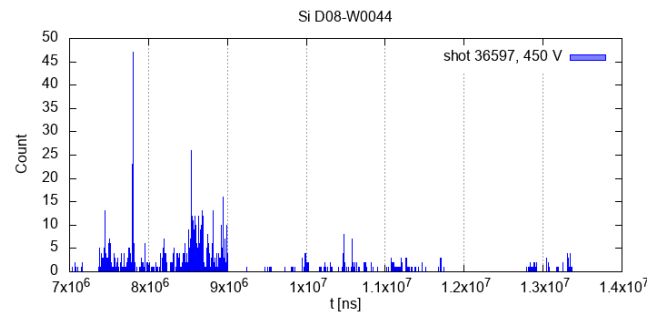
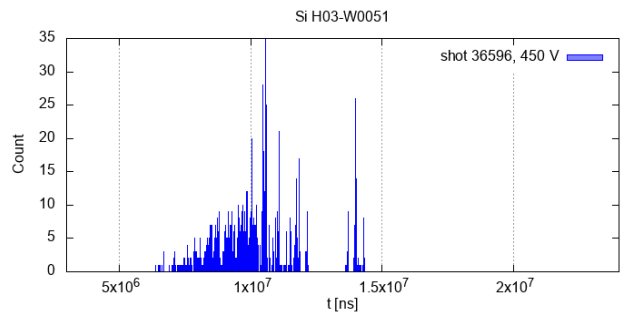
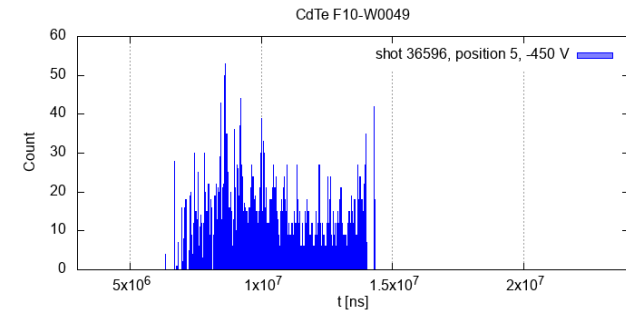
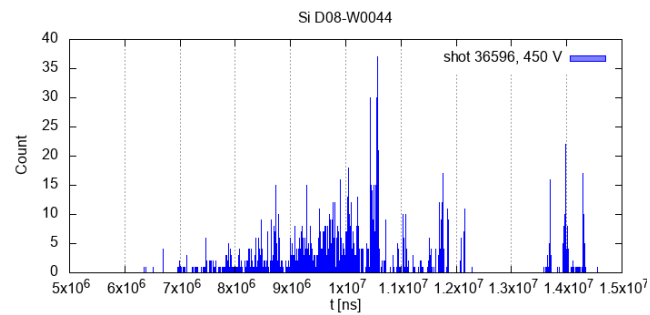
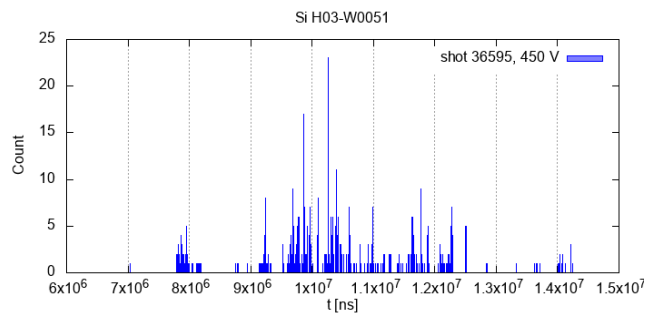
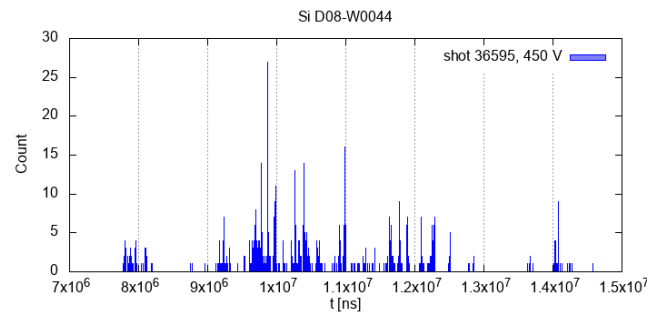
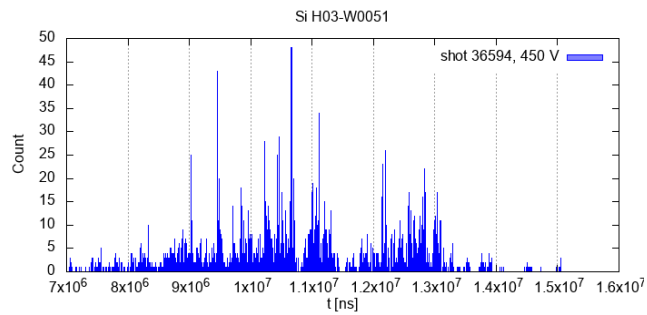


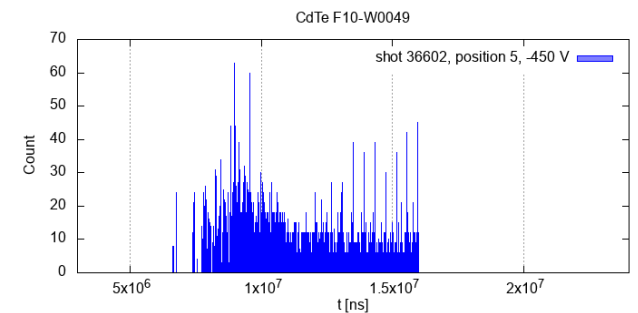
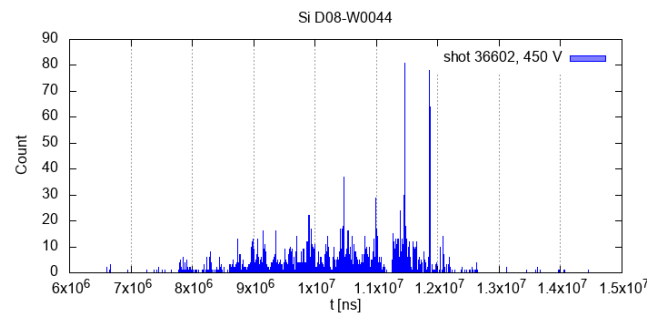
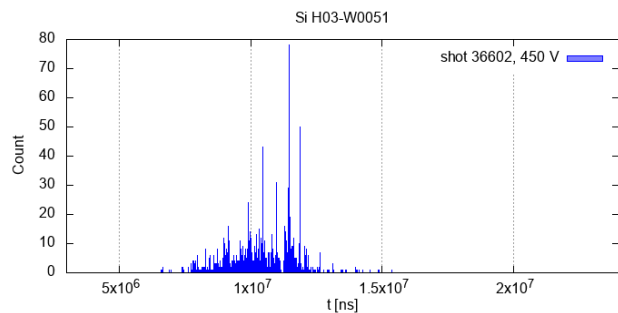
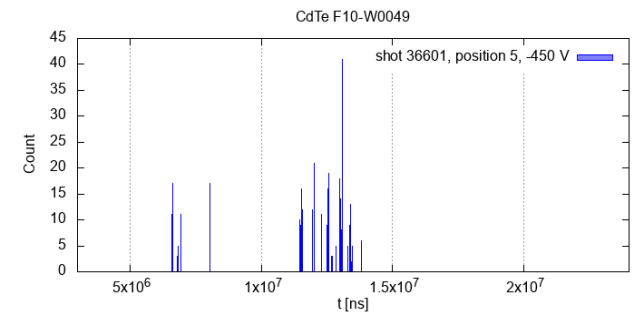
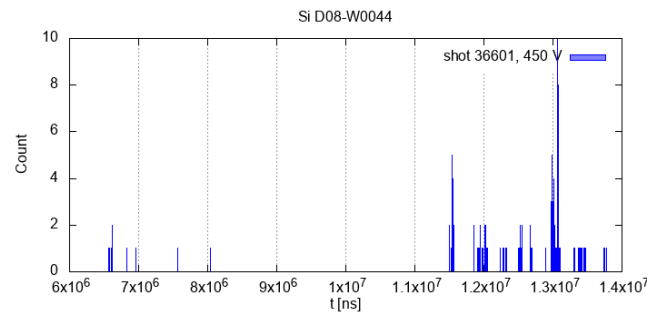
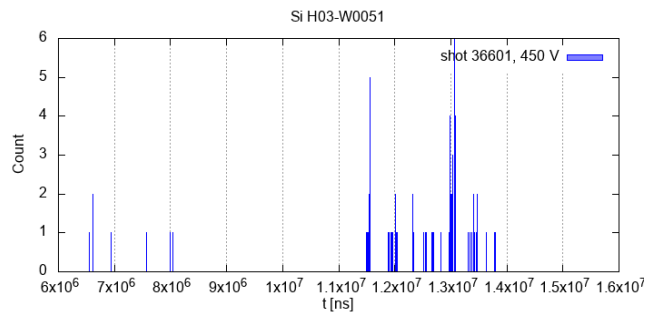
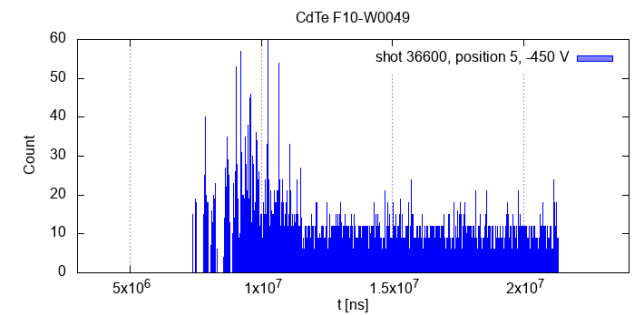
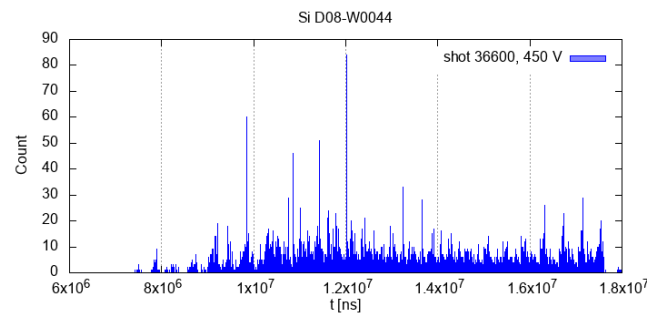
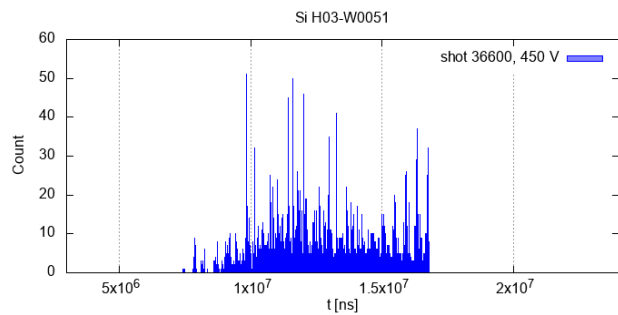
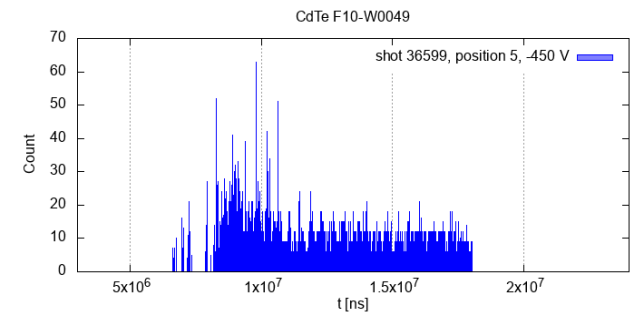
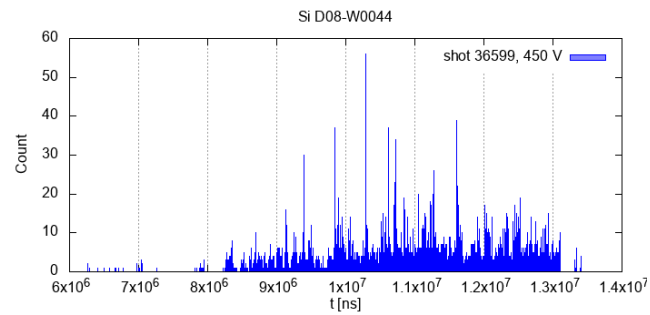
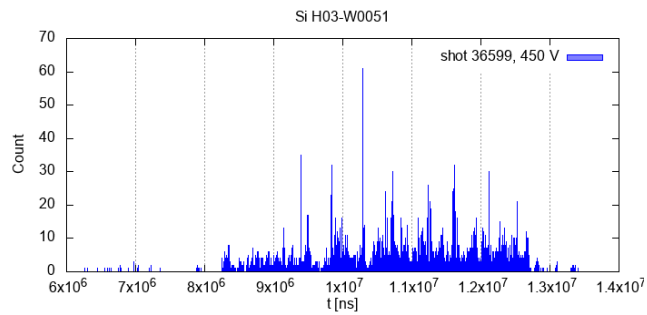








