



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

Продължение на работата по изследване на отклика на фотокатода на фотоелектронни умножители

Мотивация за изследванията

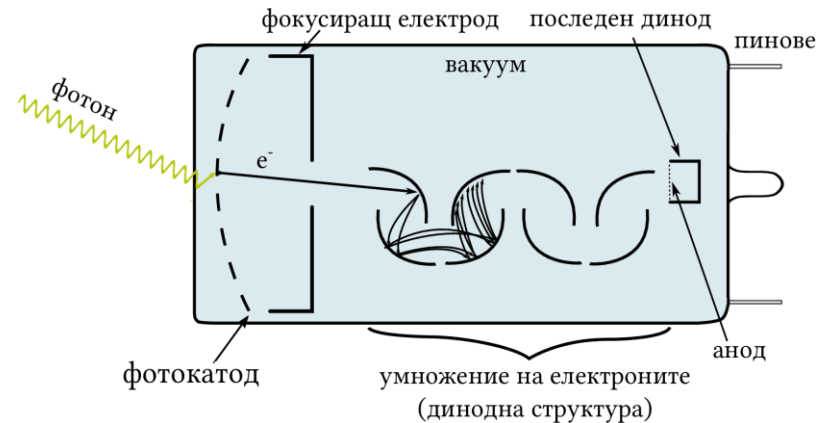
Нехомогеността на отклика на фотокатода има отрицателно въздействие върху:

- Енергийната разделителна способност в сцинтилационната спектрометрия
- Ефективността за регистрация и оттам върху техниките за абсолютно измерване на активност като TDCR (Triple-to-Double Coincidence Ratio) метода

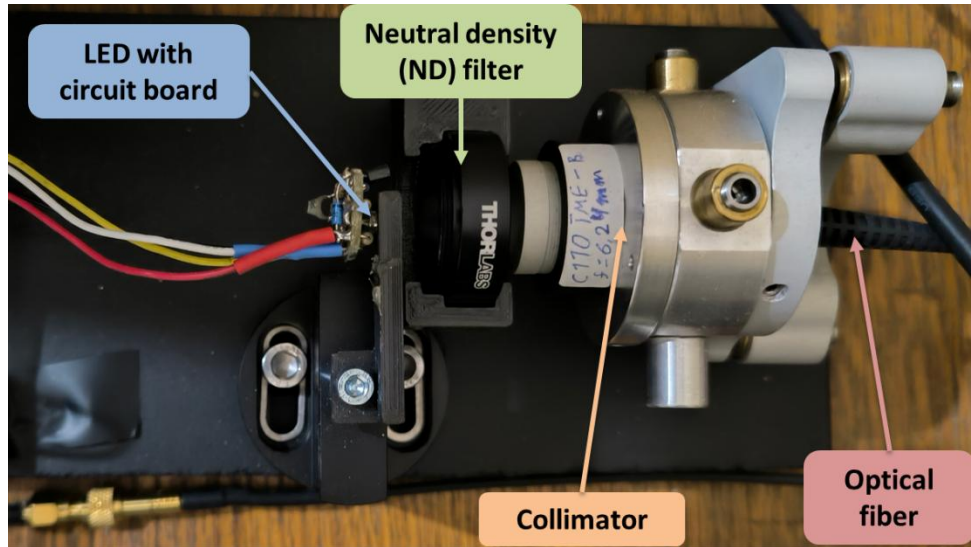
Нехомогенността на отклика на фотокатода зависи от:

- Хомогенността на отлагането на материала на фотокатода
- Електростатичното фокусиране на ФЕУ

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



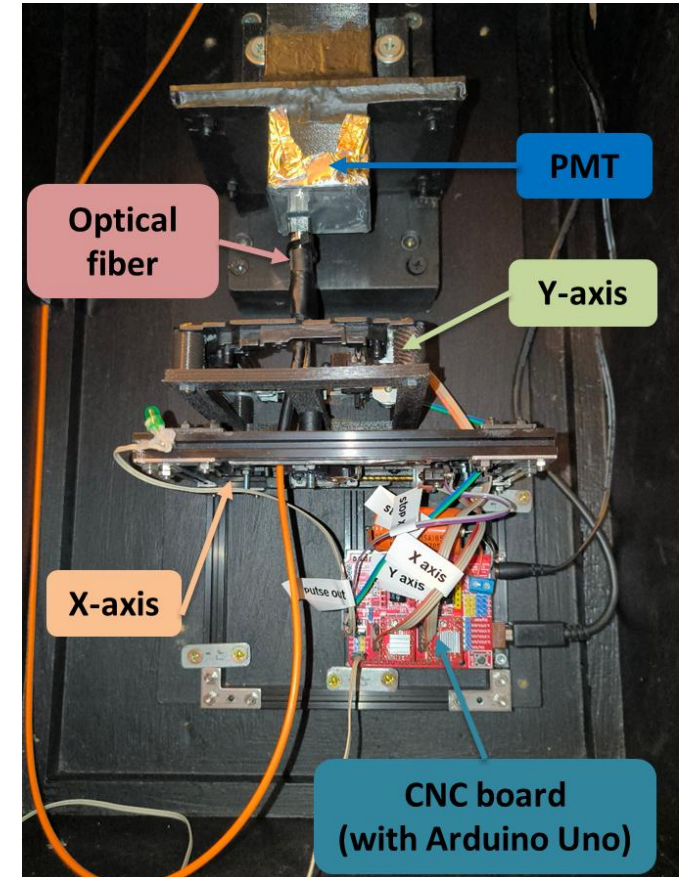
Източник на светлинни импулси



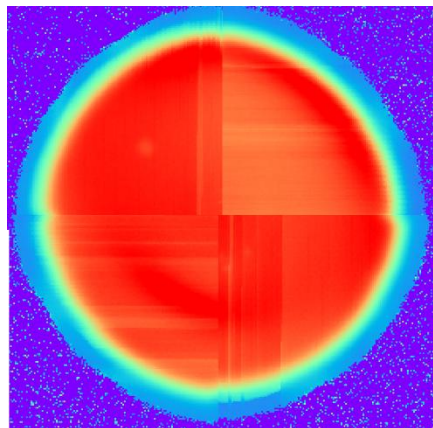
Ограничения на системата:

