



Катедра Атомна физика на 80 години

София, България

18.04.2026

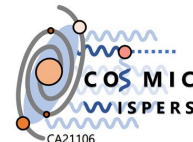


Изследване параметрите на снопа в Run III и Run IV на експеримента

TRADME

Катерина Костова

Катедра Атомна физика, Физически факултет, СУ



*Работата е подкрепена от Европейския съюз - NextGenerationEU, чрез Национален план за възстановяване и устойчивост на Република България проект SUMMIT BG-RRP-2.004-0008-C01, и чрез ФНИ КП-06-КОСТ/25 от 16.12.2024, COST Action COSMIC WISPers CA21106

Мотивация: Хипотезата за X17

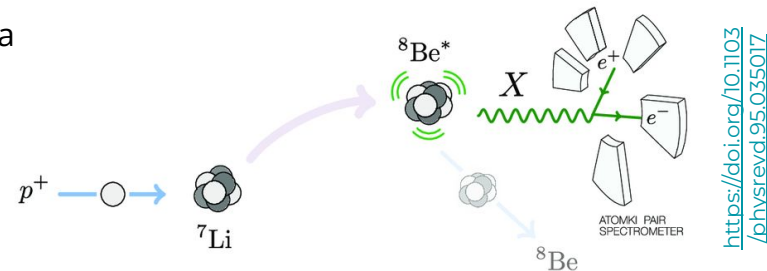
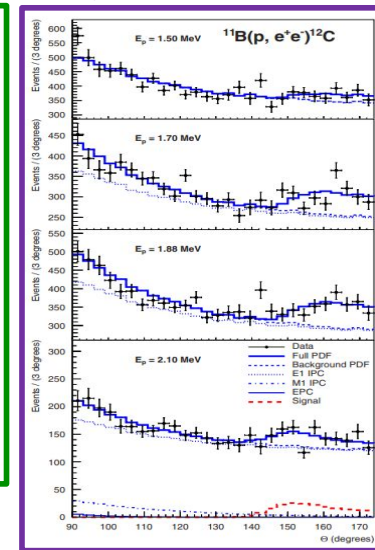
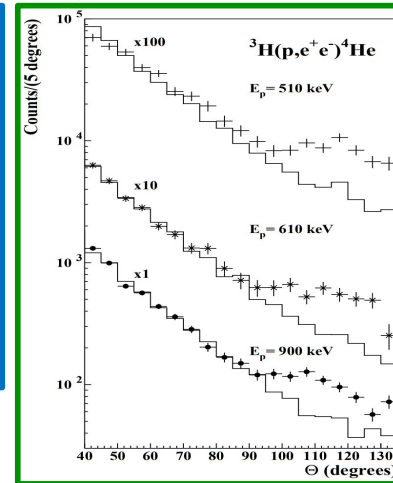
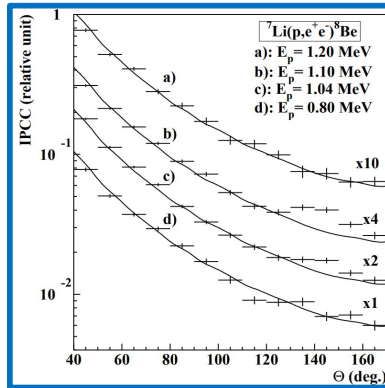
- експериментално изследване на ядрен преход на ядро ${}^8\text{Be}^*$ чрез вътрешно конвертиране (IPC) в АТОМКИ, Дебрецен, Унгария
- наблюдава се аномален излишък в разпределението по ъгъл между двойката e^+ и e^- от IPC на ${}^8\text{Be}$, ${}^4\text{He}$ and ${}^{12}\text{C}$
- аномалията е съвместима с раждането и последващото разпадане на **нова частица с маса $\sim 17\text{ MeV} \rightarrow \text{X17}$**
- ако X17 е векторен бозон, Лагранжианът на CM се разширява с нов член от вида (по аналогия с QED):

$$\mathcal{L}_X = g_{v\psi} X_\mu(x) \bar{\psi}(x) \gamma^\mu \psi(x)$$

$$\mathcal{L}_{kin}^{mix} = -\frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu}(x) X^{\mu\nu}(x)$$

+ масов член:

$$\mathcal{L}_{X_m} \equiv \frac{1}{2} m_X^2 X_\mu X^\mu$$



<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.035017>

→ **тестване на хипотезата за съществуването на X17 на множество нови и съществуващи експерименти**

Експериментът PADME

(Positron Annihilation into Dark Matter Experiment)

