



Изследване на ефектите на радиация върху параметрите на избрани силициеви фотоумножители

Валентин Бучакчиев

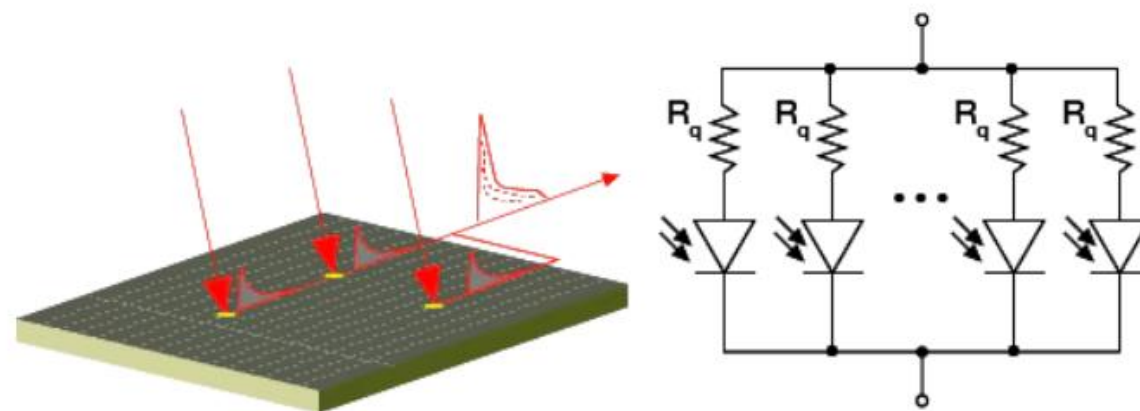
Докторант в катедра „Атомна Физика“



Гр. София, 18.04.2026 г.

Общи приказки

- Силициевите фотоумножители (SiPM) са бързо установяващ се аналог на ФЕУ-тата.
- Характеризират се със сравнимо усилване, но работят при много по-малки преднапряжения ($< 50\text{ V}$) и са значително по-компактни.
- Това ги прави крайно удобни за космически приложения, но и обект на интерес и за наземни експерименти. Особено в среди със силни магнитни полета, към които те са нечувствителни.
- Състоят се от множество клетки, всяка от които представлява лавинен диод с гасящ резистор.
- Имат нужната чувствителност за регистрация на единични фотони.

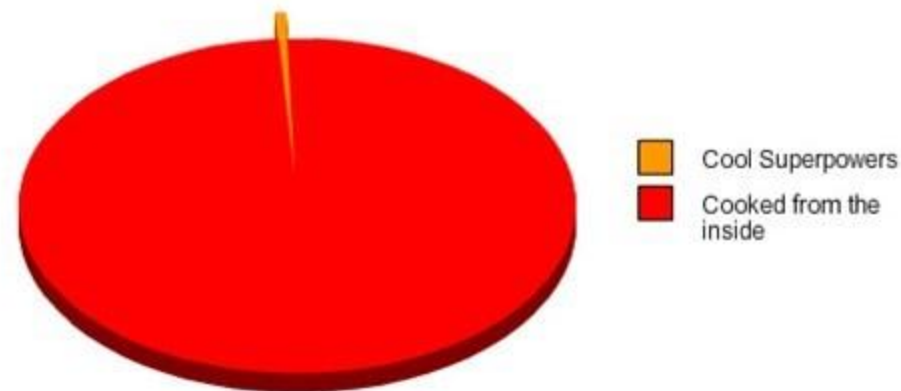


Къде е големият минус? Ами силициеви са. И идват с типичните слабости на този тип детектори...

SiPM в реална среда

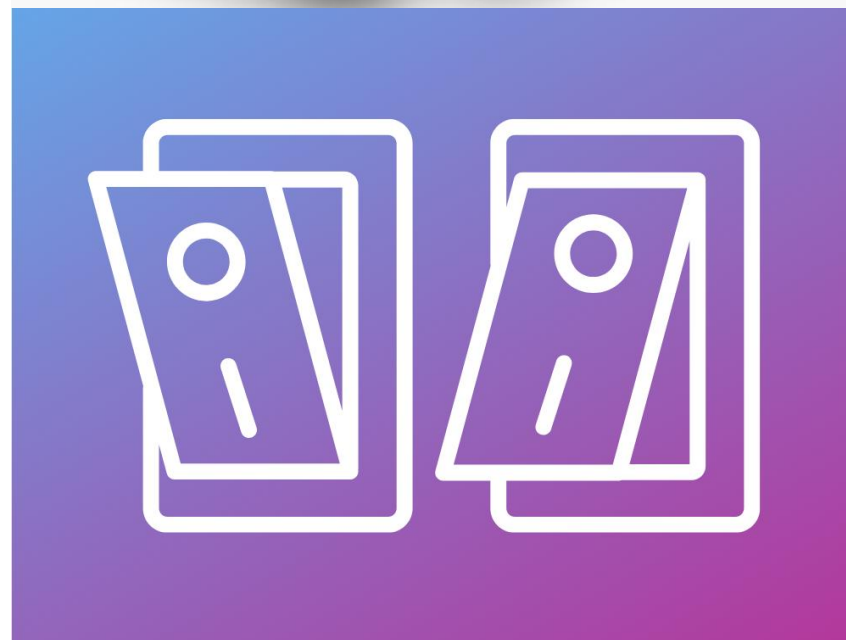
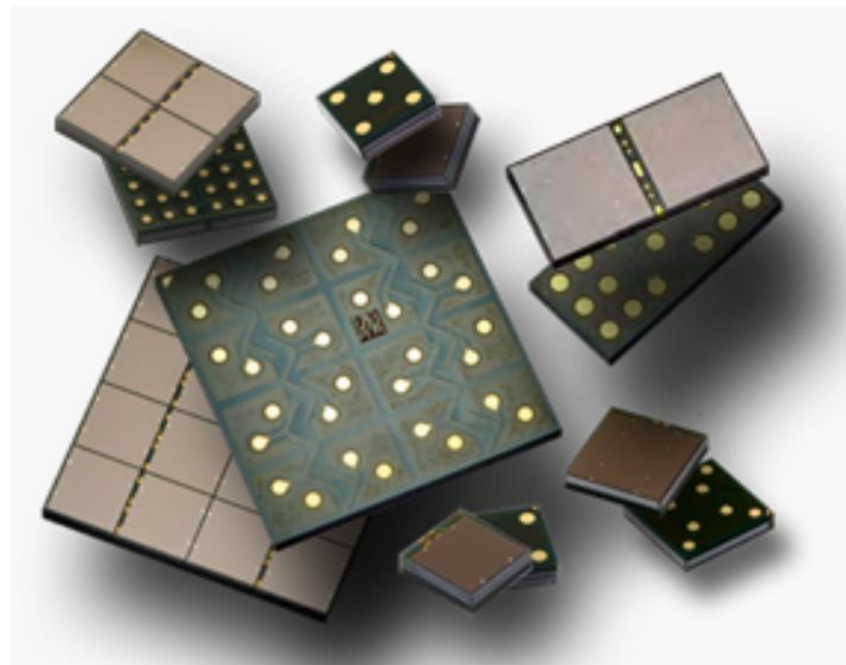
- Повечето приложения на SiPM ги поставят в радиационна среда. И като типични силициеве сензори, SiPM не обичат такива условия...
- Продължителното влияние на радиация има доказан негативен ефект върху сензорите – появата на локални дефекти в кристалната решетка на силиция води до съсипване на свойствата им.
- Увеличават се многократно шумовете (ток на тъмно).
- Поради това множество експерименти, а и самите производители на SiPM постоянно провеждат тестове за поведението им след облъчване.