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

Автоматична система за сканиране

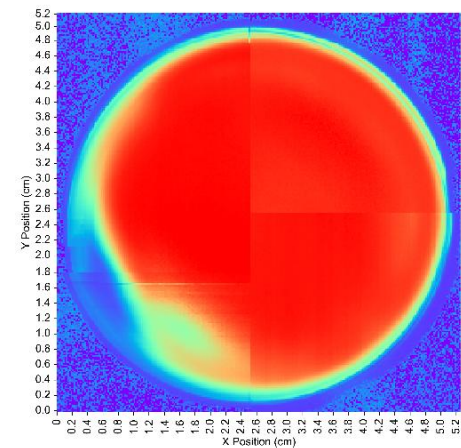
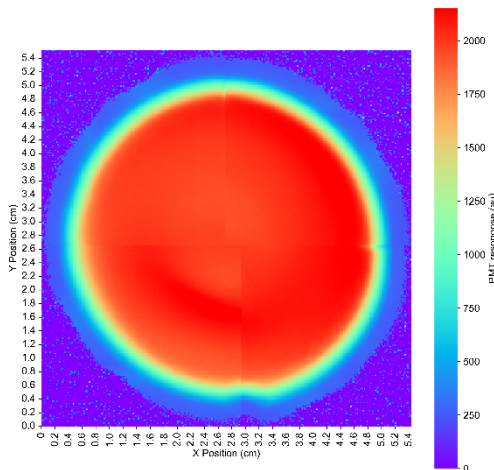


Продължение на изследванията



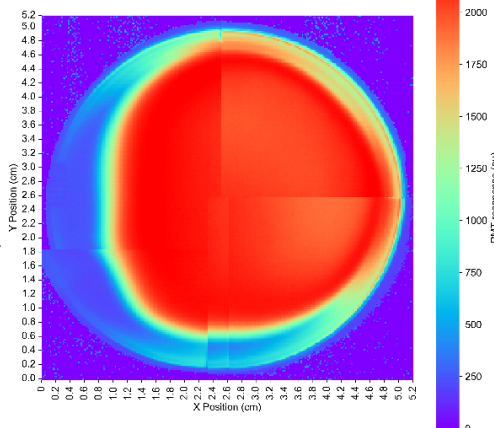
Hamamatsu
R331-05

Артефактите в
сканирането
бяха отстранени

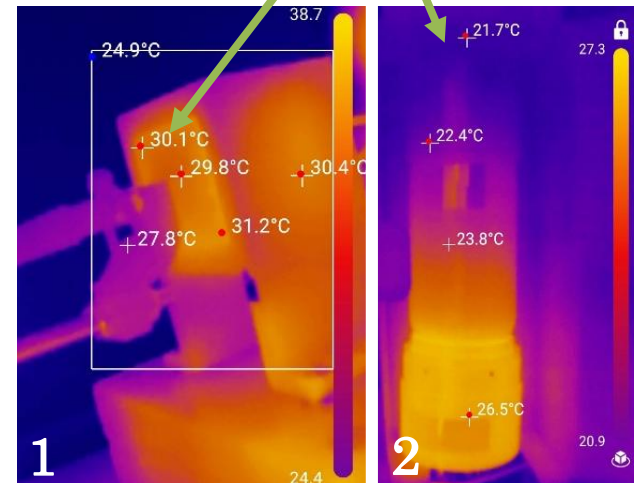


Philips
XR2020

Отклик на ФЕУ
преди и след
дефокусиране



Фотокатод



Отделена топлина от
делителя на Hamamatsu
H11934-203 (1) и R331-05 (2)
след 50 часа приложено
високо напрежение

Приложения в TDCR измерванията

- Дизайнът на оптичните камери да покрива неефективните области на ФЕУ-тата
- Дизайнът на TDCR броячите трябва да способства отвеждането на отделената от делителите на високо напрежение топлина, така че да не се загряват измерваните проби
- Дефокусирането се използва за промяна на ефективността на TDCR брояча при оценката на параметъра на йонизационно гасене на сцинтилатори – kB . Показано е, че при дефокусиране се променя геометрията на измерване → има промяна в условията на измерването

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



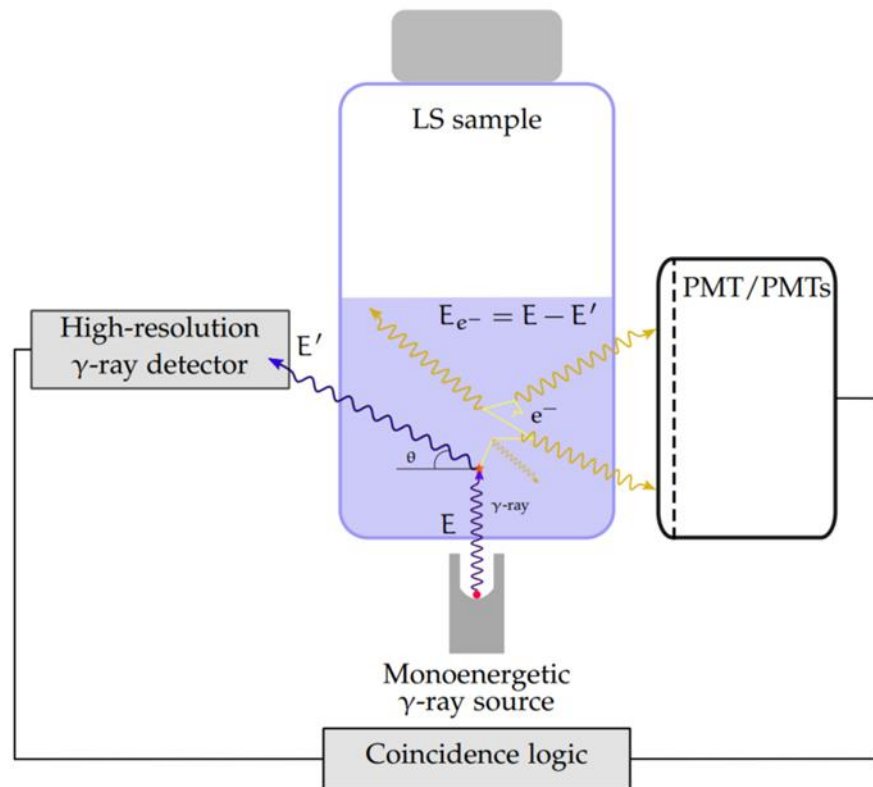
Automatic system for testing PMT photocathode homogeneity

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

Received: 10 October 2024 / Accepted: 9 February 2025
© Akadémiai Kiadó Zrt 2025

Разработване на Compton-TDCR спектрометър за охарактеризиране на течносцинтилационни коктейли

Принцип на метода



Изследване на нелинейността на светлинния отклик на сцинтилатори чрез оценка на броя детектирани фотоелектрони, пропорционален на фотоните излъчени при спиране на комптънов електрон с определена енергия в обема на сцинтилатора

- Създаване на Compton-TDCR спектрометър в СУ
- Валидиране на TDCR брояча на новата система и сравнение с други TDCR броячи налични в лаборатория по Метрология на йонизиращите лъчения
- Оптимизиране на параметрите за формиране на импулси от използвания p-тип планарен германиев детектор за получаване на най-добра разделителна способност по енергии в гама-канала.
- Създаване на МК симулация за изследване на колимирането на източника и спектъра получен в германиевия детектор от разсеяните гама-кванти
- Изследване на светлинния отклик на течносцинтилационни коктейли