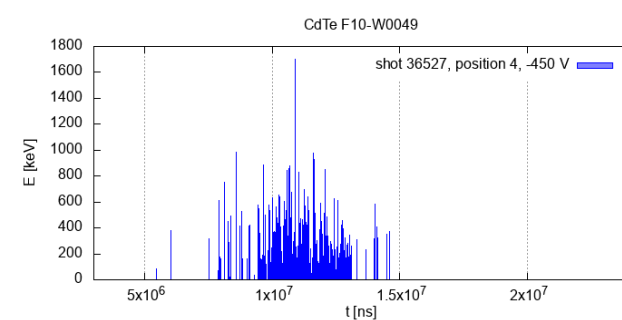
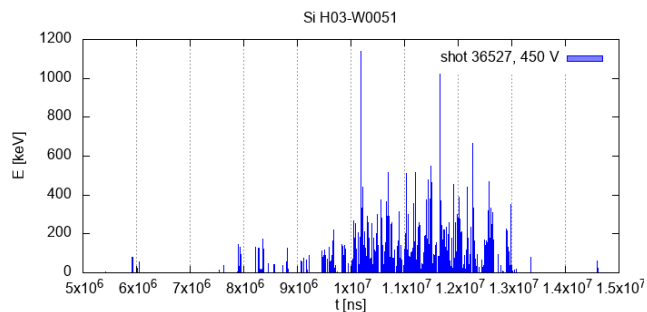
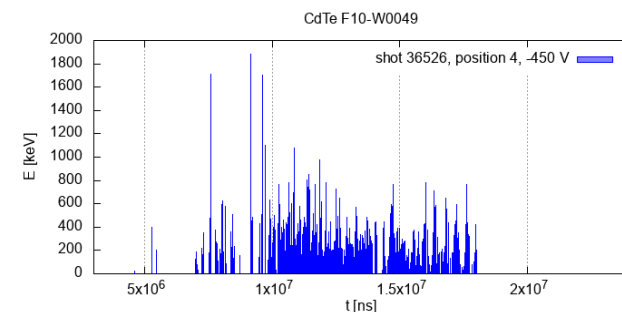
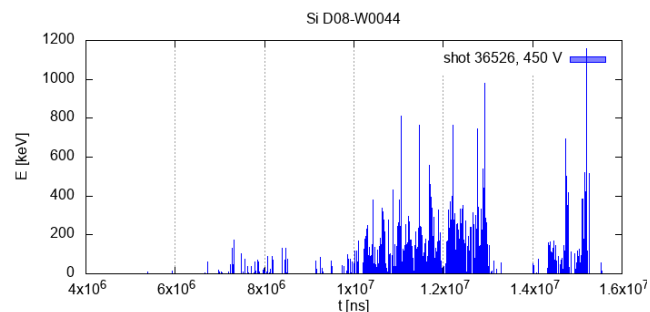
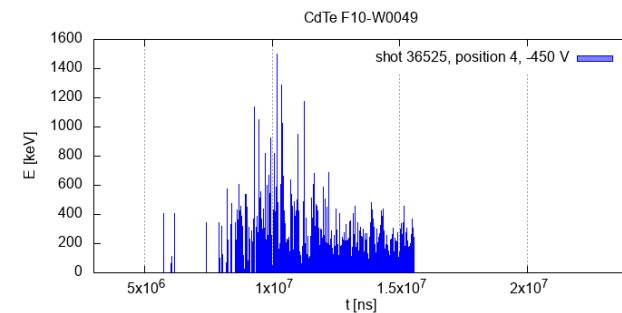
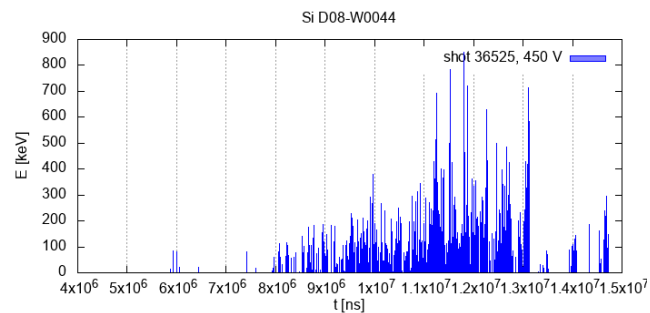
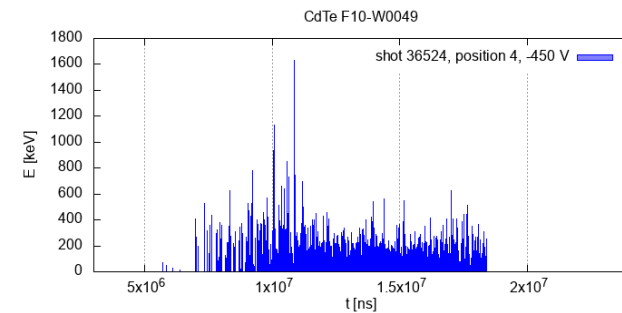
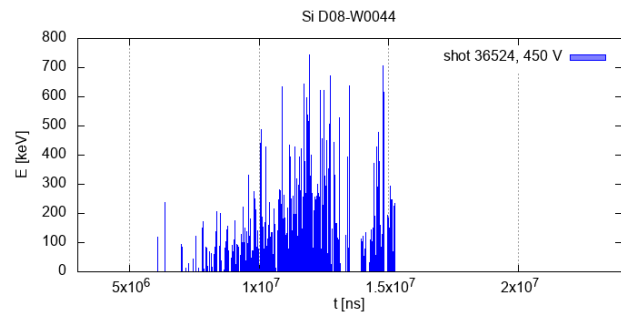
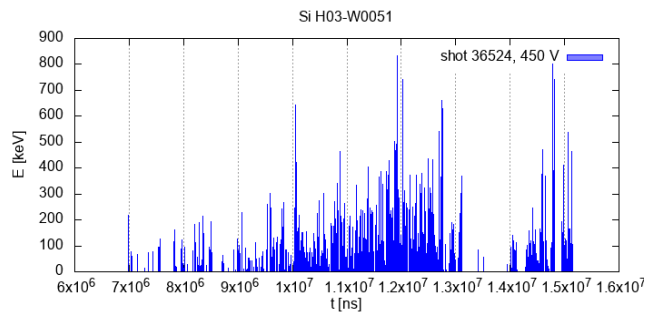


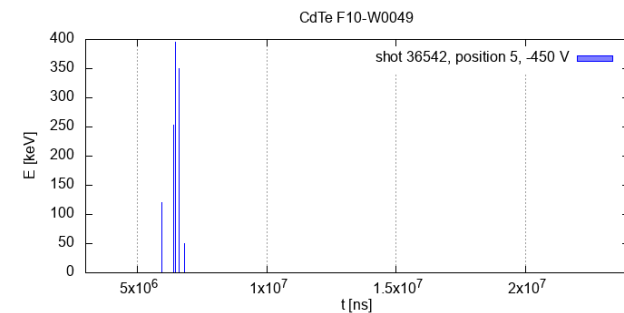
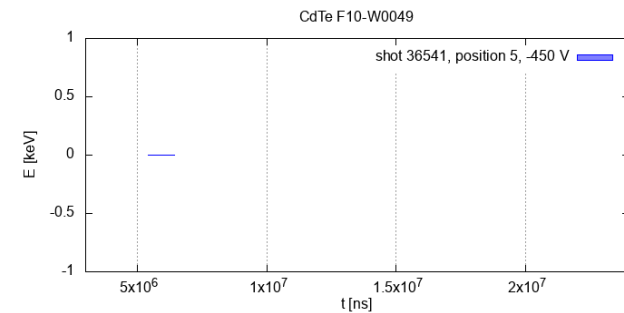
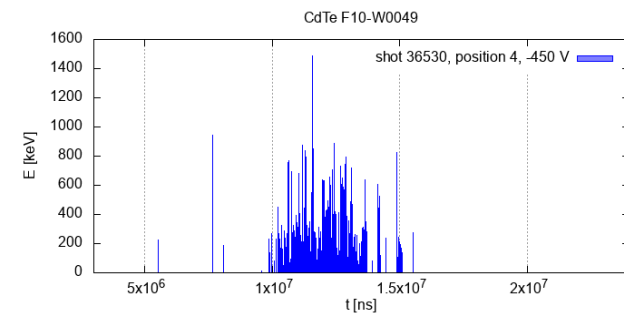
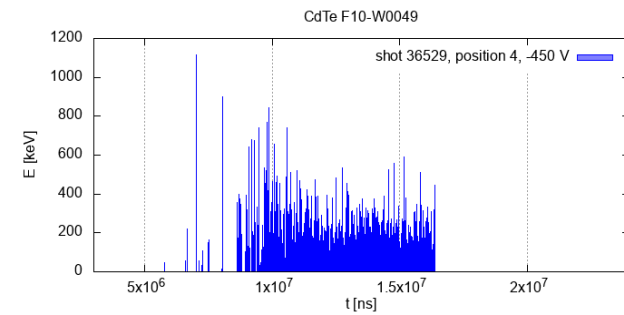
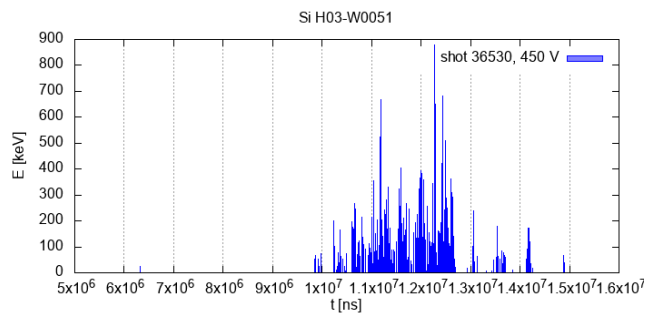
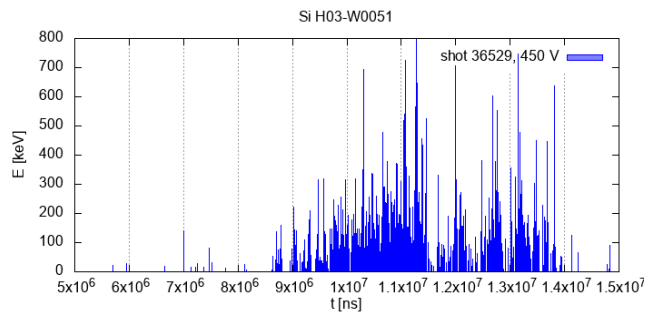


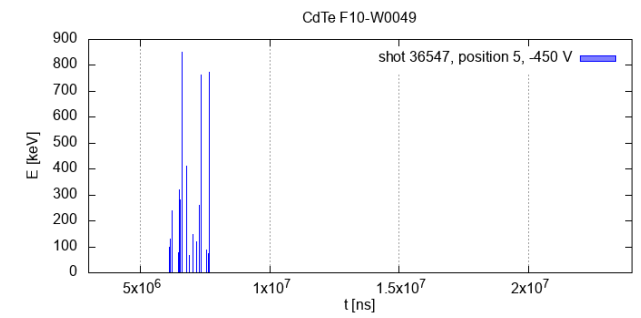
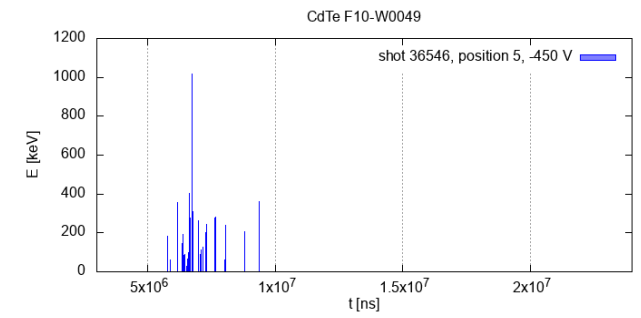
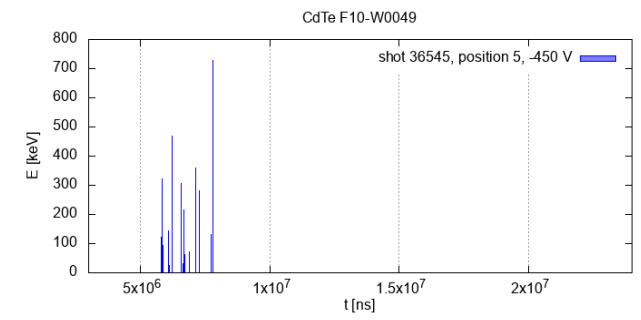
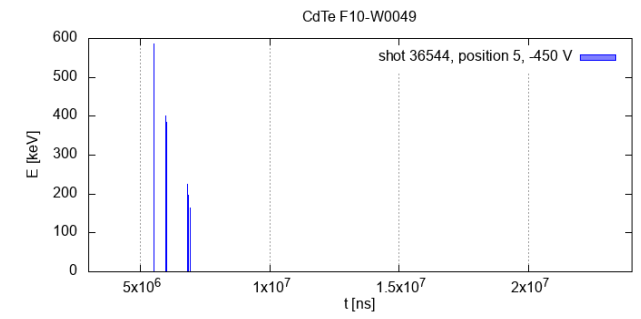
Příloha D

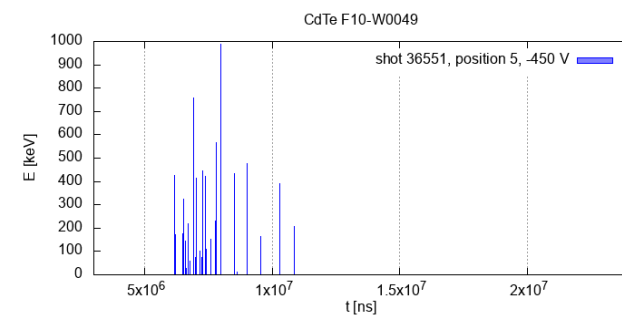
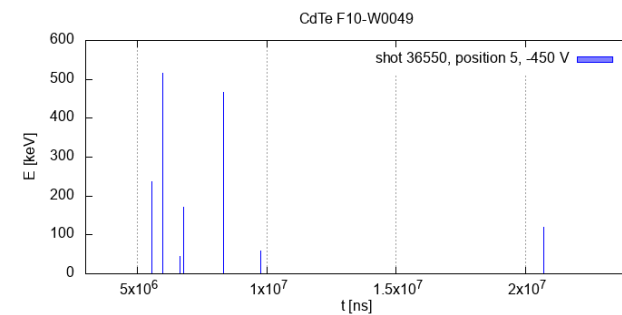
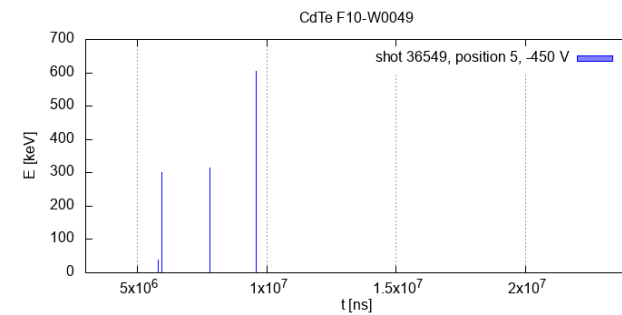
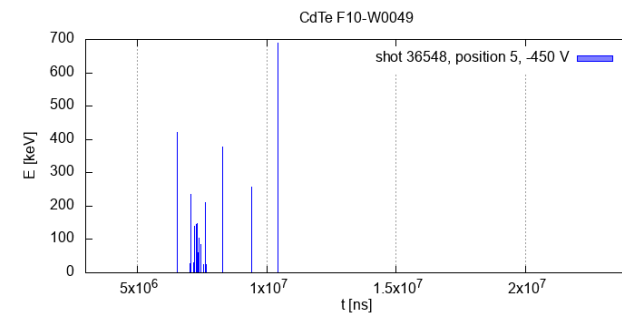
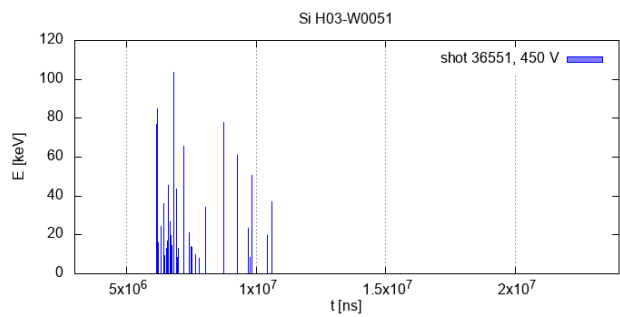
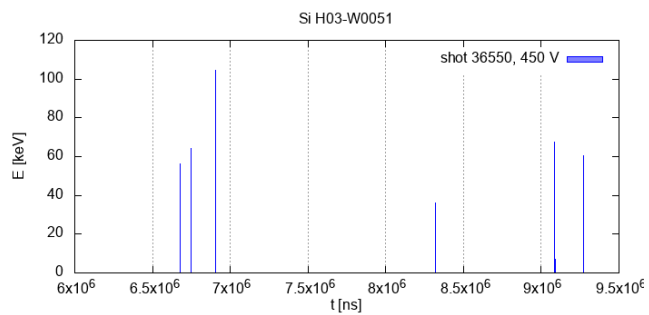
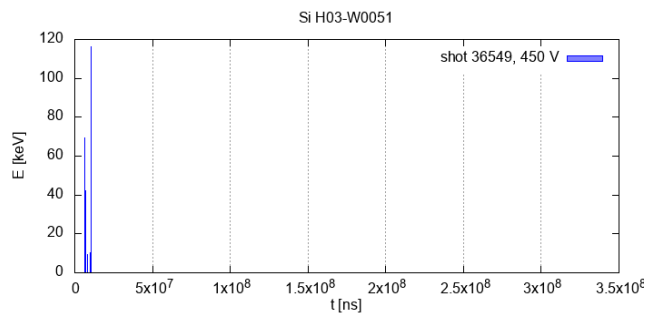
Časové vývoje energií detekovaných událostí během výbojů na tokamaku Golem

