



ФИЗИЧЕСКИ
ФАКУЛТЕТ
СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“

Разработване на Compton-TDCR система за приложение в радионуклидната метрология

Владислав Тодоров Тодоров

Научен ръководител: доц. д-р Красимир Митев

Софийски университет „Св. Климент Охридски“

Физически факултет

I. Увод

- I.1. Същност на радионуклидната метрология
- I.2. Органични сцинтилатори
- I.3. Нелинейност на отклика на сцинтилаторите
- I.4. Зависимост между излъчените фотони и отдадената енергия

Цели

II. Разработване на Compton-TDCR система

- II.1. TDCR канал / Изследване на отклика на ФЕУ
- II.2. Гама-канал. Охарактеризиране на гама-канала
- II.3. Compton-TDCR система. МК симулации
- II.4. Електроника на системата – едноканален / многоканален набор на данни

III. Резултати от изследванията на сцинтилационния отклик

IV. Приложения

- IV.1. Оценки на параметъра на йонизационно гасене (k_B) посредством вариране на ефективността и чрез Compton-TDCR измервания. Сравнение на двата метода.
- IV.2. TDCR сравнение
- IV.3. Влияние на корекцията за случайни съвпадения върху оценката на k_B
- IV.4. Създаване на първичен еталон за измерване на радон във вода във ФзФ на СУ

Течните органични сцинтилатори намират широко приложение в:

- Течносцинтилационна спектрометрия
- Измервания на активност на чисти бета-лъчители и алфа-лъчители
- Детектори, които се използват в неутринната физика
- Радионуклидната метрология за създаване на първични еталони, базирани на абсолютни измервания на радиоактивност.

Характерна особеност на органичните сцинтилатори е нелинейността на техния отклик: светлинният добив от тях не е строго линейна функция на отдадената в тях енергия.

Обект на изследване в настоящата дисертацията е именно тази нелинейност, която е от фундаментално значение за приложението на течносцинтилационното броене в радионуклидната метрология.

I.1. Същност на радионуклидната метрология

Основна задача на радионуклидната метрология е абсолютното измерване на активност.

Под абсолютно измерване се разбира такова, при което активността се определя от първи принципи, а не по сравнителен метод.

$$A = \frac{n_0}{\varepsilon} = \frac{\text{чиста скорост на броене}}{\text{ефективност за детектиране}}$$

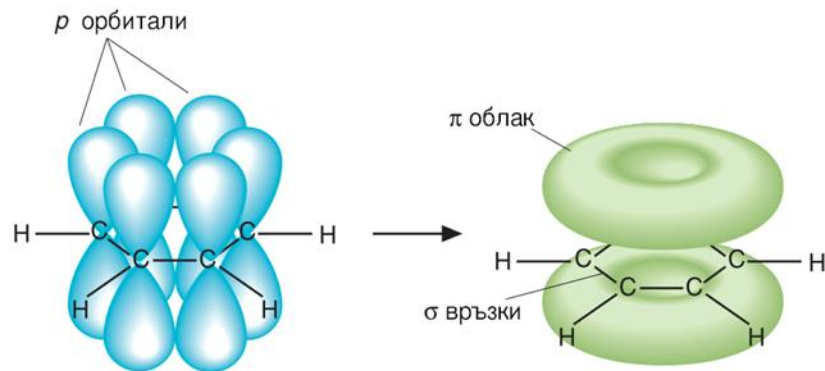
Това означава, че ефективността за измерване ε трябва да се определи от теория (физичен модел) на процесите, които стават в пробата и в детекторите по време на измерването.

Течно-сцинтилационните измервания се използват за стандартизиране на:

^3H , ^{14}C , ^{11}C , ^{18}F , ^{22}Na , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{41}Ca , ^{63}Ni , ^{68}Ga , ^{64}Cu , ^{89}Sr , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{99}Tc ,
 ^{41}Ca , ^{55}Fe , ^{67}Ga , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{123\text{m}}\text{Te}$, ^{124}Sb , ^{124}I ,
 ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{238}Pu , ^{241}Am и др.

1.2. Органични сцинтилатори

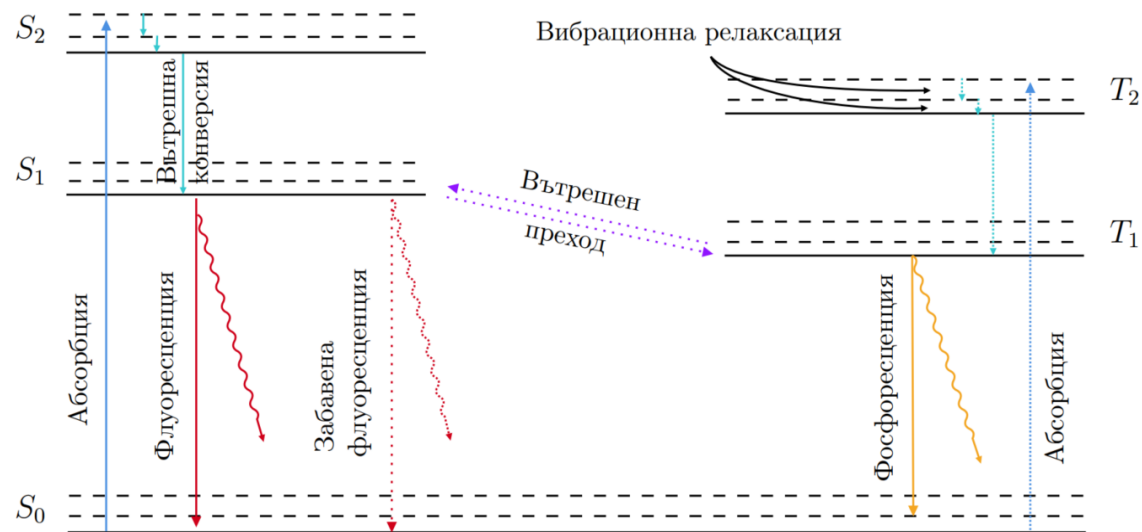
Органичните сцинтилатори са съставени от ароматни въглеводороди, съдържащи пръстеновидни бензенови молекули



При преминаване на йонизиращо лъчение, се възбудят π -електрони до синглетни и триплетни състояния

$S_1 \rightarrow S_0$ – флуоресценция

$T_1 + T_1 \rightarrow S_1 + S_0$ забавена флуоресценция

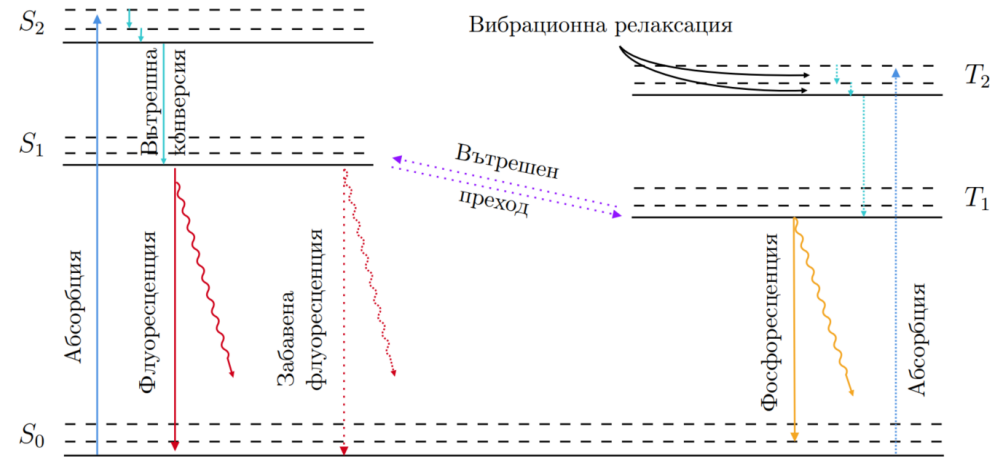


1.3. Нелинейност на отклика на органичните сцинтилатори

Причина: При голяма плътност на възбудените състояния стават възможни допълнителни междумолекулни реакции и канали за дисипация на енергия, които водят до безрадиационен преход $S_1 \rightarrow S_0$.

Ефектите на йонизационно гасене са съществени за частици с високо линейно отдаване на енергията (голяма спираща способност), например за:

- Тежки заредени частици: p^+ , α -частици, ускорени ядра
- Бавни β -частици (кинетична енергия < 20 keV)



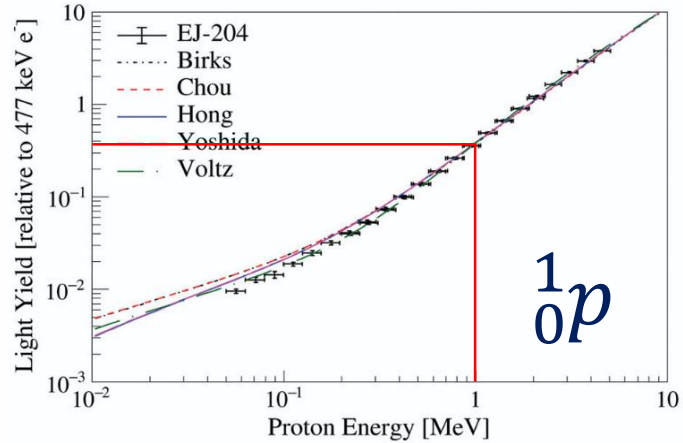
Нетният резултат от йонизационното гасене е, че светлинният добив става функция от линейното отдаване на енергията на частицата:

$$\bar{n}(E) = S \cdot L(E)$$

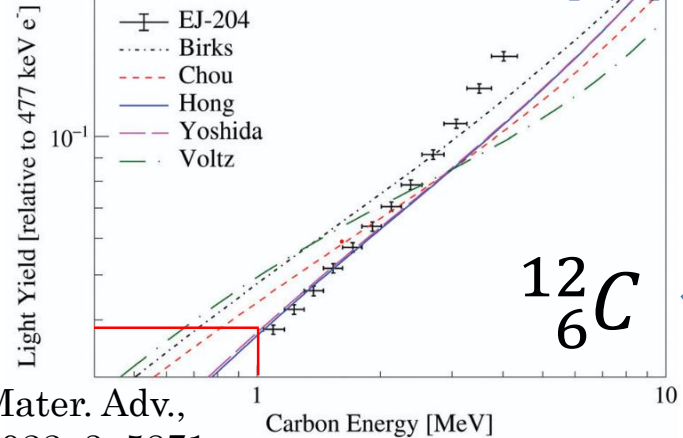
Съответно: $\varepsilon = \varepsilon(E)$

I.4. Зависимост между излъчените фотони и E

$S1 \rightarrow S0 + h\nu$ – бърза флуоресценция



$T1 + T1 \rightarrow S1 + S0$ – забавена флуоресценция



Йонизационното гасене често се описва с полу-емпиричната формула на Бъркс:

$$\bar{m}(E) = S \int_0^E \frac{dE}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

Описва се с

Не се описва с

$\bar{m}(E)$ – среден брой фотони, излъчени при отдаване на енергия E
 S – светлинен добив на сцинтилатора
 kB – параметър на йонизационно гасене
 dE/dx – спираща способност на частицата

1.5. Предишни изследвания



ELSEVIER

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 353 (1994) 41–45

**NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH**
Section A

COCO, a Compton coincidence experiment to study liquid scintillator response in the 1–20 keV energy range

M.N. Péron, P. Cassette *

Laboratoire Primaire des Rayonnements Ionisants, CEA / DAMRI, CE Saclay, BP 52, 91193 Gif-sur-Yvette Cedex, France



ELSEVIER

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 369 (1996) 344–347

**NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH**
Section A

A Compton coincidence study of liquid scintillator response to low-energy electrons

M.N. Peron*, P. Cassette

Laboratoire Primaire des Rayonnements Ionisants, CEA/Saclay, BP 52, 91193 Gif-sur-Yvette, Cedex, France



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

 **ScienceDirect**

Applied Radiation and Isotopes 66 (2008) 1026–1032

www.elsevier.com/locate/apradiso

**Applied
Radiation and
Isotopes**

The Compton source efficiency tracing method in liquid scintillation counting: A new standardization method using a TDCR counter with a Compton spectrometer

P. Cassette*, Phuc Do

LNE-Laboratoire National Henri Becquerel, CEA-Saclay, F91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France

www.nature.com/scientificreports

scientific reports

 Check for updates

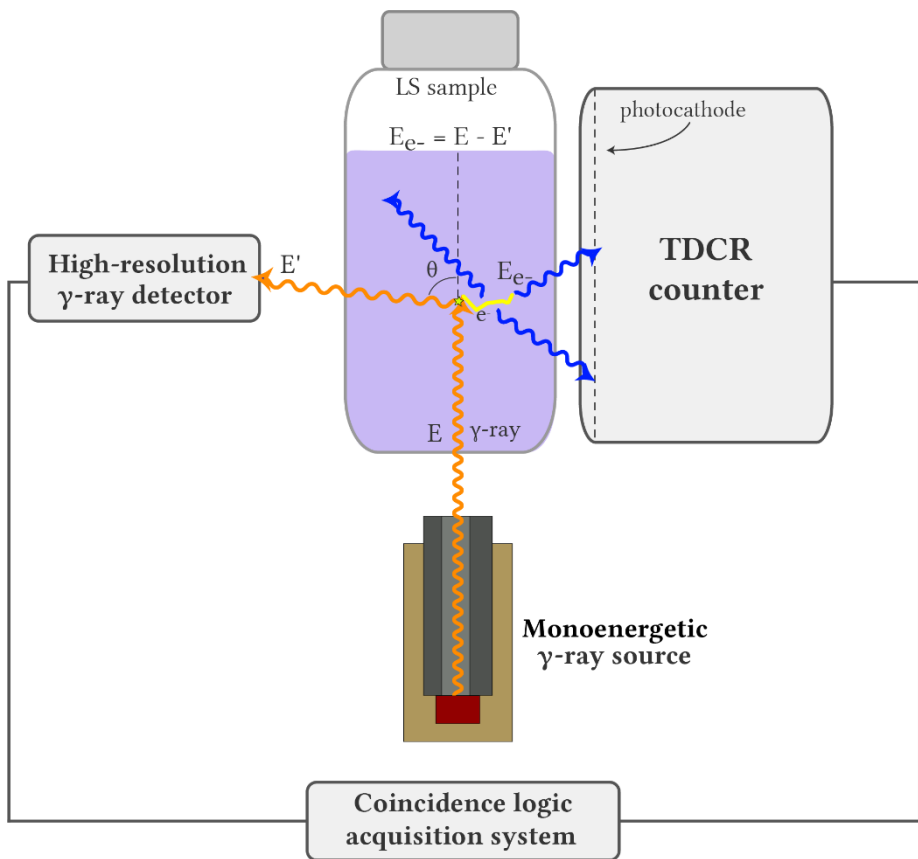
OPEN **A compact detector system for simultaneous measurements of the light yield non-linearity and timing properties of scintillators**

Benoit Sabot^{1,2}, Chavdar Dutsov^{2,6}, Philippe Cassette², Krasimir Mitev², Matthieu Hamel³, Guillaume H. V. Bertrand³, Kheirredine Lebbou⁴ & Christophe Dujardin^{4,5}

- Създаване на Compton-TDCR спектрометър в СУ за изследване на светлинния отклик на органични сцинтилатори
- Изследване на светлинния добив на течносцинтилационни коктейли. Определяне на kV и S на течносцинтилационни източници
- Приложения на системата в TDCR измервания за целите на радионуклидната метрология

1.6. Принцип на Compton-TDCR

Изследване на светлинния отклик при известна енергия на комптъновия електрон



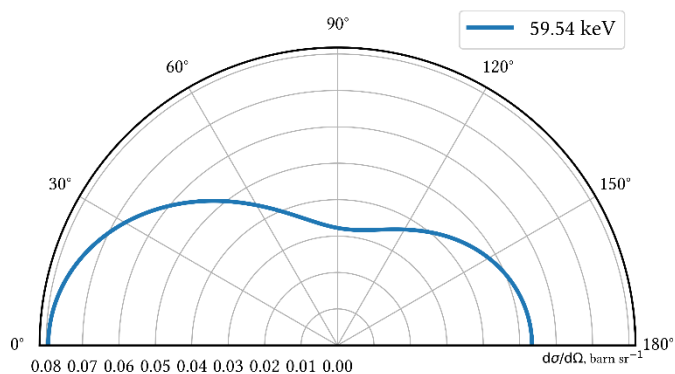
- Гама-квант се разсейва чрез Комптънов ефект в сцинтилатора
- Енергията на разсеяния фотон се измерва с nHPGe

$$E_{e^-} = E - E'$$

E_{e^-} – енергия на комптъновия електрон

E – енергия на гама-кванта

E' – енергия на комптъново разсеяния гама-квант



Разпределение на диференциалното сечение за разсейване по Клайн–Нишина

II. Разработване на Compton-TDCR система

II.1. Разработване на C-TDCR система

3 ФЕУ-та



Оптическа камера



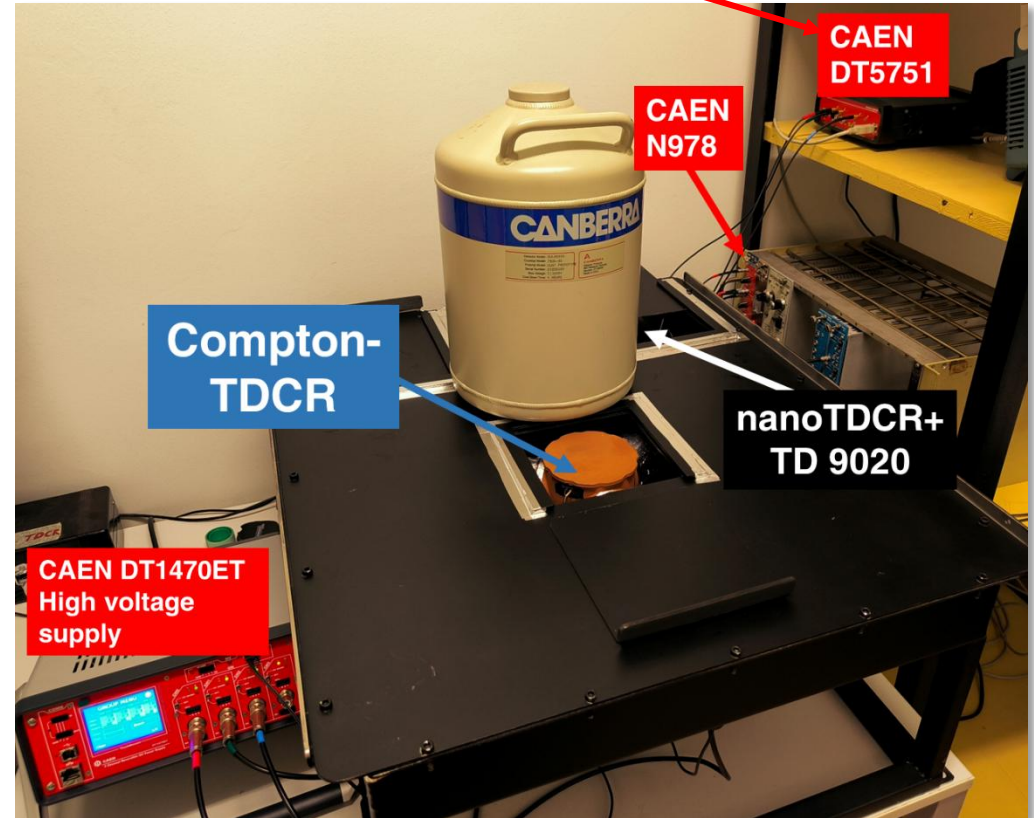
γ-канал



Анализатори
nanoTDCR+,
nanoMCA-II



Цифровизатор,
list-mode файлове



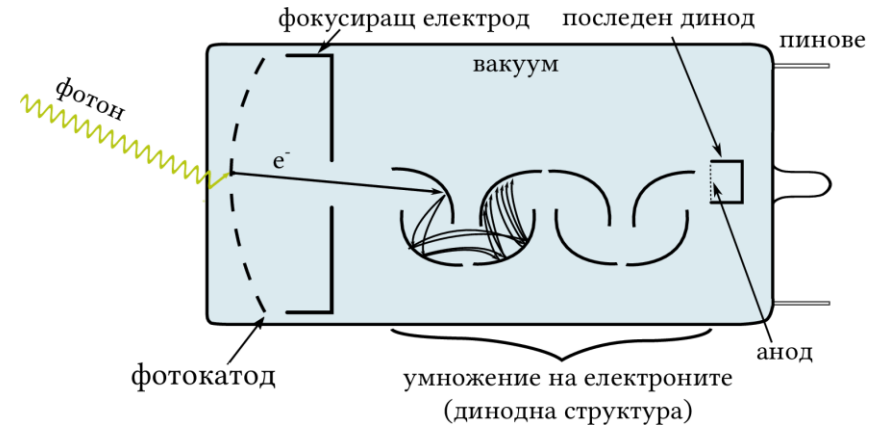
II.1. Тестове за избор на ФЕУ за TDCR канал