Effects of Radiation



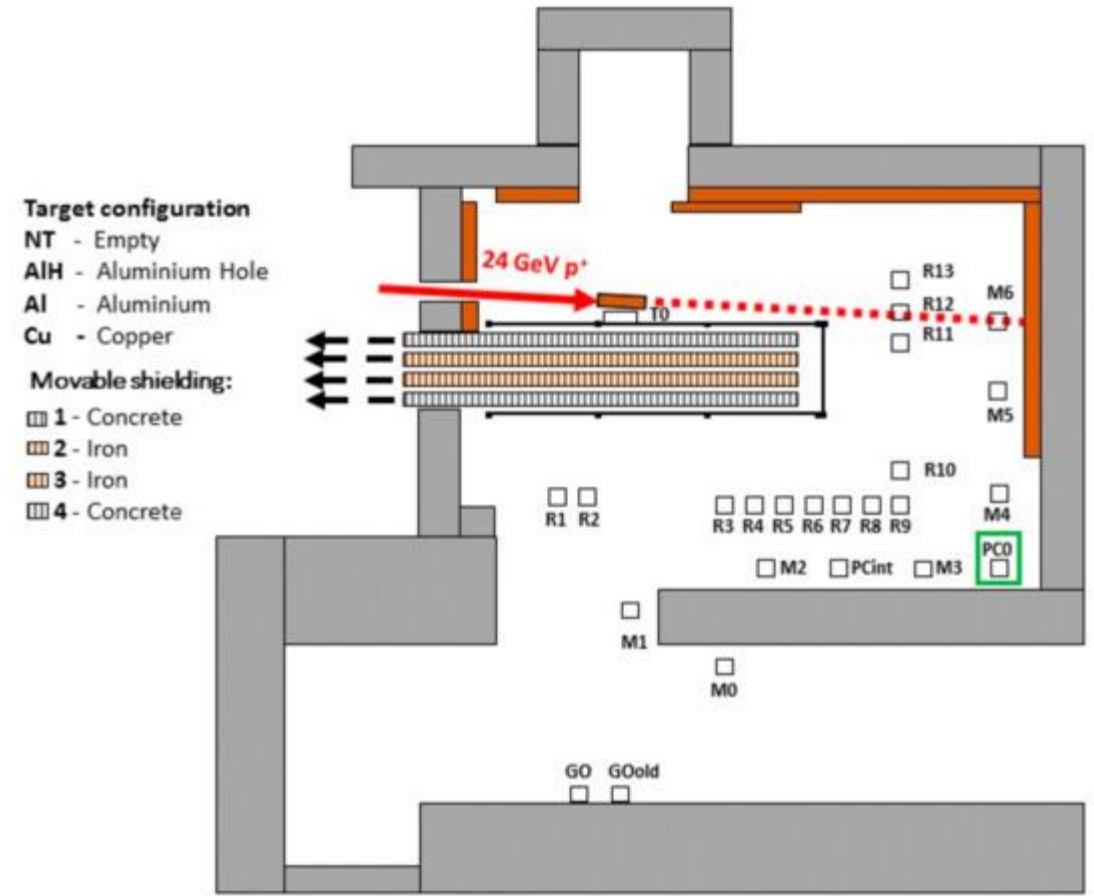
И ние така 😊

- За целите на редица проекти и ползватели (CERN, ESA), провеждаме тестове на поведението на различни SiPM поставени в радиационна среда.
- Тестват се различни производители, различни площи ($3 \times 3 \text{ mm}^2$, $4 \times 4 \text{ mm}^2$), както и различни размери на клетките (50 μm , 40 μm , 15 μm , 10 μm)
- И по-важно – тества се поведението при включено и изключено състояние на сензора – нещо, което не се среща много в литературата.



Какво правим точно?

- Бяха проведени две тестови кампании, в които облъчихме образци в съоръжението **CHARM, CERN**.
- **CHARM** се намира на **PS**. Протонни снопове отклонени от ускорителя се сблъскват с мишена и вторичната радиация, която е от смесен тип и съдържа разнообразни видове частици, се използва за облъчване на образците. Крайната доза зависи от разположението на установката в рамките на комплекса.
- При първата кампания поставихме две установки – една на минимална доза и една на максимална.
- При втората използвахме само позиция за минимална доза.