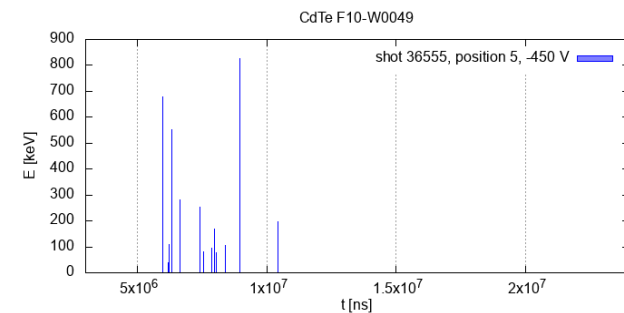
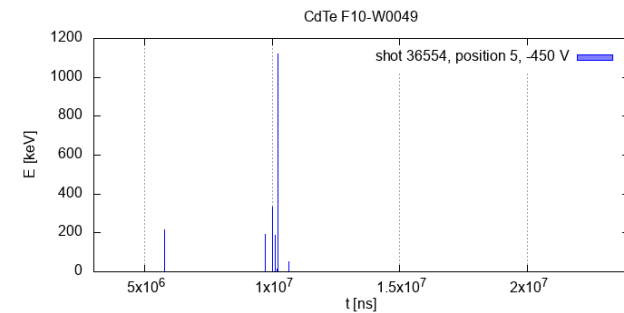
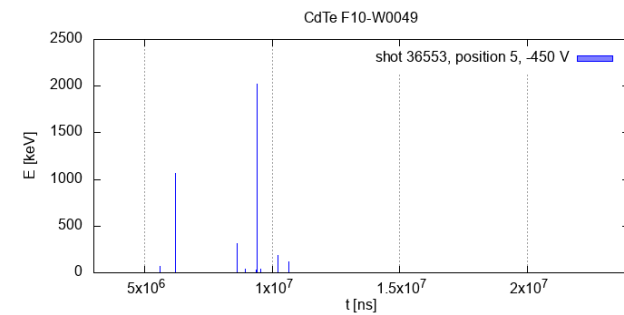
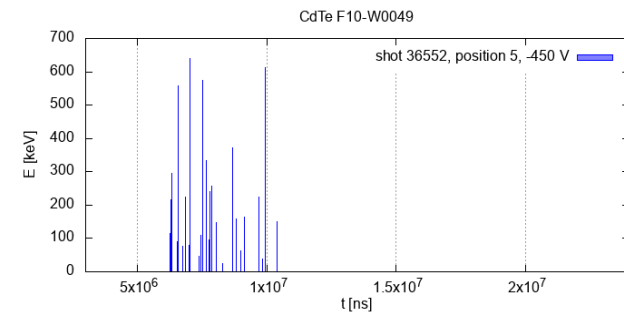
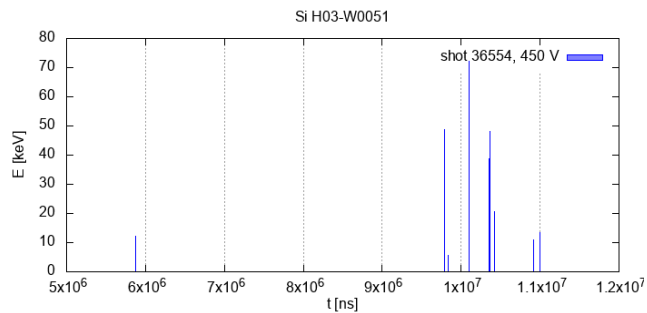
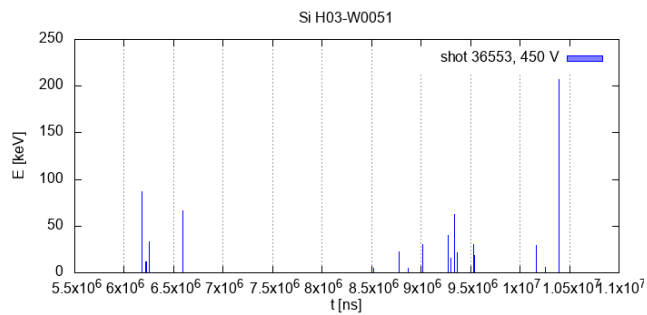
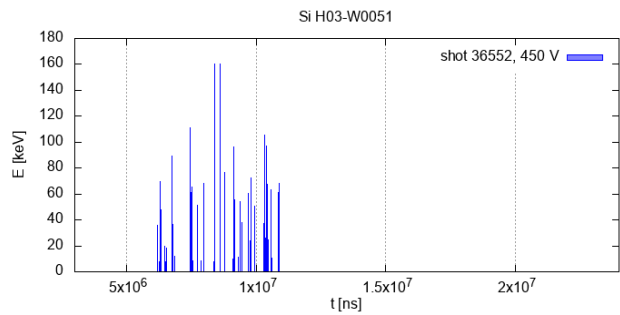
Zde jsou vloženy histogramy zobrazující časový vývoj energií detekovaných událostí ve 100 ns během výbojů na tokamaku Golem. Detekce probíhala polovodičovými pixelovými detektory s čipem Timepix3.

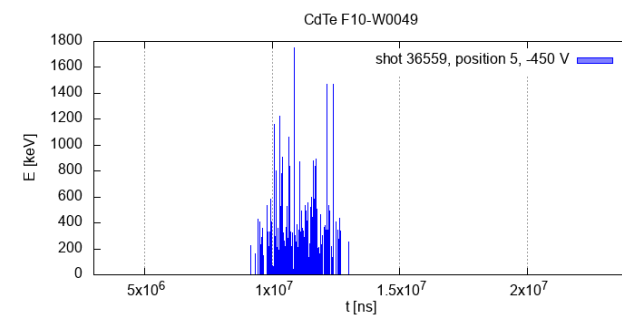
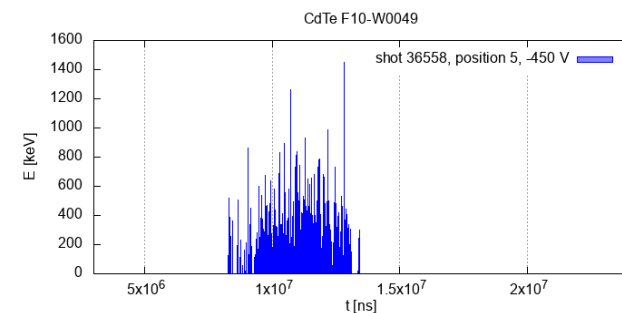
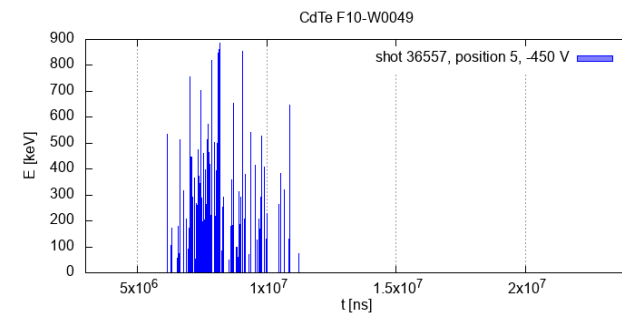
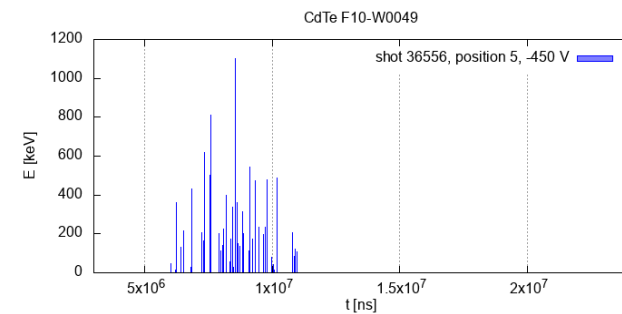
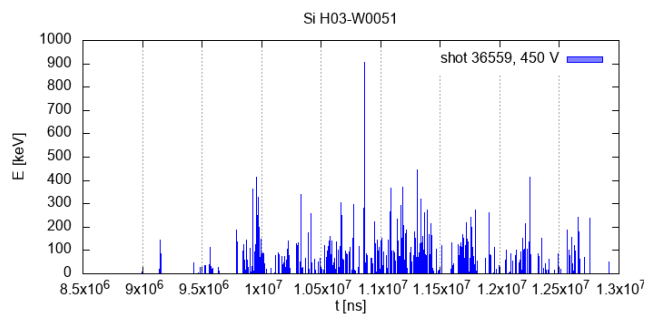
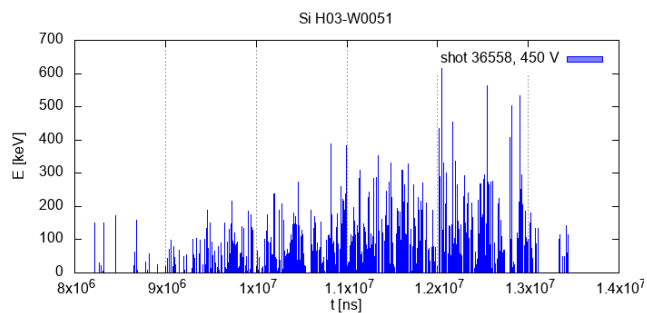
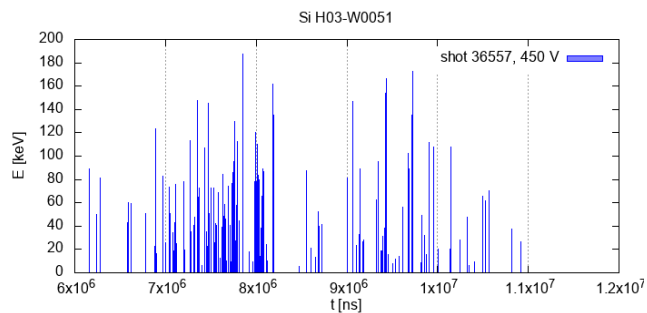


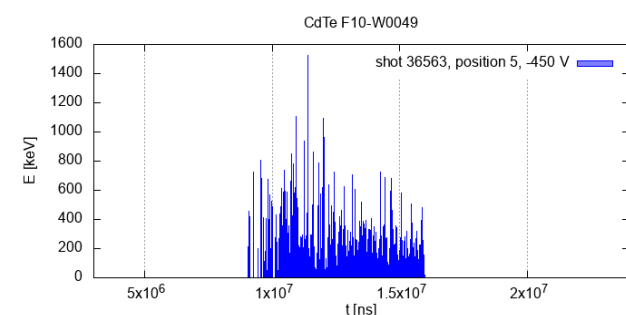
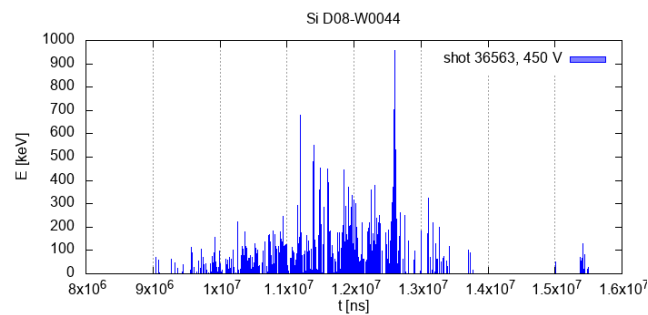
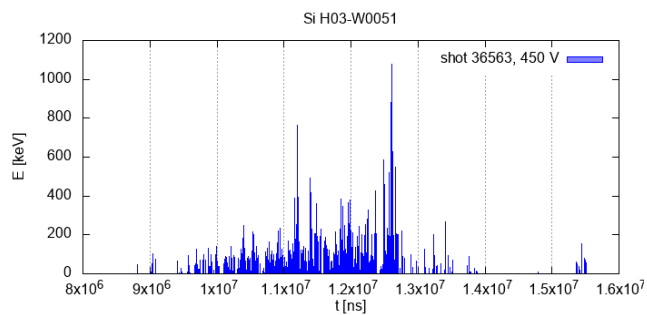
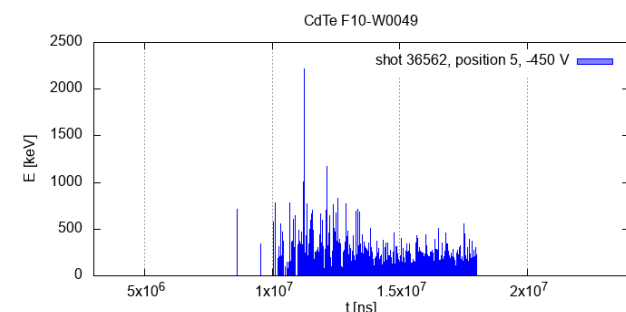
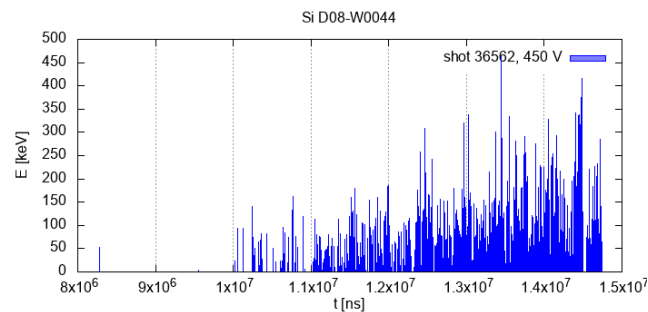
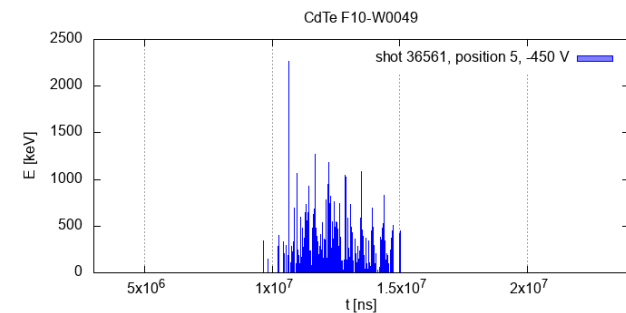
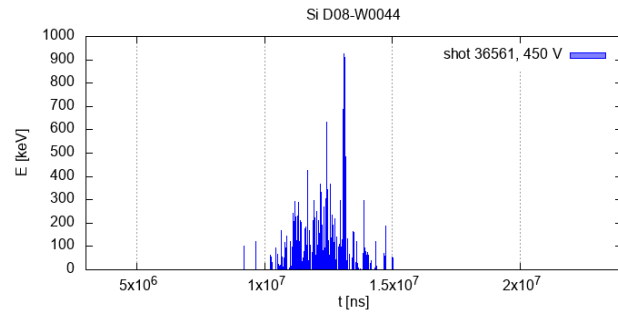
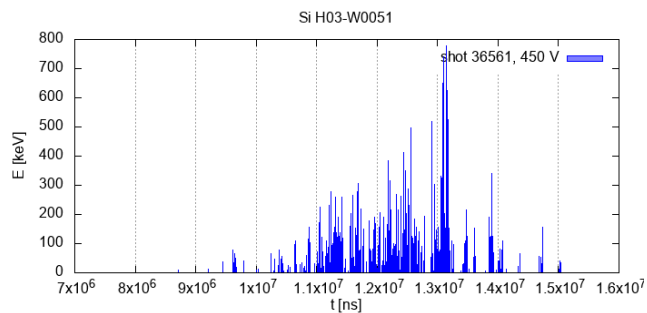
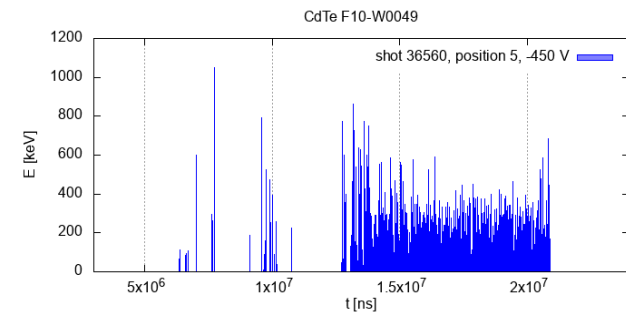
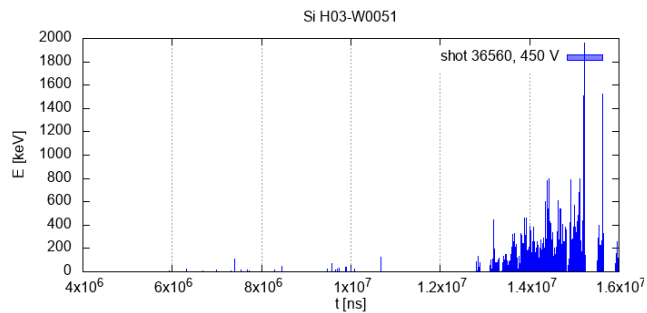