Искаме:

- ФЕУ с нисък шум и висока и постоянна квантова ефективност ε_q
- ФЕУ с голям и хомогенен фотокатоден отклик

Нехомогенността на отклика на фотокатода има отрицателно въздействие върху:

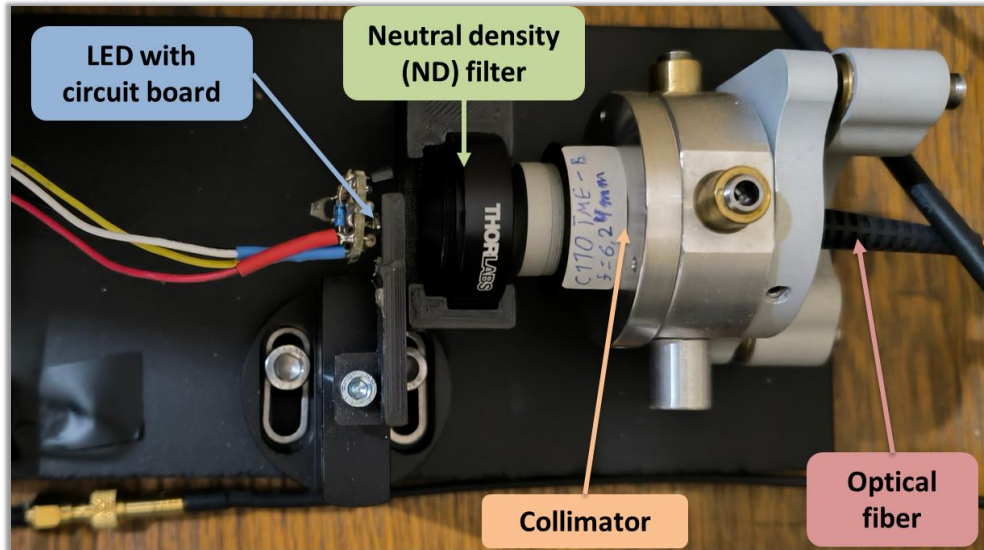
- Енергийната разделителна способност в сцинтилационната спектрометрия
- Ефективността за регистрация и оттам върху техниките за абсолютно измерване на активност като методите TDCR



$$\varepsilon_q = \frac{n_{ph.e^-}}{n_{ph}}$$

II.1. Сканираща система

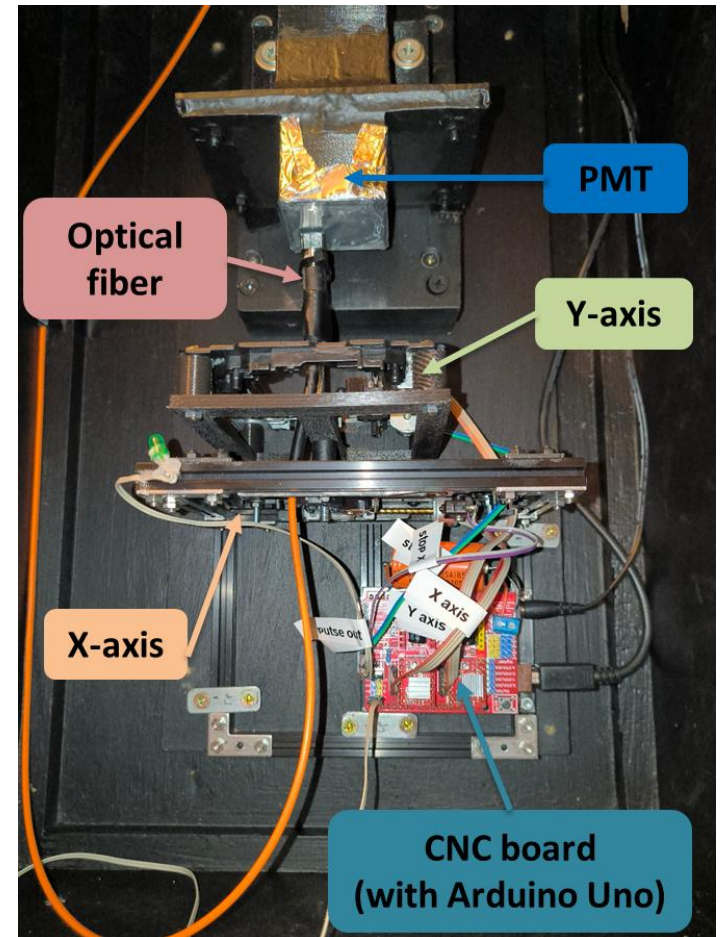
Източник на светлинни импулси



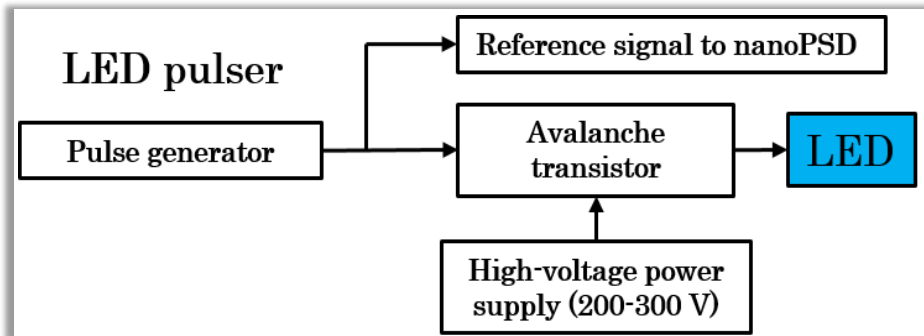
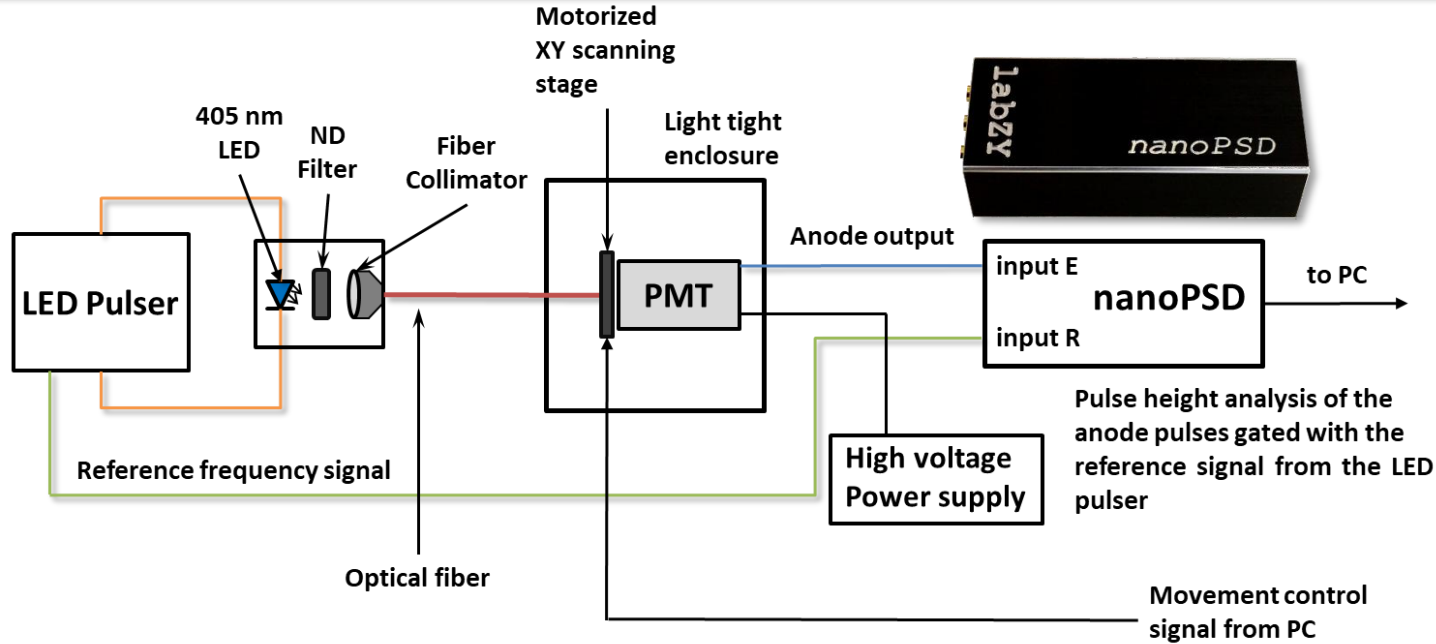
Ограничения на системата:

- Минимална стъпка: 0.2 mm (\varnothing на влакното)
- Площ на сканиране: 3.6 x 3.2 cm²

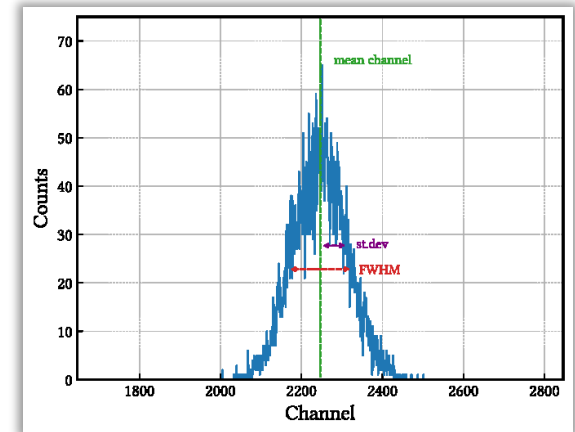
Механизирана система за сканиране



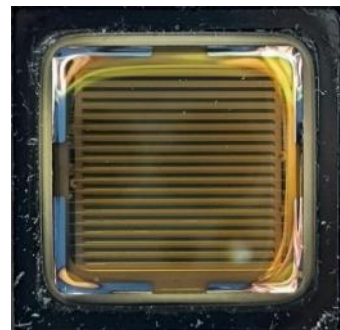
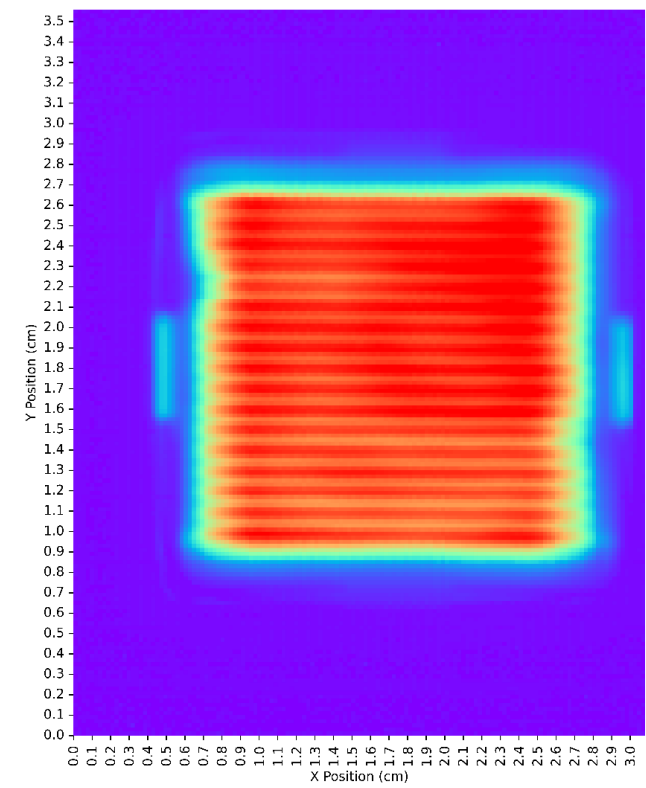
II.1. Сканиране и обработка на сигналите от ФЕУ



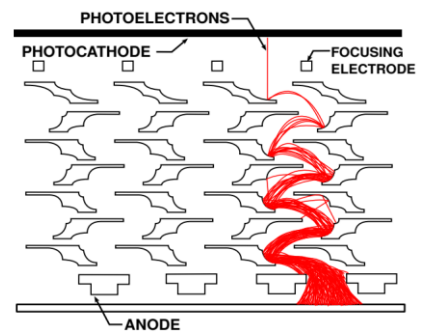
Output spectrum



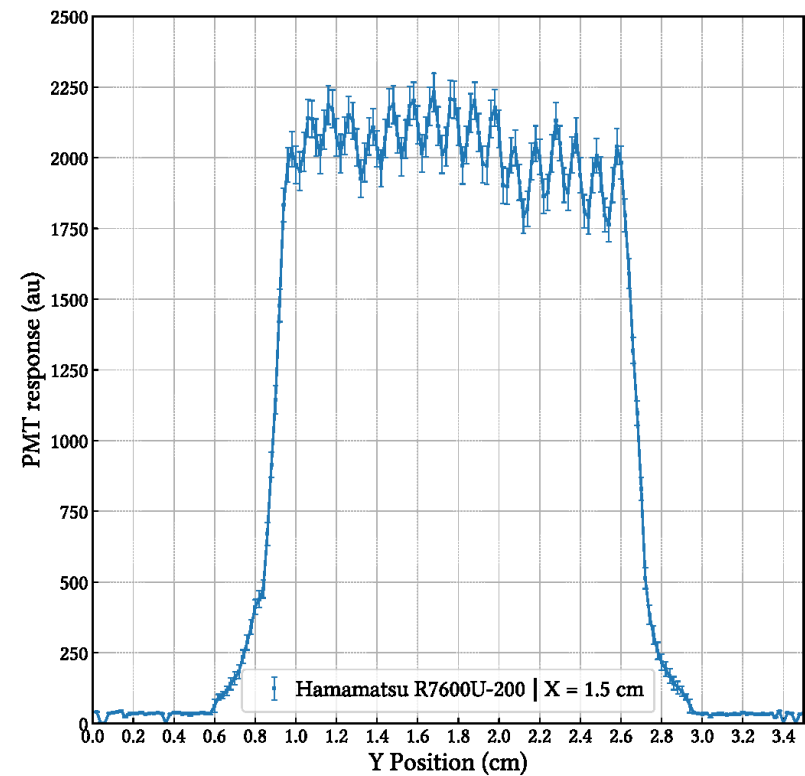
II.1. Отклик на Hamamatsu R7600U-200



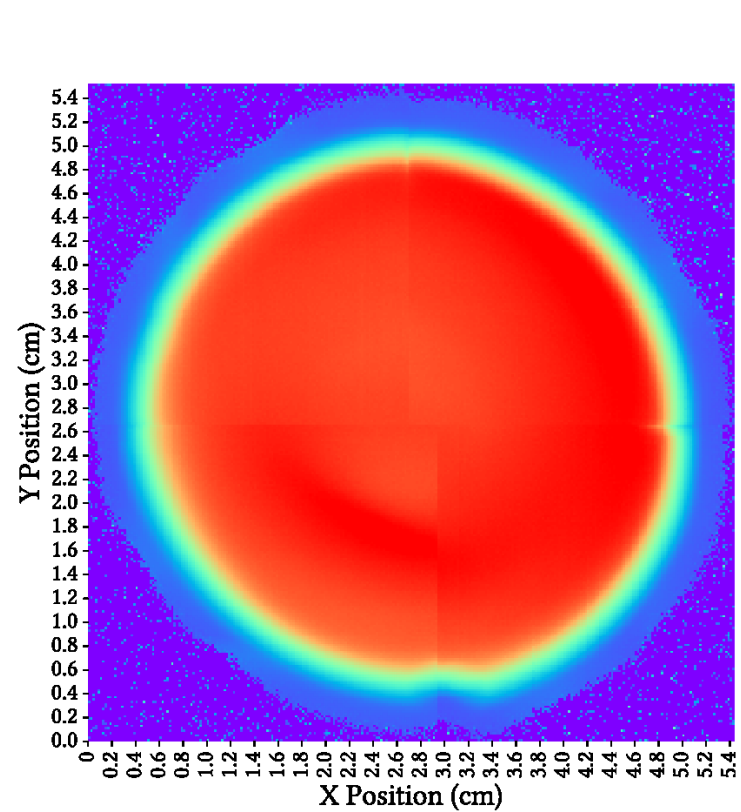
Прозорец



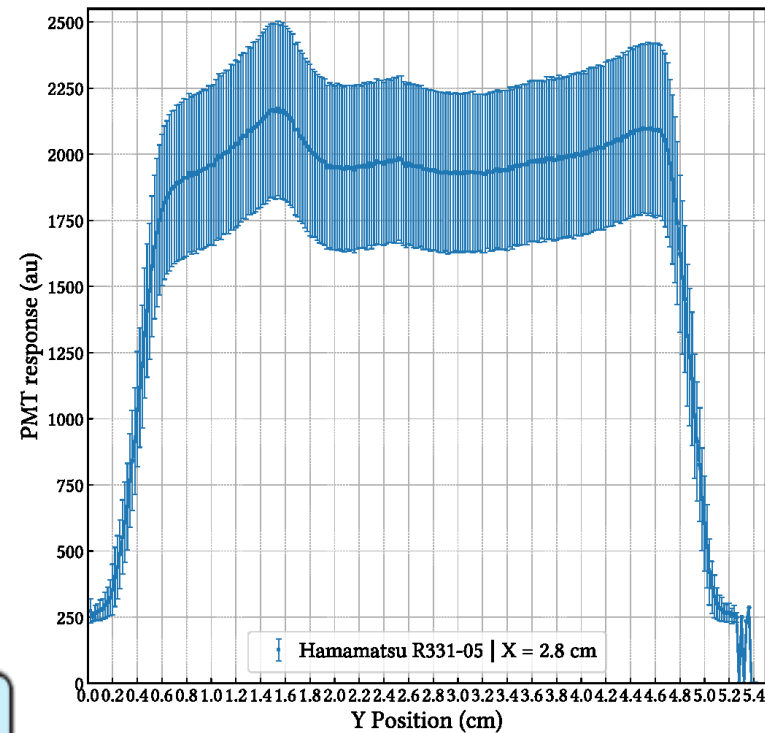
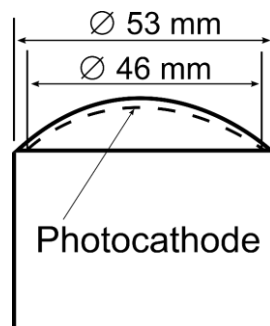
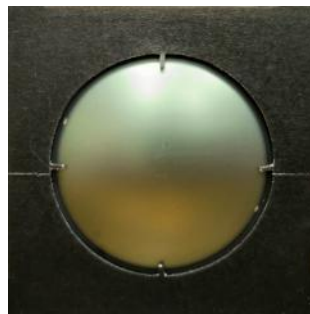
Динодна система