Layout of the CHARM Facility - CERN

Обща схема

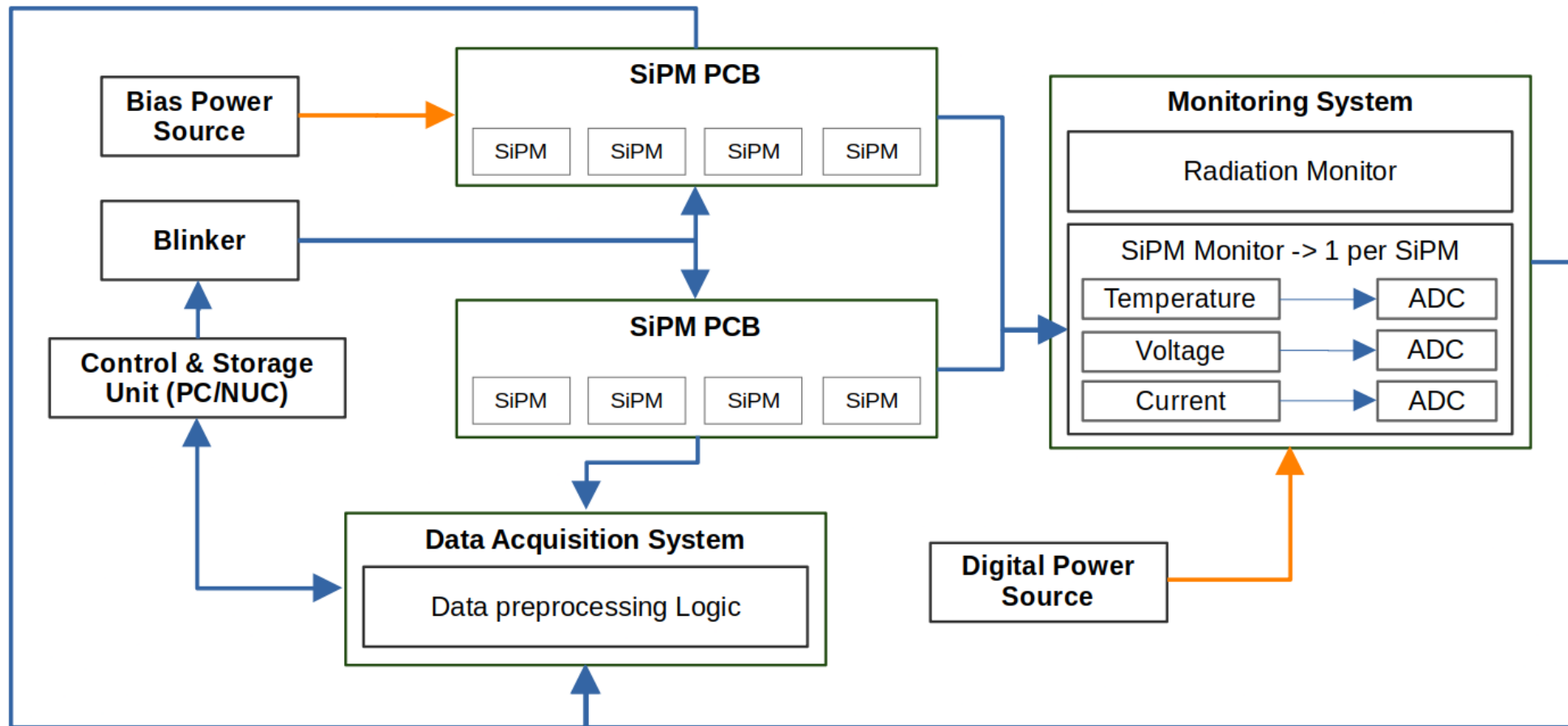
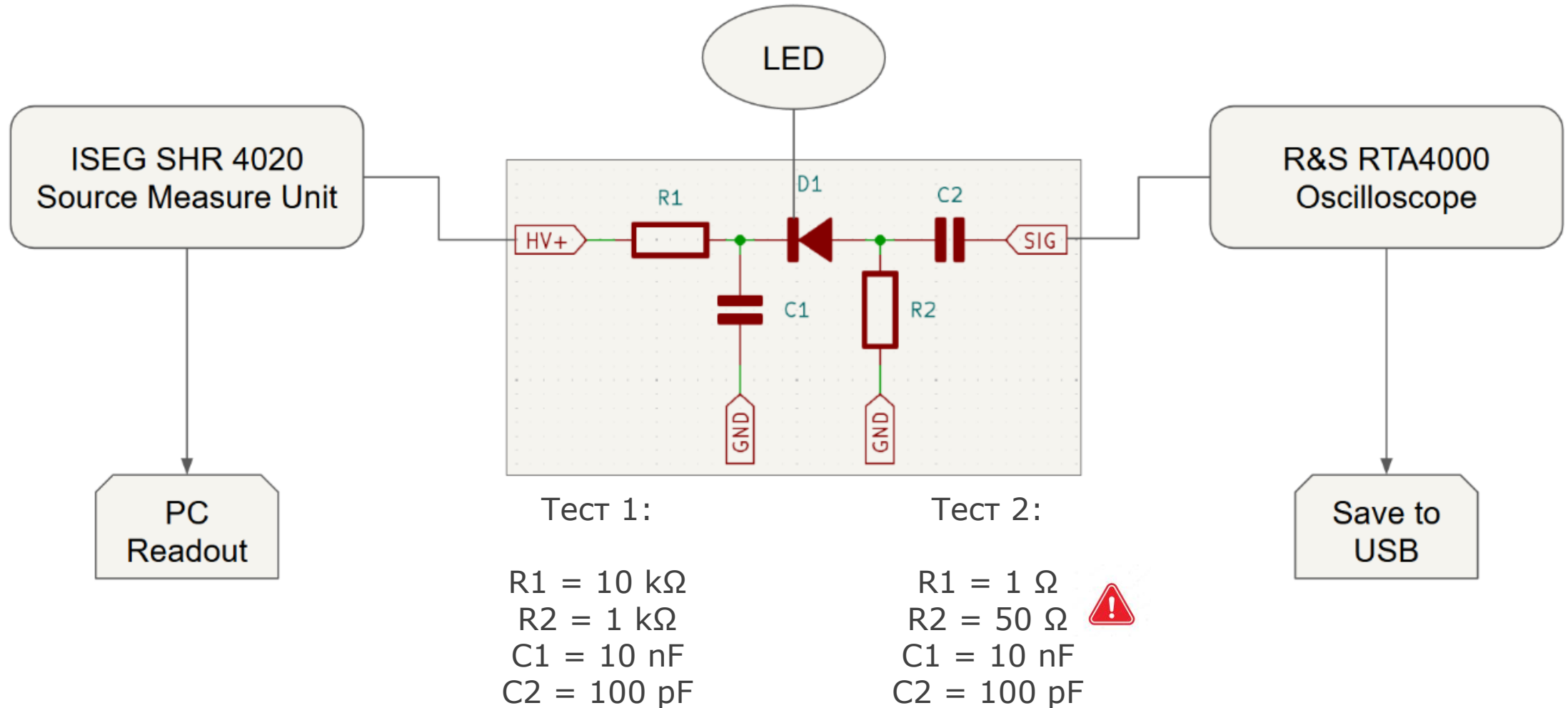
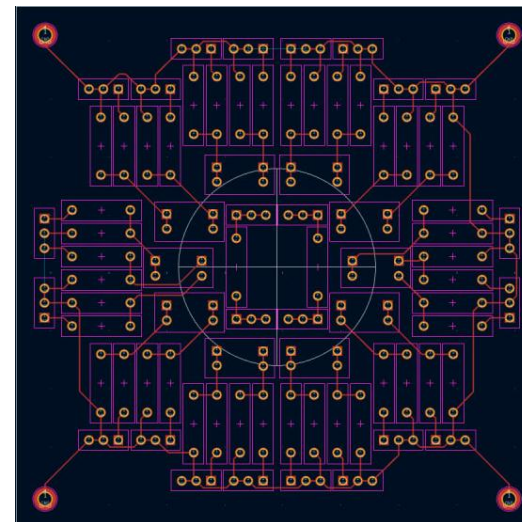
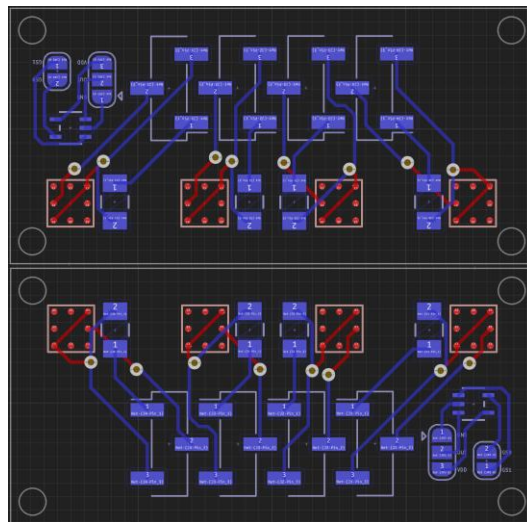