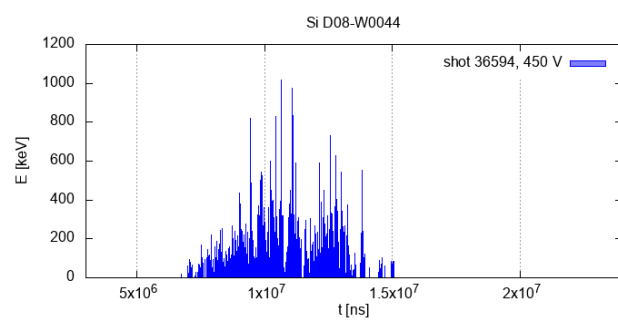
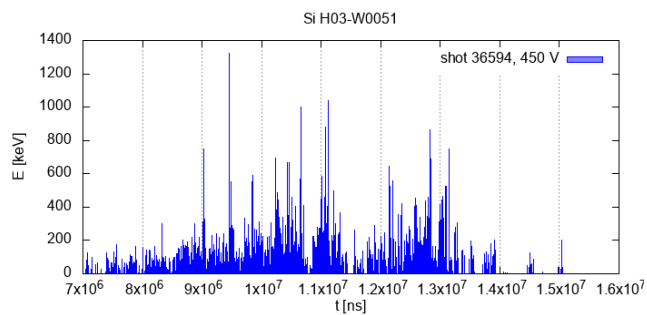
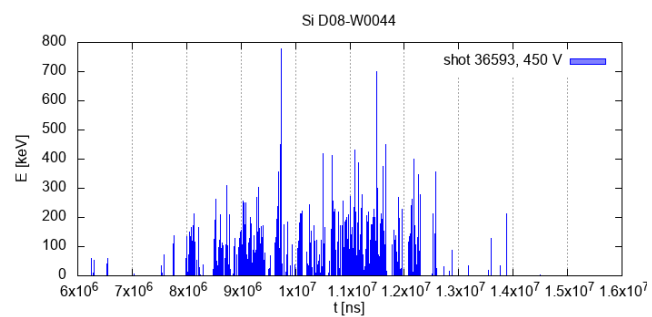
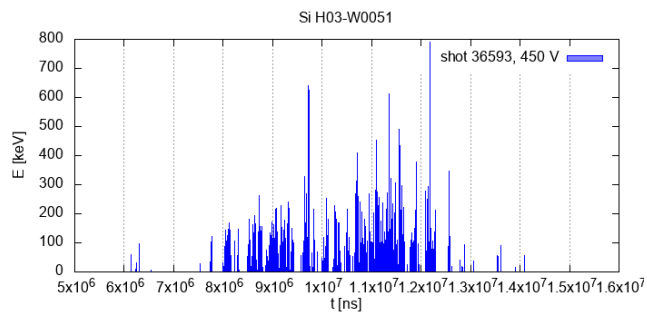
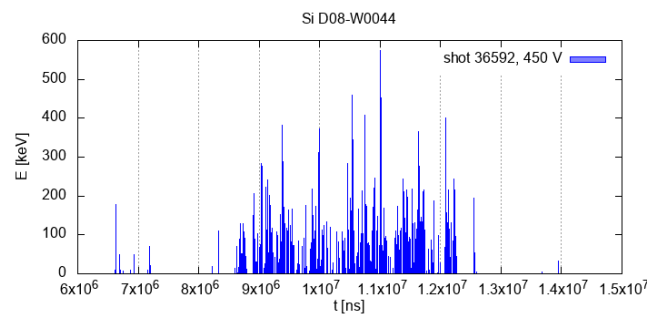
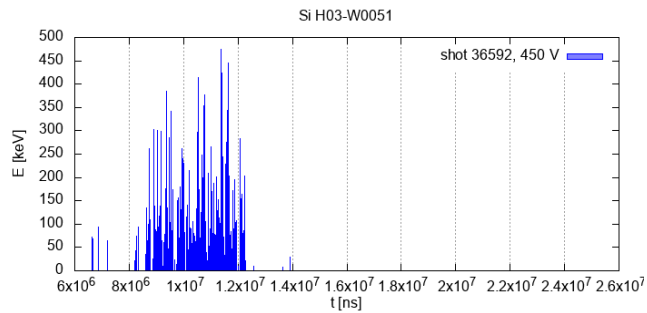
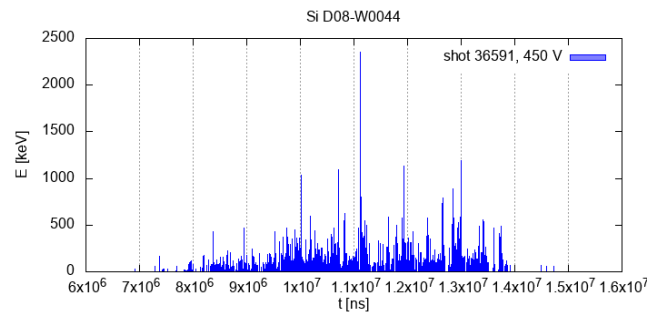


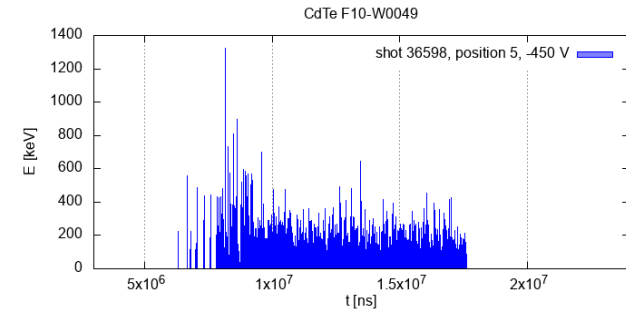
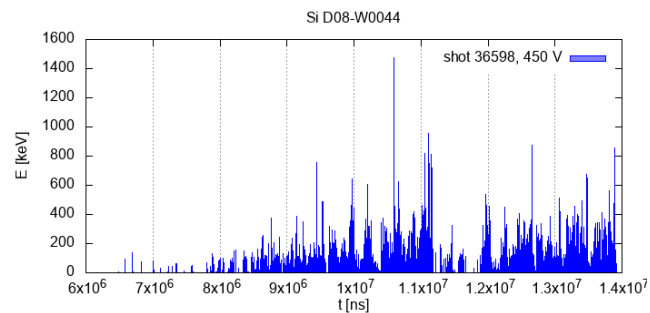
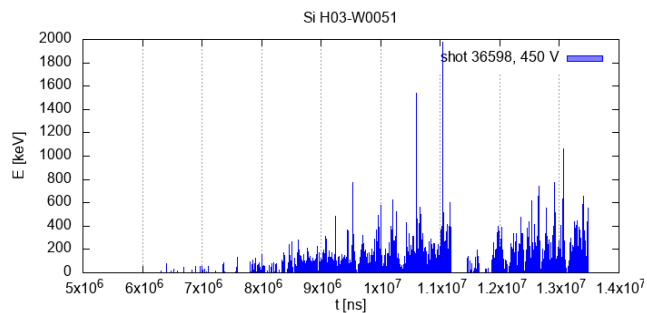
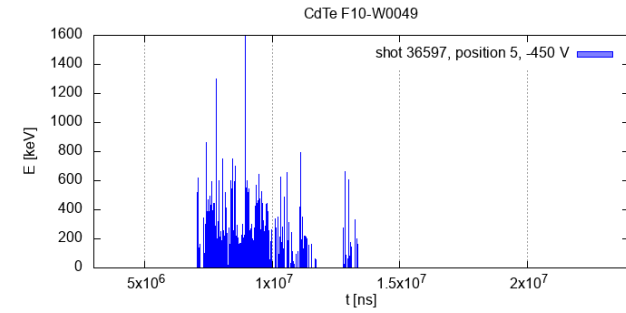
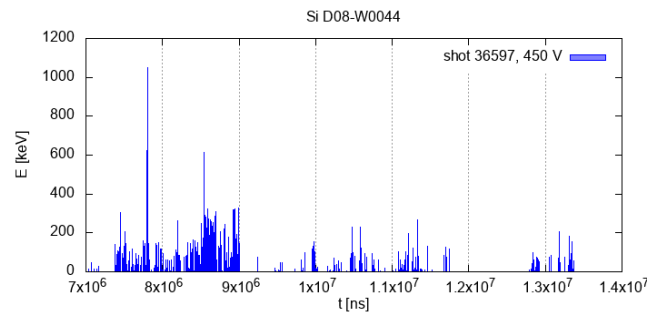
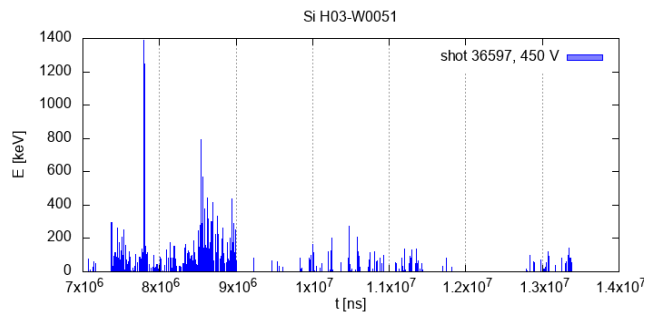
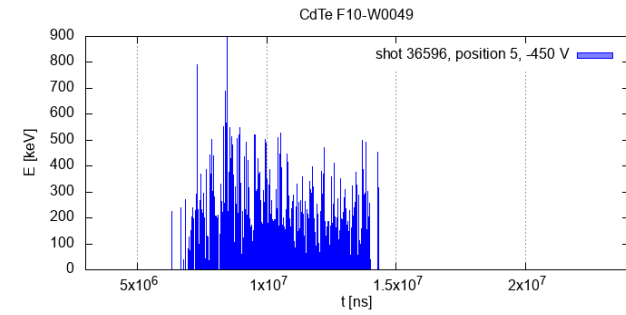
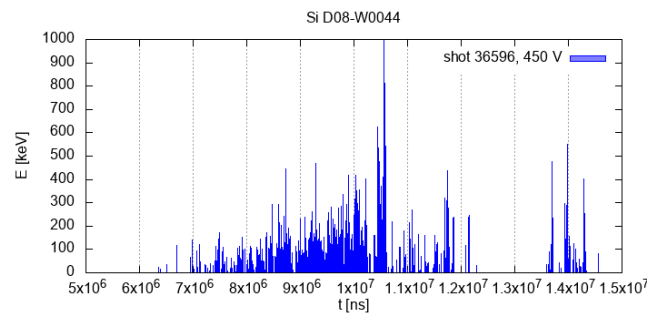
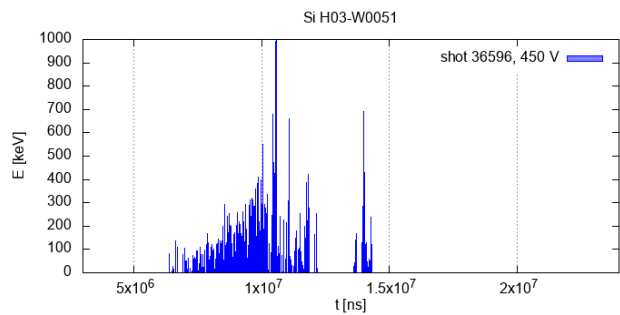
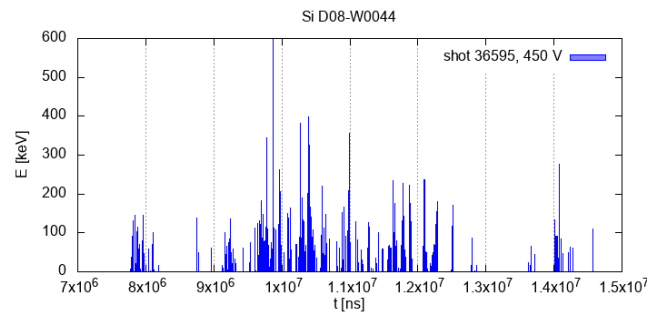
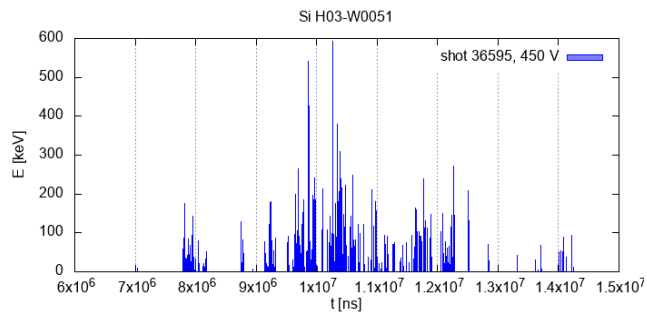