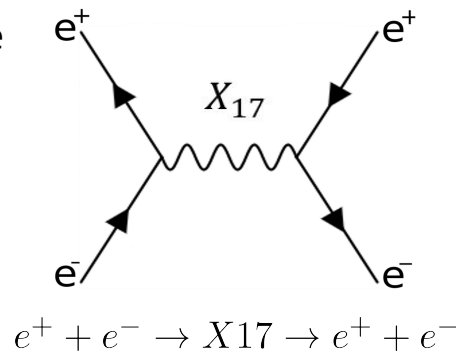
- първоначално планиран за търсене на асоциирано раждане на тъмен фотон в електрон-позитронна аниhilация - **Run I** и **Run II** (вж. презентация на Калина Димитрова)
- **Run III** и **Run IV** - изследване на раждането на нов хипотетичен бозон X17 в резонансна аниhilация и разпадане в електрон-позитронна двойка

$$e^+ + e^- \rightarrow X17 \rightarrow e^+ + e^-$$



Резонантно търсене на експерименти с тънка фиксирана мишена

- $\sigma_{res} \propto \frac{g_{Ve}^2}{2m_e} \pi Z \delta(E_{res} - E_{beam}) \rightarrow$ доминантен процес в сравнение с други пораждащи сигнал процеси
- \sqrt{s} трябва да бъде възможно най-близо до очакваната маса
→ фино сканиране по енергии с позитронен сноп
→ очаквано усилване над фона от процеси от CM

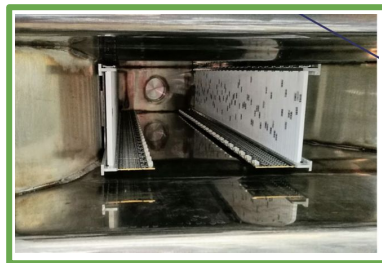


PADME Run III: Сканиране по енергии на e^+ снопа в интервал $E_{beam} = [262, 296]$ MeV
→ енергия в система център-на-масите за двойките e^+e^- в интервал $\sqrt{s} = [16.4, 17.4]$ MeV

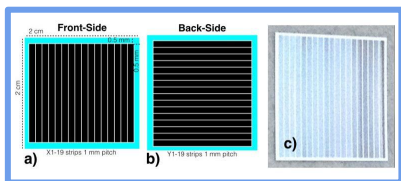
→ измерване на броя 2-частични крайни състояния N_2

$$N_2(s) = N_{POT}(s) \times [B(s) + S(s; M_X, g) e_S(s)] \text{ vs. } N_2(s) = N_{POT}(s) \times B(s)$$

Детекторите на PADME



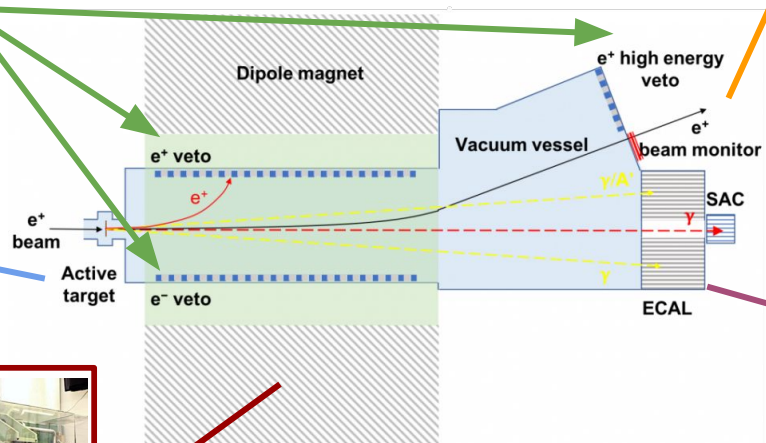
Scintillating e^+/e^- VETO



Active diamond target

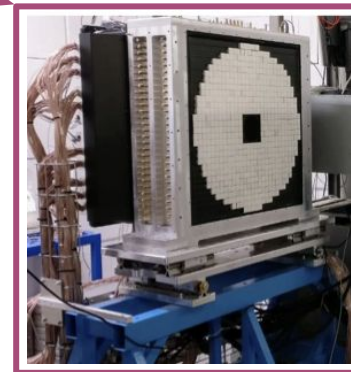
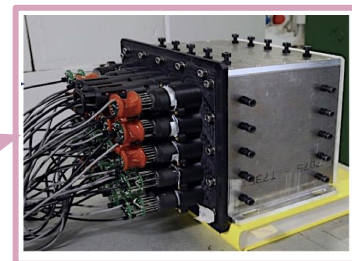


Dipole Magnet



TimePix Beam monitor

Small Angle PbF_2 calorimeter



BGO ECAL

Експериментът PADME

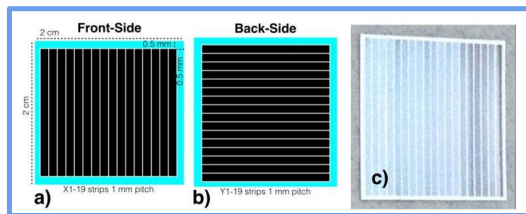
Детектори за следене на характеристиките на снопа