II.1. Отклик на Hamamatsu R331-05

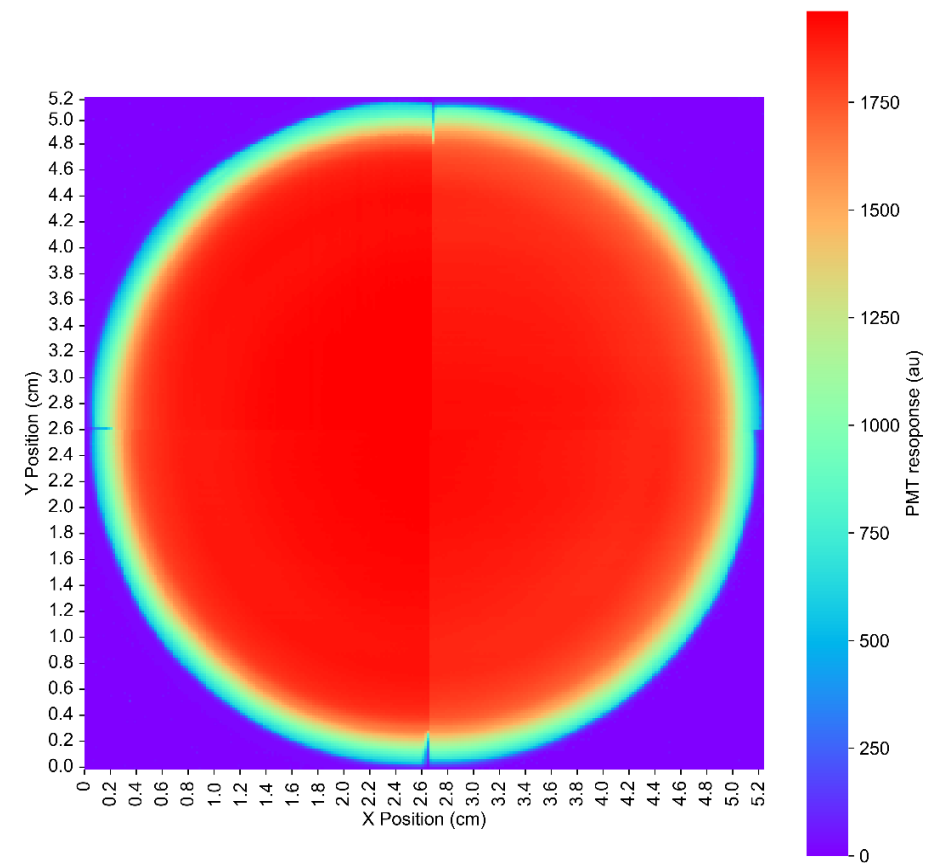


Прозорец

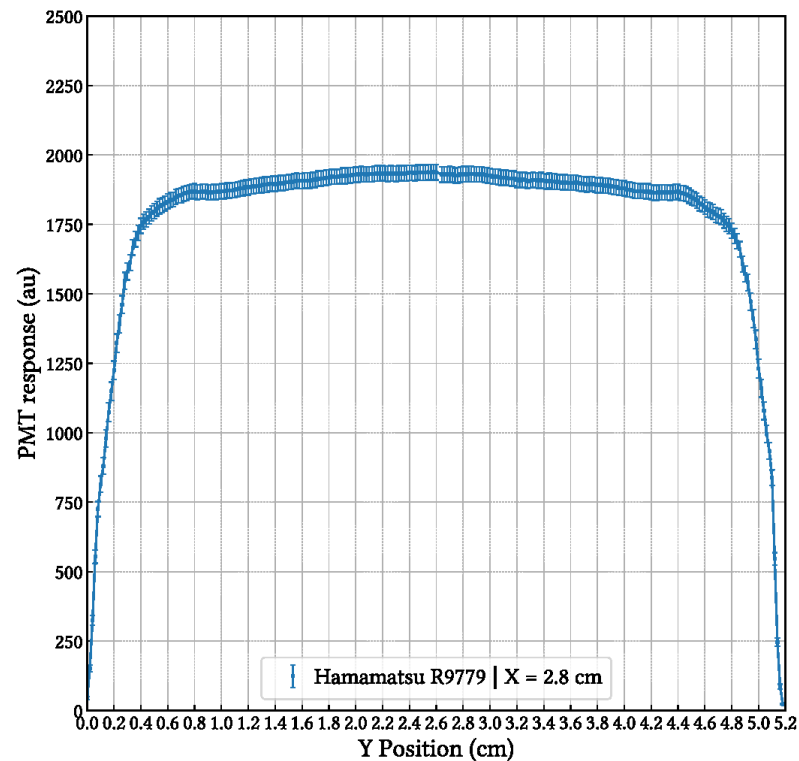


Динодна система

II.1. Отклик на Hamamatsu R9779

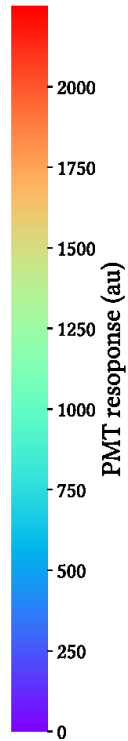
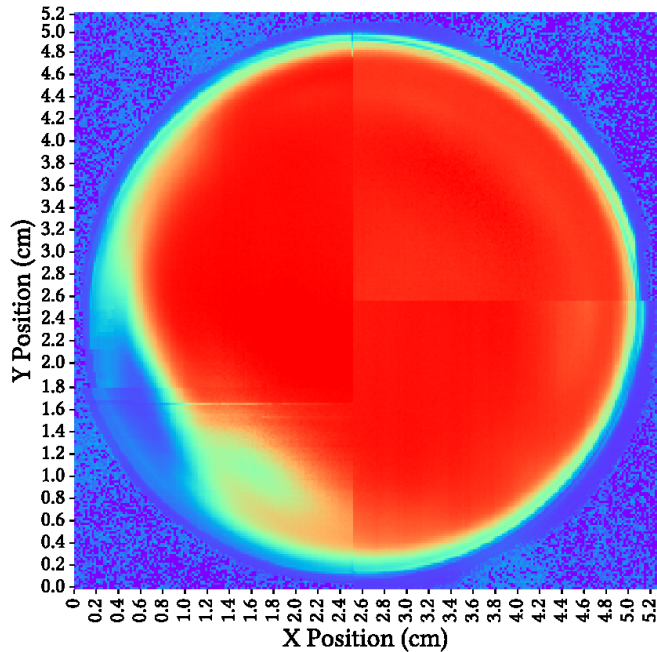


Прозорец

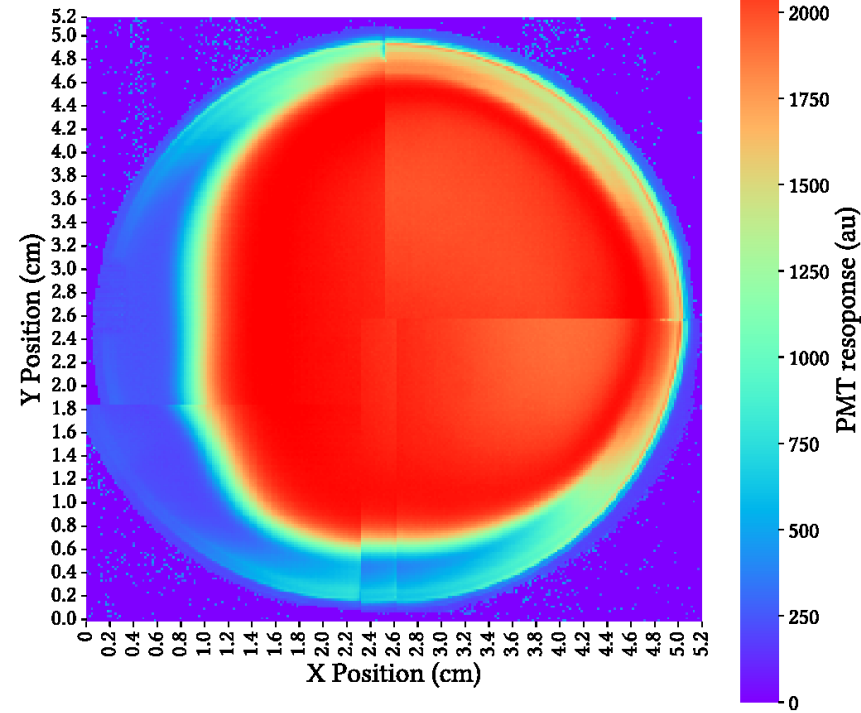


Хомогенен отклик, но не е чувствително за единични фотони

II.1. Сканиране на отклика на Philips XR2020Q



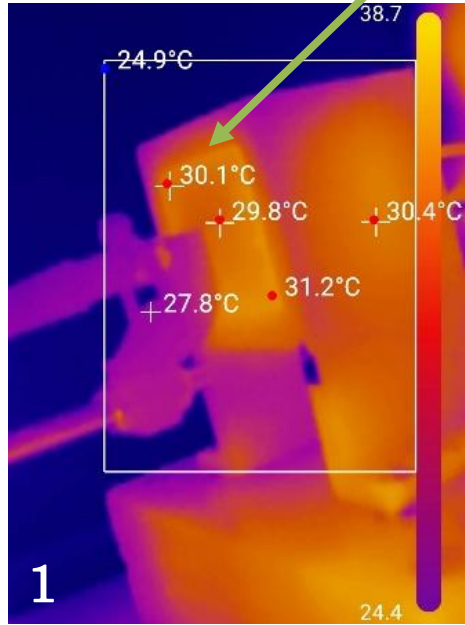
Отклик на ФЕУ
преди и след
дефокусиране



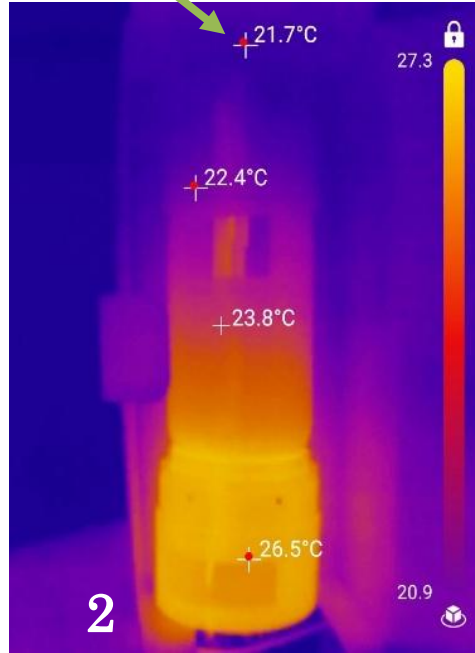
Променя се геометрията на измерване,
не е подходящ метод в TDCR

II.1. Температурни измервания

Температура на фотокатода след 50 часа приложено високо напрежение

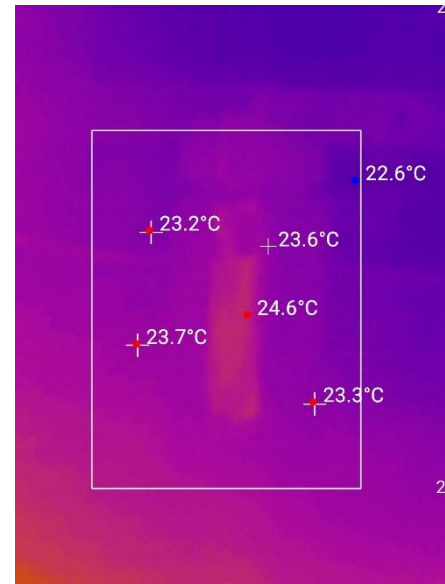


Hamamatsu H11934-203

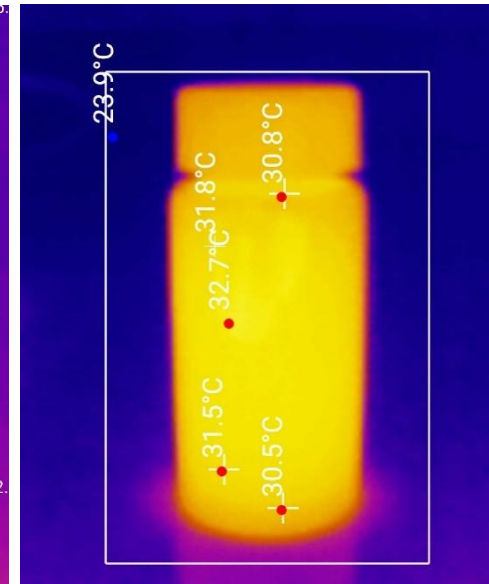


Hamamatsu R331-05

Течносцинтилационно шишенце
в TDCR брояч с
Hamamatsu H11934-203



Преди поставяне
в брояча



След 24 часа в брояча

II.1. Резултати от тестовете

- Моделът **Hamamatsu R331-05** беше избран като най-подходящ за Compton-TDCR системата
- Дизайнът на оптичните камери да покрива неефективните области на ФЕУ-тата
- При дефокусирането се променя геометрията на измерване в оптичната камера → не е подходящо за TDCR измервания.

Получените резултати имат значение и за сцинтилационната спектрометрия като цяло, защото нехомогенността на отклика на ФЕУ разваля разделителната способност.