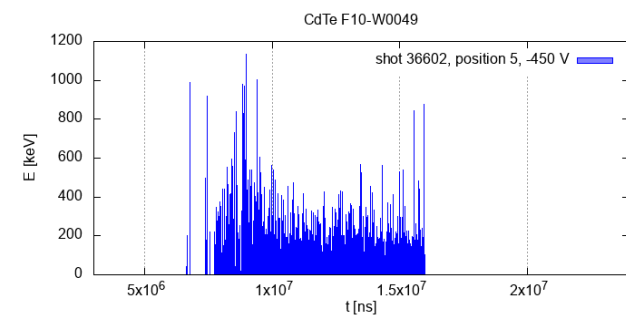
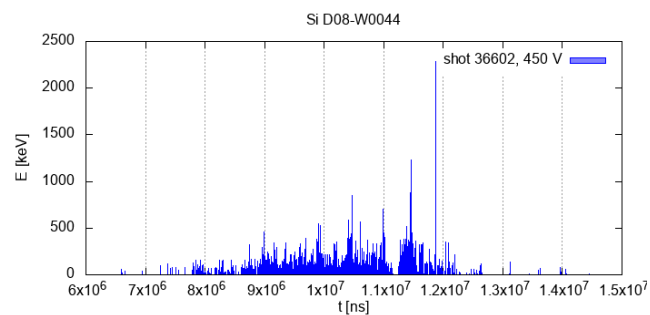
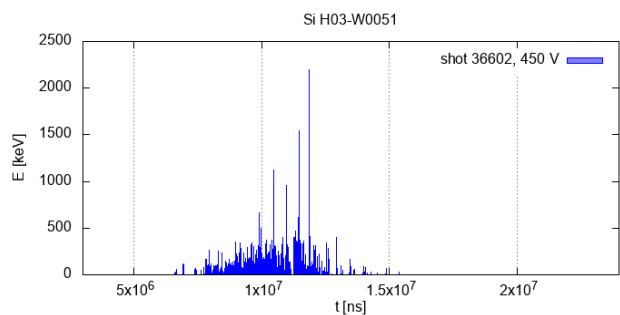
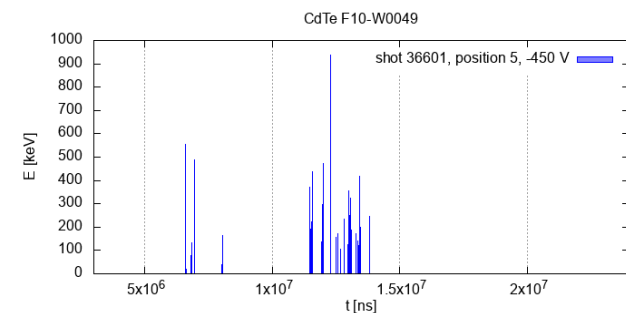
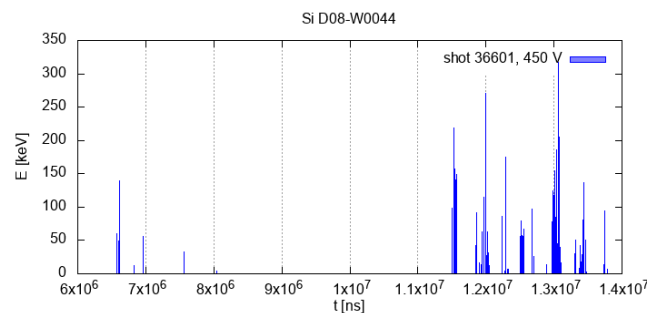
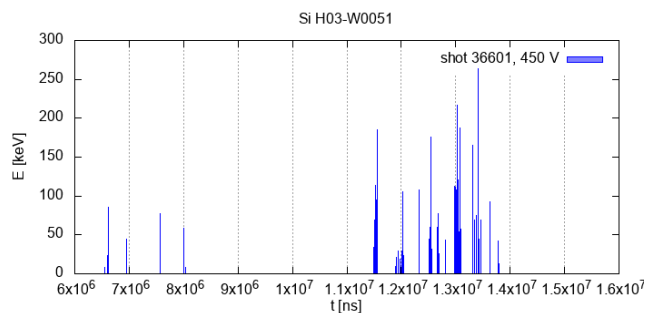
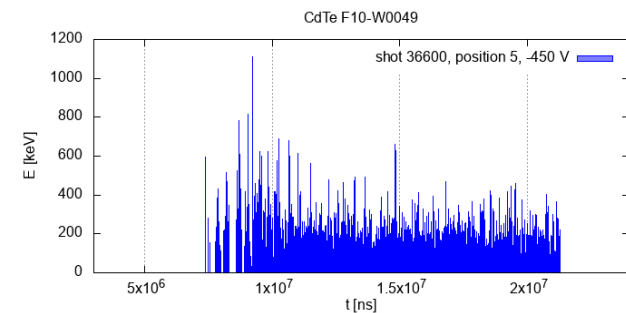
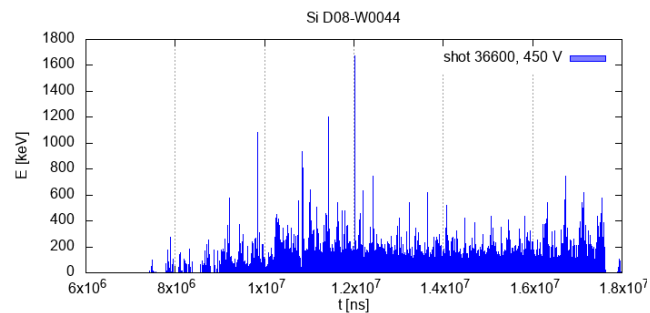
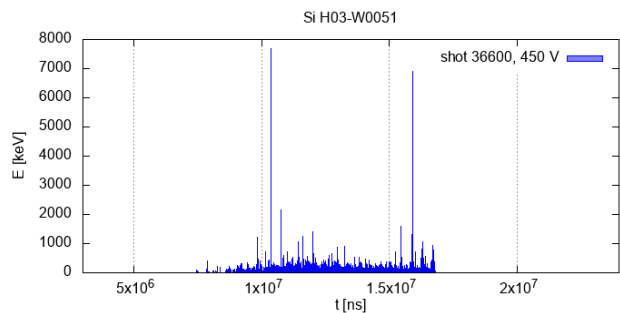
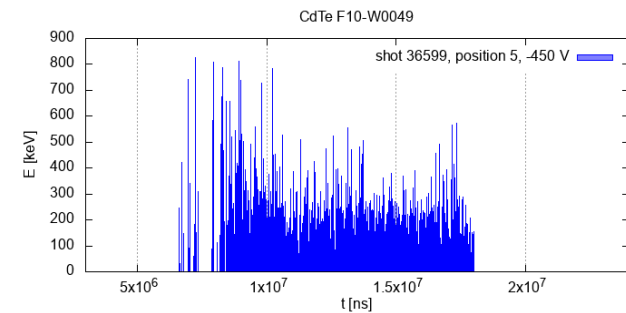
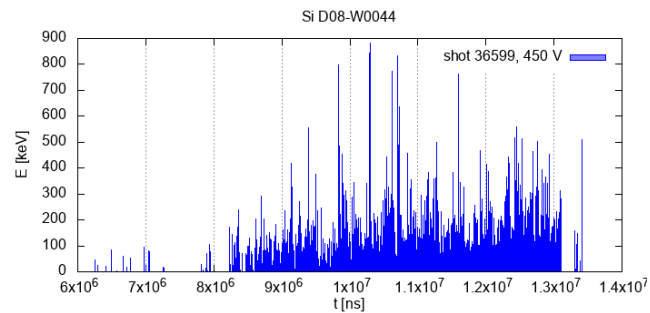
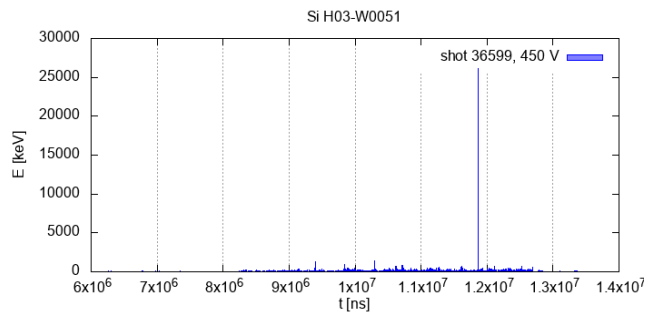








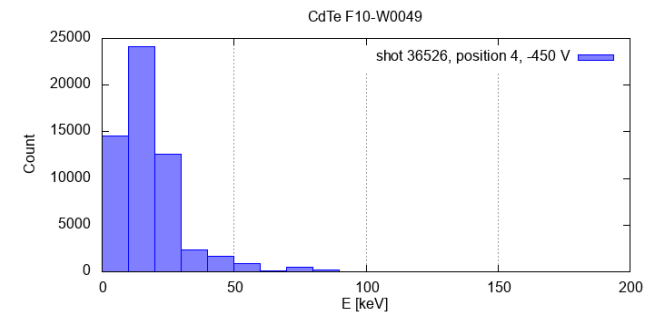
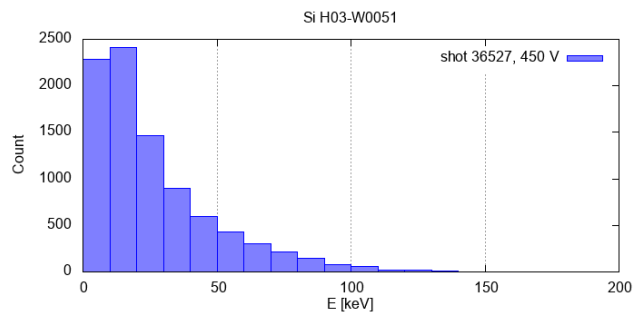
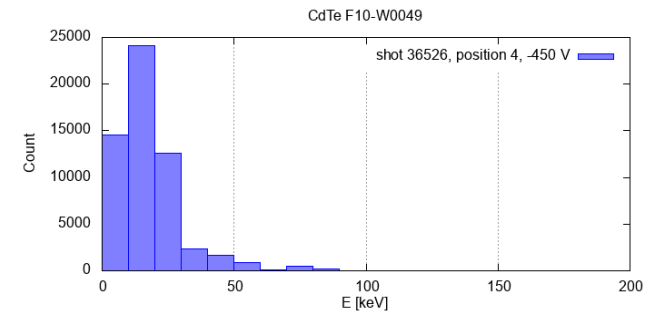
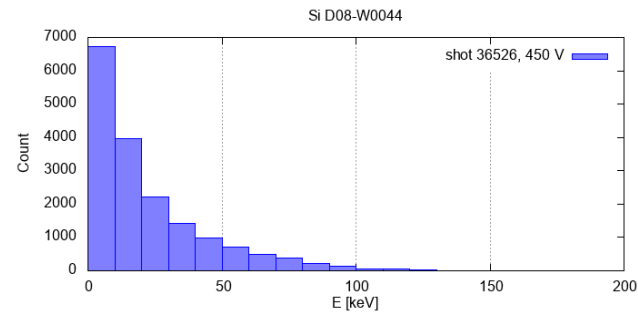
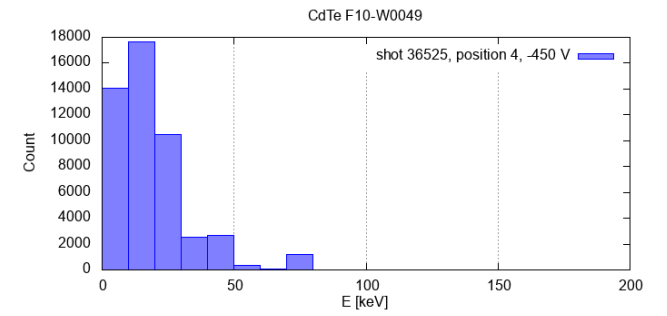
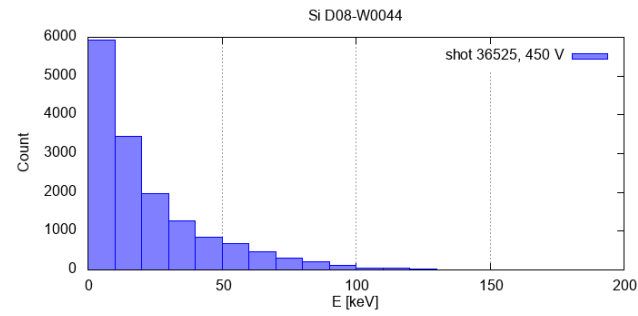
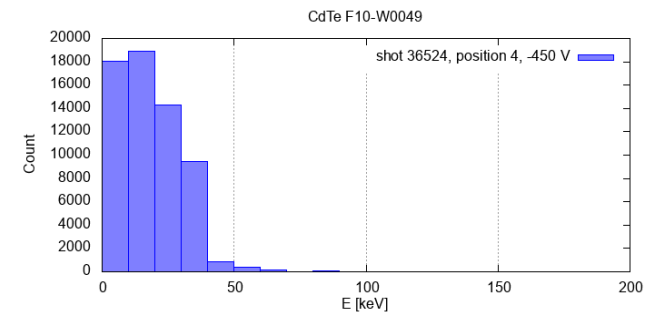
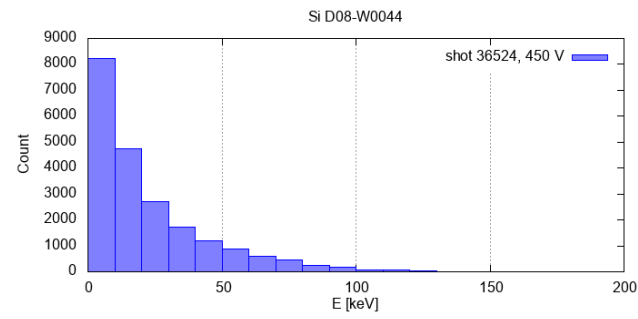
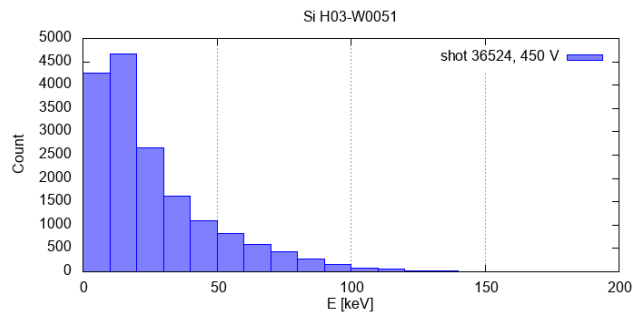


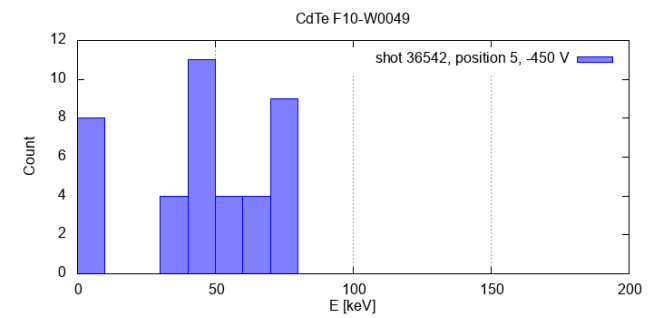
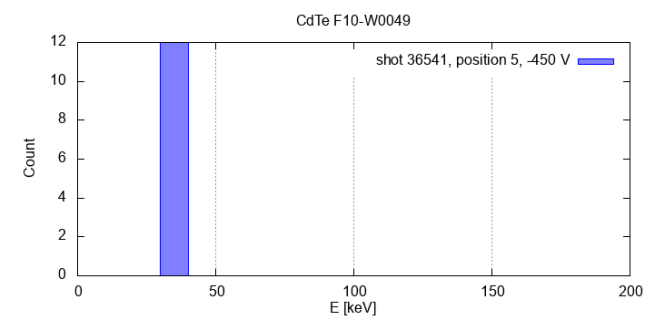
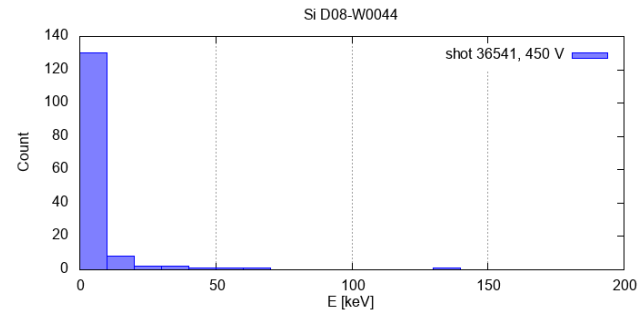
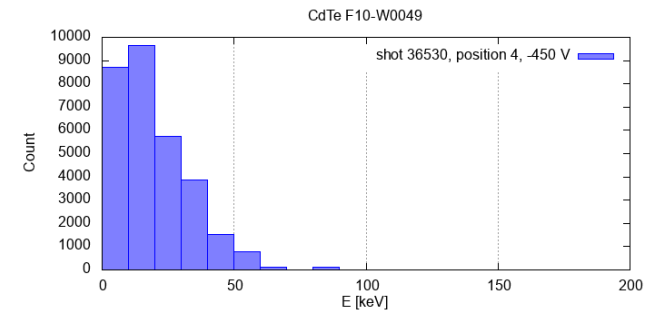
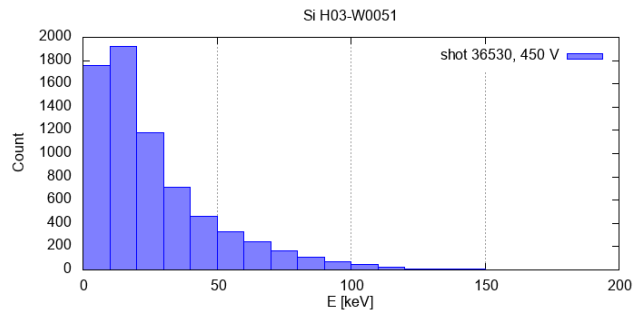
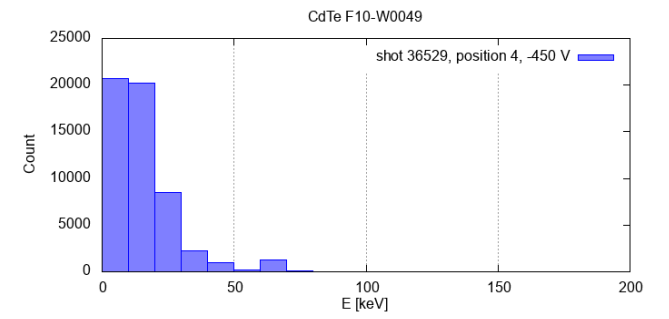
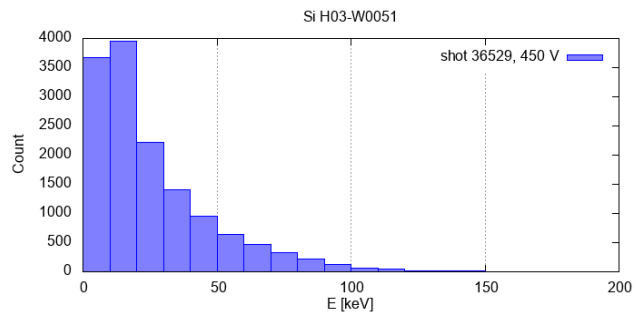