Черенковски калориметър от оловно стъкло

за измерване на интензивността на снопа

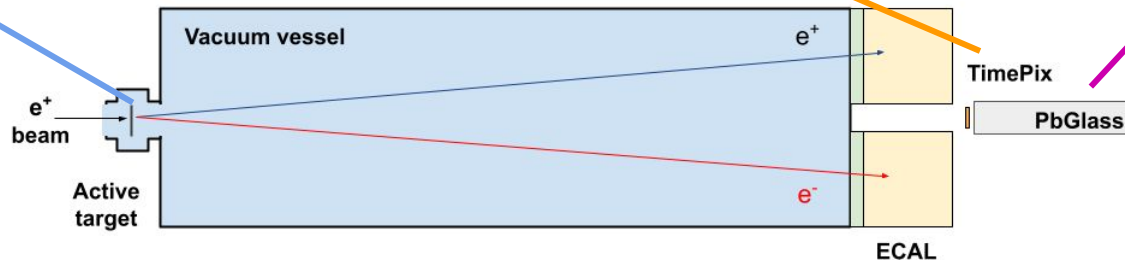
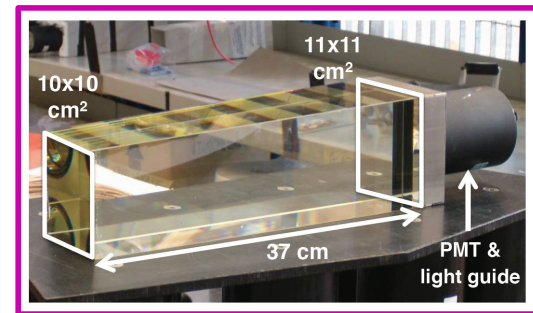
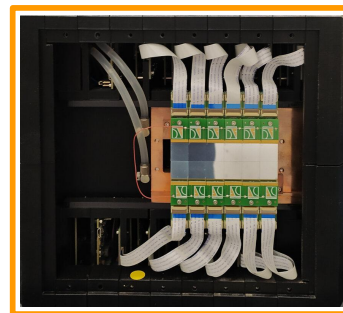
Активна диамантена мишена

за измерване на позицията и интензивността на снопа



TimePix

за измерване на позицията и диаметъра на снопа



Прецизно определяне на N_{ROT}

Черенковски електромагнитен калориметър

- блок от оловно стъкло Schott SF57 (75% PbO) с плътност $\rho = 5.5 \text{ g/cm}^3$
- фотоумножител Hamamatsu R2238
- многоканален АЦП V1742

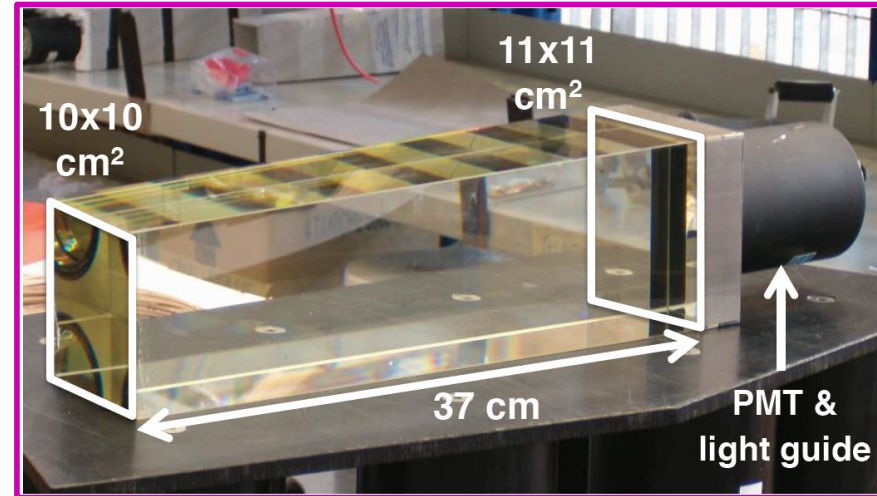
→ за прецизно определяне на N_{ROT}

→ измерва се полученият заряд на анода на фотоумножителя и се преобразува в енергия:

$$E_{\text{PbGl}}^{\text{tot}} = \frac{Q_{\text{PbGl}}^{\text{tot}}}{Q/E}$$

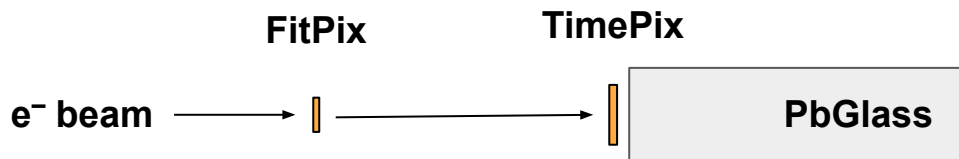
пълна депозирана енергия в оловното стъкло

калибровъчен коефициент или отклик на детектора в pC/MeV



Фигура: Черенковският електромагнитен калориметър от оловно стъкло с приблизителните му размери

Тестов набор на данни за калибриране на детекторите за следене на характеристиките на снопа



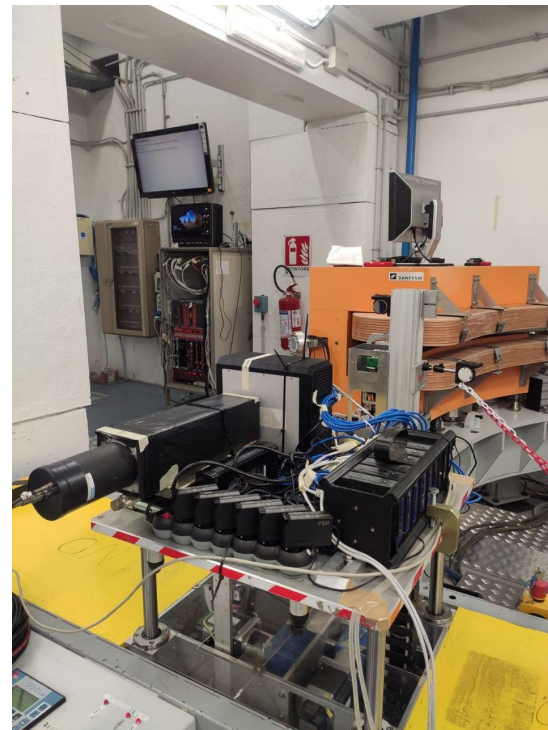
Необходимост от 2 типа корекции на измерването:

1. Energy-loss correction

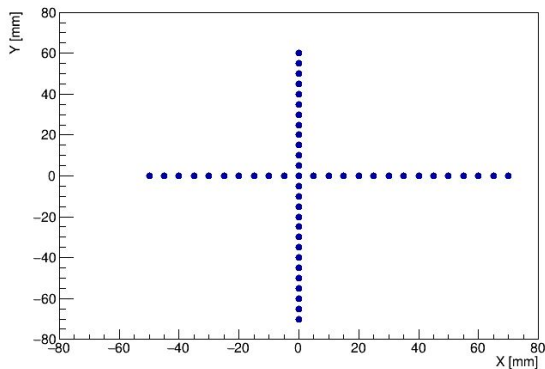
- поради движение на позицията на снопа и нееднородности на материала пред калориметъра от оловно стъкло

2. Radiation-induced performance degradation

- промяна на прозрачността на оловното стъкло при $O(\text{krad})$
- обща акумулирана доза по време на Run III ~ 2.5 krad

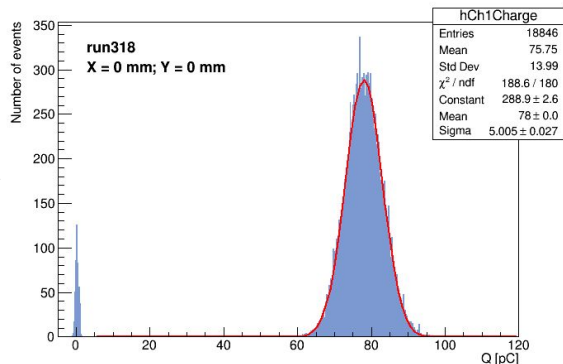


Резултати от тестов набор на данни за Run III

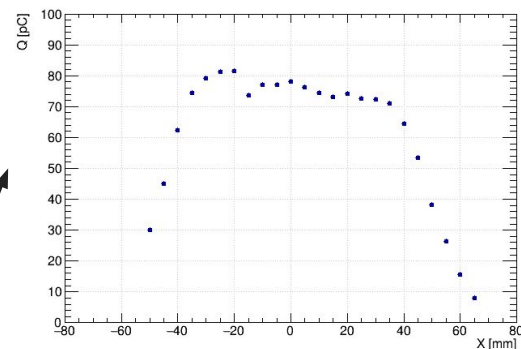


Фигура 1: Координатите на изследваните позиции на снопа по X и Y.

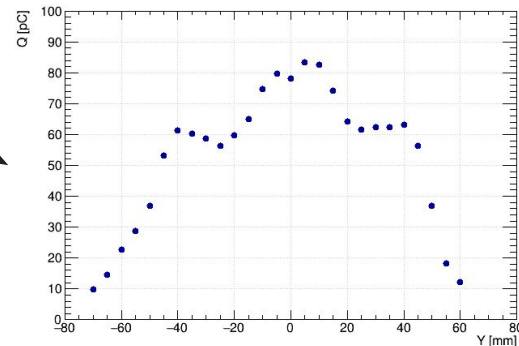
за всяка точка от сканирането по позиция се прави разпределението на получения заряд



Фигура 2: Разпределение на реконструирания заряд за дадена позиция на детектора.



Фигура 3: Реконструиран заряд като функция на позицията на снопа по X оста.



Фигура 4: Реконструиран заряд като функция на позицията на снопа по Y оста.

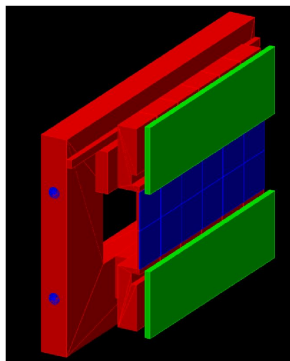
Резултати от тестов набор на данни за Run III

1. Загуба на енергия поради поглъщане от пасивен материал пред оловното стъкло

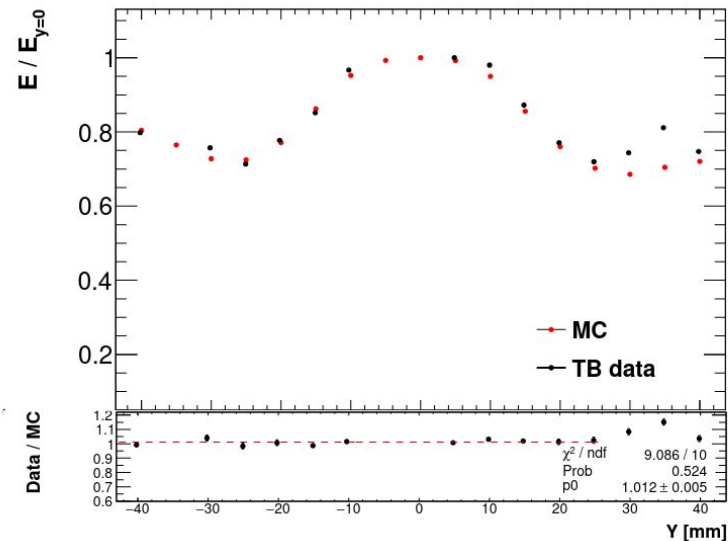
- геометрията на охлаждащата система на TimePix (основно Cu) детайлно описана в МК симулация
 - много добро съвпадение между данни и МК симулация
- валидиране на Y профила на калориметъра