Тестовете на ФЕУ и получените резултати са публикувани в:

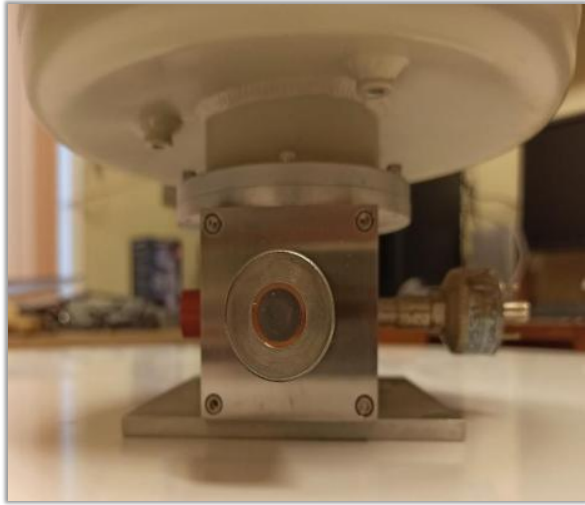
Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry
<https://doi.org/10.1007/s10967-025-10028-y>



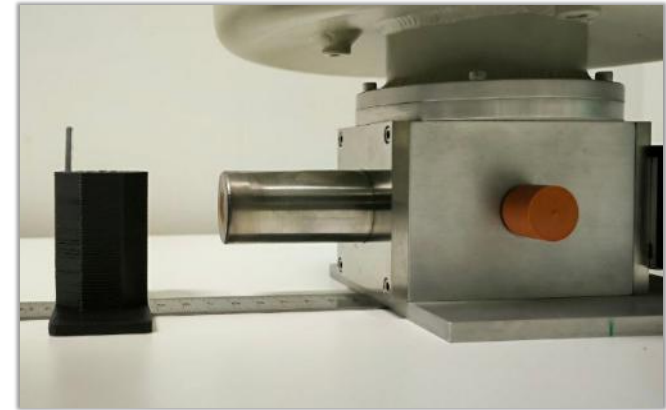
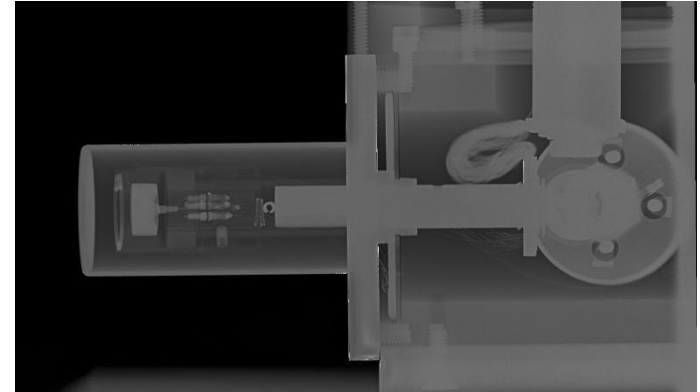
Automatic system for testing PMT photocathode homogeneity

V. Todorov¹ · P. Cassette¹ · S. Georgiev¹ · B. Sabot² · K. Mitev¹

II.2. γ -канал: nHPGe детектор

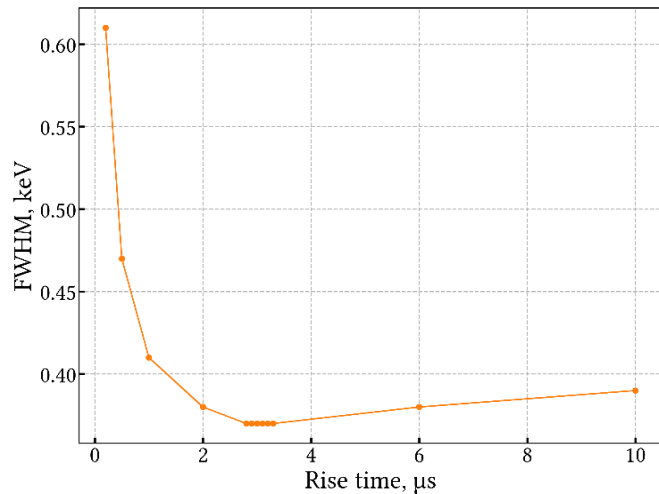


Цифрова обработка на импулсите от предусилвателя на nHPGe (transistor reset) и многоканален анализатор



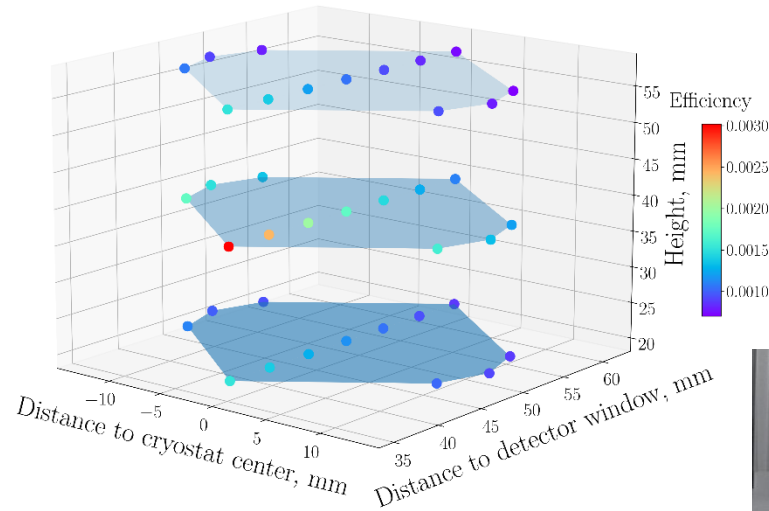
II.2. γ -канал: охарактеризиране на nHPGe

Настройка на параметрите за формиране на импулса на nanoMCA-II*

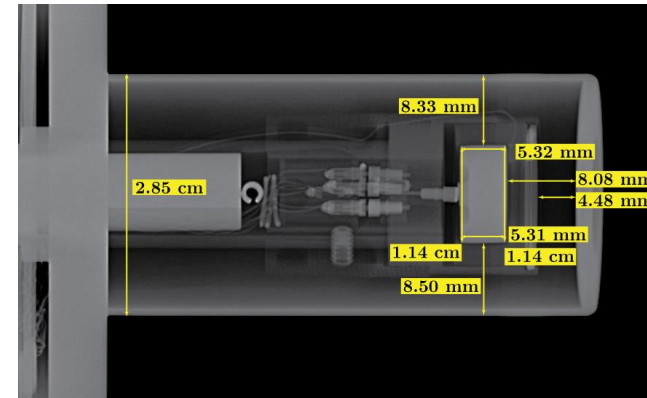


$R=0.62\%$ (FWHM=370 eV) за пика на пълно поглъщане на ^{241}Am

Карта на ефективността за регистрация в пика на пълно поглъщане на линията с енергия 59.54 keV на ^{241}Am *

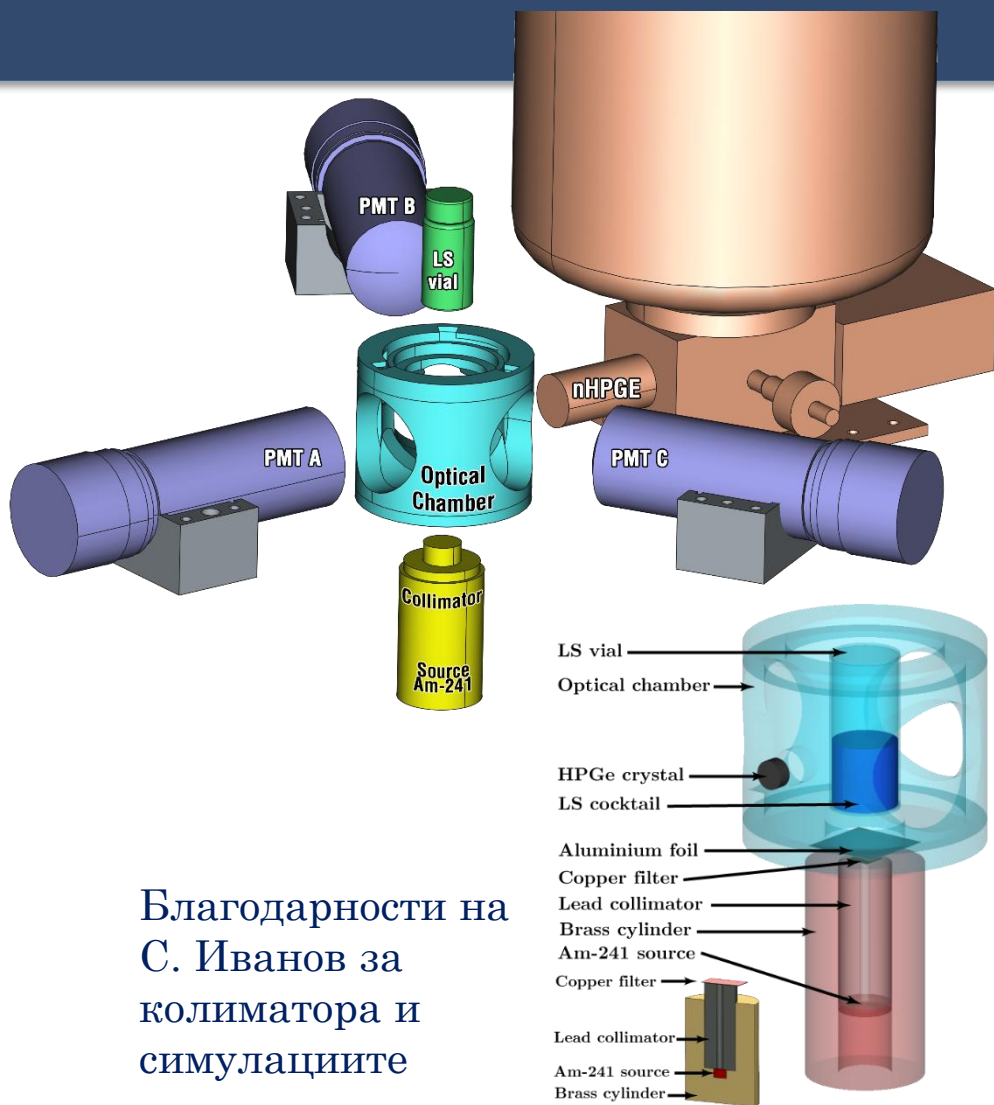
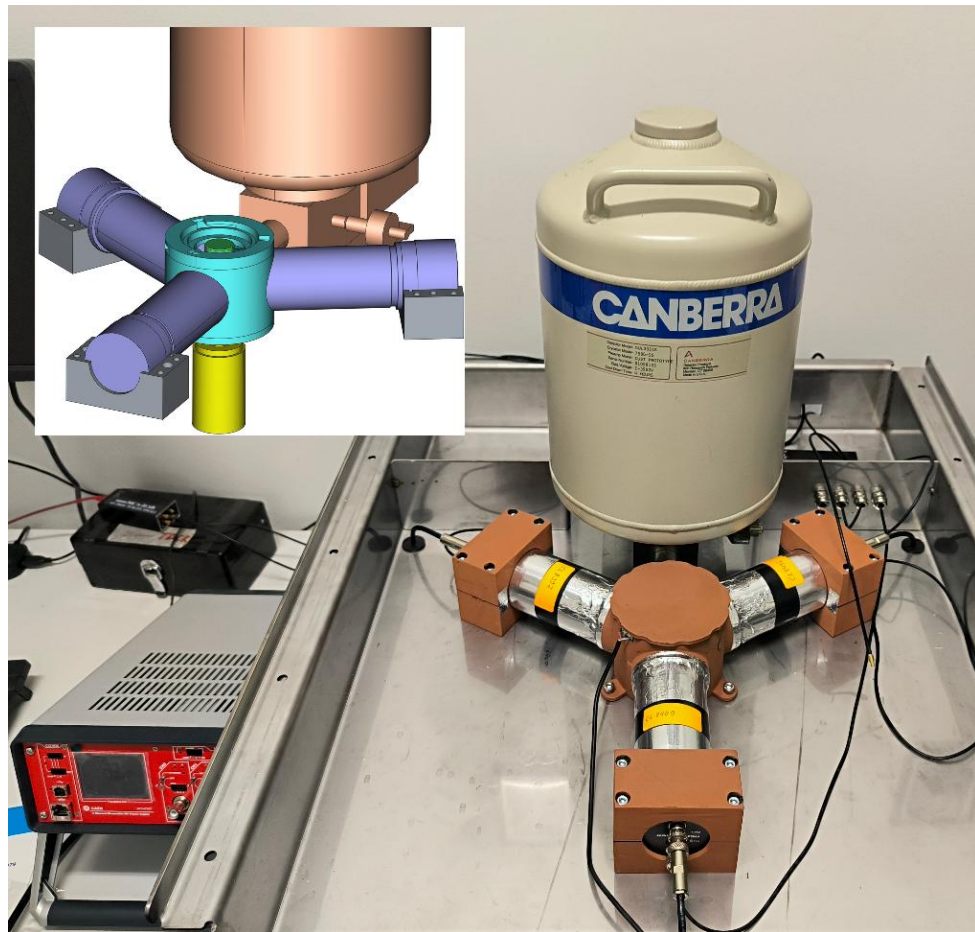


Охарактеризиране на геометричните размери на детектора. Оценените размери на кристала са използвани в МК симулацията



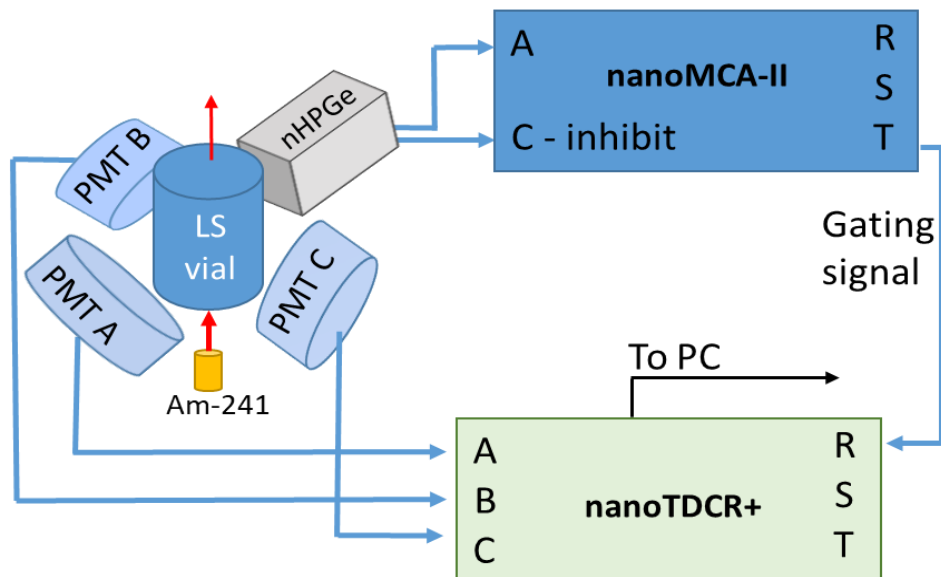
*изследвания на Християна Стойчева (дипломна работа)

II.3. Compton-TDCR система

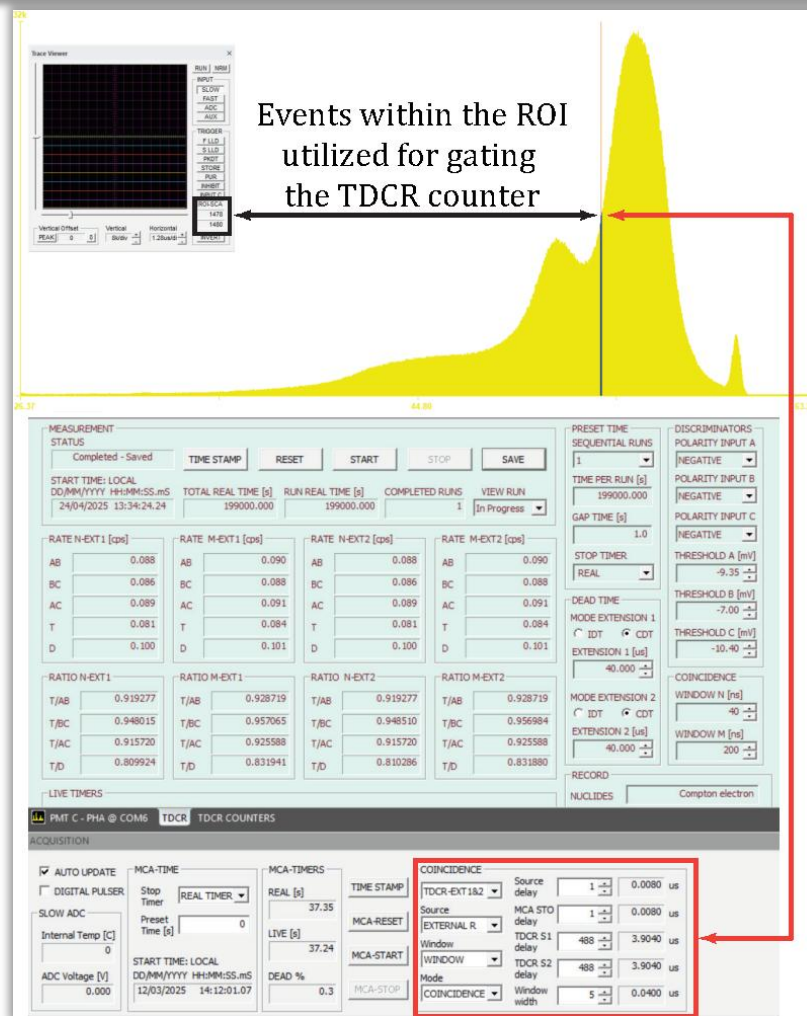


II.4. Електроника на С-TDCR системата

Благодарности на В. Йорданов за цялата електроника за системата



Всеки импулс в ROI на nHPGE
тригерира прозорец на съвпадения в TDCR
Това отнема много време:
1 охарактеризиране на проба > 2 месеца

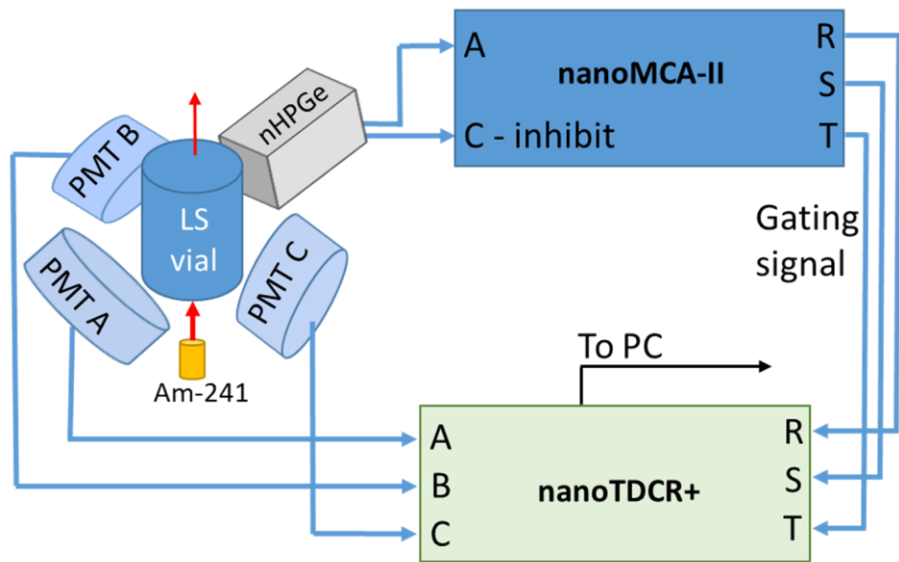


II.4. Електроника на C-TDCR системата

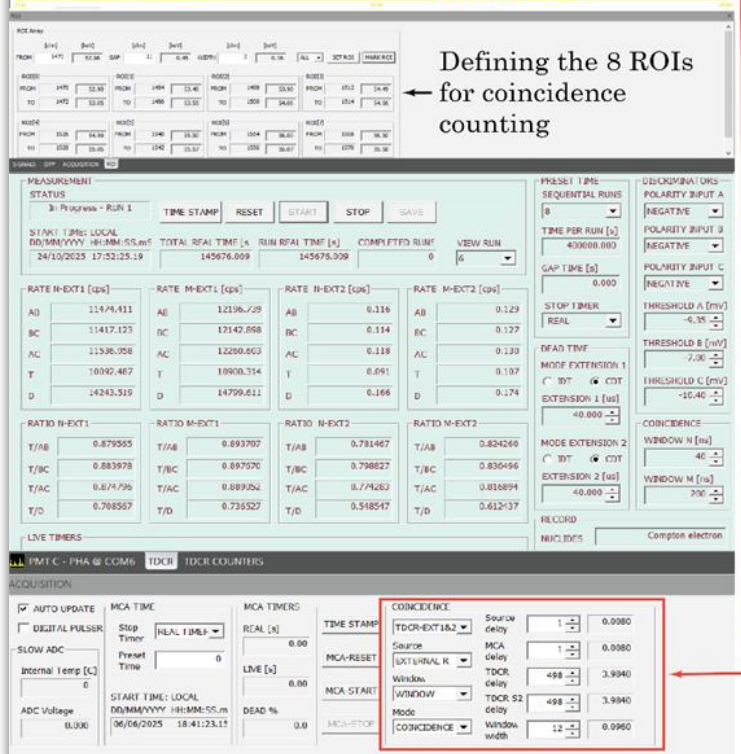
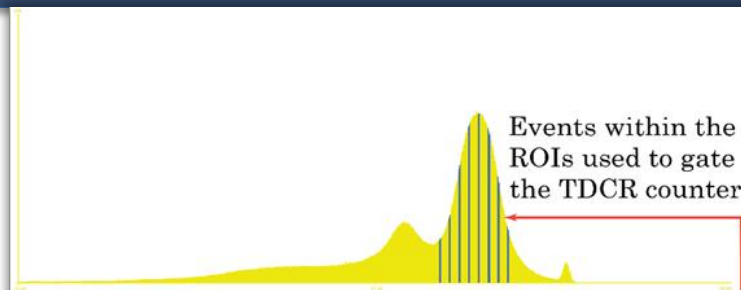
Нови версии на FPGA за nanoMCA-II и nanoTDCR+ направени от В. Йорданов