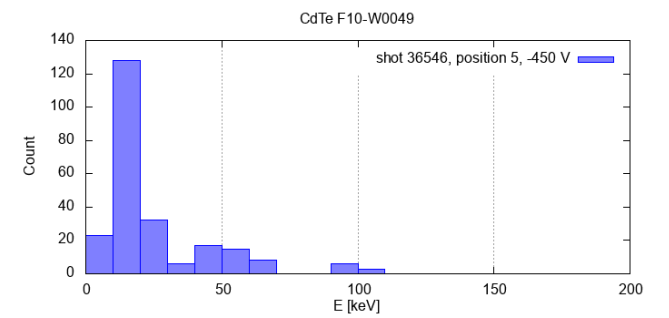
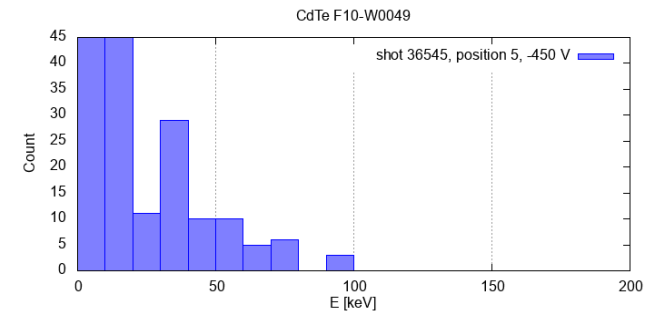
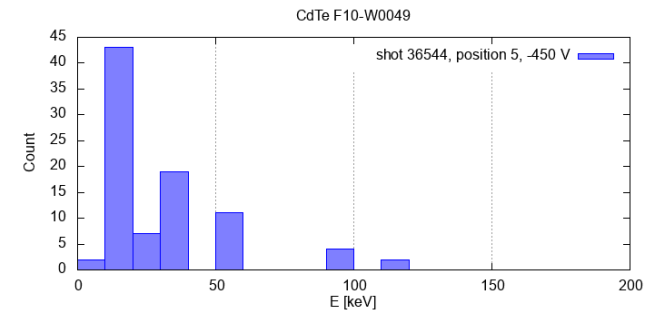
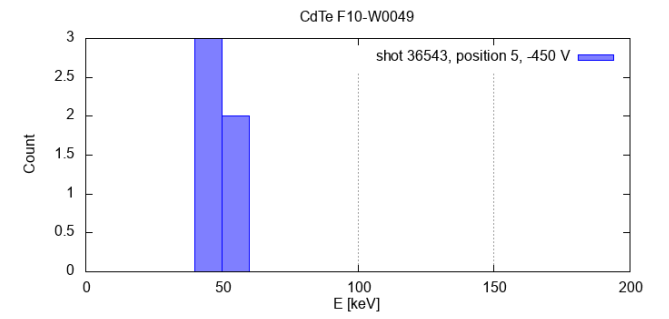
Příloha E

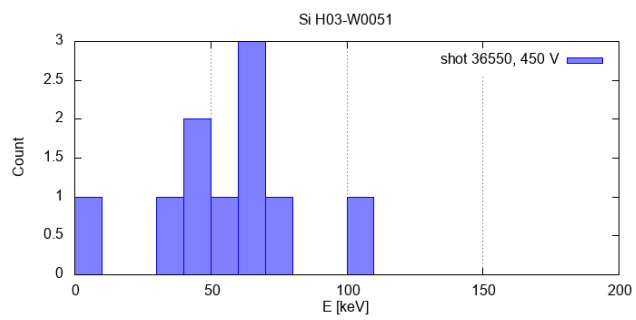
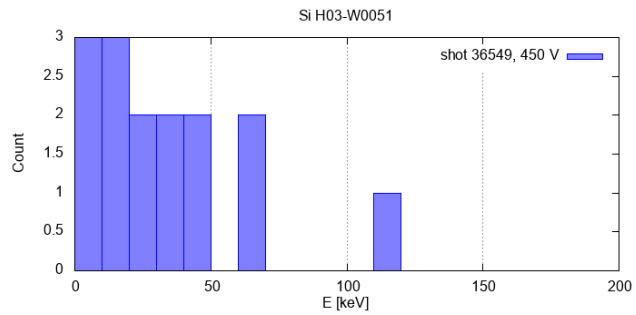
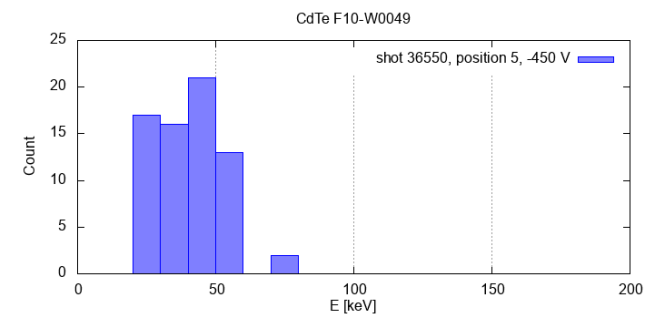
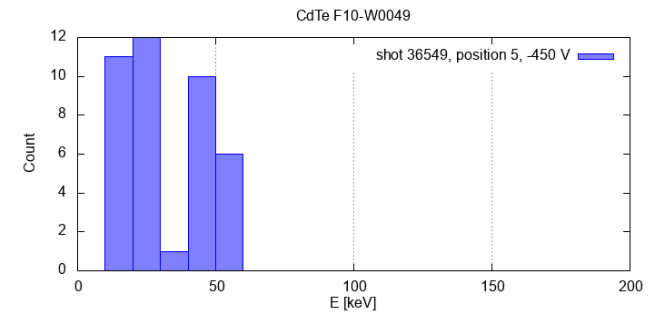
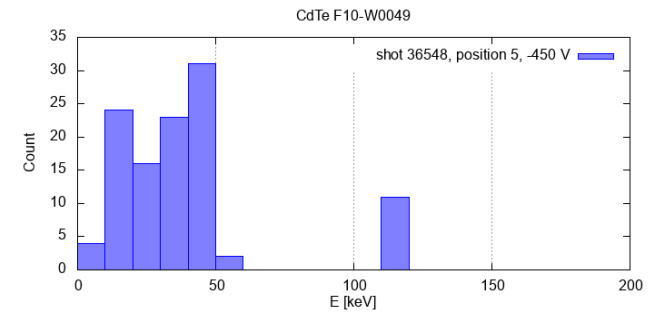
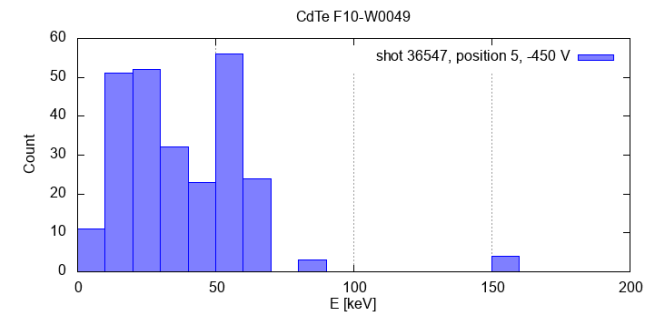
Energetická spektra detekovaných událostí při výbojích na tokamaku Golem

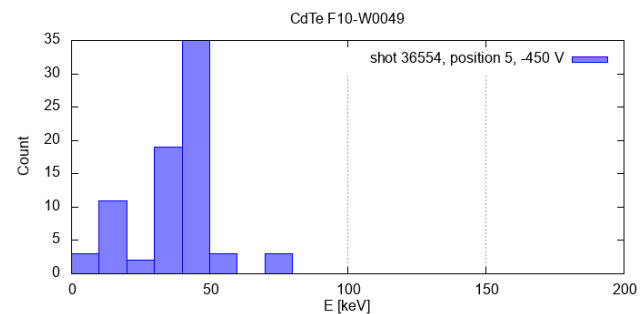
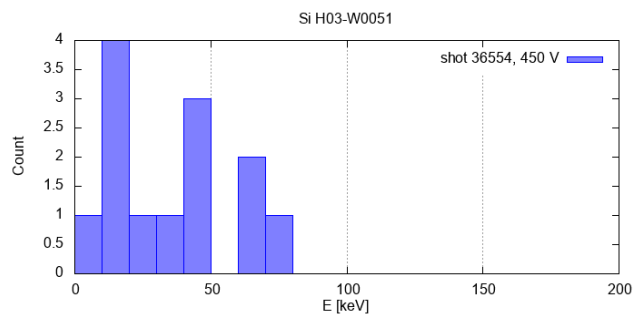
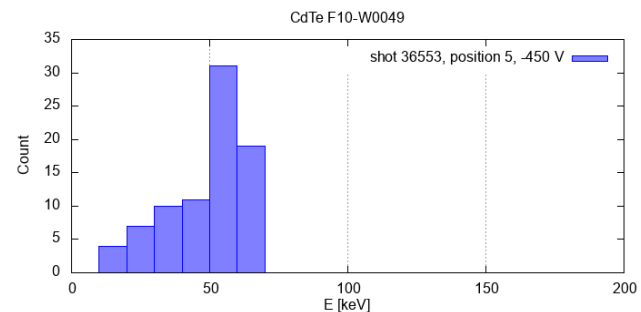
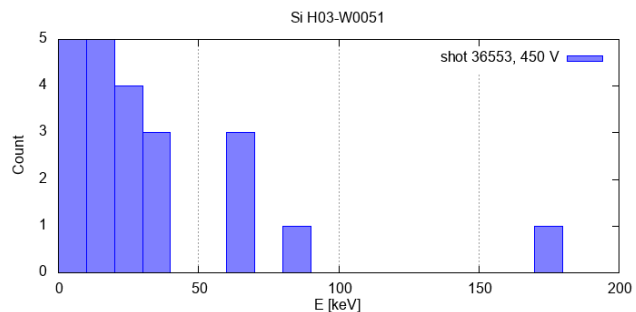
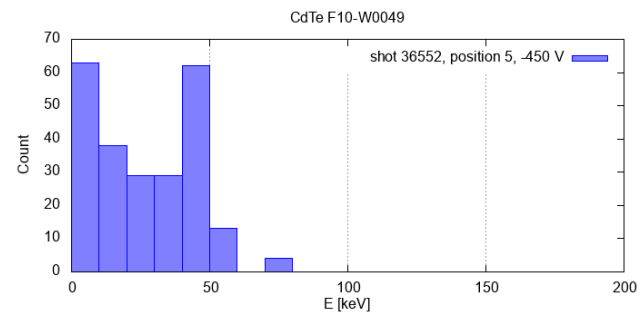
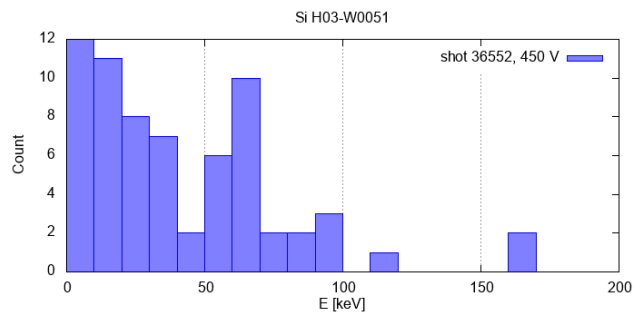
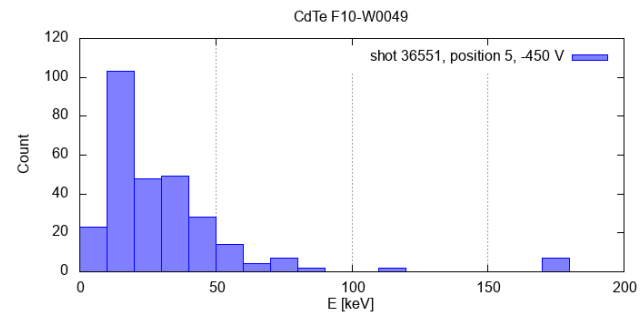
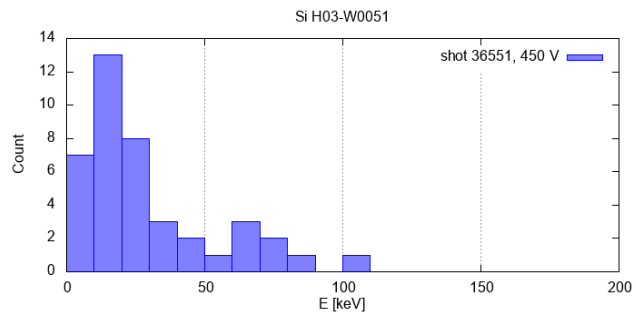
Zobrazení spekter detekovaných energií událostí z jednotlivých výbojů na tokamaku Golem. Detekce byla prováděna polovodičovými pixelovými detektory s čipem Timex3. Jeden bin má šířku 10 keV.

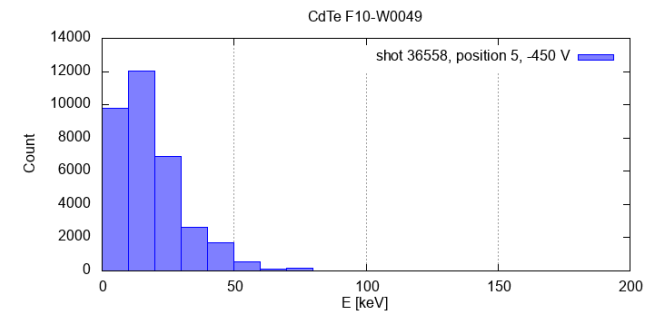
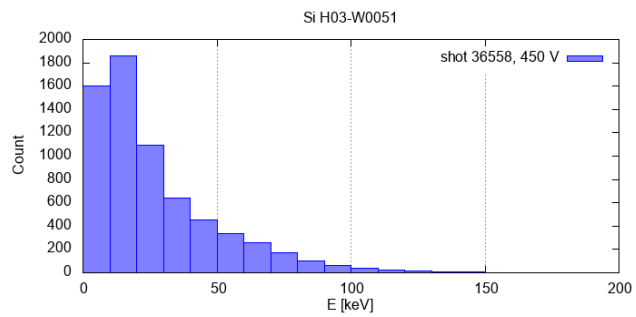
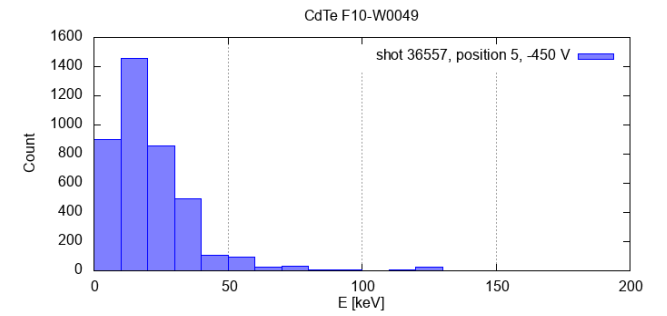
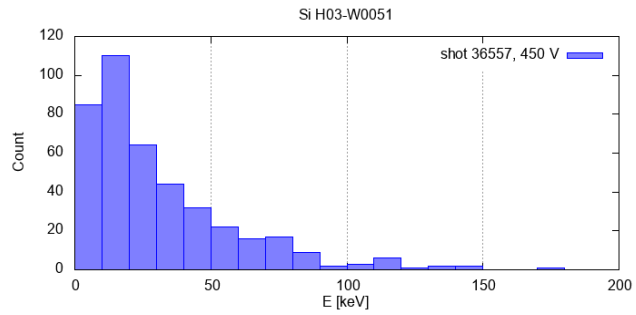
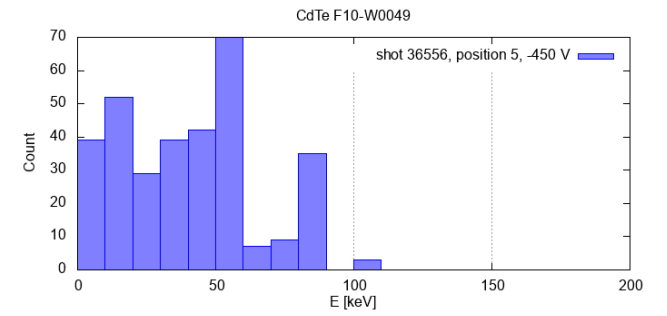
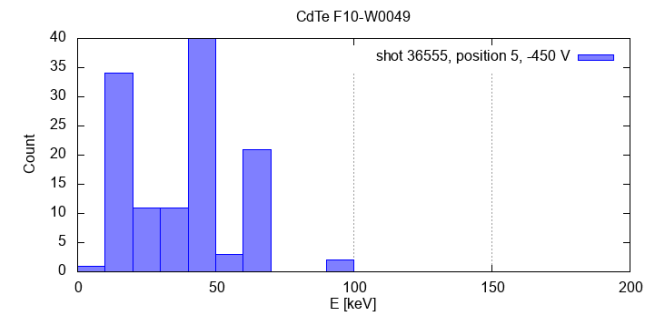