Фигура 1: Снимка на детектора TimePix с неговата охлаждаща система.

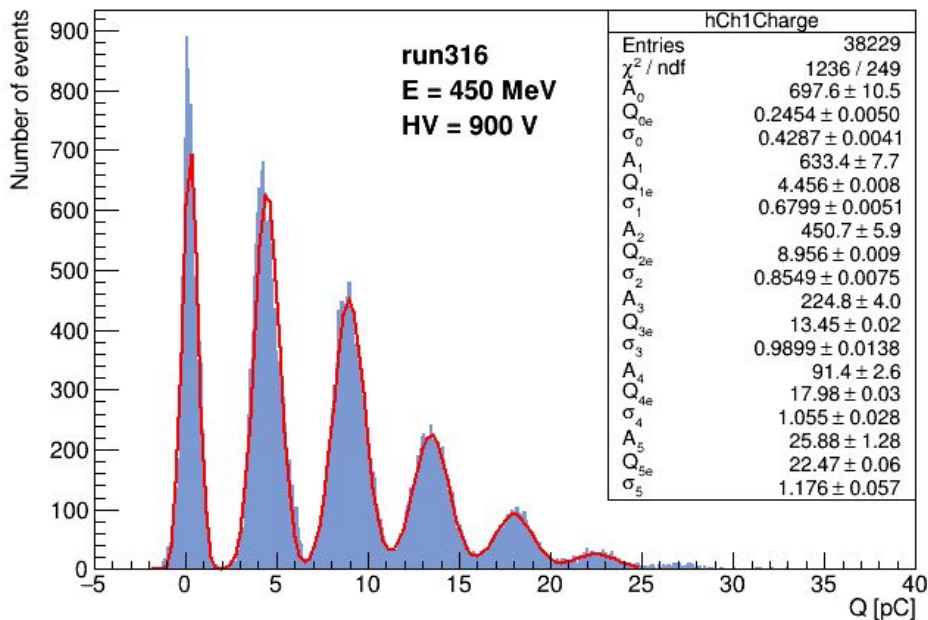


Фигура 2: Монте Карло симулация на детекторната геометрия.

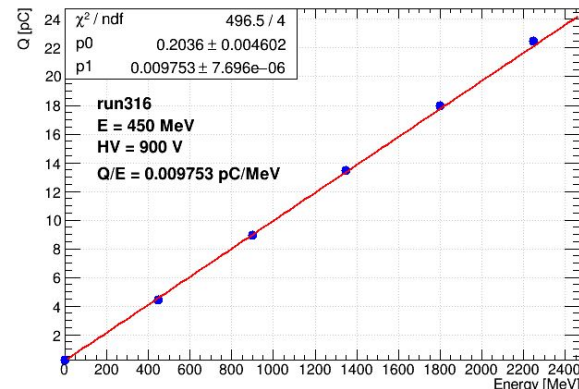


[arXiv:2505.24797](https://arxiv.org/abs/2505.24797) [hep-ex]

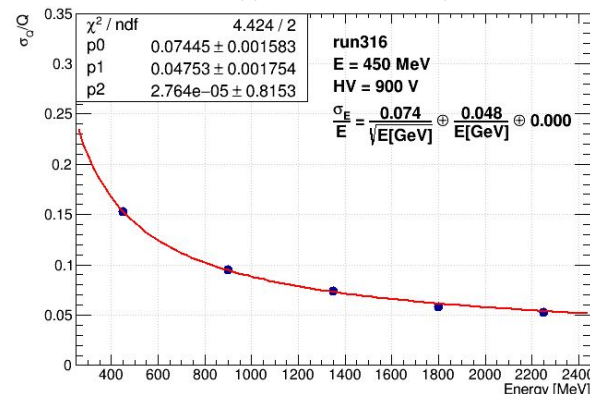
Отклик към единични частици на калориметъра от оловно стъкло



Фигура 1: Разпределение по заряд при ниска множественост на позитронния сноп.