TDCR канал

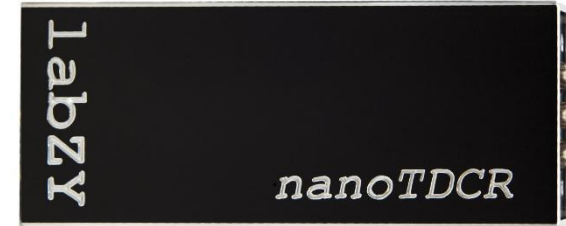
3 ФЕУ-та
Hamamatsu R331-05



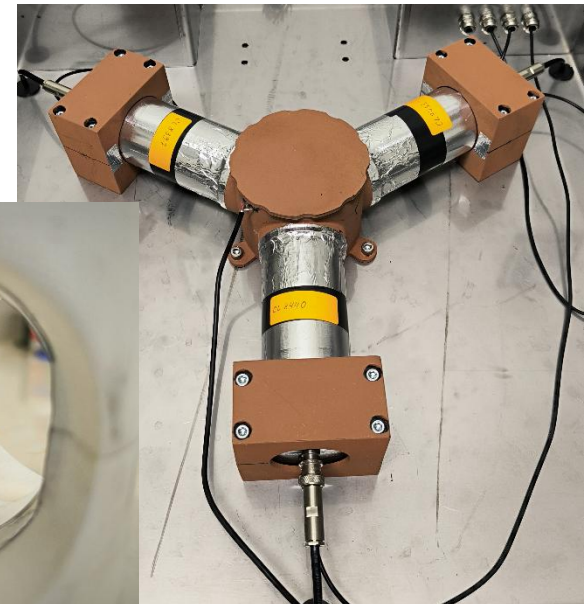
CAEN DT1470ET 4
канален модул за ВН



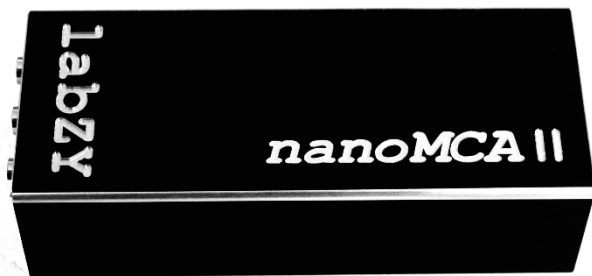
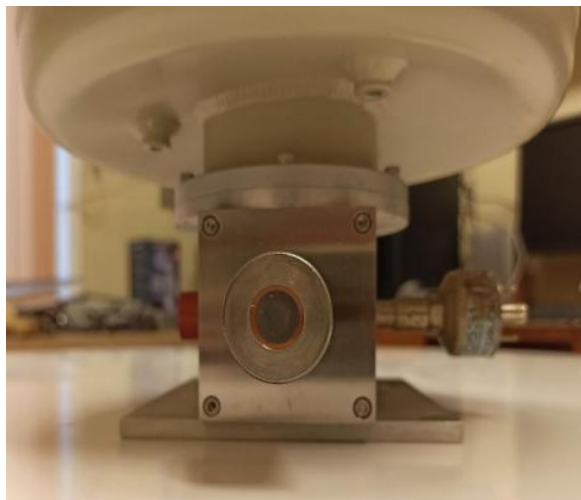
Анализатор nanoTDCR+,
YANTEL



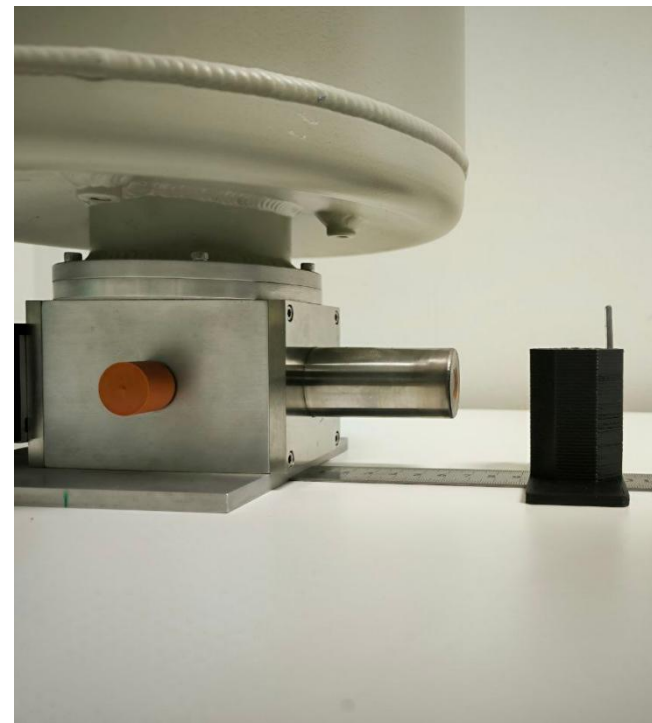
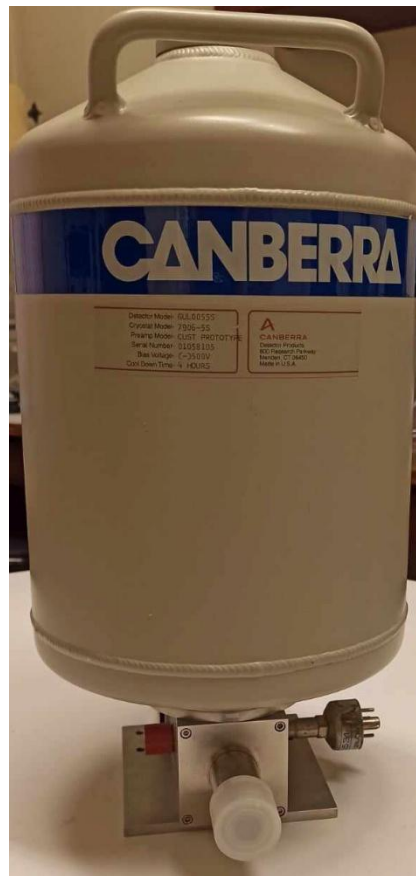
Оптическа
камера