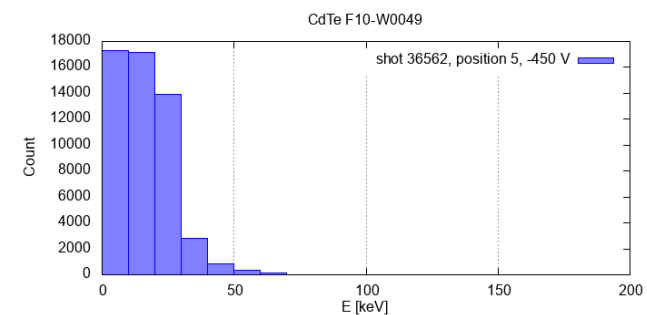
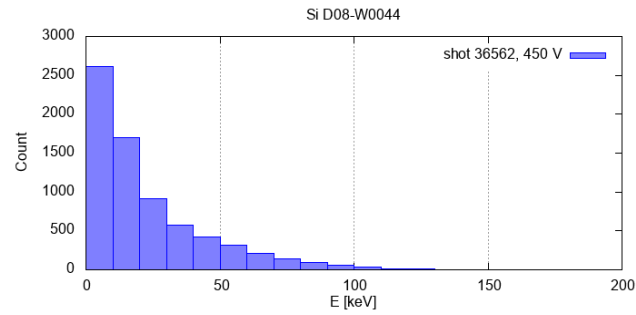
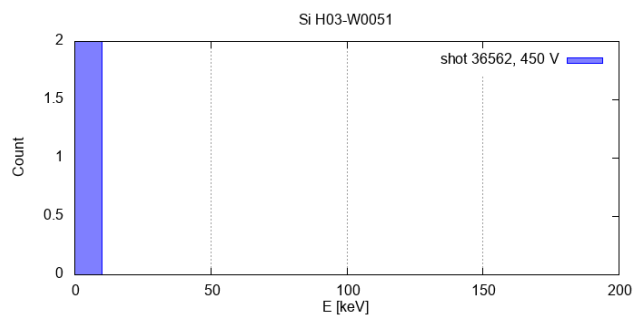
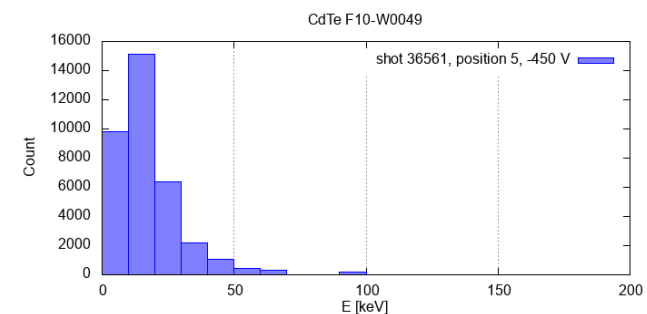
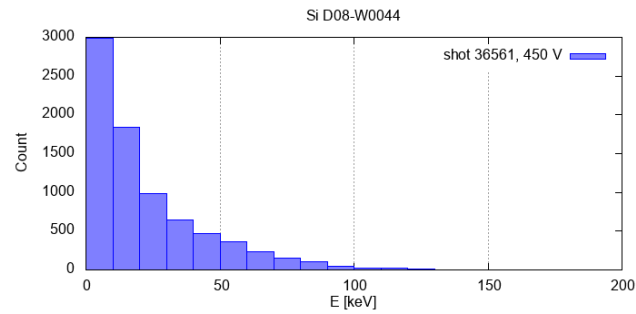
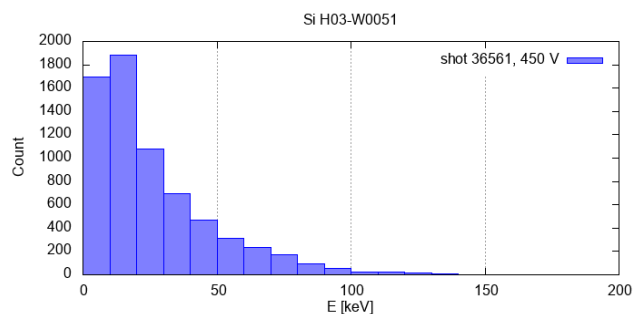
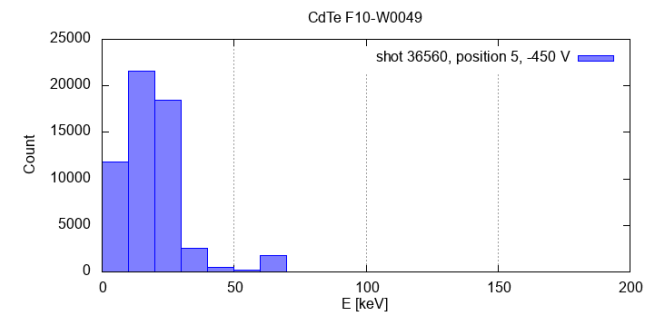
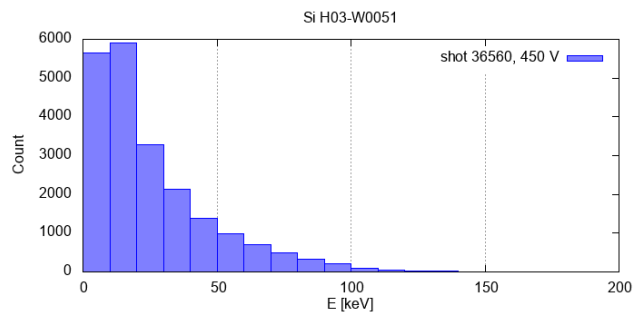
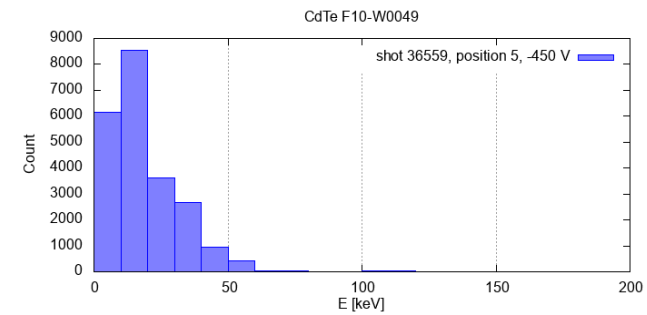
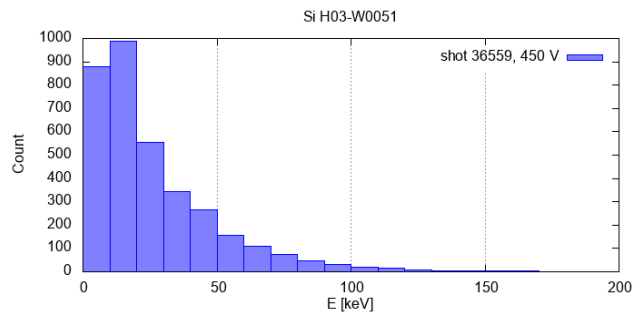


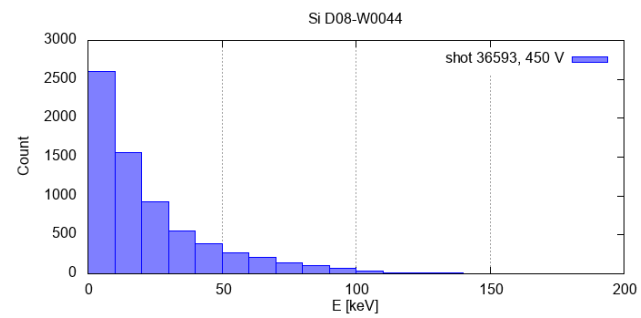
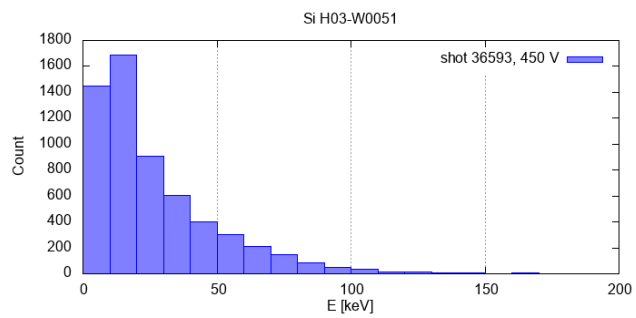
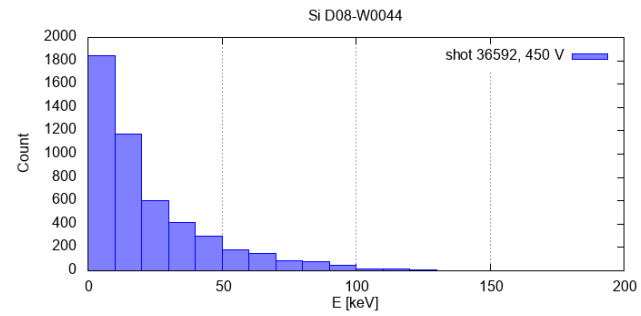
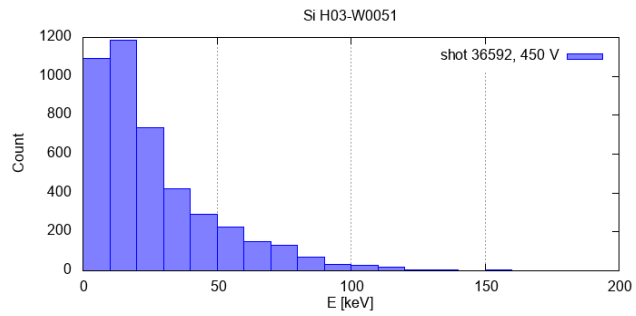
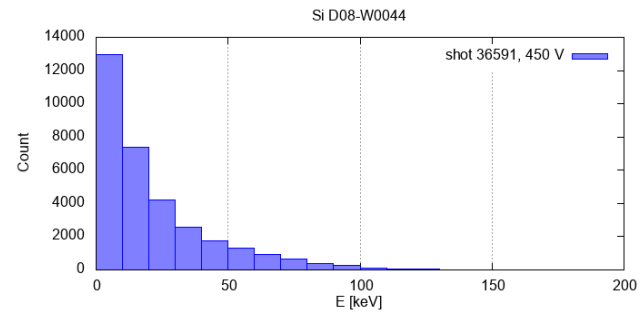
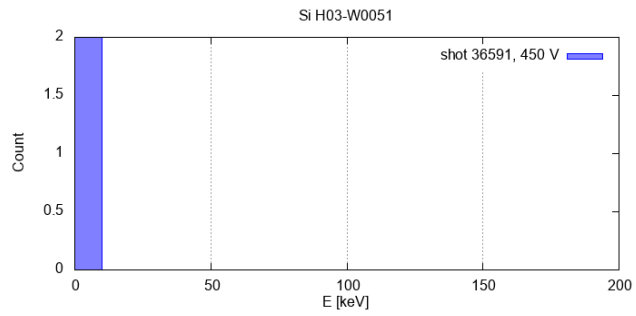
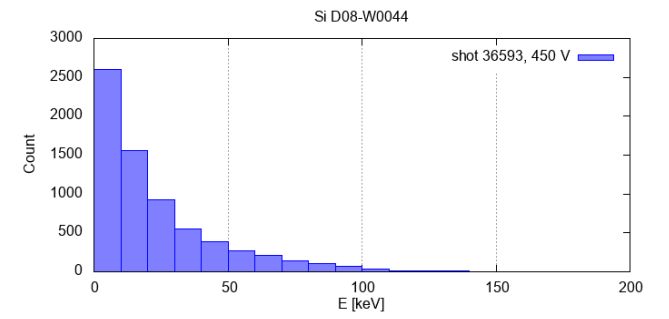
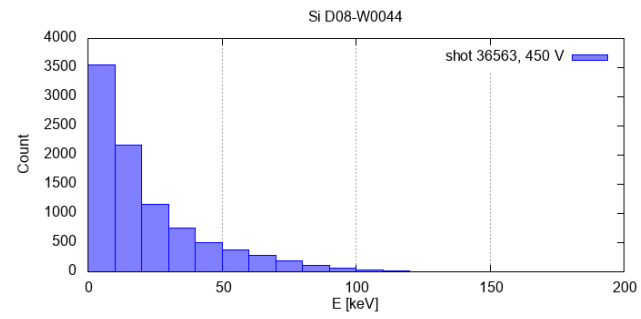
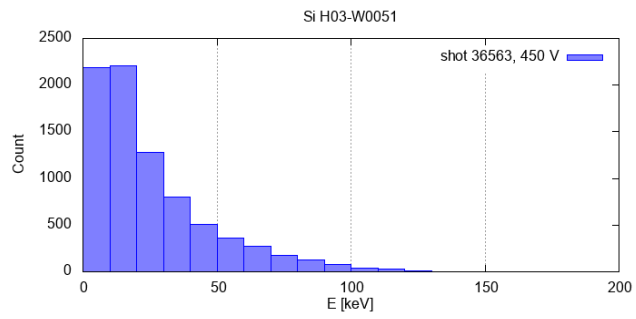