⇒ 8 паралелни ROI в гама канала

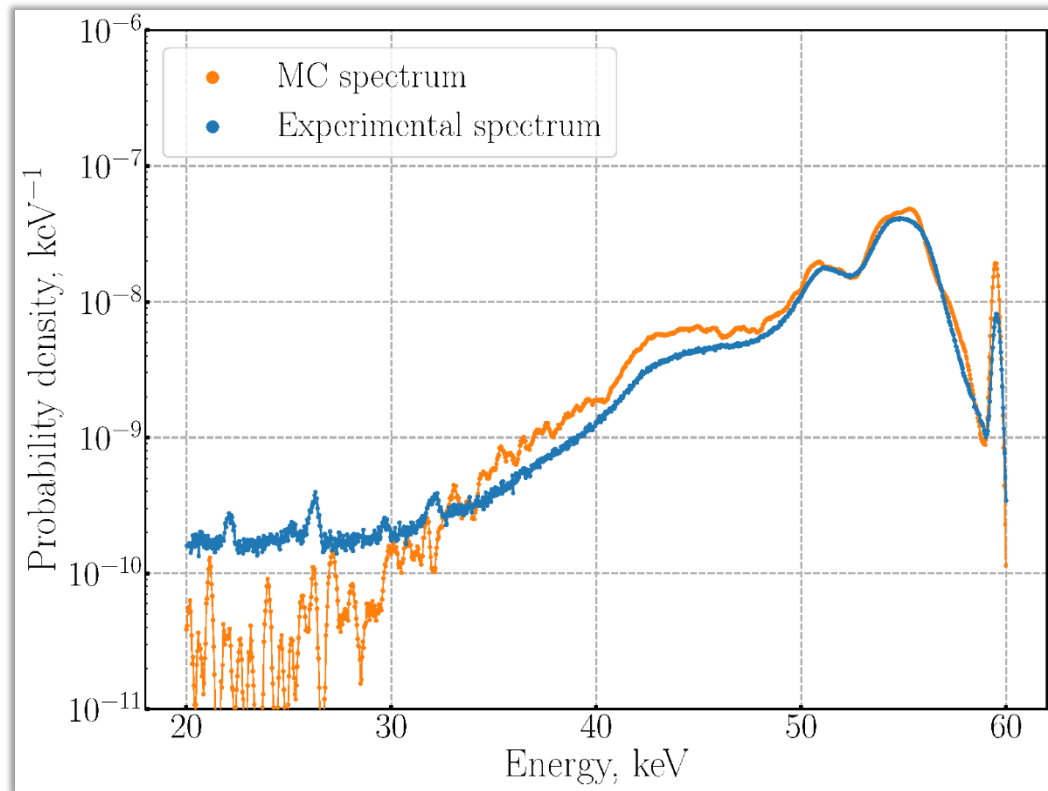
На всяка съответства независимо TDCR измерване



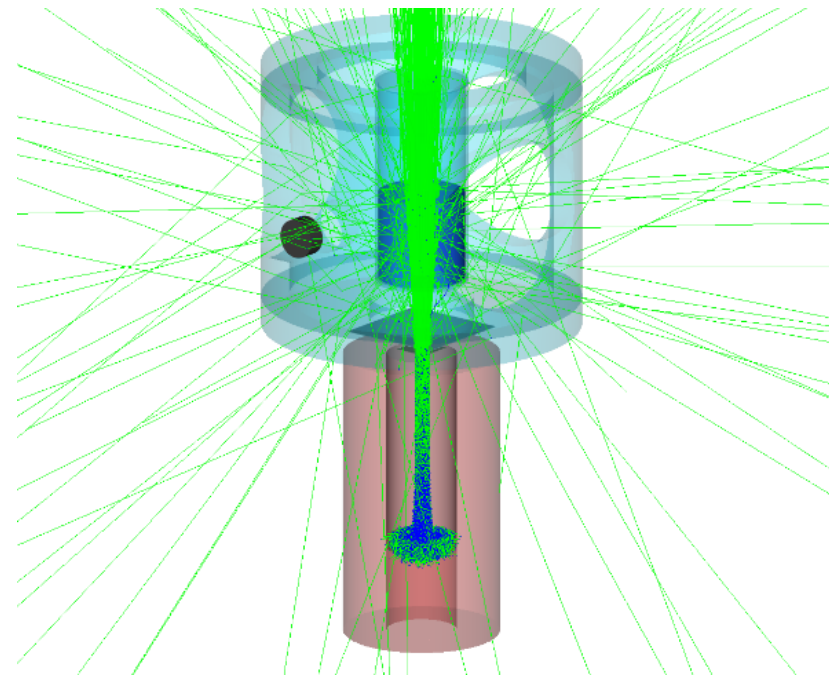
1 охарактеризиране на проба ~ 2 седмици



II.5. Валидиране на C-TDCR системата с МК симулации

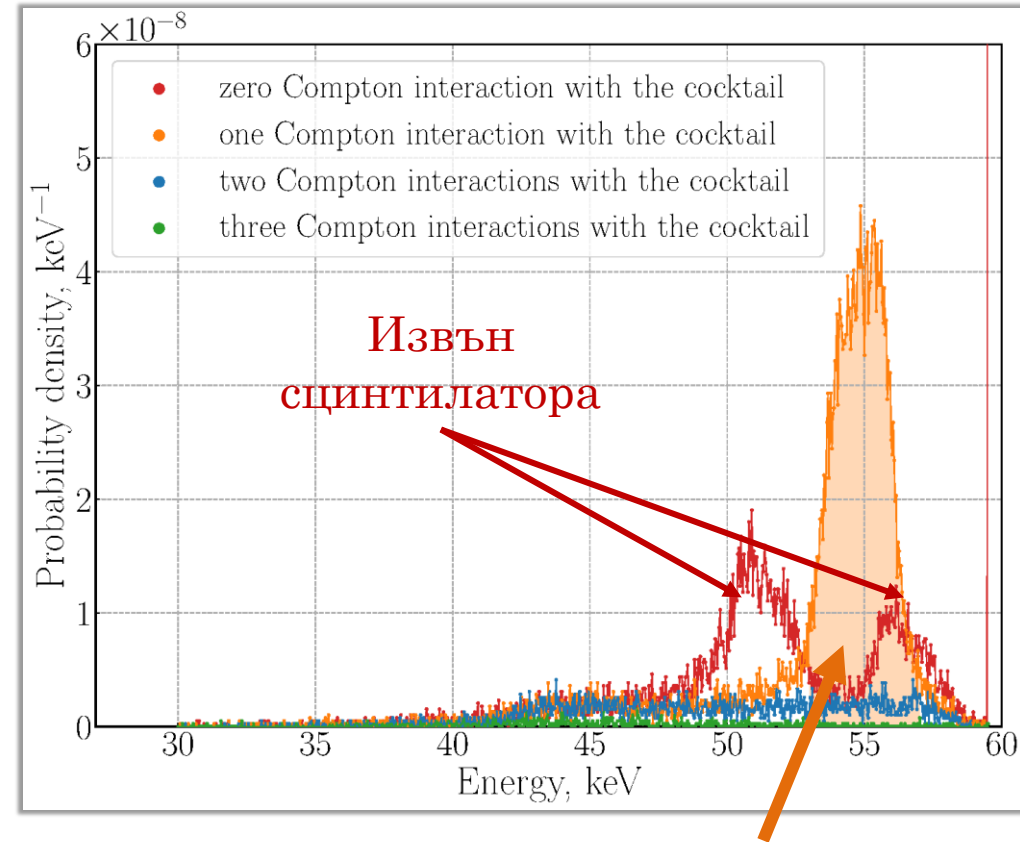
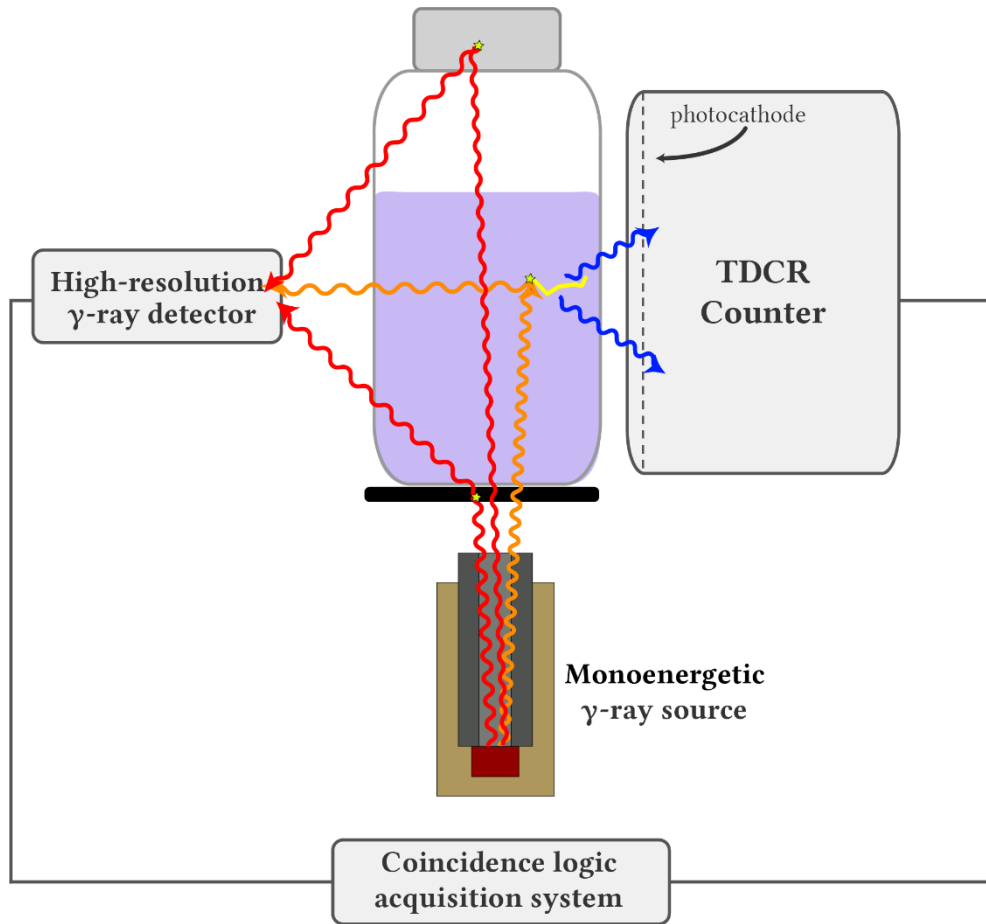


Много добро съгласуване между
симулиран и експериментален спектър



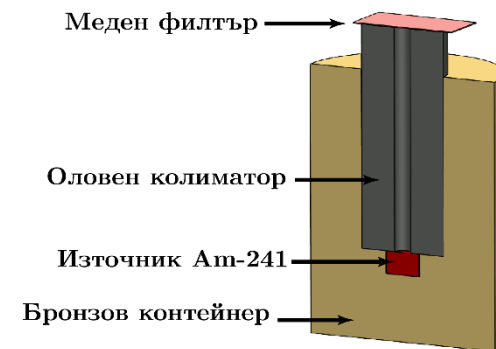
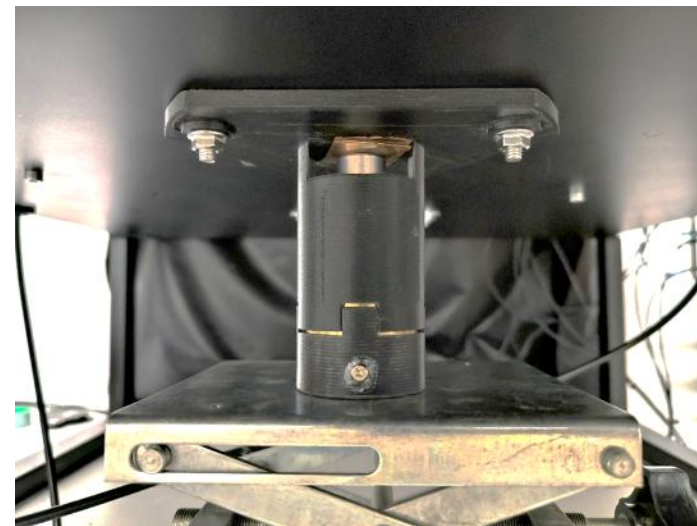
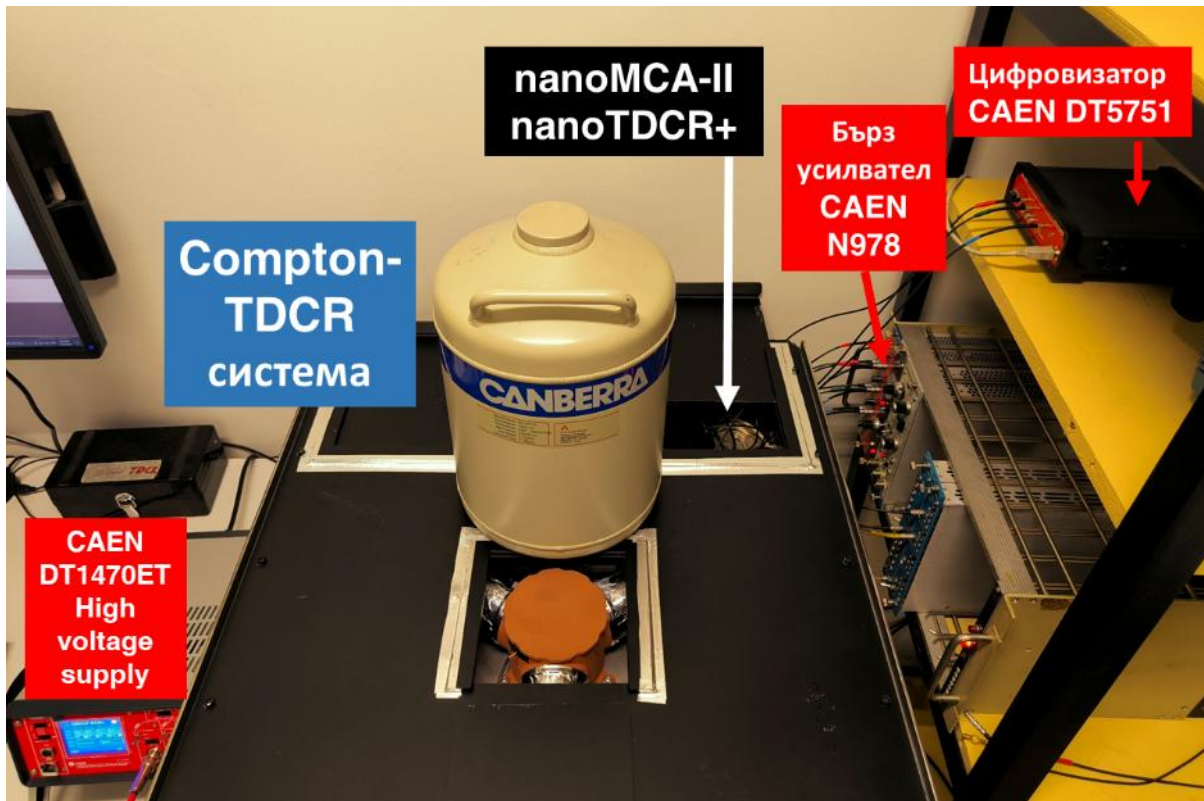
Благодарности на
С. Иванов за симулациите

II.5. Валидиране на C-TDCR системата с МК симулации



Използваем диапазон от енергии в Compton-TDCR измерванията

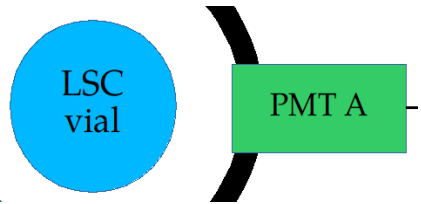
II.6. Охарактеризирана C-TDCR система



III. Резултати

III Оценка на светлинния добив – Вероятностен модел

Поасонов модел на статистиката на детектиране.
Разглеждаме ФЕУ А.



$$P(n|\bar{n}_A) = \frac{\bar{n}_A^n e^{-\bar{n}_A}}{n!}$$

Поасонов модел на вероятността за създаване на n фотоелектрона при средно \bar{n}_A във ФЕУ А

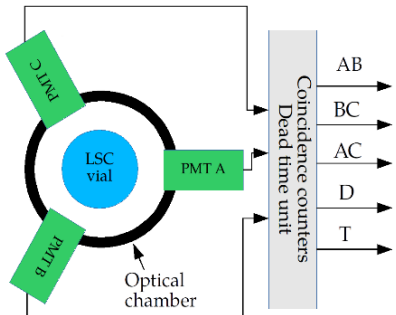
$$P_A(0|\bar{n}_A) = e^{-\bar{n}_A}$$

Вероятност за детектиране на 0 фотоелектрона във ФЕУ А при средно \bar{n}_A

$$P_A = \varepsilon_A = 1 - P_A(0|\bar{n}_A) = 1 - e^{-\bar{n}_A}$$

Ефективност за детектиране при очаквани \bar{n}_A фотоелектрона

За целия TDCR брояч с ФЕУ А, В и С имаме:



За голям брой събития:

$$\varepsilon_{BC} = \varepsilon_B \cdot \varepsilon_C$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_A \cdot \varepsilon_B \cdot \varepsilon_C$$