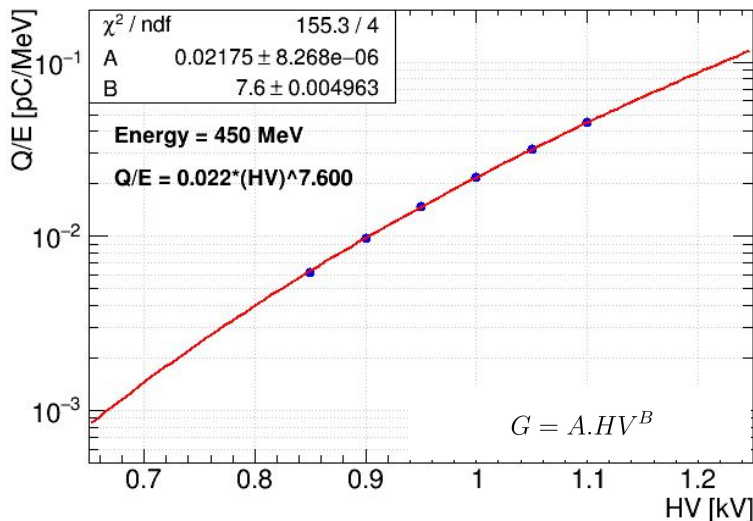
Фигура 2: Среден заряд към енергия на единична частица.



Фигура 3: Относителна разделителна способност към енергията на единична частица.

Резултати от тестов набор на данни за Run III

2. Влошаване на отклика на детектора поради голяма получена радиационна доза



Фигура: Функция на отклик на детектора от приложено високо напрежение при $E_{\text{beam}} = 450 \text{ MeV}$.

$$Q/E (650V) = 0.8231 \pm 0.0006 \text{ fC/MeV}$$

- по време на Run III общо $7e11 \text{ PoT}$ ($\sim 300 \text{ MeV}$ всеки) са преминали през оловното стъкло \rightarrow обща акумулирана доза $TID = 25 \text{ Gy}$ (2.5 krad)
- радиационната устойчивост на SF57 не е била измервана в литературата, но има данни за други подобни материали (SF5-SF6), при които се наблюдават значителни загуби

Quantity	PWO:R ³⁺	SF5 (PbO:50% [4])	SF6 (PbO:75% [4])
Density (g cm^{-3})	8.28	4.07	5.19
Radiation length X_0 (cm)	0.89	2.55	1.69
Index of refraction	2.2	1.67	1.81
Cutoff in T (%) (nm)	320	340	360
Hygroscopicity	No	No	No
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	1123	442	455
Radiation-hardness (rad)	10^{7-8}	10^{3-4}	10^{2-3}
Hardness (Mohs)	3		
Cleavage	(101)	None	None
Available length ^a (X_0)	30	Large	Large
Moliere radius (cm)	2.19		

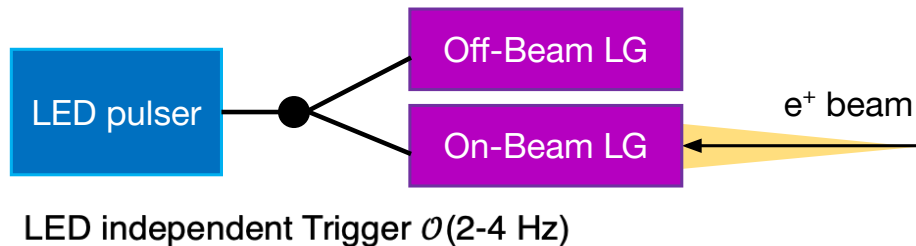
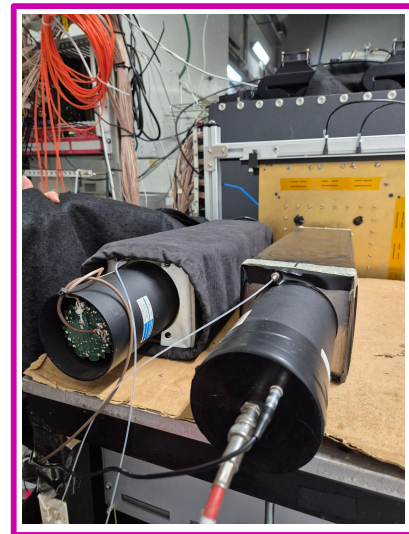
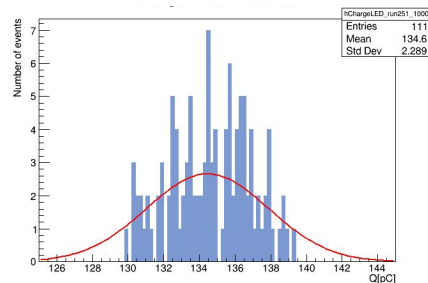
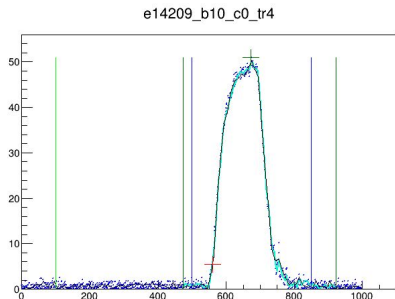


SF57 PbO concentration $\sim 75\%$

Стратегия за Run IV

LED импулсен генератор + 2ри детектор от оловно стъкло

- **LED импулсен генератор** Tektronix AFG3101 за контролиране на промяната в отклика на калориметъра при радиационно облъчване на оловното стъкло
- независим тригер, включен в системата за набор на данни DAQ
- второ идентично **оловно стъкло** (извън линията на снопа, само LED) като референтен детектор
- online проследяване на отклика на детектора, нормиран на този от втория (референтен) детектор от оловно стъкло