Схема на изчитането

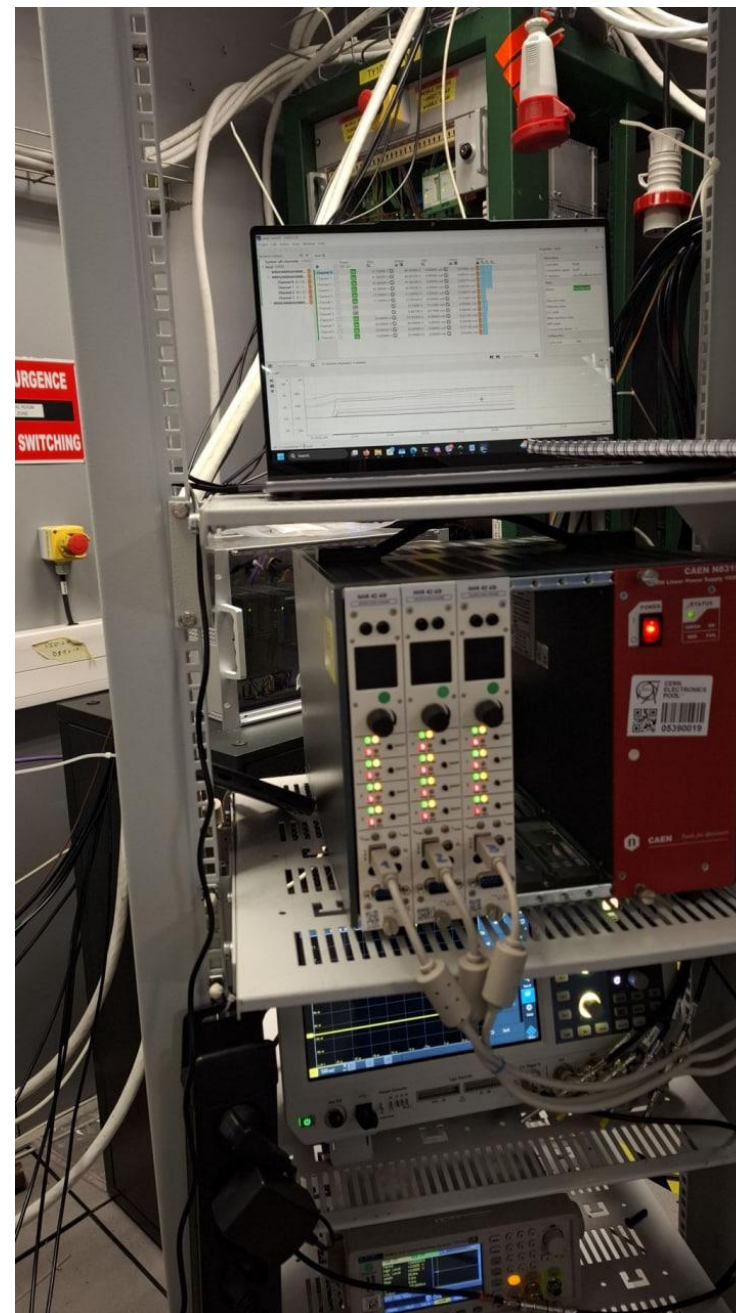
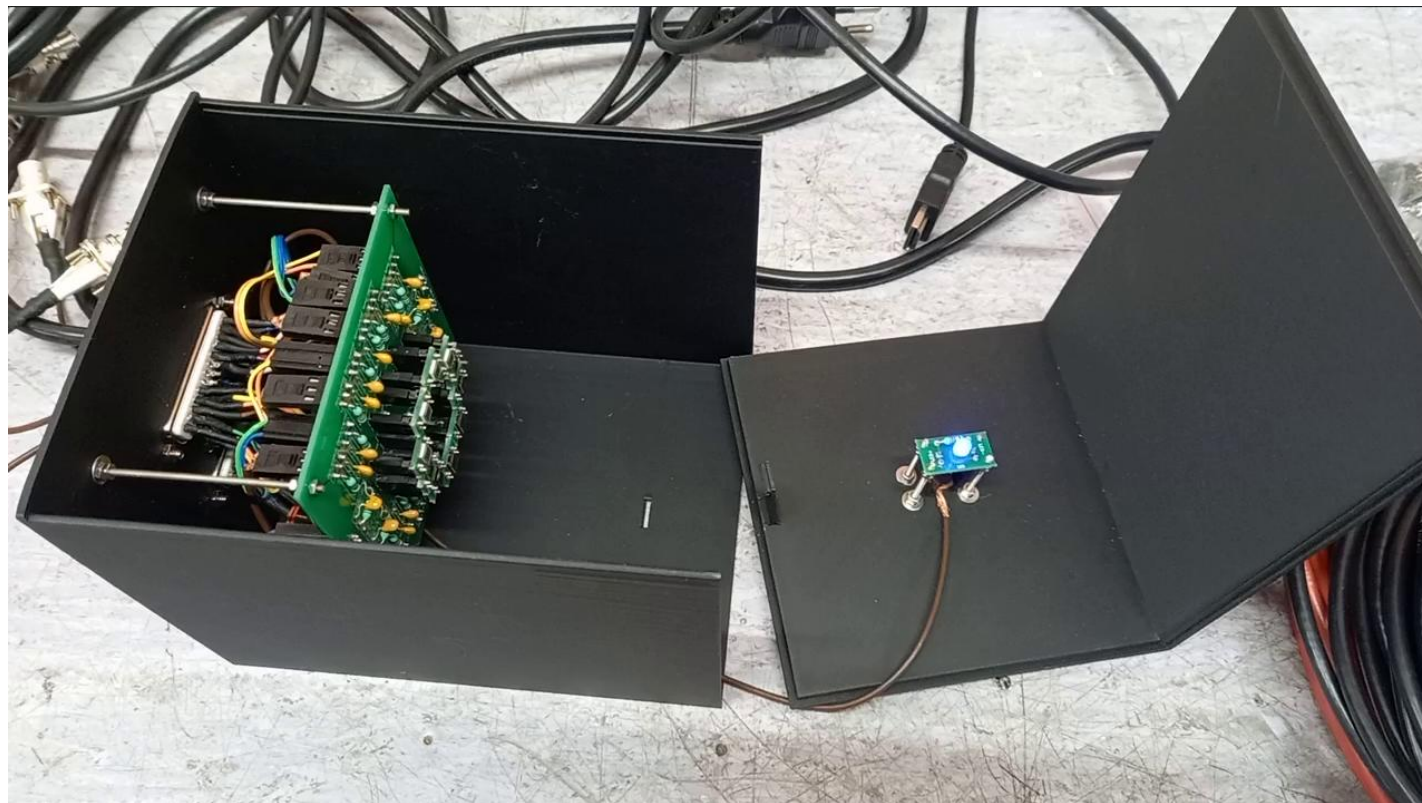


Разликите между 1 и 2 тест

- Значителна промяна в стойностите на резисторите.
 - Оказа се, че R1 потиска значително тока в системата, водейки до насищане на SiPM-а при значително по-ниски токове
 - Също така в един момент осъзнахме, че слагайки голям резистор на изхода (R2), съсипваме сигналите си колкото повече напредва тестът.
- За тест 2 силициевите фотоумножители бяха поставени в кръг, за да се уеднакви максимално много светлината, която попада върху тях от диода.
- Тест 2 внася и контрол (наблюдение и записване) на температурата посредством Pt-1000 RTD.