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{BC}} = \varepsilon_A = 1 - e^{-\bar{n}_A}$$

$$\frac{T}{BC} \rightarrow \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{BC}} = \varepsilon_A$$

$$\frac{T}{BC} = (1 - e^{-\bar{n}_A}) \Rightarrow \bar{n}_A = -\ln\left(1 - \frac{T}{BC}\right)$$

$$\frac{T}{AC} = (1 - e^{-\bar{n}_B}) \Rightarrow \bar{n}_B = -\ln\left(1 - \frac{T}{AC}\right)$$

$$\frac{T}{AB} = (1 - e^{-\bar{n}_C}) \Rightarrow \bar{n}_C = -\ln\left(1 - \frac{T}{AB}\right)$$

$$\bar{n} = \bar{n}_A + \bar{n}_B + \bar{n}_C$$

III. Изследване на светлинния отклик

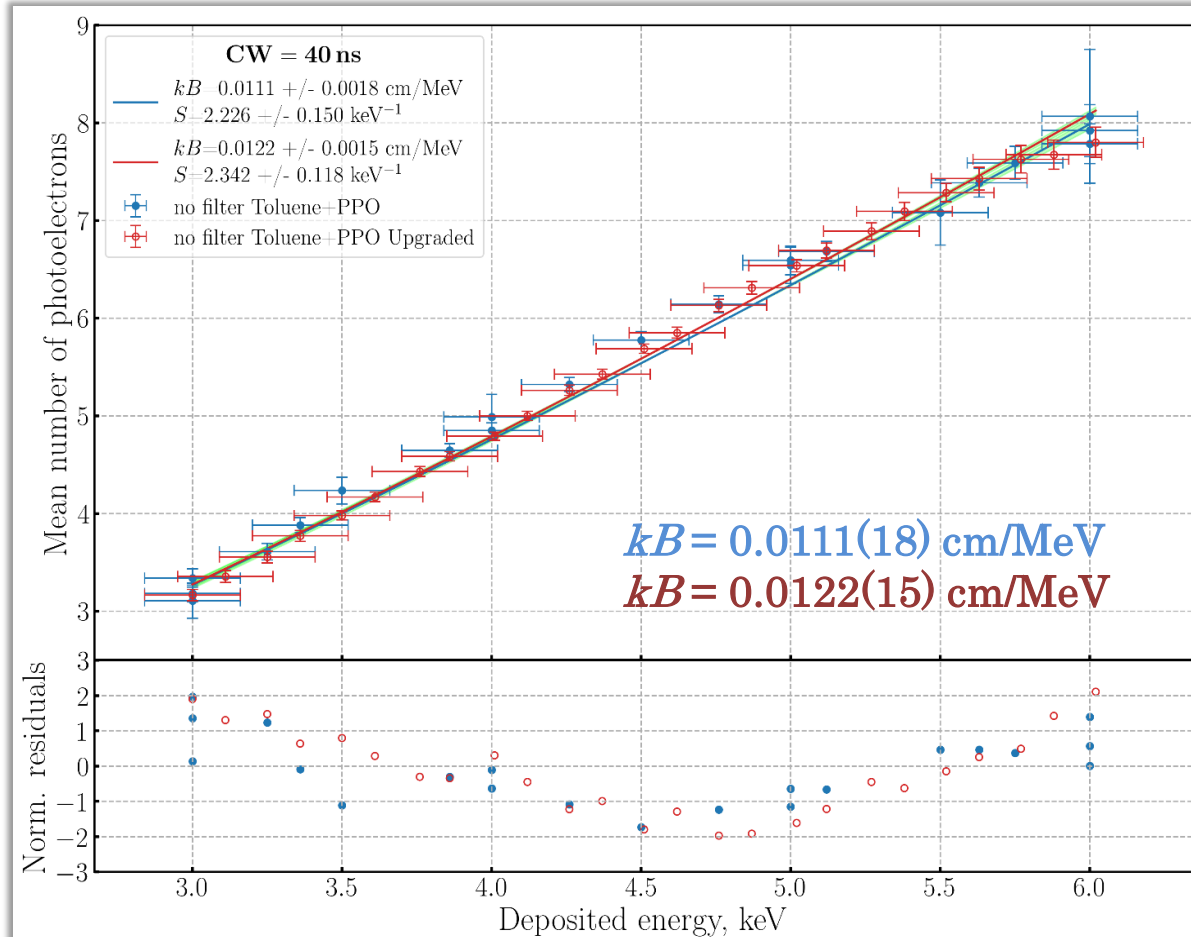
Средният брой детектирани фотоелектрони като функция на отдадената в сцинтилатора енергия е фитирана с функцията:

$$\bar{n}(E) = S \cdot L(E) = S \int_0^E \frac{dE'}{1 + kB(dE'/dx)}$$

Оценяваме от
апроксимирането (фит)

Апроксимиране по метода на ортогоналната регресия (ODR)

Toluene + PPO (^3H)

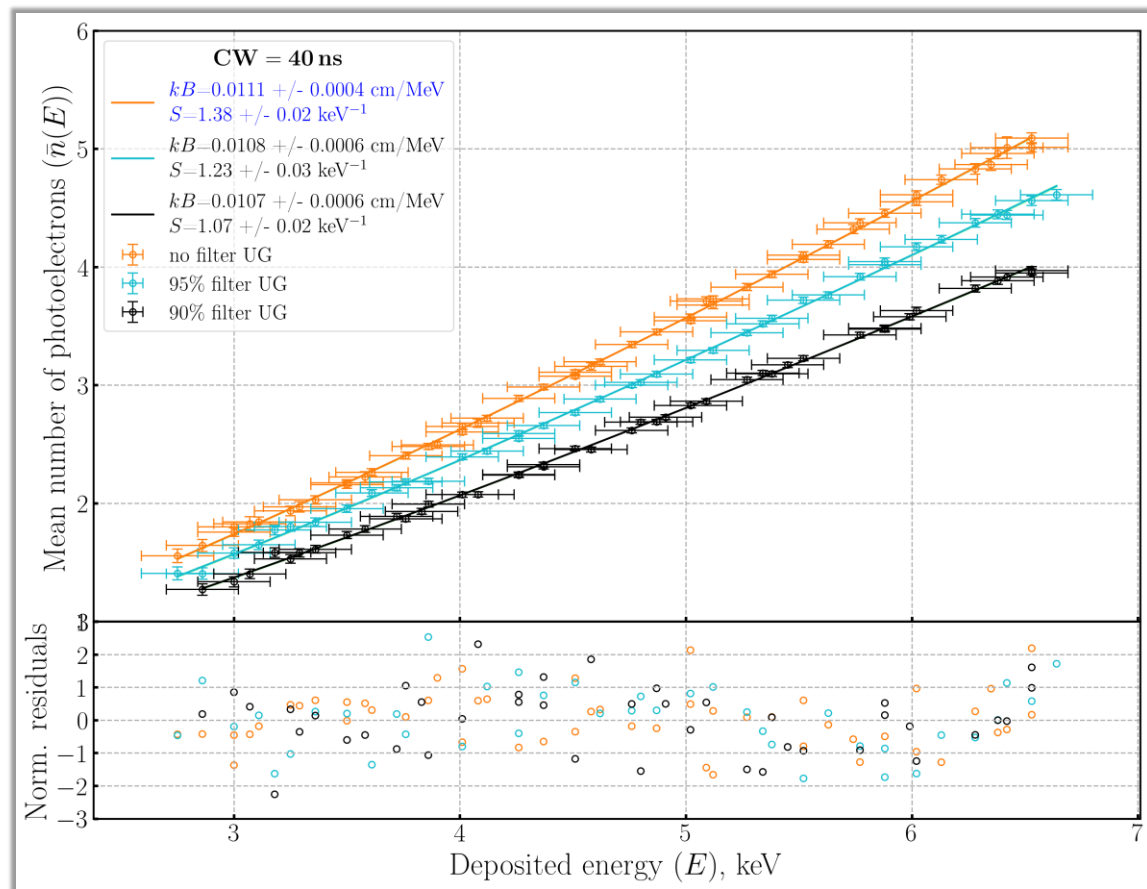


III. Изследване на светлинния отклик

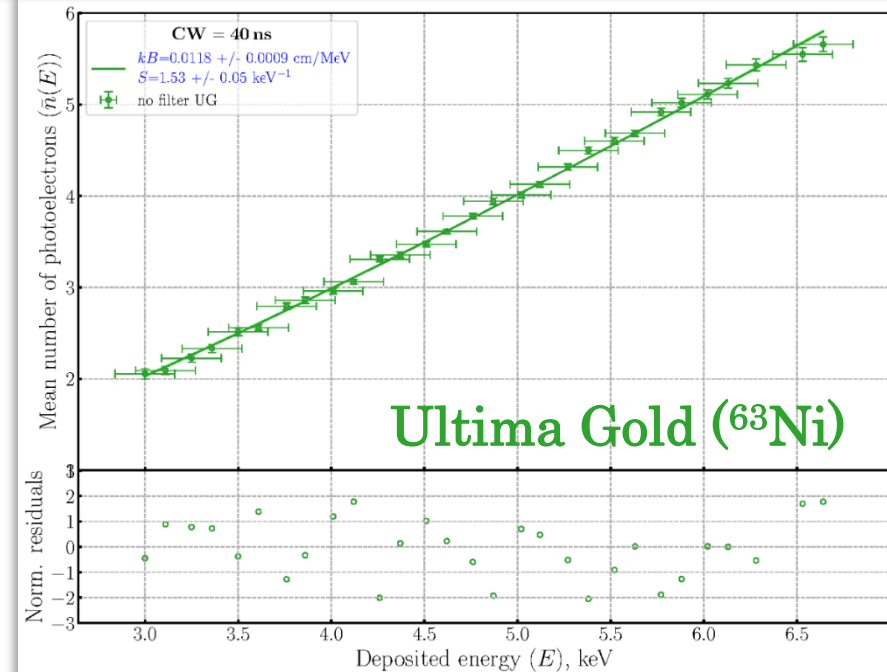
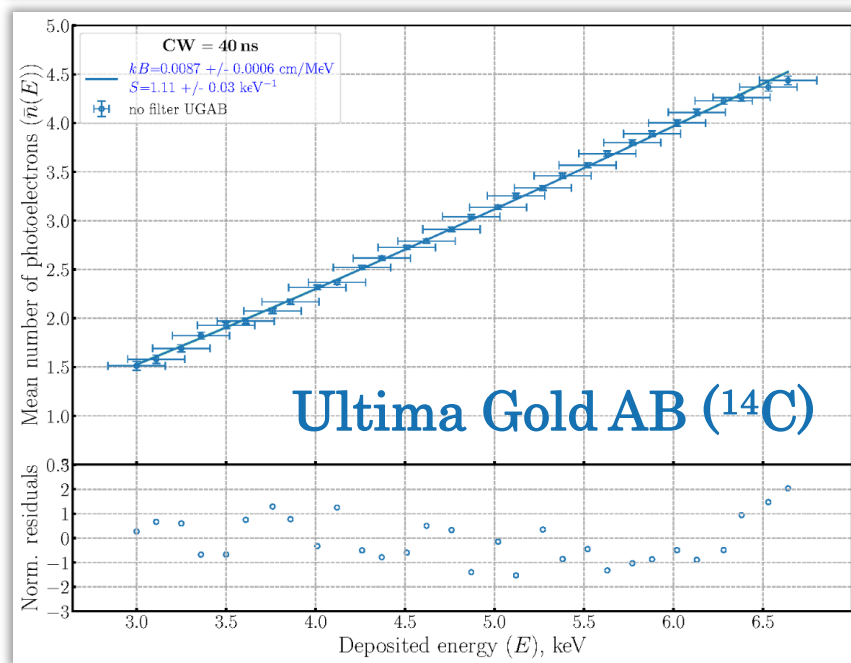
Ultima Gold (^{55}Fe)

Филтър	kB , cm/MeV	S , keV $^{-1}$
Без	0.111(4)	1.38(2)
95%	0.0108(6)	1.23(3)
90%	0.0107(6)	1.07(2)

⇒ Промяната в ефективността за детектиране със сиви филтри не променя оценката за стойността на параметъра на йонизационно гасене



III. Резултати - изследване на светлинния отклик



Дизайнът на
Compton-TDCR
системата и
първите резултати
са публикувани в:



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Applied Radiation and Isotopes

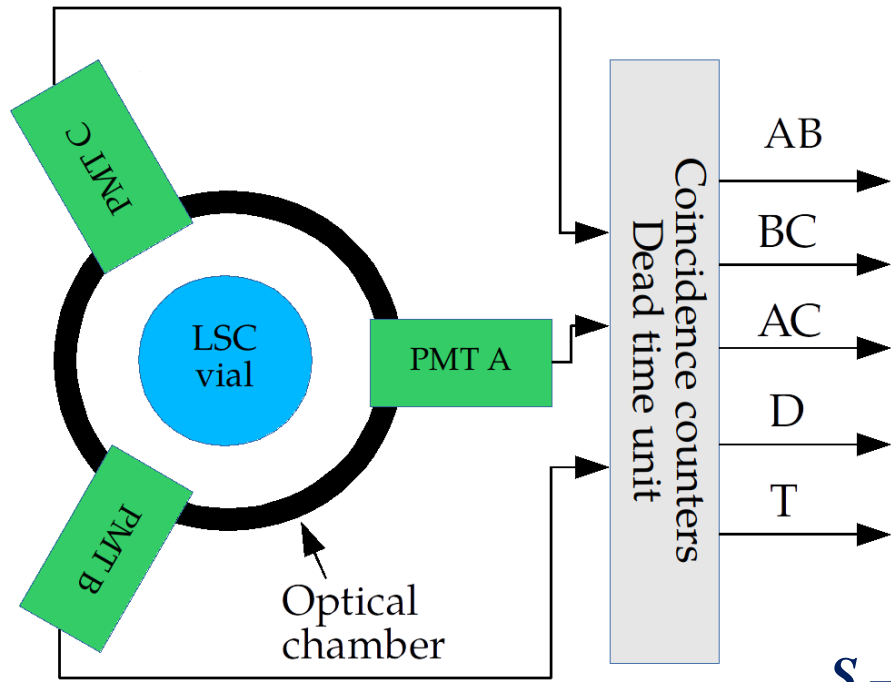
journal homepage: www.elsevier.com/locate/apradiso

Design of a new Compton-TDCR spectrometer at Sofia University for the characterization of Liquid Scintillation cocktails[☆]

V. Todorov^{a,*,}, P. Cassette^a, V. Jordanov^c, S. Ivanov^{a,d}, H. Stoycheva^a, S. Georgiev^a, B. Sabot^b, K. Mitev^a

IV. Приложения

IV.1. TDCR метод за оценка на активност



$$D = AB + BC + AC - 2T$$

При измерване на β -лъчители имаме спектър на отдадената енергия

$$\varepsilon_T = \int_0^{E_{max}} W(E)(1 - e^{-\bar{n}})^3 dE$$

$$\varepsilon_D = \int_0^{E_{max}} W(E)(3(1 - e^{-\bar{n}})^2 - 2(1 - e^{-\bar{n}})^3) dE$$

$$\bar{n}(E) = S \int_0^E \frac{dE}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

S – свободен параметър (брой фотоелектрони keV^{-1})

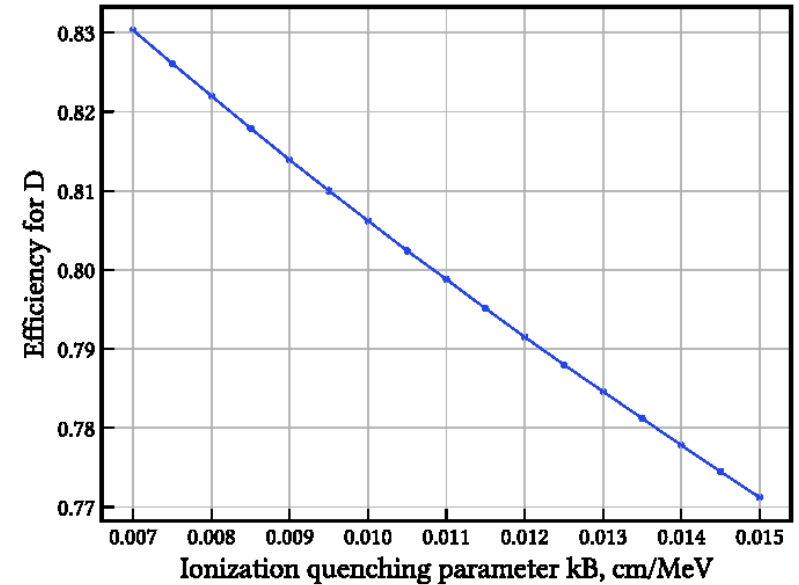
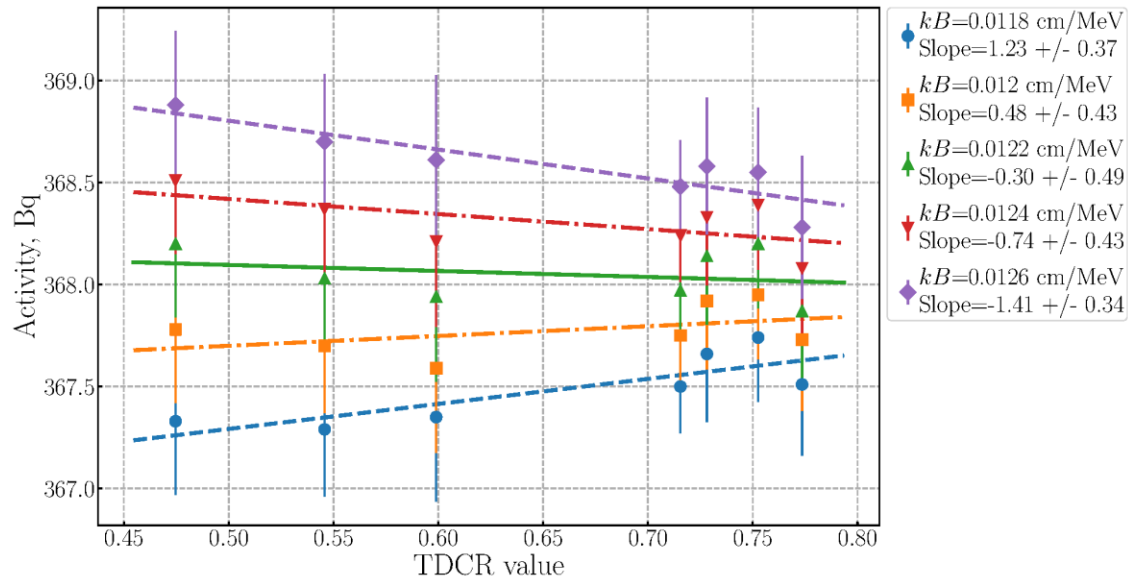
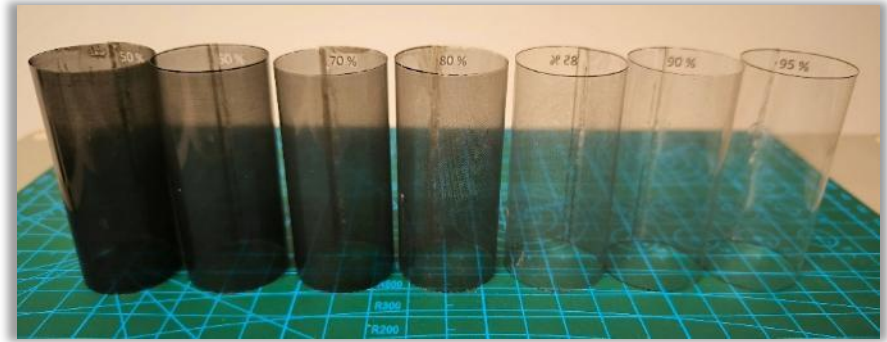
$W(E)$ – спектър на отдадената енергия