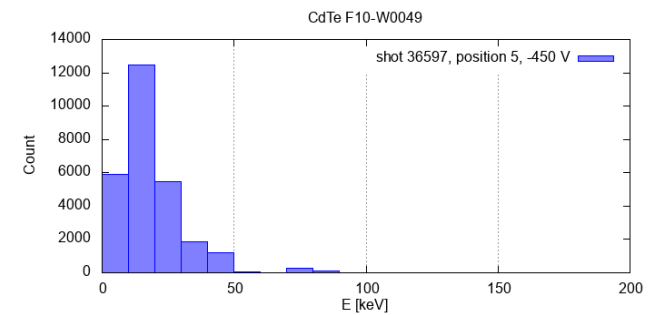
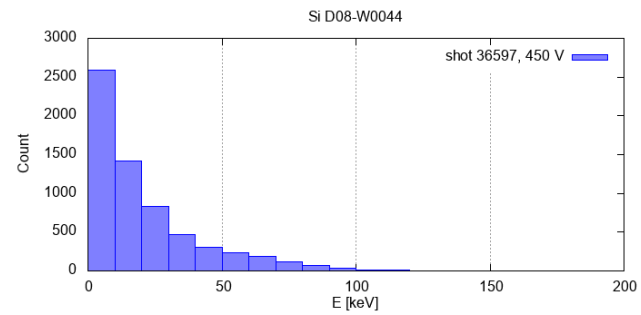
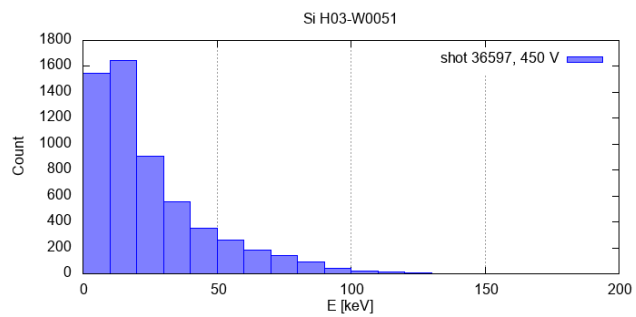
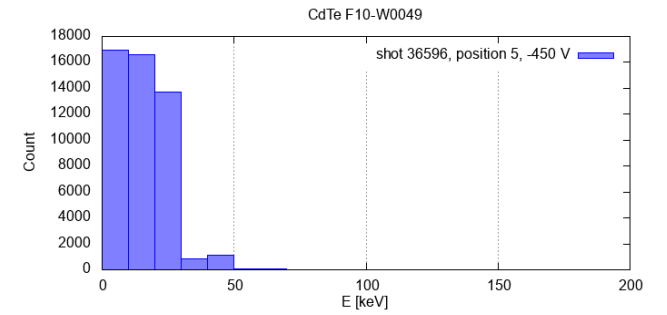
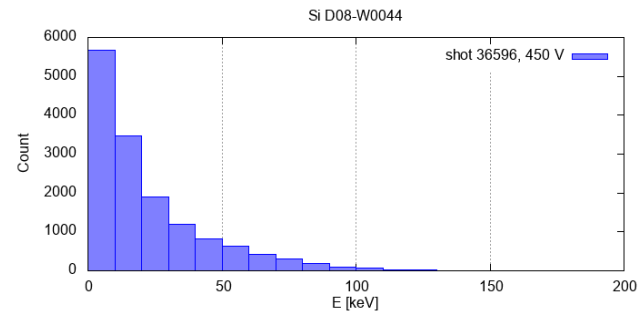
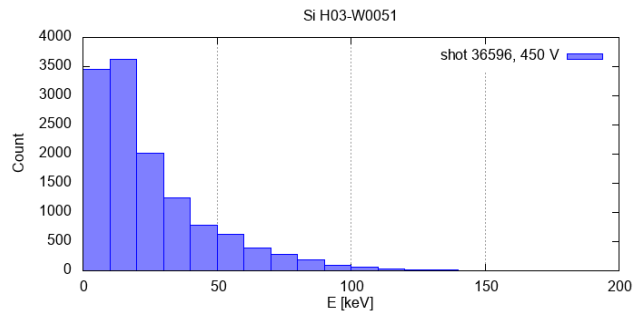
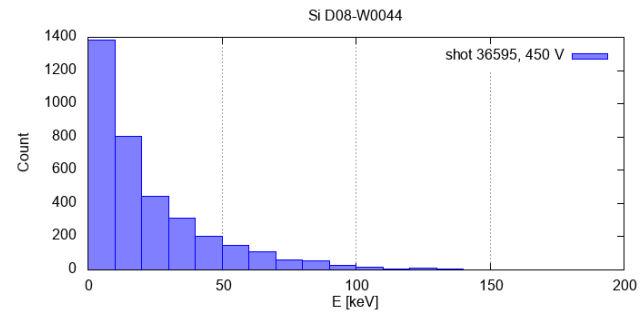
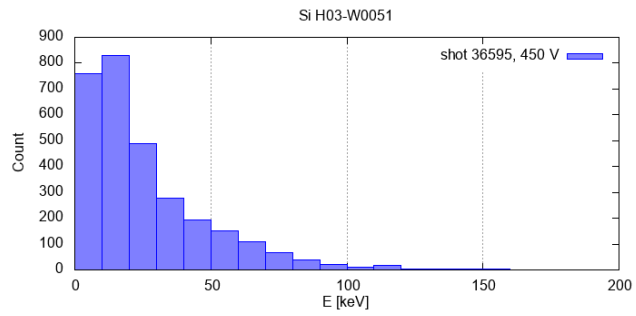
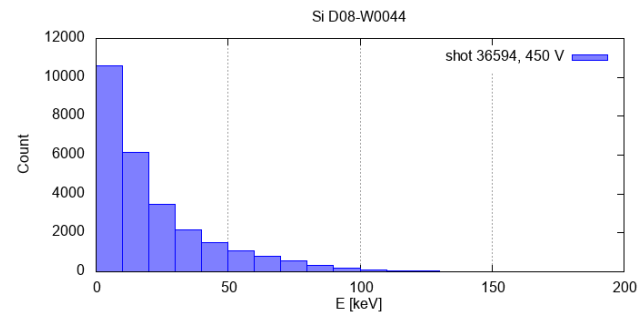
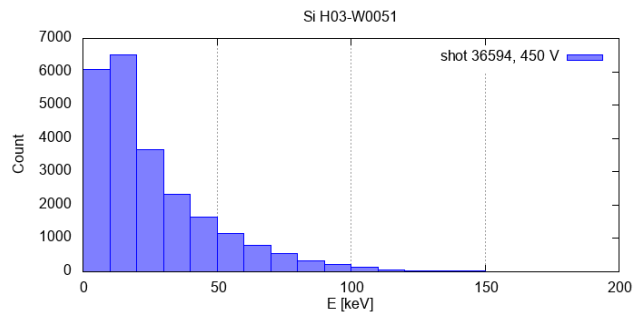


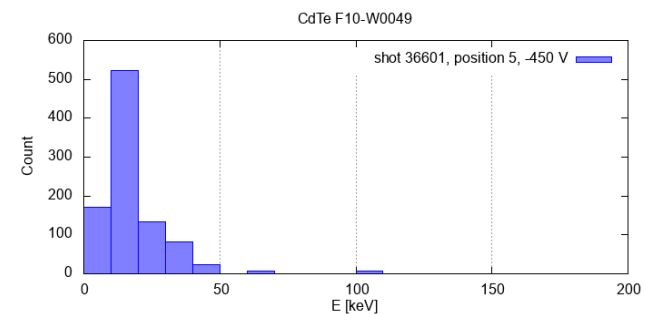
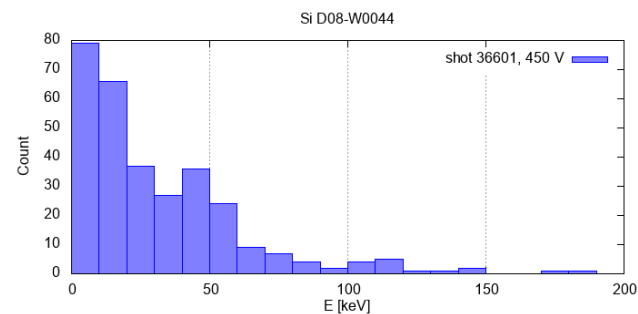
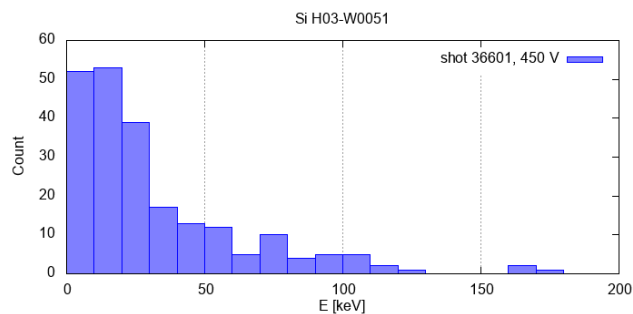
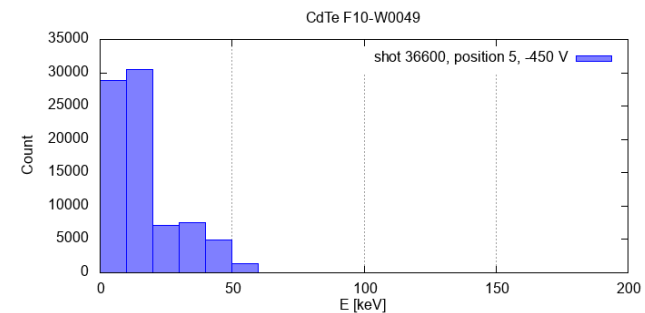
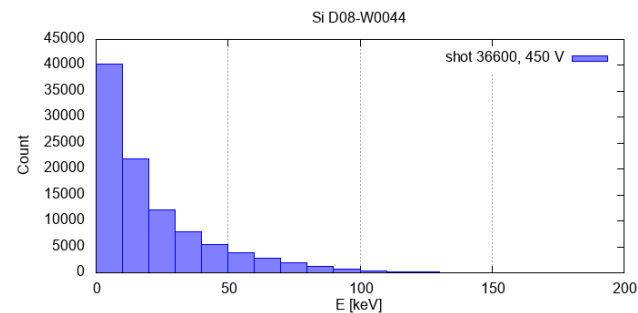
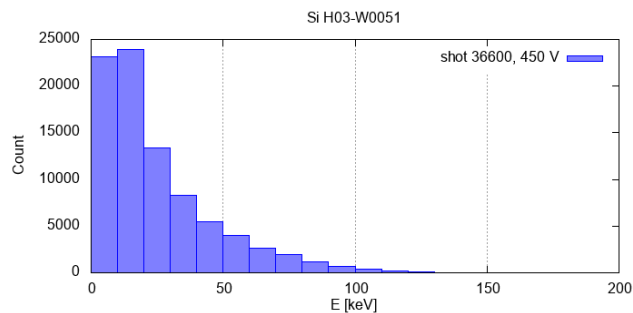
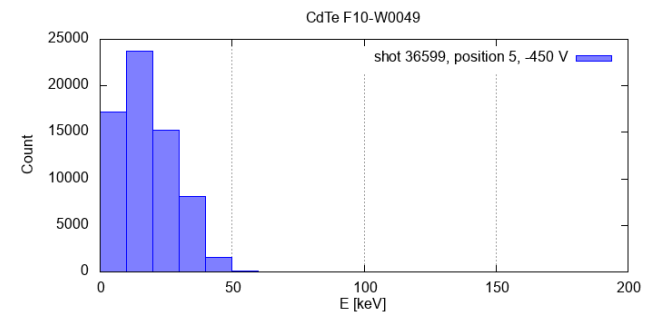
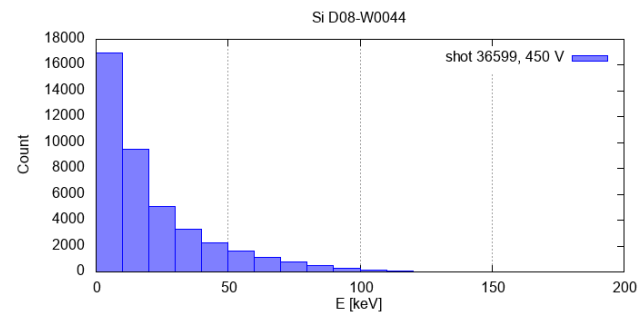
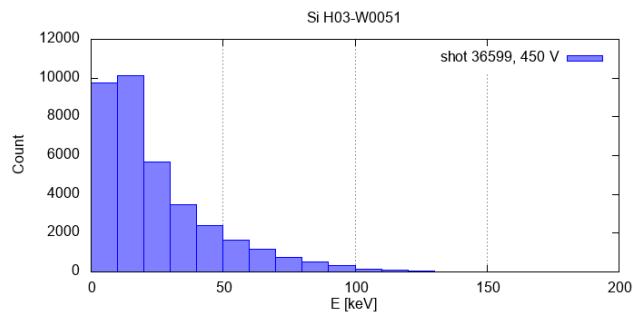
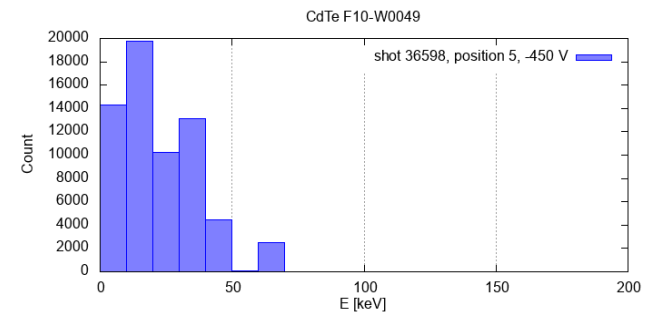
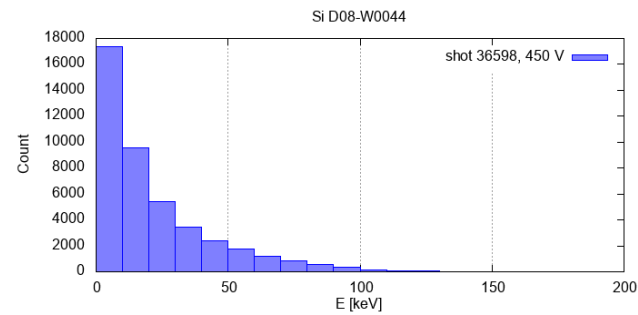
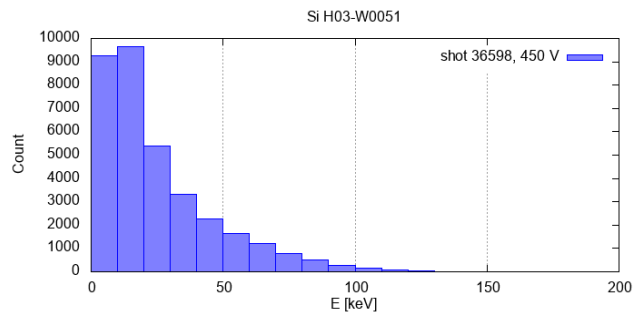


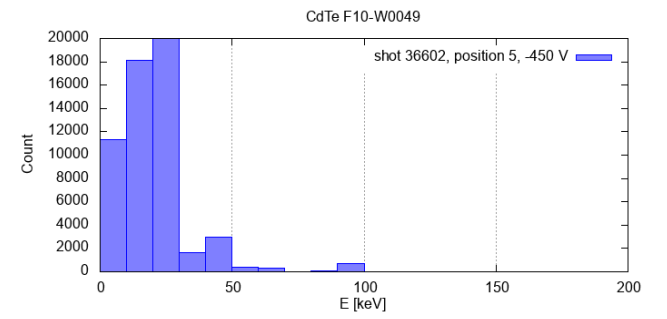
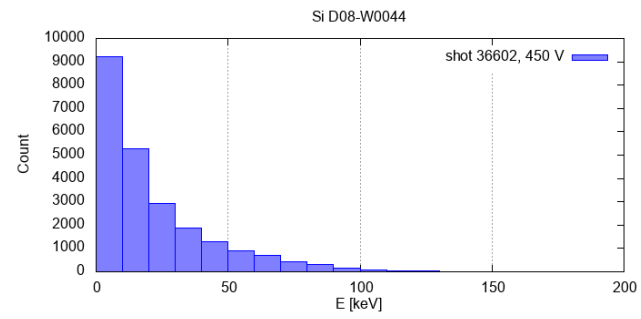
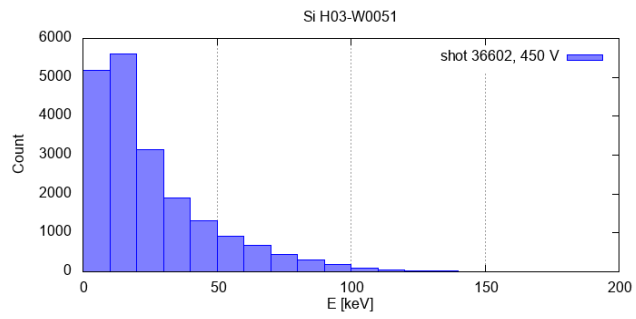












Příloha F

Frekvence výskytů událostí při výbojích na tokamaku Golem

Zde jsou zobrazeny frekvence výskytů událostí (Count rate) během daného výboje. V grafech jsou zobrazeny dva přístupy. Jeden přístup je zobrazen černými body spojenými čarou a spočívá v pevném nastavení časového okna a určení Count rate z událostí, které byly detekovány během tohoto času. Pro všechny detektory bylo zvoleno časové okno délky 0,3 ms. Druhý přístup je zobrazen žlutými sloupci a spočívá ve stanovení konstantního počtu událostí v časovém okně. Délka časového okna je v tomto případě variabilní. Pro Si detektor bylo zvoleno 2000 událostí pro jeden bin a pro CdTe detektor bylo zvoleno 3000 událostí pro jeden bin.