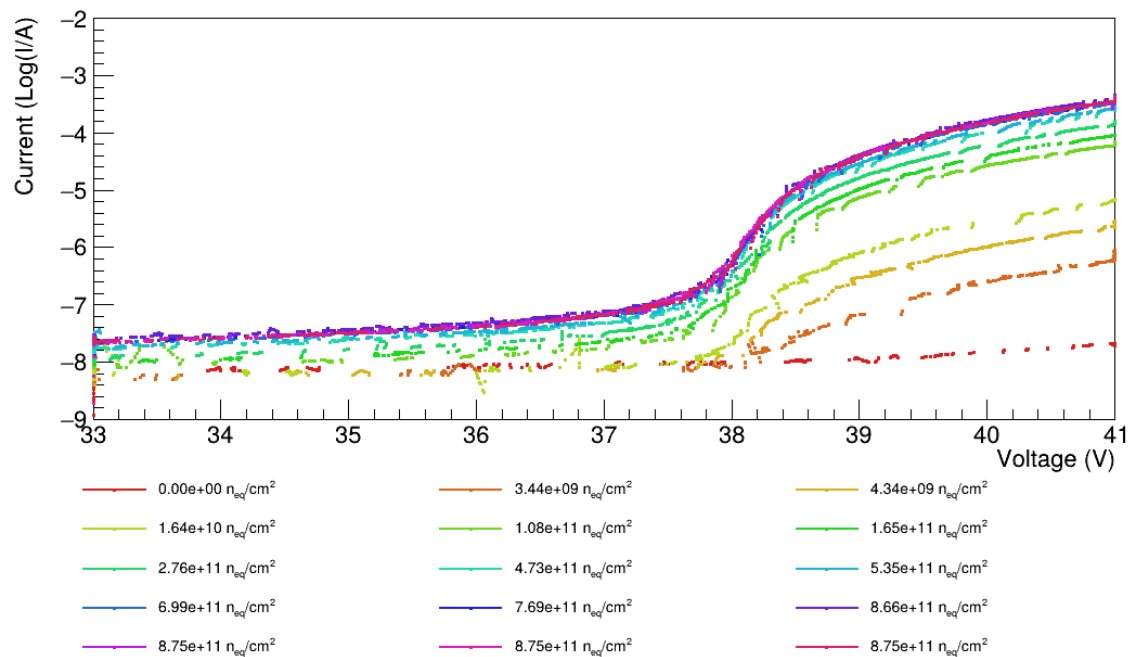


Тестовата установка

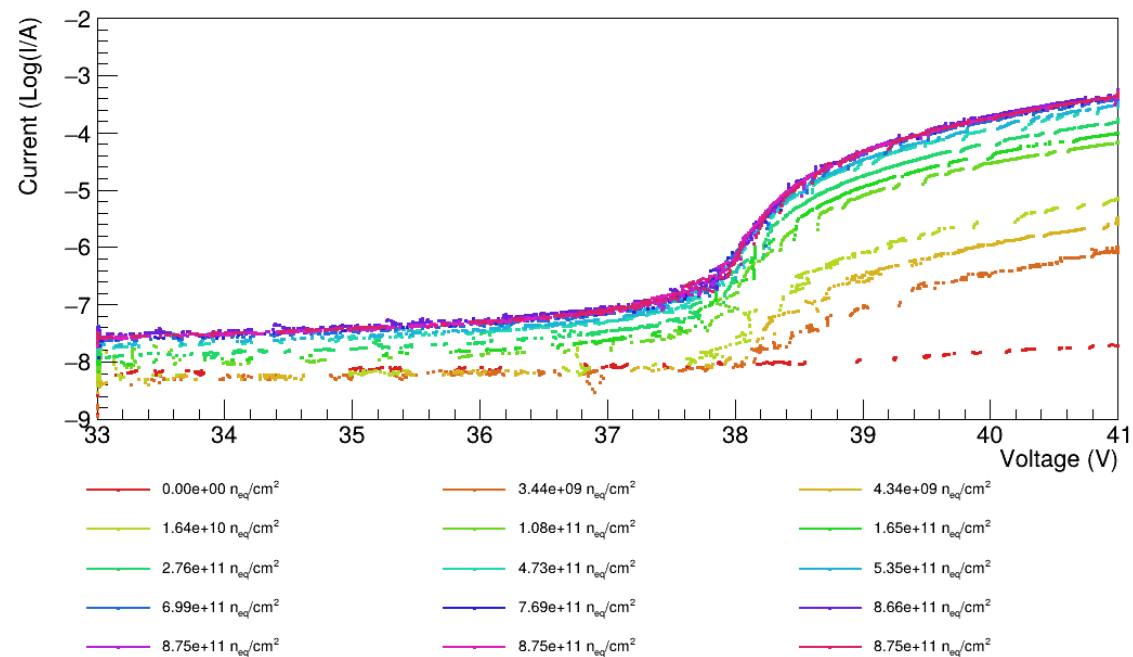


Результати

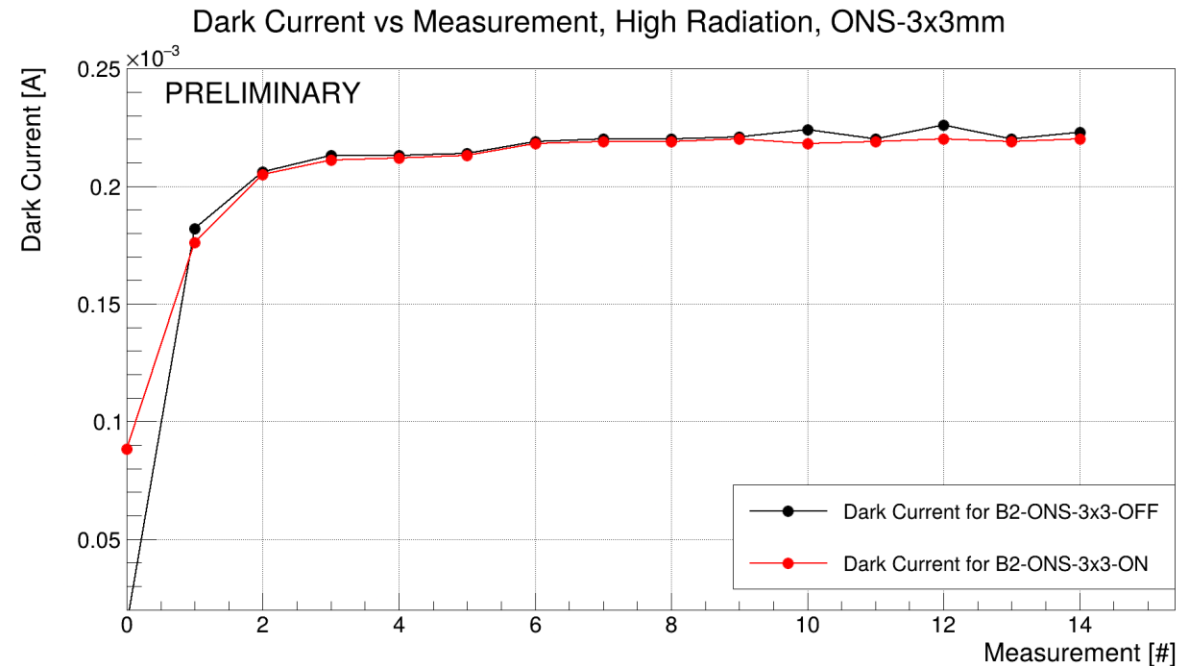
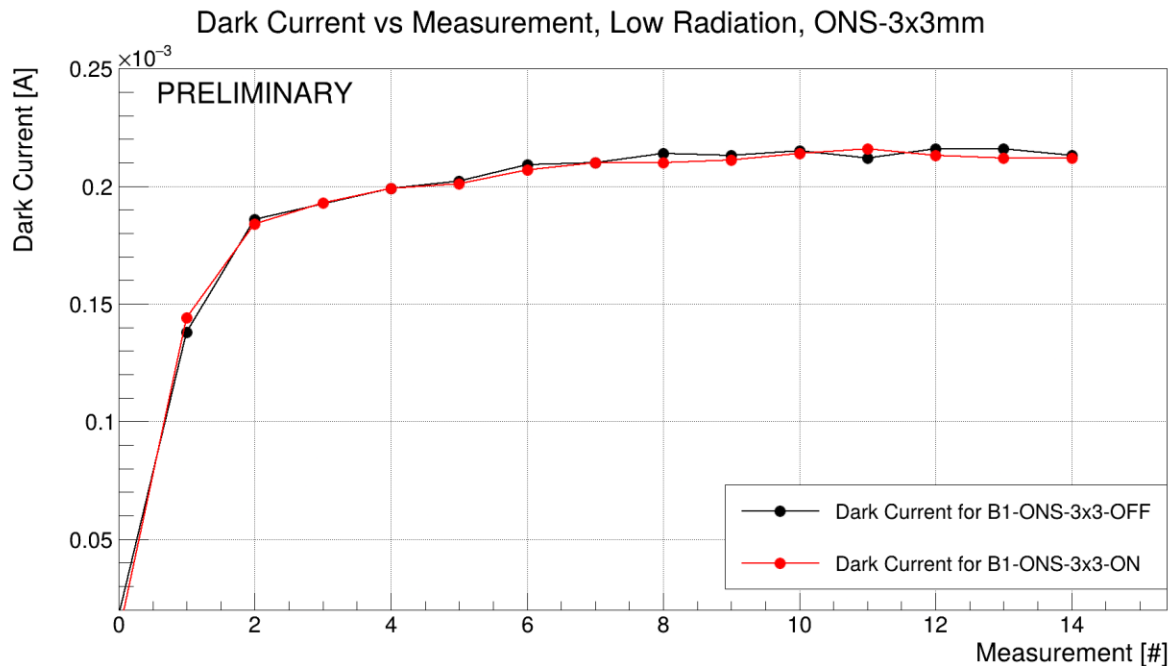
Hamamatsu-S14160-3010PS
3x3 mm², 10 μm
Active