Заключение

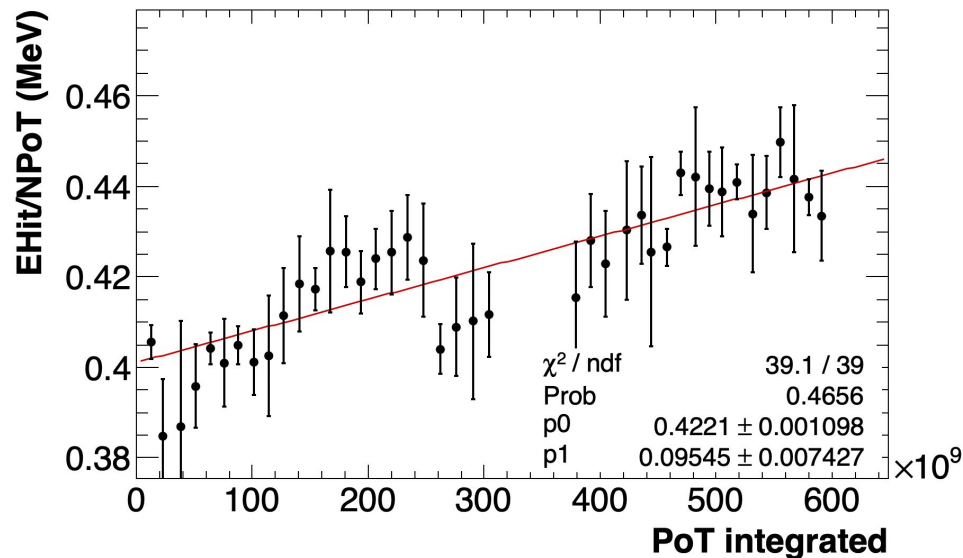
- Експериментът PADME има възможност да потвърди или отхвърли хипотезата за съществуването на нова хипотетична частица X_{17} , но за това е необходима прецизно измерване с неопределеност от по-малко от 1% на характеристиките на снопа.
- Бяха анализирани данните от тестов набор на данни през 2024 г., получени от черенковския калориметър от оловно стъкло, с цел определяне на калибрационния коефициент Q/E , необходим за точното изчисляване на броя на частиците, попаднали в мишената.
- Два основни ефекта бяха установени и характеризирани - загуба на енергия в пасивния материал пред калориметъра и влошаване на отклика на детектора поради голяма получена радиационна доза → **общата некорелирана систематична неопределеност е 0,35%.**
- В рамките на новия Run IV се използва нова техника за калибриране с цел намаляване на неопределеността при измерването на интензитета на снопа – чрез използване на LED импулсен генератор и втори детектор от оловно стъкло като референтен детектор за отклика на светлинния добив – като по този начин **систематичната неопределеност се очаква да се подобри до под 0,3%.**

Благодаря за
вниманието!

Back-up

Radiation loss $\square E_{\text{hit}}/N_{\text{PoT}}$

- First proof of loss of LY:
 - By looking at the ratio between the total energy per bunch in ECAL and the NPoT an increasing slope is visible \square order 10%
 - Notice that EHit is particularly sensible to the beam spot variation (beam e^+ might enter) hence is prone to significant jumps between periods

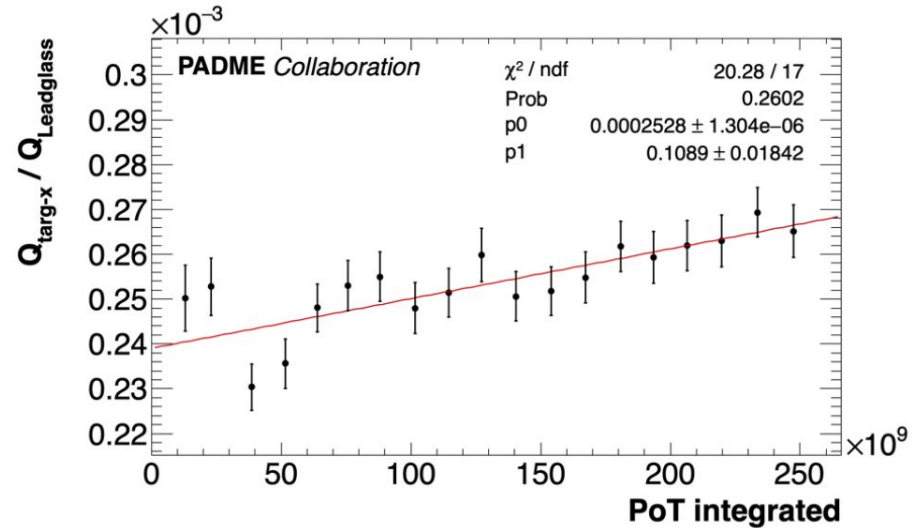


Correlation matrix

	θ	1
θ	1	0.04257
1	0.04257	1

Radiation loss $\square Q_{X-Tar}/Q_{LG}$

- Second proof of loss of LY:
 - Target X strips are way more sensible than Y \square can be used for quantitative checks
 - Shows an increasing slope \square order 10% also here
 - During scan 1 (fitted) there were no “no target runs” hence the Qx response is reliable just in that part of Run 3
- **Conclusion:** use the weighted mean of the two proofs as Integrated PoT correction $\square 0.0967 \pm 0.0068$