В модела на свободния параметър числено намираме S , така че:

$$\text{теор. пресметнато } \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_D} = \frac{T}{D} \text{ експериментално измерено}$$

IV.1. Избор на kB в TCDR – промяна на ефективността

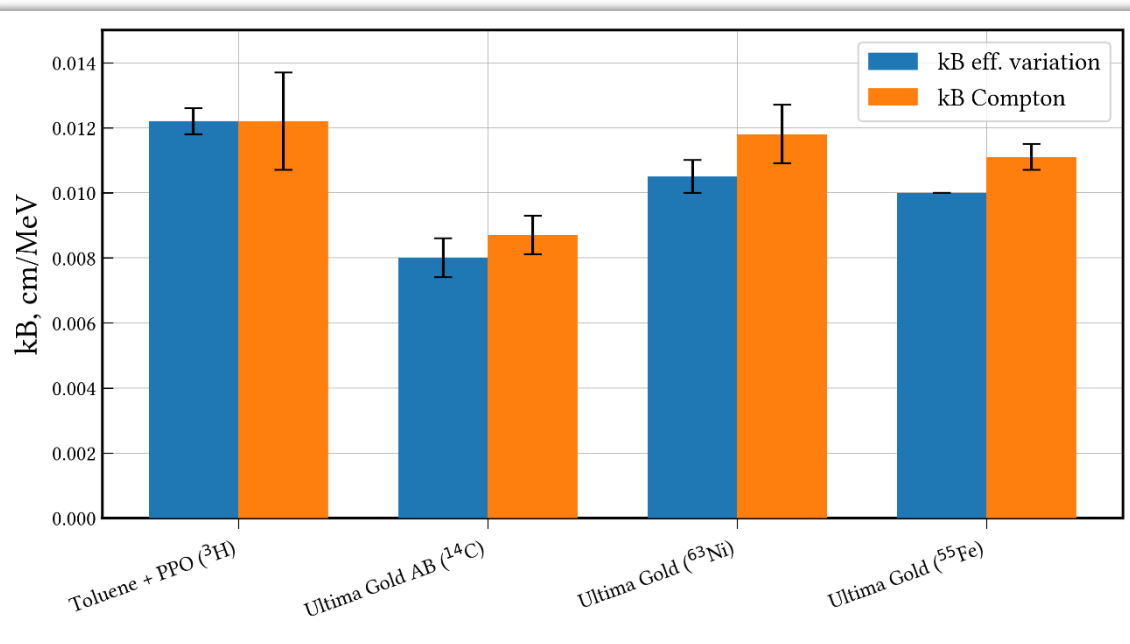
Променяме ефективността (eff. var.) със сиви филтри като извършваме серия от TDCR измервания на една проба



→ Избираме kB , за което $A \sim \text{const}$

IV.2. TDCR eff. variation vs. Compton-TDCR

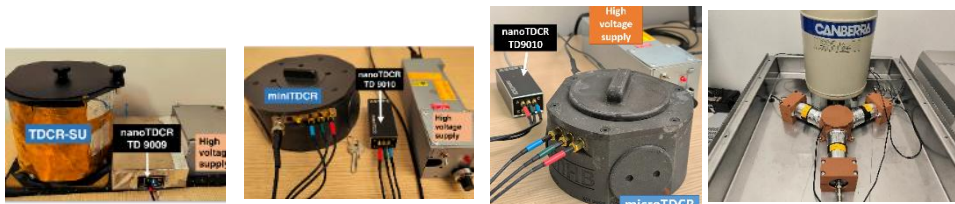
Сцинтилатор	kB eff. variation, cm/MeV	kB Compton, cm/MeV
Toluene + PPO (^3H)	0.0122(4)	0.0122(15)
Ultima Gold AB (^{14}C)	0.0080(6)	0.0087(6)
Ultima Gold (^{63}Ni)	0.0105(5)	0.0118(9)
Ultima Gold (^{55}Fe)	0.0100	0.0111(4)



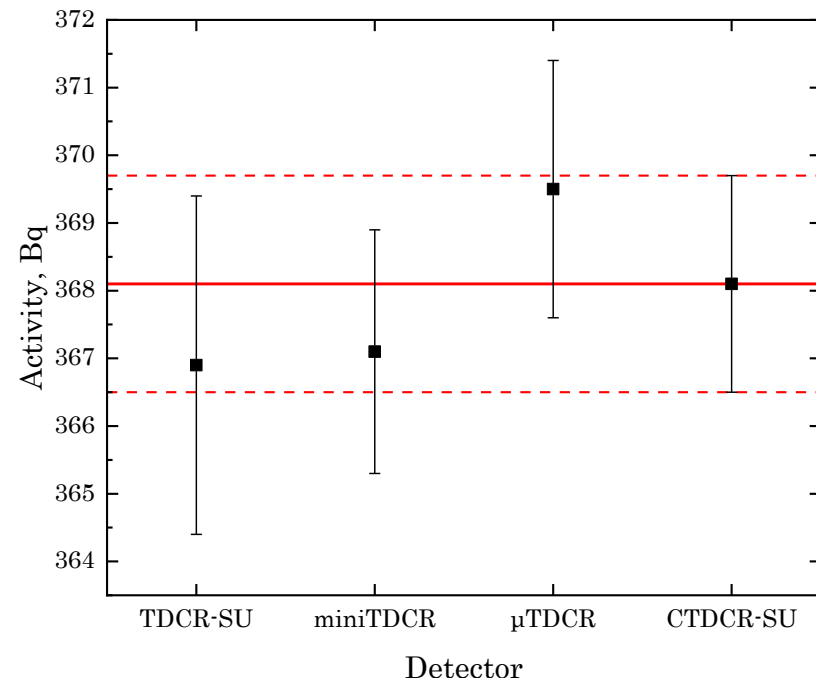
Адекватни оценки на kB
по Compton-TDCR

→ Много добро съгласуване между
Compton-TDCR и измерванията
при промяна на ефективността

IV.1. Сравнение между TDCR броячите в МЙЛ



Par/Det	TDCR-SU	miniTDCR	μTDCR	CTDCR-SU
kB (cm/MeV)	0.0130(7)	0.0110(5)	0.0130(5)	0.0122(4)
ϵ_D	0.536	0.691	0.765	0.791
ϵ_T	0.265	0.453	0.571	0.612
FOM (ph/keV)	0.877	1.448	2.235	2.505
A (Bq)	366.9(25)	367.1(18)	369.5(19)	368.1(16)



CTDCR-SU има най-висока ефективност

Много добро съгласуване по активност

CTDCR-SU е най-добър за проби с нисък светлинен добив

Оценката на kB параметъра е различна за някои от броячите

IV.3. Влияние на корекцията за случайните съвпадения върху оценката на kB



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

Evaluation of the accidental coincidence counting rates in TDCR counting

Chavdar Dutsov^{a,*}, Philippe Cassette^b, Benoît Sabot^b, Krasimir Mitev^a

Генерирани са
list-mode TDCR
измервания с
МК
симулация

Study of a method to correct for accidental coincidences in TDCR measurements

Karsten Kossert^{* @}, Marcell Péter Takács

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116, Braunschweig, Germany



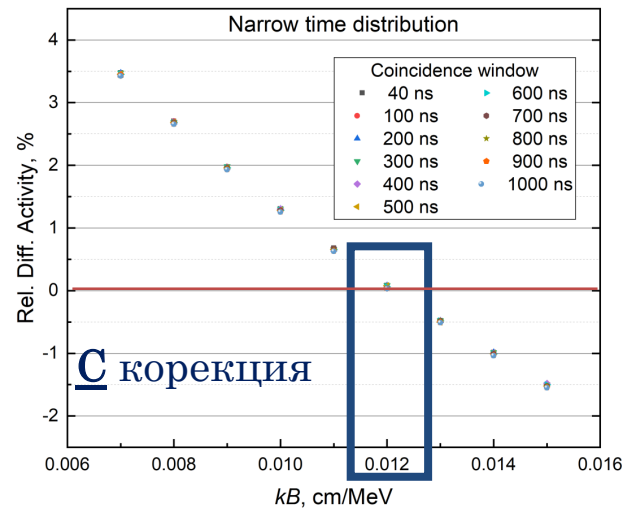
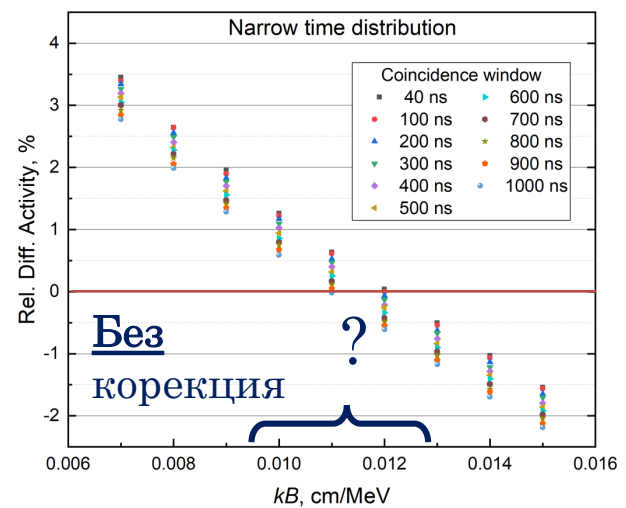
ARTICLE INFO

Keywords:
Liquid scintillation counting
TDCR counting
Accidental coincidences
Coincidence resolving time
Radionuclide metrology

ABSTRACT

A recently proposed method from Dutsov et al. (2020) for correcting random coincidences in TDCR measurements was thoroughly examined. To achieve this, an extensive experimental study was conducted using various liquid scintillation (LS) samples. The study involved several radionuclides (^3H , $^{32}\text{Si}/^{32}\text{P}$, ^{55}Fe , ^{89}Sr , ^{151}Sm , ^{238}Pu , and ^{241}Am) as well as background samples. Different LS cocktails and activity levels were also considered. Data acquisition was performed using a fast digitizer, and the resulting list-mode data were analyzed by systematically varying the coincidence resolving time over a range from 10 ns to 1500 ns. All data were evaluated both with and without correction for random coincidences.

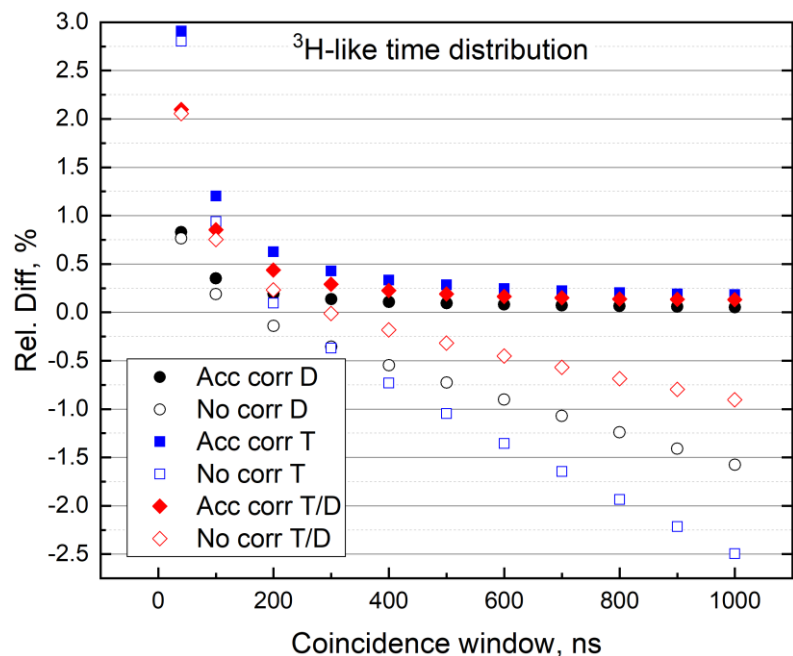
In all cases, the measurement results exhibited significantly better consistency when the correction for random coincidences was applied. This also holds for background measurements. The improvement was particularly evident at longer coincidence resolving times. Moreover, it is demonstrated that the correction is essential for accurately evaluating uncertainties.



IV.3. Влияние на корекцията за случайните съвпадения върху оценката на kB

Корекцията за случайни съвпадения трябва да се прилага за правилно определяне на kB параметъра.

Корекцията е съществена за правилна оценка на скоростите на броене.



Изследванията на влиянието на корекцията за случайни съвпадения върху оценката на kB параметъра са публикувани в:

Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry
<https://doi.org/10.1007/s10967-025-10173-4>



Investigation of the possible effect of the accidental coincidences correction on the determination of kB value by efficiency variation with grey filters

V. Todorov¹ · K. Mitev¹ · P. Cassette¹ · B. Sabot²



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Applied Radiation and Isotopes

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apradiso

MCLTDCR: A Monte Carlo code for generation of list mode TDCR files

K. Mitev *, V. Todorov ^a, P. Cassette ^a, B. Sabot ^b

IV.4. Първичен еталон за измерване на ^{222}Rn във вода

Първичният еталон за радон във вода е предложен и осъществен в

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

ELSEVIER Applied Radiation and Isotopes journal homepage: www.elsevier.com/locate/apradiso

Towards a radon-in-water primary standard at LNHB

Krasimir Mitev^{a,*}, Benoit Sabot^b, Sylvie Pierre^b, Marie-Christine Lépy^b, Philippe Cassette^a

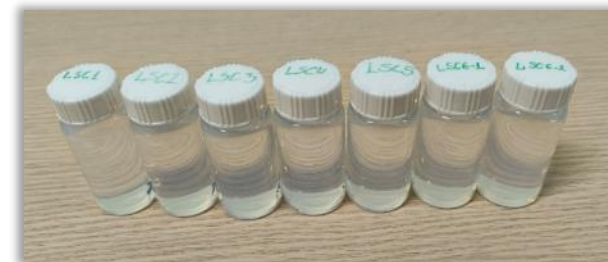
OPEN ACCESS
IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures Metrologia
Metrologia 62 (2025) 035010 (19pp) <https://doi.org/10.1088/1681-7575/addf52>

Development of a radon-in-water primary standard

Benoit Sabot^{1,*}, Philippe Cassette², Marie-Christine Lépy¹, Sylvie Pierre¹, Raphaël Martin¹ and Krasimir Mitev²

Активността, оценена по метода предложен от Р. Cassette за стандартизиране на ^{222}Rn във води чрез TDCR измерване, се съгласува с активността, оценена от първичния еталон

В лаборатория МЙЛ на СУ, със СТDCR-SU приложихме метода за стандартизиране на проби с ^{222}Rn във вода. Пробите бяха използвани за калибриране на вторични детектори като по този начин се установява верига на проследимост до първичен еталон.