Hamamatsu-S14160-3010PS
3x3 mm², 10 μm
Passive

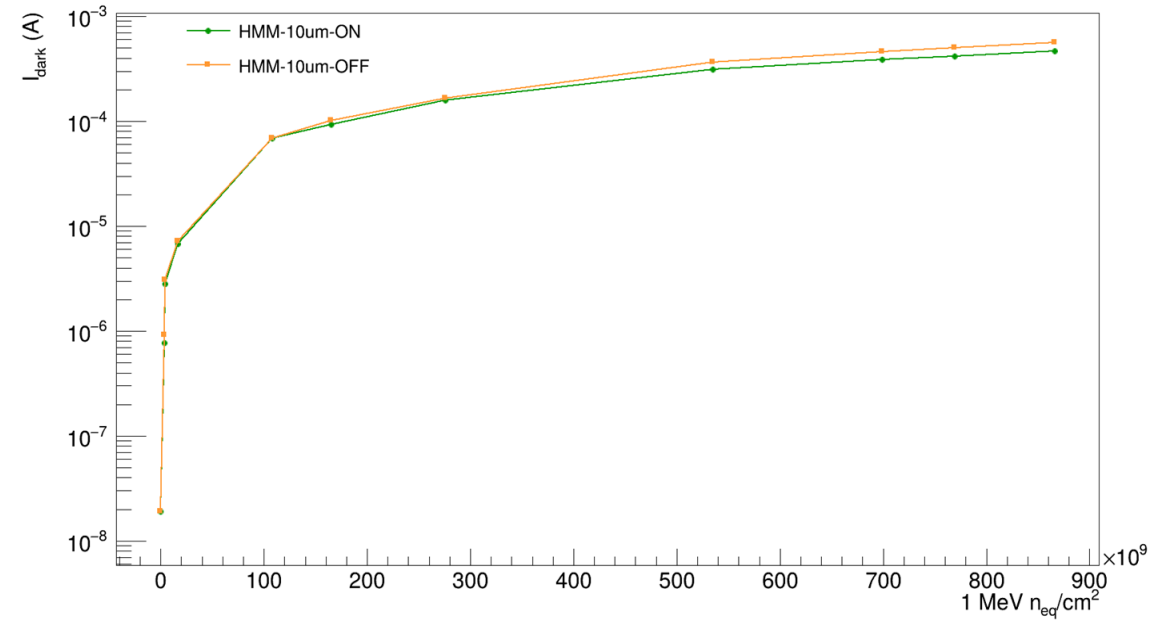
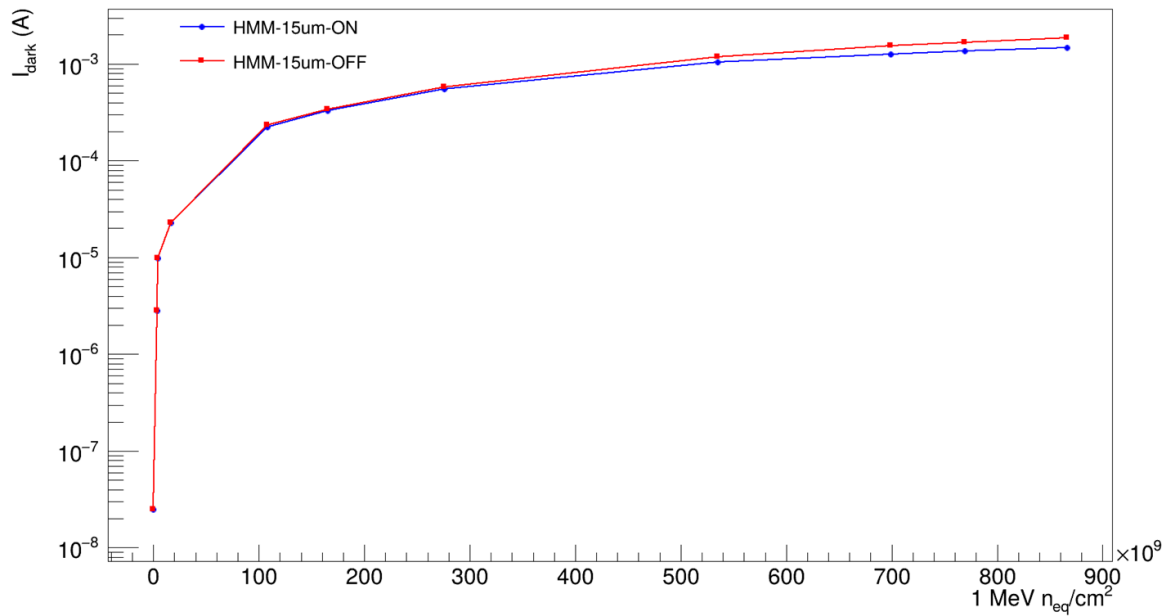


Относно токове и състояния...



- Резултати от тест 1 – неокончателни. Кривите вървят сравнително наравно, особено когато се отчете грешката от около 5% от стойността на платото.
- Резултатът е силно вероятно следствие от насищането предизвикано от стойността на R1.