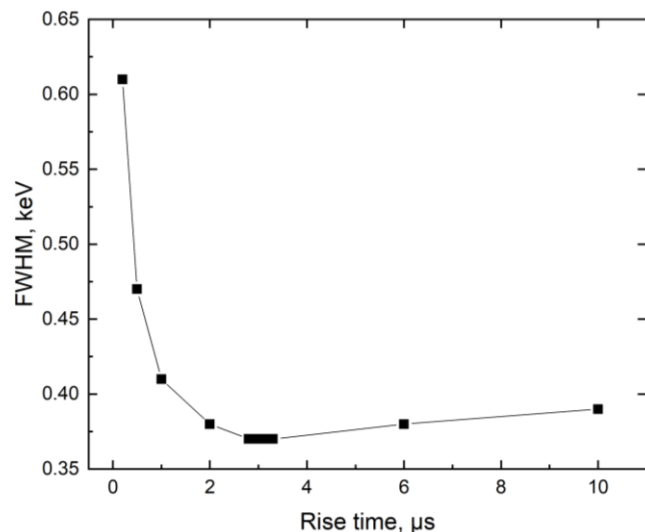
nHPGe детектор



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

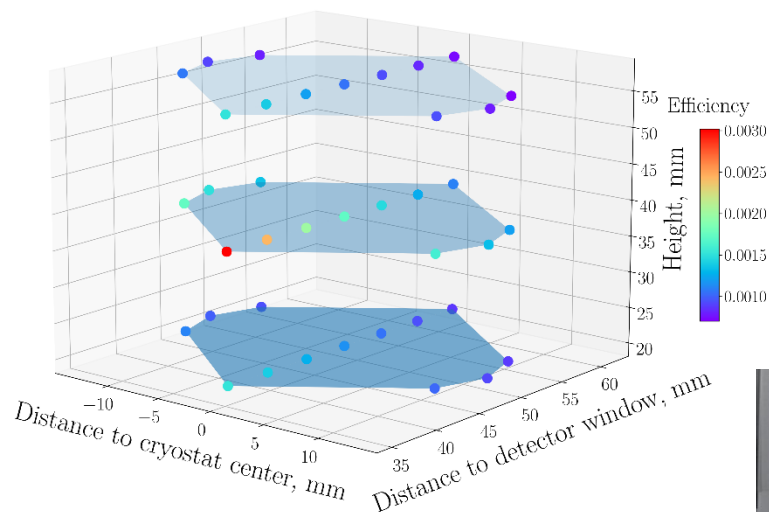


Настройка на параметрите
за формиране на импулса*

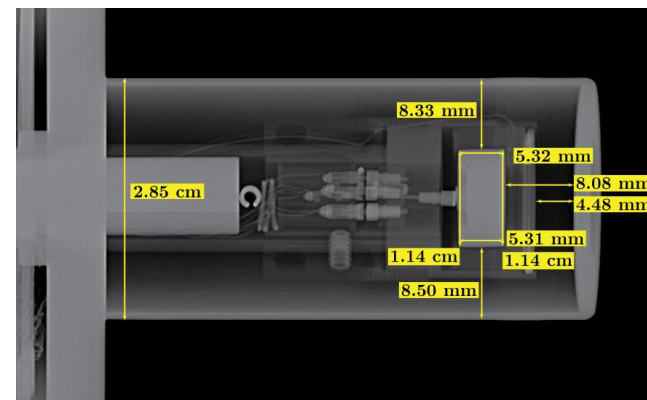


$R=0.62\%$ за пика на пълно поглъщане на ^{241}Am

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

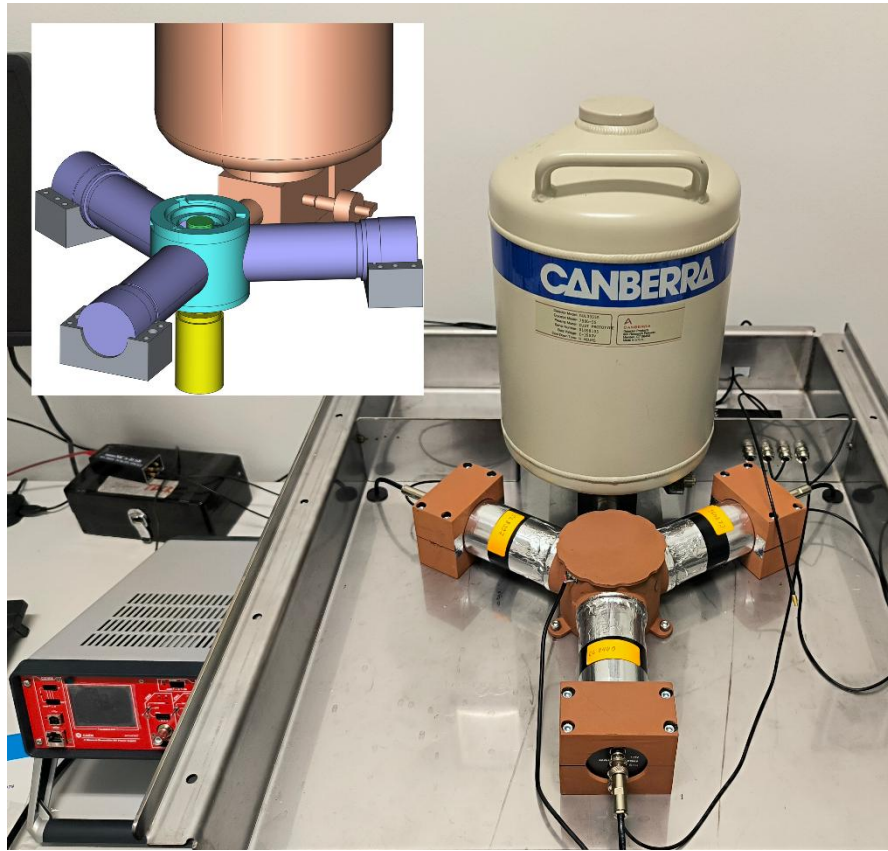


Рентгенова снимка на
германиевия кристал и
криостата около него.
Оценените размери на
кристала са използвани
в МК симулацията