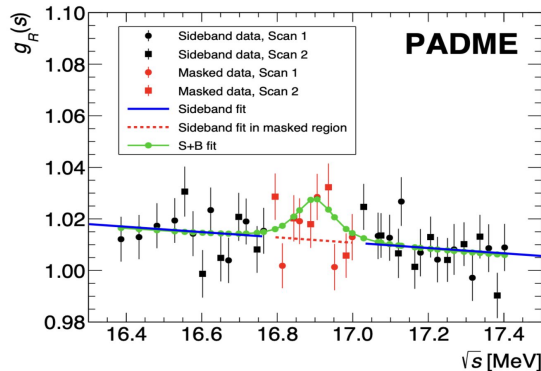


Correlation matrix

	0	1
0	1	0.4282
1	0.4282	1

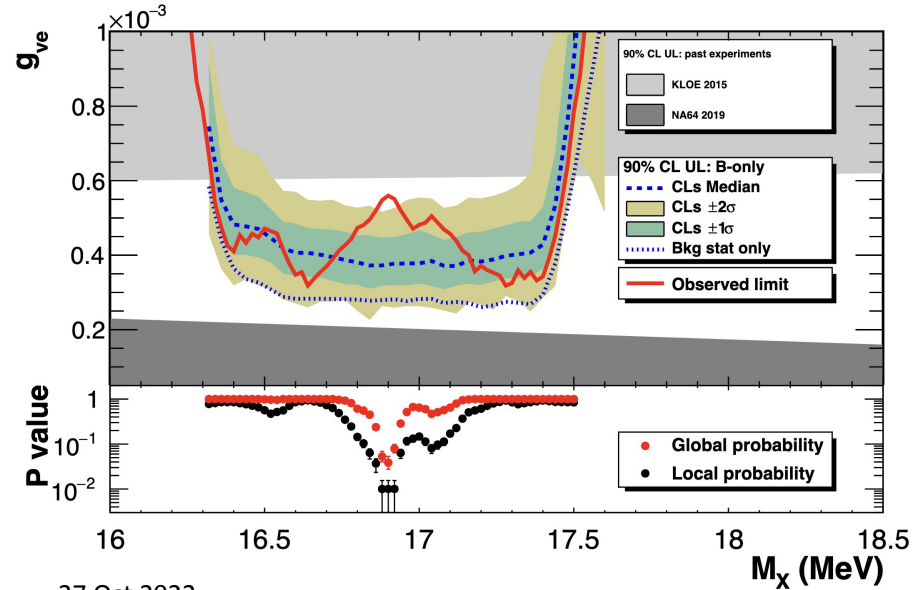
PADME Run III result

- At $M_X = 16.90(2)$ MeV, $g_{ve} = 5.6 \times 10^{-4}$, the global probability dip reaches $3.9_{-1.1}^{+1.5}$ %, corresponding to (1.77 ± 0.15) σ one-sided (look-elsewhere calculated exactly from the toy pseudo-events)
 - A second excess is present at ~ 17.1 MeV, but the absolute probability there is ~ 40 %
- If a 3σ interval is assumed for observation following the estimate $M_X = 16.85(4)$ MeV of [PRD 108, 015009 \(2023\)](#), the p-value dip deepens to $2.2_{-0.8}^{+1.2}$ % corresponding to (2.0 ± 0.2) σ one-sided

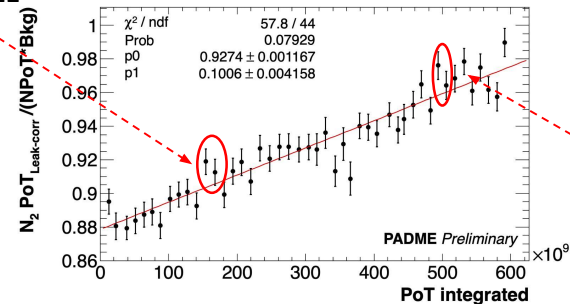


[arXiv:2505.24797](https://arxiv.org/abs/2505.24797) [hep-ex]

Some excess is observed a $\sim 2.5 \sigma$ local coverage



27 Oct 2022



8 Dec 2022

Run IV improvements

→ for increased sensibility to confirm/disprove Run III result

- **LED pulser** Tektronix AFG3101 to control the radiation induced loss of the PbGI
 - Independent trigger included in the DAQ system
 - A second PbGI block installed (out of the acceptance and only acquiring the LED trigger)
 - Online PbGI response renormalized to the not-fired PbGI block
→ reference for light yield response on the fly
- **TMM Micromegas** replace the TimePix3 beam monitor
 - 10cm x 10cm MM gas chamber, with x-y strips readout, with $\sim 250 \mu\text{m}$ pitch for beam shape and spot monitor
 - Greater active area wrt TimePix and less passive material
- **PadMMe Micromegas** chamber in front of ECAL
 - e/γ discrimination
 - spatial resolution $\sim 350 \mu\text{m}$
 - beam spot monitor already implemented in Run IV online monitoring

→ Overall uncertainty to be decreased from 0.88% to $\sim 0.5\%$