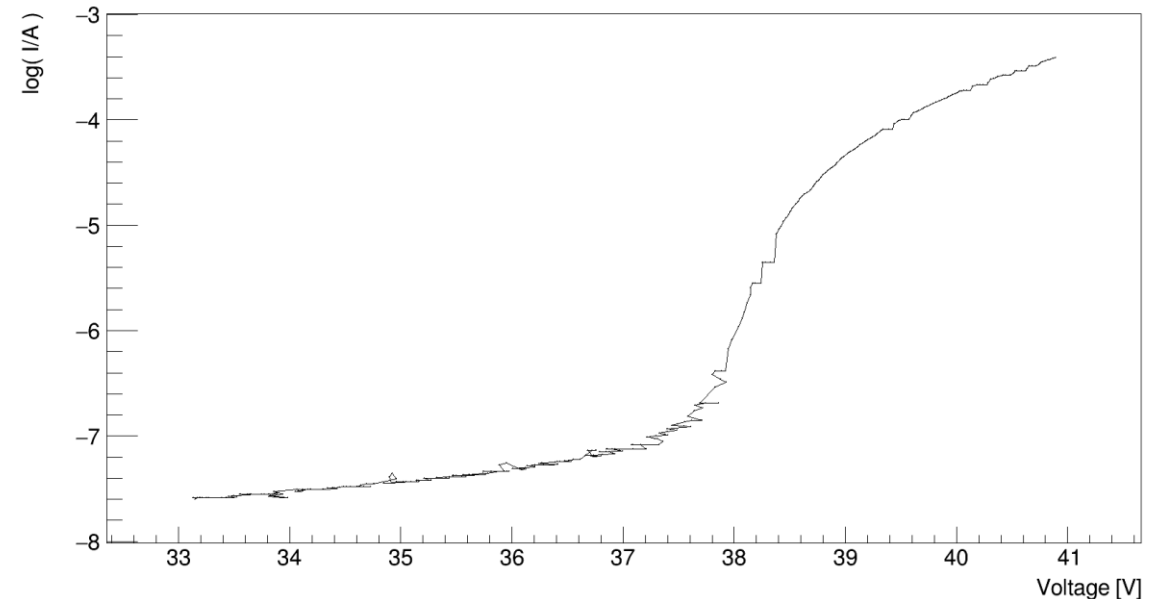
Но, тест 2



- Забелязват се консистентно по-ниски токове при активните SiPM.
 - Токовете на „пасивните“ SiPM са с $\sim 24\%$ по-високи за 15-микроните SiPM.
 - ...същото но със стойност $\sim 19\%$ важи за 10-микроните.
- Резултатът е очакван на база физични съображения.

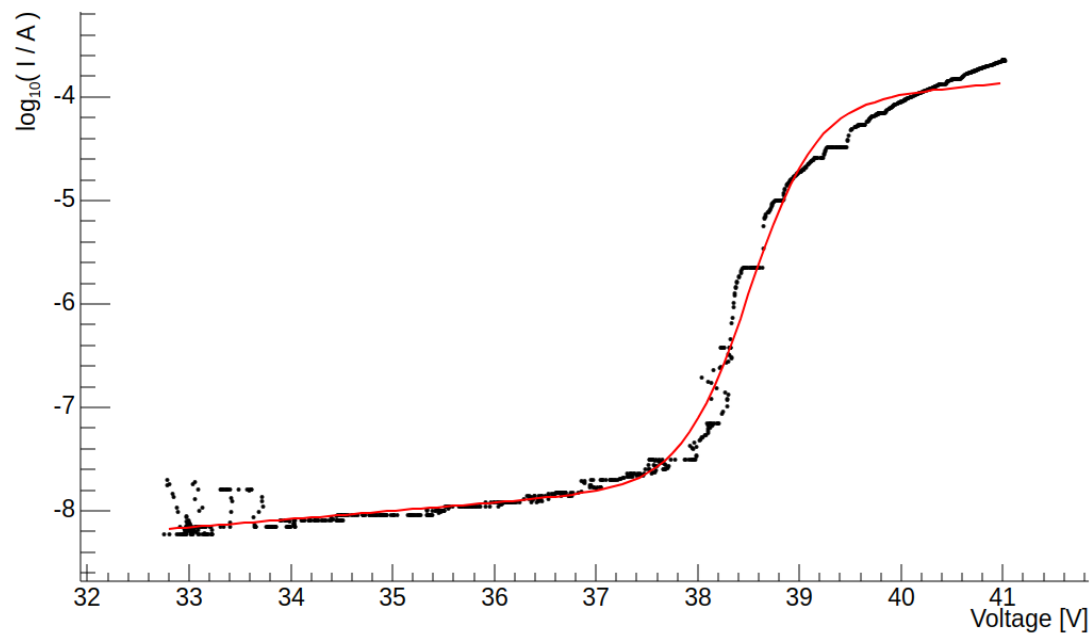
Интересуваме се и от пробивното напрежение

- Литературата твърди, че пробивното напрежение не се влияе от радиацията.
- Доверяваме се на литературата, поради което искаме да проверим това.
- Стандартните методи за изследване на пробивно напрежение на SiPM са чрез прилагане на производна (от 1, 2 или дори 3 ред) върху волт-амперната характеристика и ефективно се свеждат до търсене на инфлексната точка на коляното.
- Проблемът е... че това има съмнителна приложимост когато коляното изглежда... така.

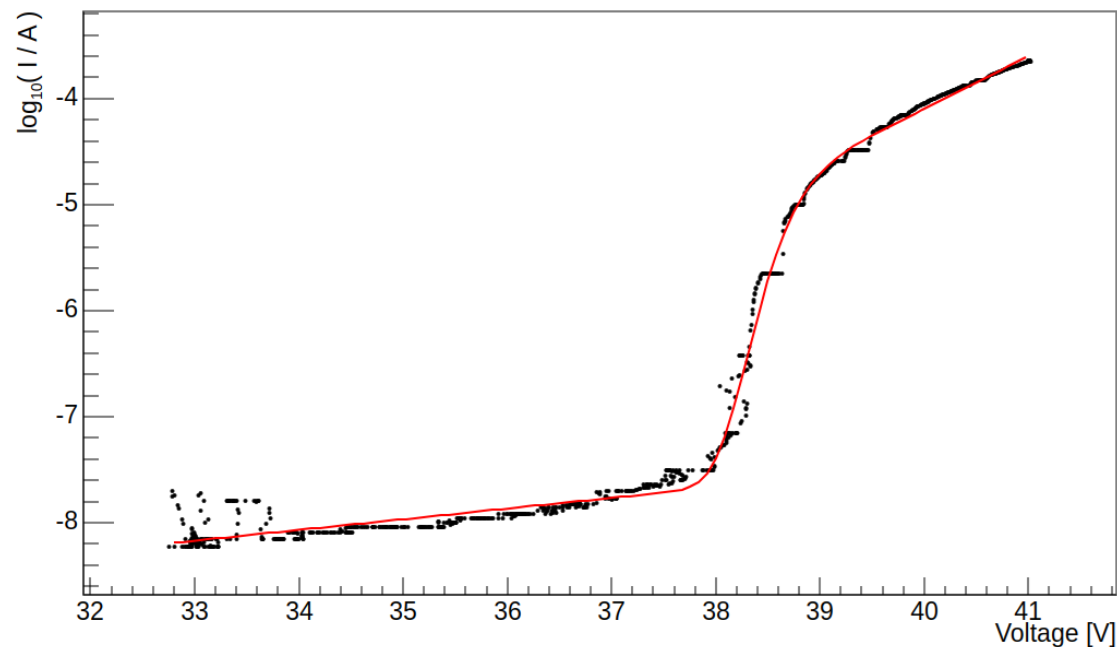


Та решихме да фитираме...