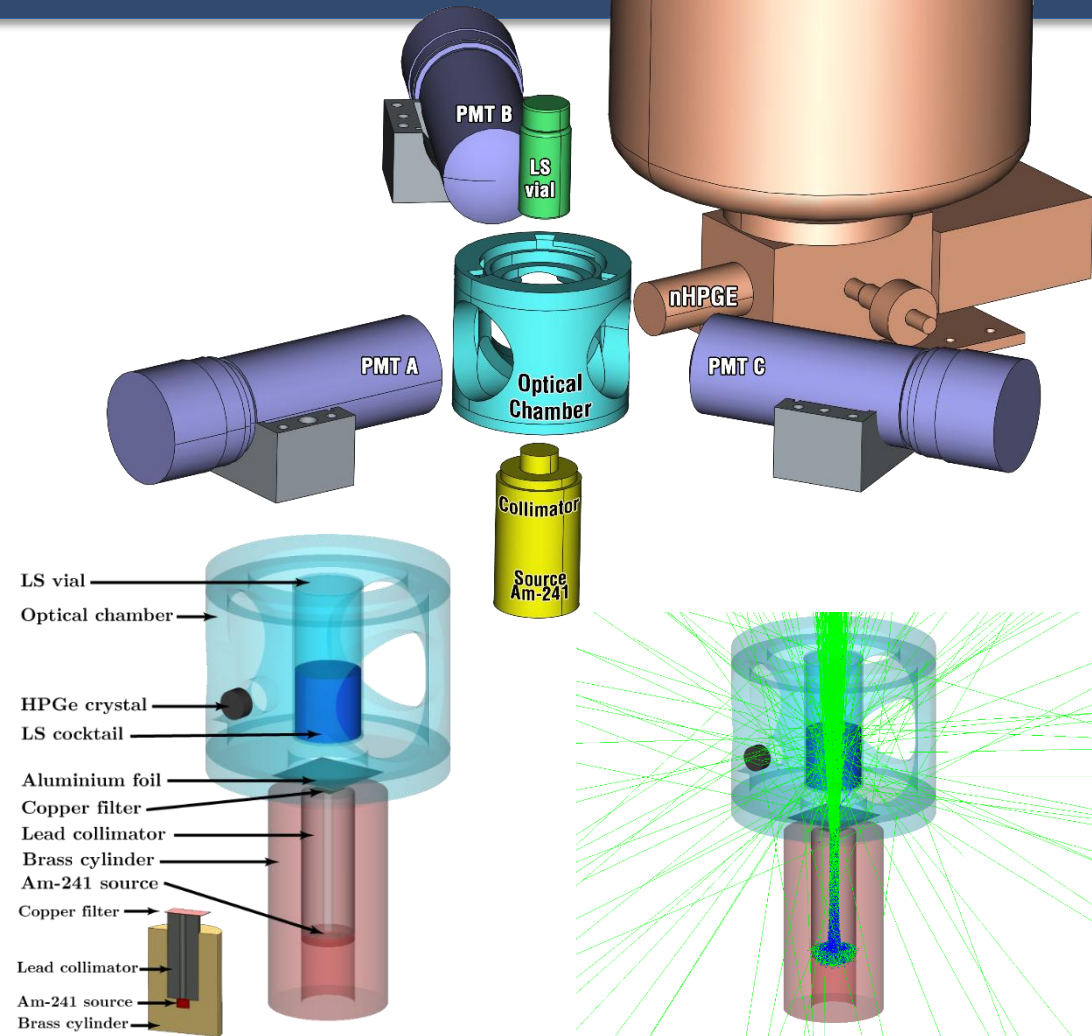


*изследвания на Християна Стойчева (дипломна работа)

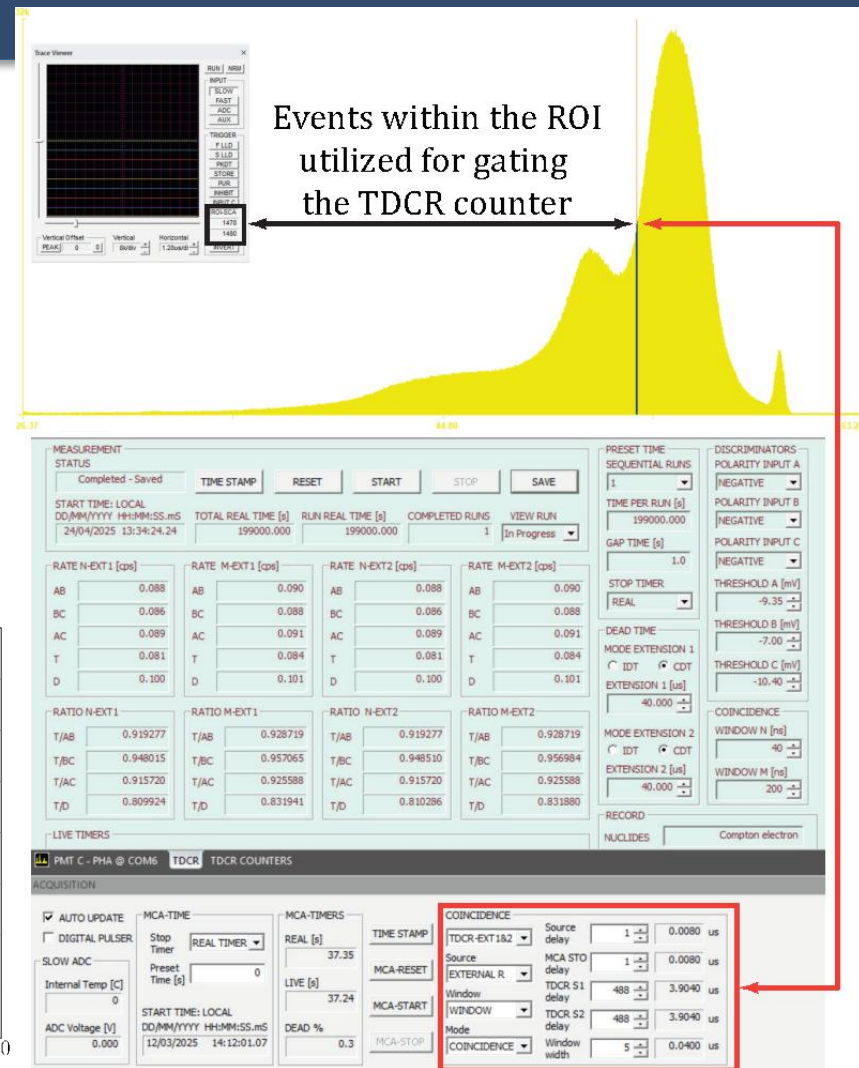
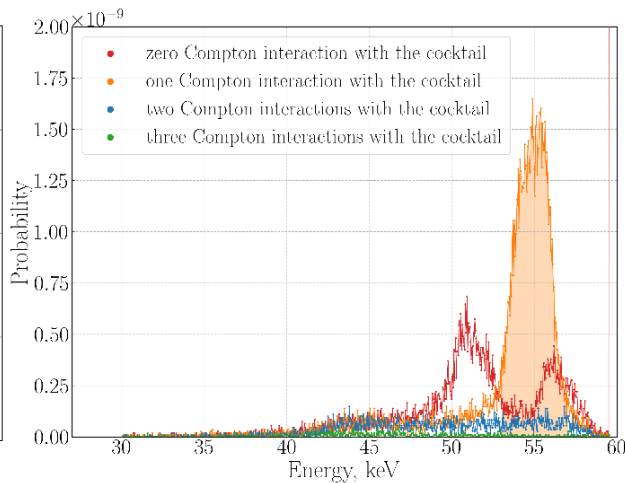
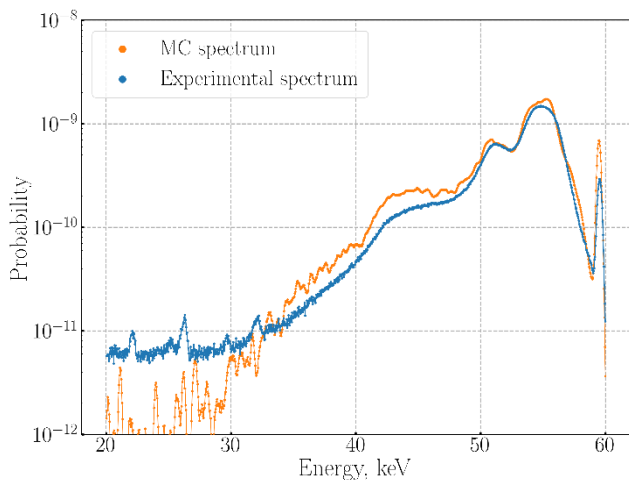
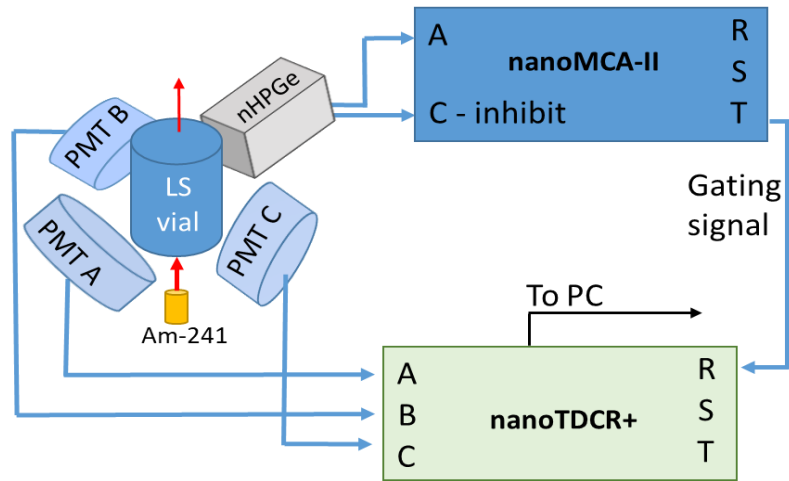
Compton-TDCR система