Application of TDCR counting for primary standardization of radon-in-water samples

Vladislav Todorov
Faculty of Physics
Sofia University "St. Kliment
Ohridski"
Sofia, Bulgaria
vtodorov@phys.uni-sofia.bg

Philippe Cassette
Faculty of Physics
Sofia University "St. Kliment
Ohridski"
Sofia, Bulgaria
philippe.cassette@phys.uni-sofia.bg

Strahil Georgiev
Faculty of Physics
Sofia University "St. Kliment
Ohridski"
Sofia, Bulgaria
strahilg@phys.uni-sofia.bg

Hristiana Stoycheva
Faculty of Physics
Sofia University "St. Kliment
Ohridski"
Sofia, Bulgaria
hristiana.stefanova.st@gmail.com

Radostina Vasileva
Faculty of Physics
Sofia University "St. Kliment
Ohridski"
Sofia, Bulgaria
radostina.ivvs@gmail.com

Krasimir Mitev
Faculty of Physics
Sofia University "St. Kliment
Ohridski"
Sofia, Bulgaria
knitev@phys.uni-sofia.bg

1. Създадена е Compton-TDCR система
2. Валидирана е методологията за приложение на системата за оценка на светлинния добив
3. Измерен е светлинният отклик на органични течни сцинтилатори
4. Разработени са няколко приложения на системата в радионуклидната метрология

Публикации по темата на дисертацията

1. V. Todorov*, P. Cassette, V. Jordanov, S. Ivanov, H. Stoycheva, S. Georgiev, B. Sabot, K. Mitev, *'Design of a new Compton-TDCR spectrometer at Sofia University for the characterization of Liquid Scintillation cocktails'*, Applied Radiation and Isotopes, 226(2025), p. 112194
2. V. Todorov*, P. Cassette, S. Georgiev, B. Sabot, and K. Mitev, *"Automatic system for testing PMT photocathode homogeneity"*, J Radioanal Nucl Chem, 334(2025), p. 5919–5931
3. V. Todorov, K. Mitev*, P. Cassette, and B. Sabot, *"Investigation of the possible effect of the accidental coincidences correction on the determination of kB value by efficiency variation with grey filters"*, J Radioanal Nucl Chem, 334(2025), p. 5943–5950
4. K. Mitev*, V. Todorov, P. Cassette, B. Sabot, *'MCLTDCR: A Monte Carlo Code for Generation of List Mode TDCR files'*, Applied Radiation and Isotopes, 226(2025), 112094
5. P. Cassette*, V. Todorov, B. Sabot, S. Georgiev, and K. Mitev, *"Uncertainties in TDCR measurement revisited: Contribution of optical effects"*, Applied Radiation and Isotopes, 201(2023), p. 110992
6. V. Todorov*, P. Cassette, S. Georgiev, H. Stoycheva, R. Vasileva, and K. Mitev, *"Application of TDCR Counting for Primary Standardization of Radon-in-Water Samples"* XXXIV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA). IEEE (2024)

* кореспондиращ автор

Други публикации свързани с темата на дисертацията

1. V. Todorov, S. Georgiev, M. Hamel, Ch. Dutsov, B. Sabot, I. Dimitrova, K. Mitev*, *'Evaluation of radon absorption and detection properties of a plastic scintillator developed for PSD measurements'*, Measurement, 231(204), p. 114554
2. V. Todorov*, S. Georgiev, P. Kovacheva, and K. Mitev, *"Use of TDCR systems at Sofia University for control of certified radioactive solutions"* XXXV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA). IEEE (2025)
3. V. Todorov, C. Dutsov, P. Cassette, and K. Mitev*, *"Effects of the photocathode non-uniformity on radon measurements by plastic scintillation spectrometry"*, J Radioanal Nucl Chem, vol. 331 (2022), p. 3249–3258
4. V. Todorov*, P. Cassette, Ch. Dutsov, B. Sabot, S. Georgiev, and K. Mitev, *"A study of the non-uniformity of the PMT photocathode response and its influence on the results obtained in different scintillation counting experiments"*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1046 (2023), p. 167719

* кореспондиращ автор

Представяния по време на докторантурата

1. V. Todorov*, P. Cassette, V. Jordanov, S. Ivanov, H. Stoycheva, S. Georgiev, B. Sabot, K. Mitev, *'Design of a new Compton-TDCR spectrometer at Sofia University for the characterization of Liquid Scintillation cocktails'*, 24th International Conference for Radionuclide Metrology (ICRM2025), 19-23 May, 2025
2. V. Todorov*, S. Georgiev, P. Kovacheva, and K. Mitev, *"Use of TDCR systems at Sofia University for control of certified radioactive solutions"* 2025 XXXV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)
3. V. Todorov*, P. Cassette, S. Georgiev, H. Stoycheva, R. Vasileva, K. Mitev, *'Application of TDCR counting for primary standardization of radon-in-water samples'*, 2024 XXXIV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)
4. V. Todorov*, P. Cassette, S. Georgiev, B. Sabot, K. Mitev, *'Development of an automated system for the characterization of the homogeneity of the photocathodes of photomultiplier tubes'*, ICRM Liquid Scintillation Counting Working Group Meeting, 10-11 April, 2024

* презентиращ автор

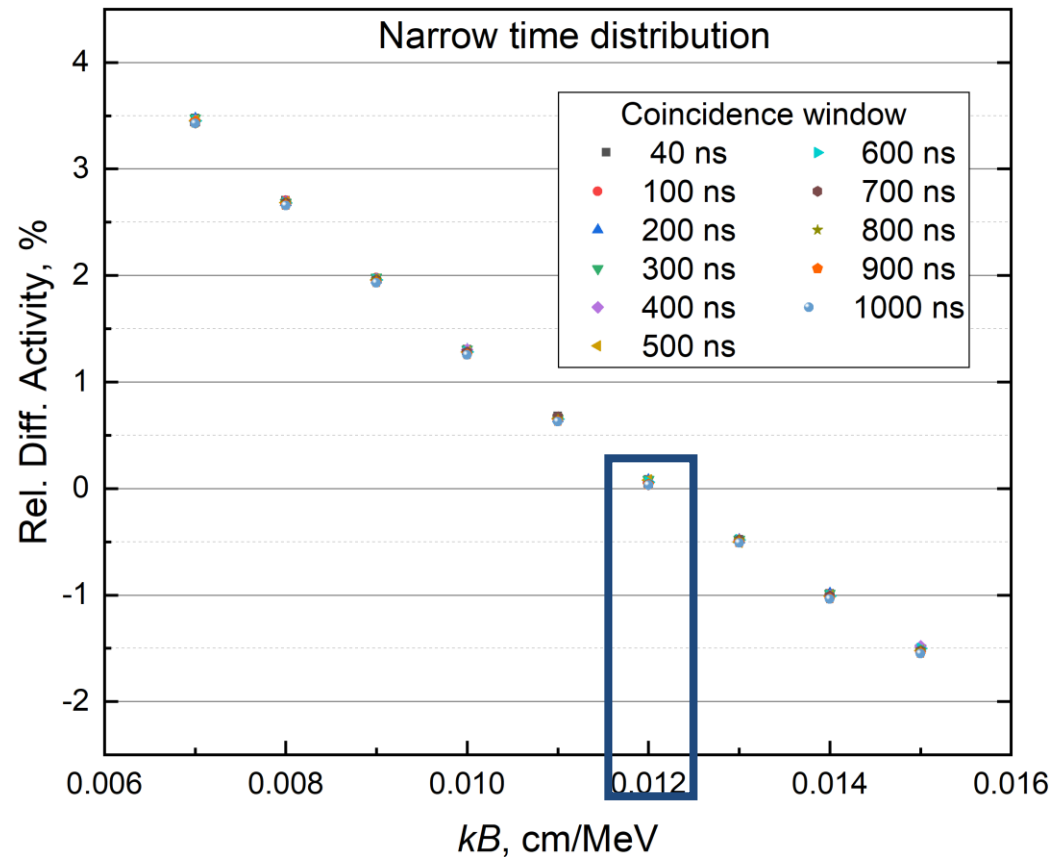
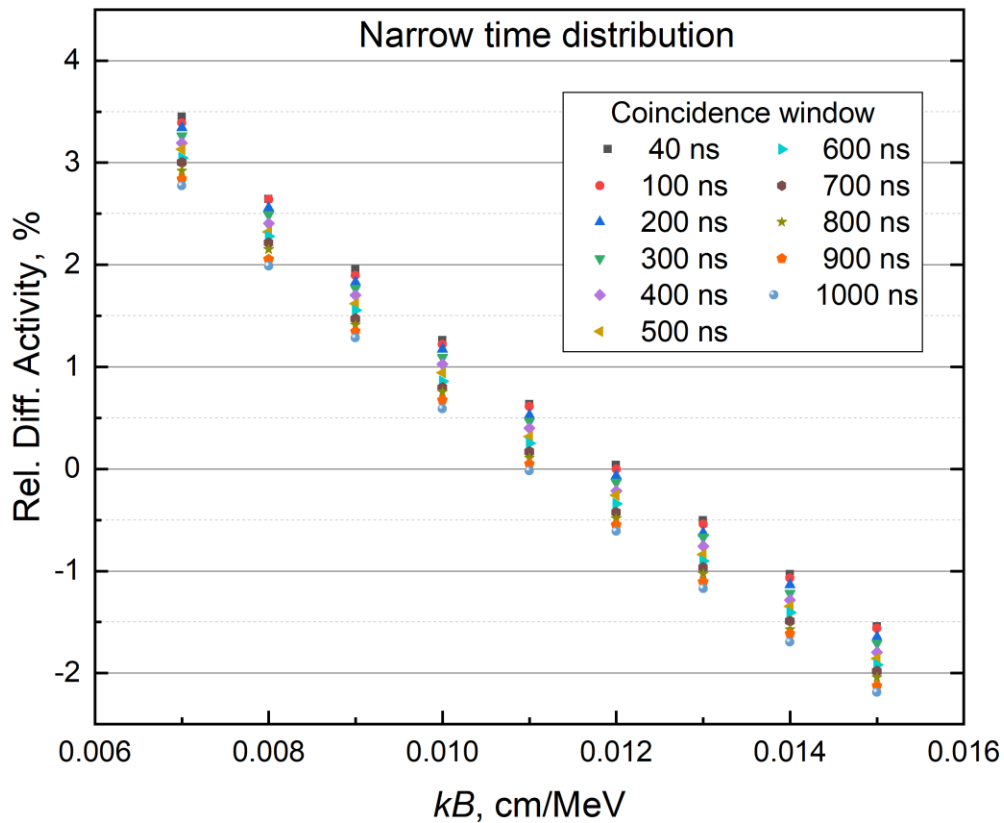
- Създадена е Compton-TDCR система за изследване на сцинтилационния отклик на течни сцинтилатори. Охарактеризирани са ФЕУ-тата използвани в TDCR канала на системата. Гамма-каналът е оптимизиран за получаване на най-добра разделителна способност по енергии.
- Измерен е откликът на четири течни сцинтилатора в областта от енергии 3-6 keV. Откликът на сцинтилаторите е апроксимиран с формулата на Бъркс и е оценена стойността на параметъра на йонизационно гасене kB .
- По техниката за промяна на ефективността, независимо е оценен kB параметърът за същите сцинтилатори. Наблюдавано е много добро съгласуване между двете оценки на параметъра.
- Оценена е нехомогенността на отклика на фотокатода на 5 ФЕУ-та и е дискутирано влиянието ѝ както върху TDCR измерванията, така и при сцинтилационна спектрометрия.
- С МК симулация е показано, че корекцията за случайни съвпадения е съществена за правилна оценка на скоростите на броене.

**Благодаря за
вниманието!**

- Dutsov et al. (2020) предлагат аналитична корекция за случайни съвпадения (АС) при измервания с използване на TDCR метода
- Изследван е потенциалния ефект на случайните съвпадения върху избора на параметъра на йонизационно гасене kB за течни сцинтилатори
- TDCR измервания, направени чрез вариране на ефективността с използване на сиви филтри, бяха анализирани без и със прилагане на корекцията за случайни съвпадения при определяне на стойността на параметъра на йонизационно гасене kB
- С Монте Карло симулация са генерирани list-mode TDCR измервания, които са обработени без и със прилагане на АС и са сравнени със стойностите зададени в симулацията

Резултати при прилагане на АС за определяне на kB

Тясно времево разпределение

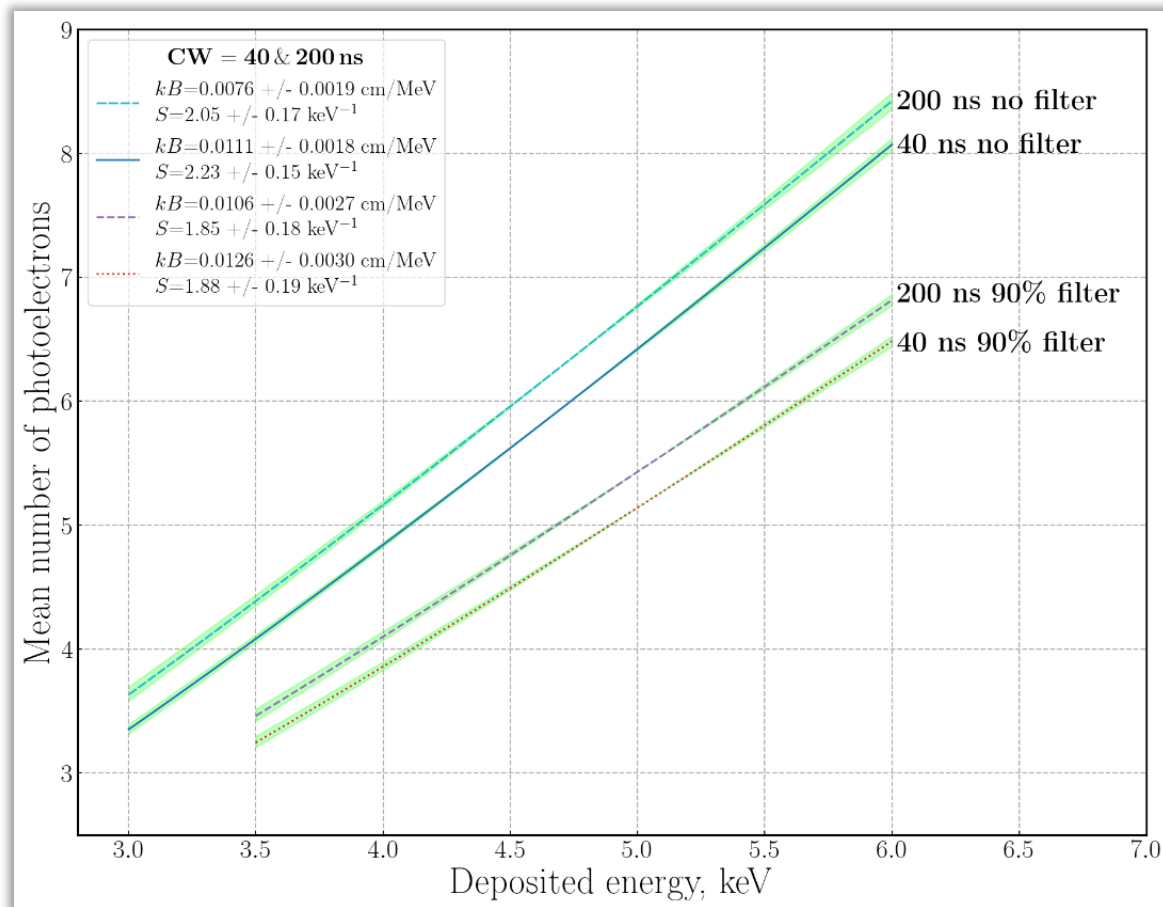


III. Изследване на светлинния отклик

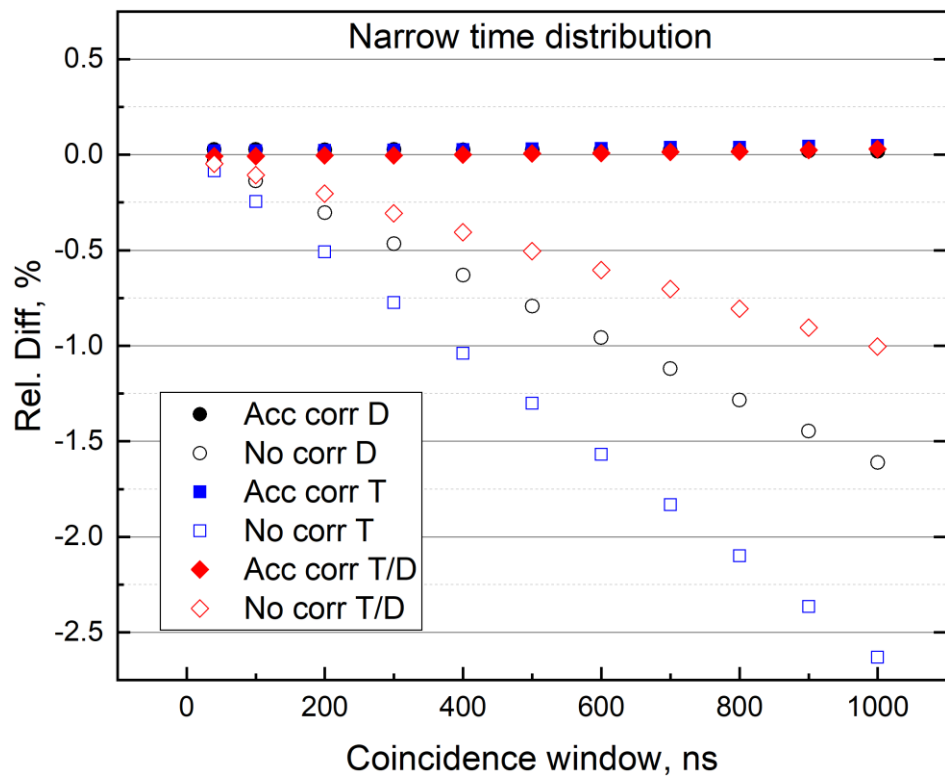
CW – прозорец на съвпадение

- Наблюдаваме разликата в оценката на kB параметъра при измервания с прозорец на съвпадения с различна дължина – 40 ns и 200 ns
- Обяснява се от това, че формулата на Бъркс за йонизационно гасене е приложима само за бързата сцинтилационна компонента

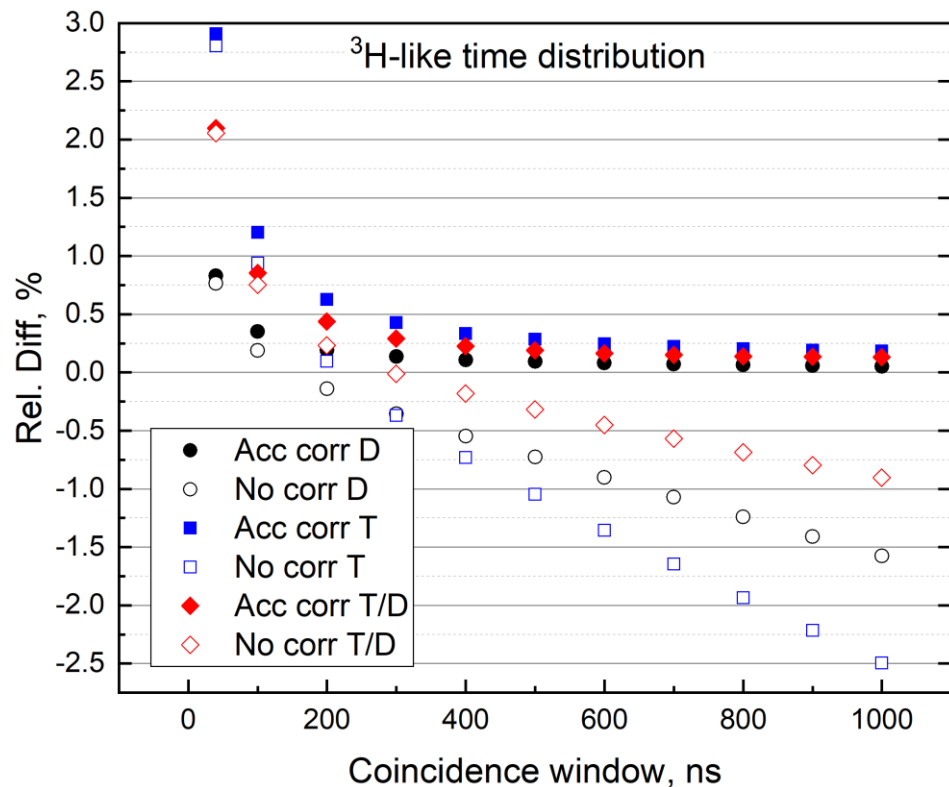
Toluene + PPO (^3H)



Резултати за скоростите на броене



- Перфектно съгласуване между стойностите зададени в МК симулацията и при приложена АС



- Пропуснати събития при малки прозорци на съвпадение