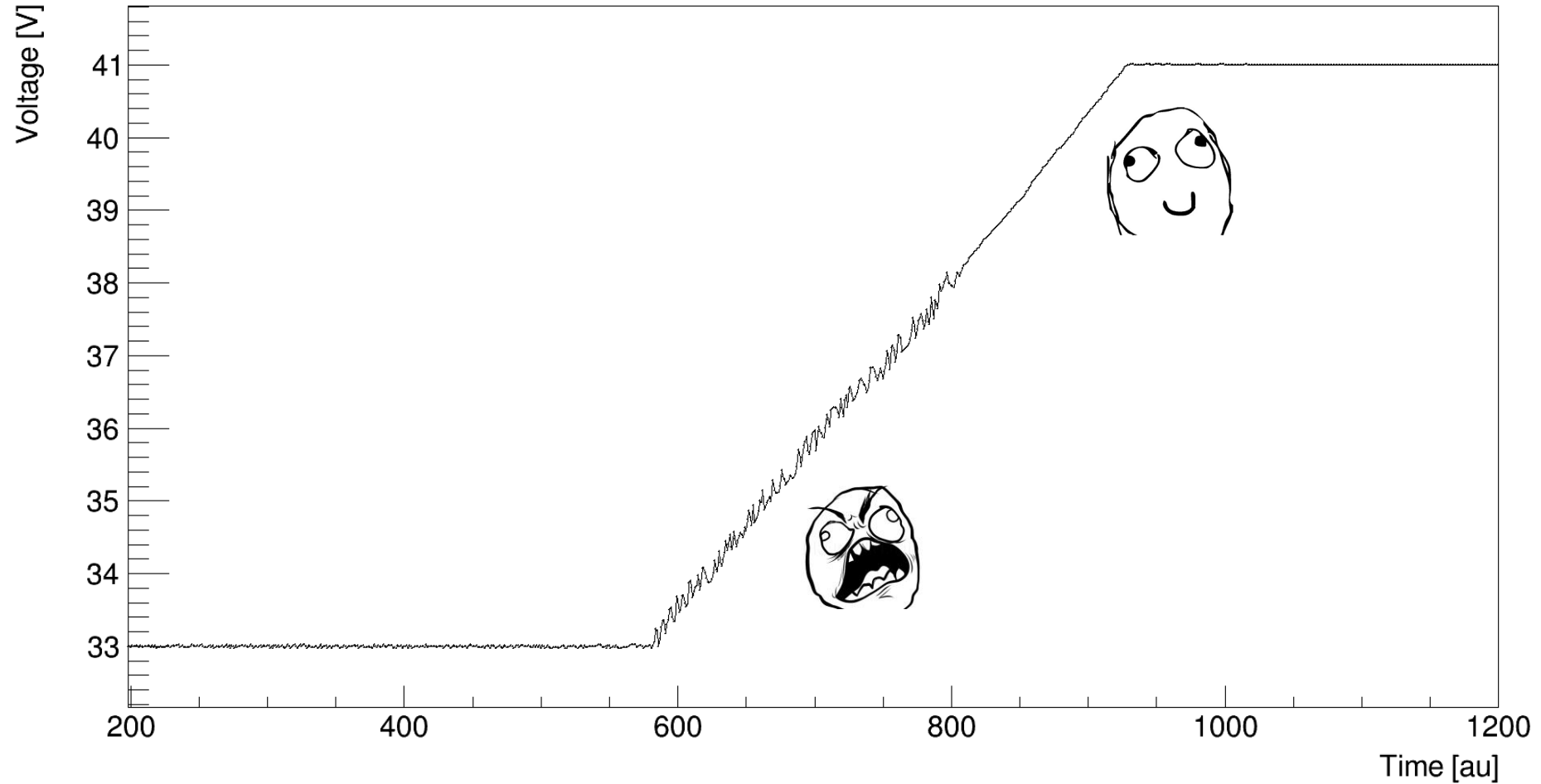
$$\log I(V) = p_0 + p_1 V + p_2 \tanh(p_3(V - V_{\text{br}}))$$



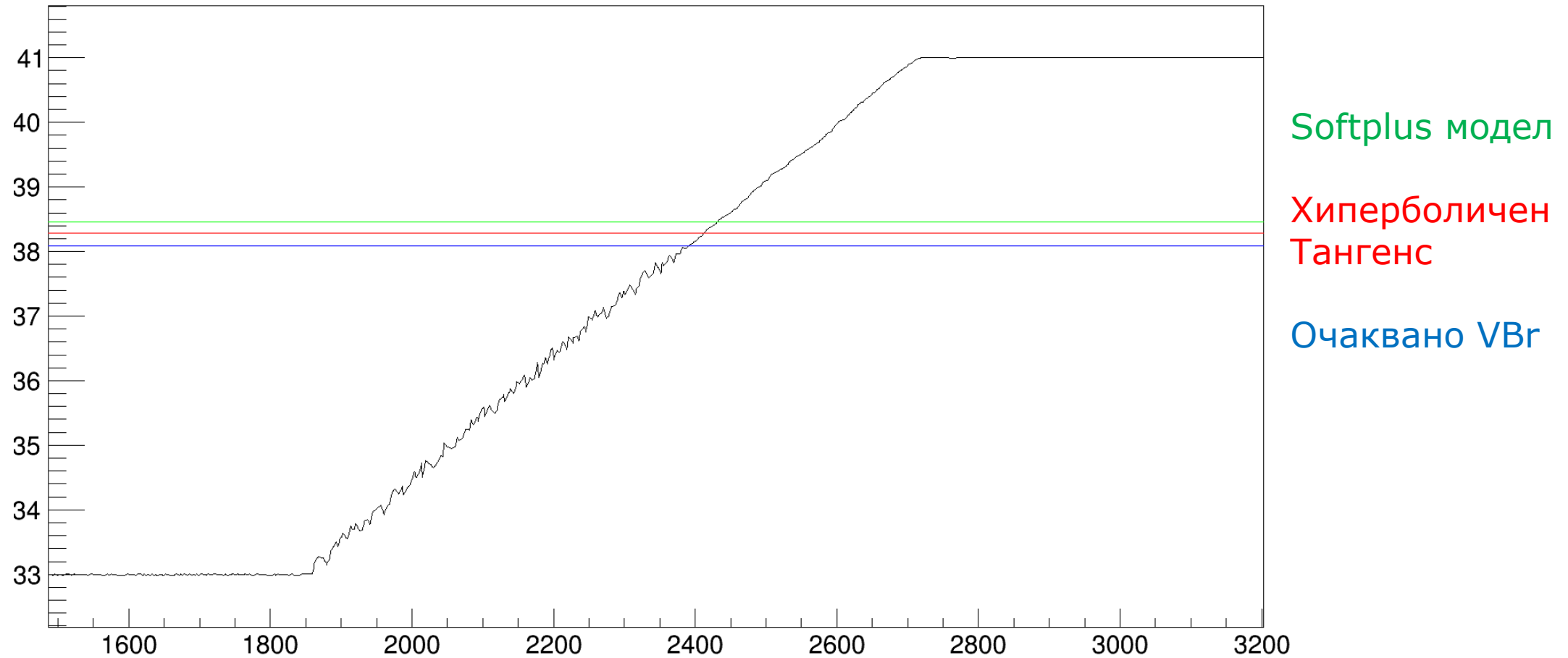
$$\log I(V) = p_0 + p_1 V + p_2 \ln\left(1 + \exp\left(\frac{V - V_{\text{br}}}{s_{\text{br}}}\right)\right) - p_3 \ln\left(1 + \exp\left(\frac{V - V_{\text{sat}}}{s_{\text{sat}}}\right)\right)$$



Но как валидираме?



Стигаме до картинки от типа...



Нагл... анализът продължава...

- Работи се върху подобряването на моделите за фитиране и точността на определяне на пробивното напрежение.
- Данните се засичат и с данните от температурните сензори, за да се получи пълна картина
- Очаква се да се направят някои допълнителни измервания върху установката от тест 2
- И така работата върви и ни повлича и нас със себе си.

Благодаря
за вниманието