Специални благодарности на Симеон Иванов за колиматора и симулациите!



Compton-TDCR система

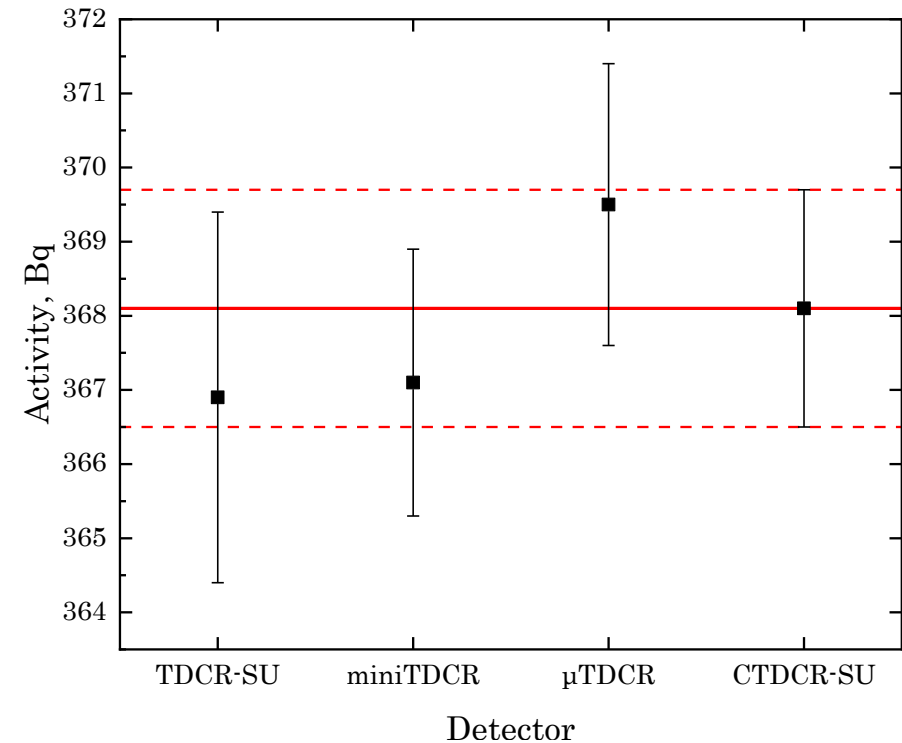


Резултати получени с Compton-TDCR спектрометъра

Сравнение между TDCR броячите в МЙЛ

Резултати от измерване на ^3H в Toluene+PPO и промяна на ефективността с използване на сиви филтри

Par/Det	TDCR-SU	miniTDCR	μ TDCR	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)



Изследване на светлинния отклик на течен сцинтилатор

Изследване на светлинния отклик

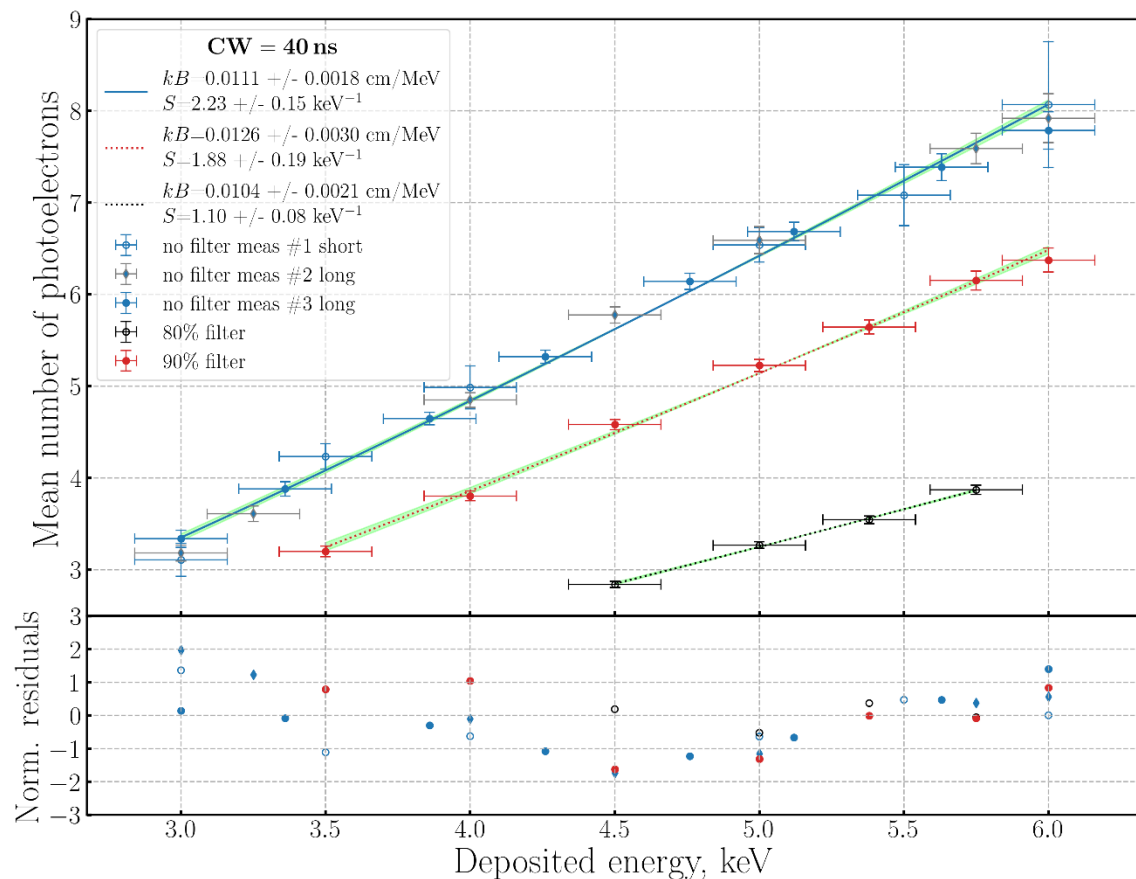
Средният брой детектирани фотоелектрони като функция на отдадената в сцинтилатора енергия е фитирана с функцията:

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

S – светлинен добив на сцинтилатора
 $L(E)$ – формула на Бъркс за йонизационното гасене

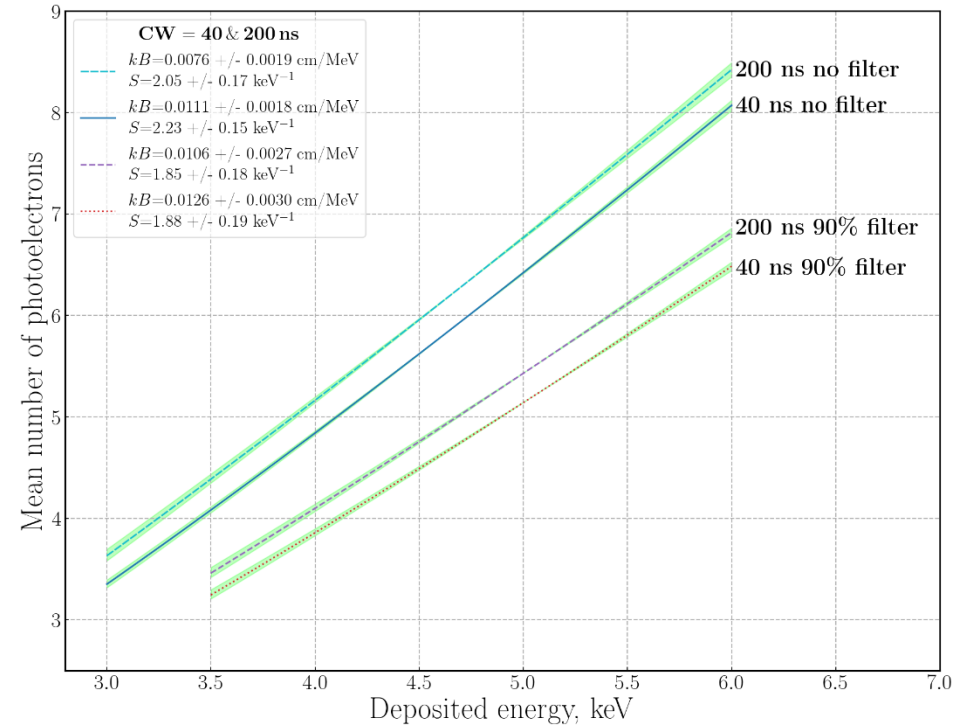
kB – параметър на йонизационно гасене

dE'/dx – спираща способност на електрон с енергия E'



Изследване на светлинния отклик

- Светлинният отклик на toluene+PPO беше изследван с помощта на Комптоновия метод. Получената стойност $kB = 0.0111(18) \text{ cm/MeV}$ е в добро съответствие със стойността от измерванията при промяна на ефективността: $kB = 0.0122(4) \text{ cm/MeV}$
- Наблюдаваме разликата в оценката на kB параметъра при измервания с прозорец на съвпадения с различна дължина
- Ще бъдат изследвани други сцинтилатори, както и начин за оценка на ефективността за регистрация без TDCR модела.



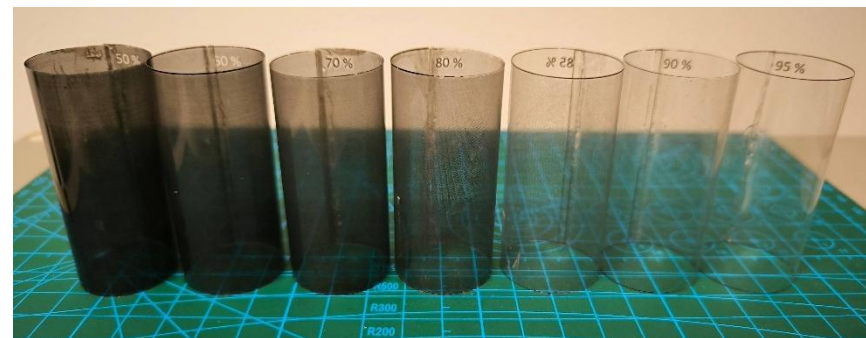
Ръкопис 'Design of a new Compton-TDCR spectrometer at Sofia University for the characterization of Liquid Scintillation cocktails' премина първи етап на рецензиране (minor revision) и е изпратена в ARI за второ рецензиране.

Изследване на влиянието на
корекцията за случайни съвпадения
при определяне на kV при промяна на
ефективността със сиви филтри

- Dutsov et al. (2020) предлагат аналитична корекция за случайни съвпадения 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

Измервания

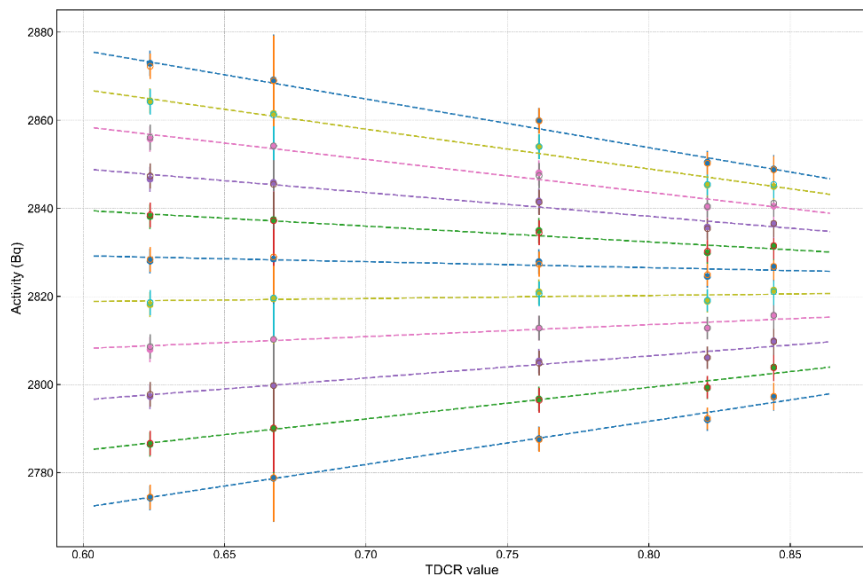
При промяната на ефективността със сиви филтри се извършват серия от TDCR измервания с една и съща проба, като всеки път се използва различен филтър, за да се получи различна ефективност за детектиране. Избира се тази стойност на kB в TDCR модела, която дава една и съща активност при всички измервания.



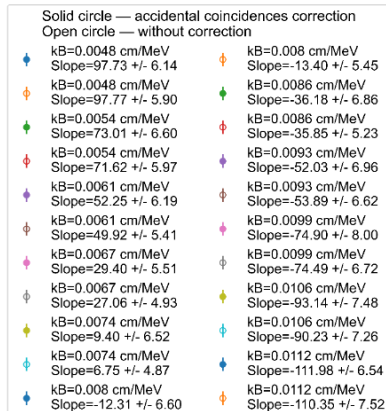
Нуклид	Детектор	Сцинтилатор	Година
^3H , ^{14}C	TDCR-SU	Toluene+PPO	2022
	miniTDCR		
^3H , ^{14}C	TDCR-SU	Toluene+PPO	2023
	miniTDCR		
^{63}Ni	miniTDCR-LNHB	UltimaGold	2024
^3H	miniTDCR-LNHB	UltimaGold	2022



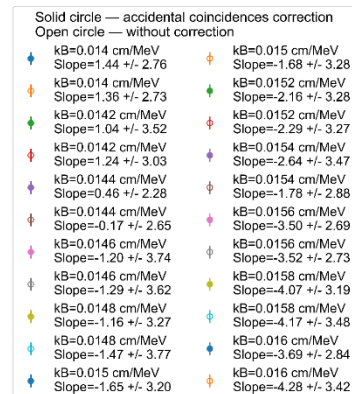
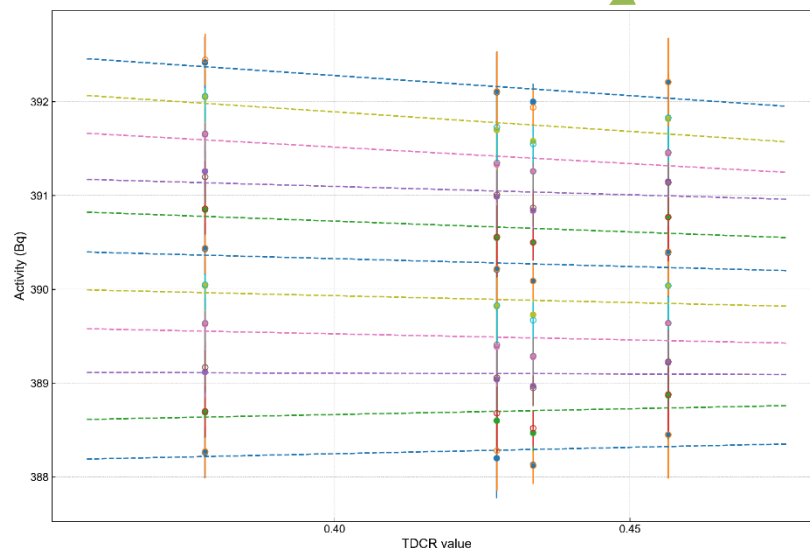
Анализ на измерванията



^{63}Ni в UltimaGold,
miniTDCR-LNHB



^3H в toluene+PPO,
TDCR-SU



- Корекцията за случайни съвпадения не променя оценката на оптимална стойност на kB параметъра
- За дадена проба, стойността на kB варира между различните TDCR системи
- За дадена система и сцинтилатор, стойността на kB варира в зависимост от нуклида в пробата и продължителността на прозореца на съвпадения
- Ще продължим теоретичните и експериментални изследвания на параметъра на йонизационно гасене kB и за по-добро разбиране на поведението му при отчитане на йонизационното гасене в рамките на TDCR модела

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

Статии по темата на дисертацията за II година:

1. V. Todorov*, P. Cassette, S. Georgiev, B. Sabot, and K. Mitev, “Automatic system for testing PMT photocathode homogeneity” J Radioanal Nucl Chem, Mar. 2025. DOI: 10.1007/s10967-025-10028-y
2. 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, May 2025 DOI: 10.1007/s10967-025-10173-4
3. 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’(revised), submitted to ARI
4. K. Mitev*, V. Todorov, P. Cassette, B. Sabot,, ‘MCLTDCR: A Monte Carlo Code for Generation of List Mode TDCR files’(revised), submitted to ARI
5. 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” 2024 XXXIV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA). IEEE, DOI: 10.1109/MMA62616.2024.10817679

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, vol. 231. Elsevier BV, p. 114554, May 2024. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114554
2. P. Cassette*, V. Todorov, B. Sabot, S. Georgiev, and K. Mitev, "*Uncertainties in TDCR measurement revisited: Contribution of optical effects*" Applied Radiation and Isotopes, vol. 201. Elsevier BV, p. 110992, Nov. 2023. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110992.
3. V. Todorov*, P. Cassette, S. Georgiev, B. Sabot, and K. Mitev, "*Automatic system for testing PMT photocathode homogeneity*" J Radioanal Nucl Chem, Mar. 2025. DOI: 10.1007/s10967-025-10028-y
4. 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, May 2025 DOI: 10.1007/s10967-025-10173-4
5. 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*' (revised), submitted to ARI
6. K. Mitev*, V. Todorov, P. Cassette, B. Sabot,, '*MCLTDCR: A Monte Carlo Code for Generation of List Mode TDCR files*' (revised), submitted to ARI
7. 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*" 2024 XXXIV International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA). IEEE, DOI: 10.1109/MMA62616.2024.10817679

Представяния на резултатите за II година:

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 Committee for Radionuclide Metrology (ICRM2025), 19-23 May, 2025
2. 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)

Представяния на резултатите за I година:

1. 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, 10-11 April, 2024
2. V. Todorov, P. Cassette, S. Georgiev, B. Sabot, K. Mitev, '*Automated System for Assessing PMT Photocathode Non-Uniformity*', International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry (LSC2024), 15-17 April, 2024

**Благодаря за
вниманието!**