

Търсене на нови леки частици при аниhilация на ускорени позитрони

Калина Димитрова
Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“
kalina@phys.uni-sofia.bg

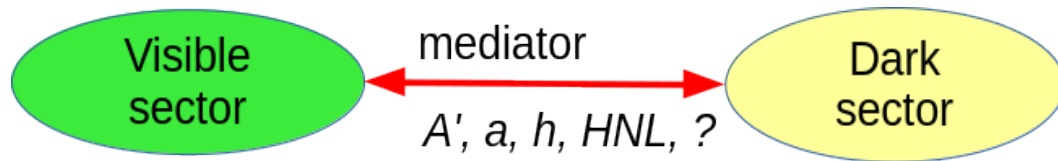
Предзащита на дисертация за придобиване на ОНС „доктор“
29.06.2026 г.



Нови леки частици

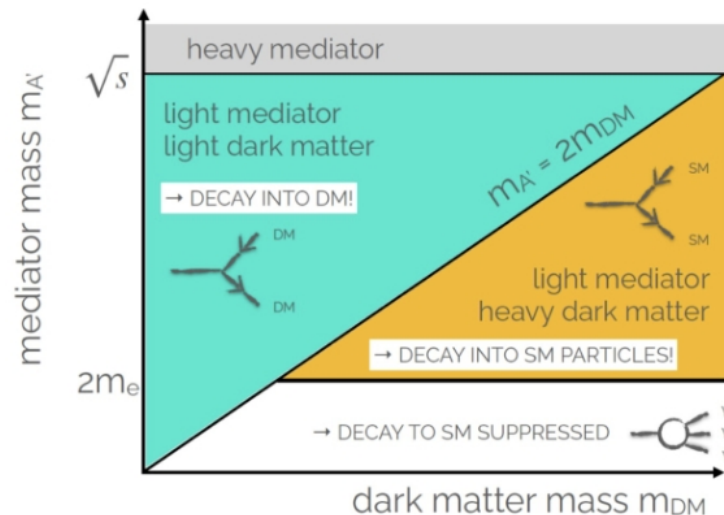


Обяснение на наличието на Тъмна материя чрез съществуването на Тъмен сектор: различни модели за портал между видимия сектор и скрития



Тъмен фотон:

- Безмасов или масивен
- Масивен тъмен фотон: разпад до частици от Стандартния модел или от Тъмния сектор
- Смесване на видимия и Тъмния фотон

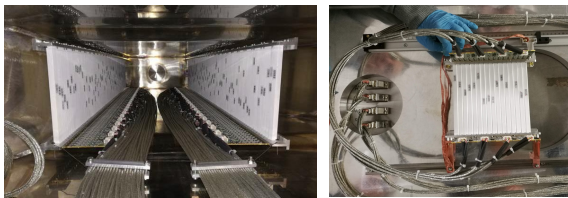


Експериментът PADME



Детектори за заредени частици

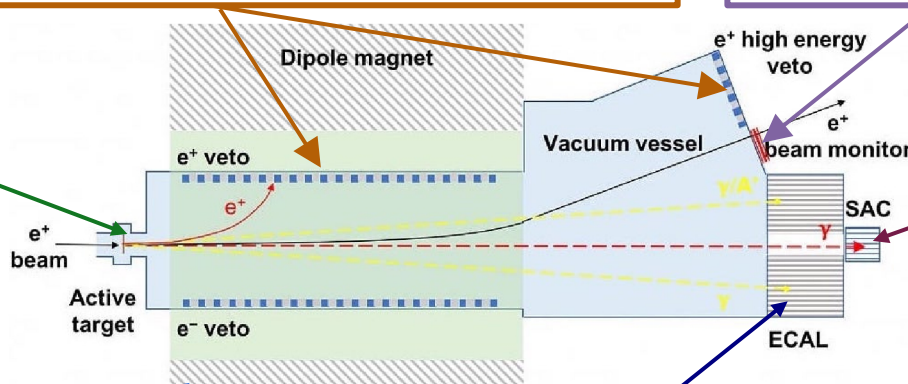
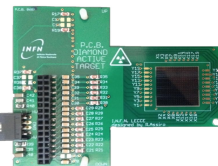
96 + 96 (90) + 16 (x2) канала:
пластмасов сцинтилатор-WLS-SiPM RO
Разделителна способност по импулс до
~5 MeV



TimePix3 монитор на снопа
при изходния прозорец
Матрица от 2 x 6
детектора, общо
1536 x 512 пиксела

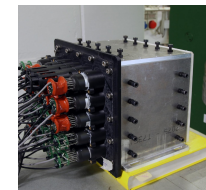
Активна диамантена мишена

2 x 16
електроди от
графит: XY
профил на
снопа и
множественост

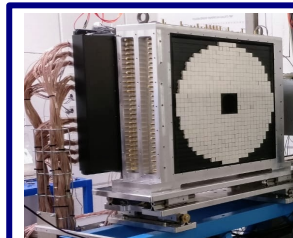
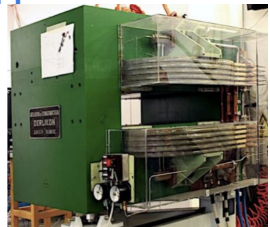


Калориметър за малки ъгли (SAC)

25
кристала
 PbF_2 в 5x5
матрица



Диполен магнит



Електромагнитен калориметър (ECAL)

616 BGO кристала, $2.1 \times 2.1 \times 23 \text{ cm}^3$
Покрити с дифузно отразителна боя TiO_2 ;
допълнителна оптична изолация: 50 – 100 μm фолио
от tedlar
Време на разпад на сигнала – $O(300 \text{ ns})$

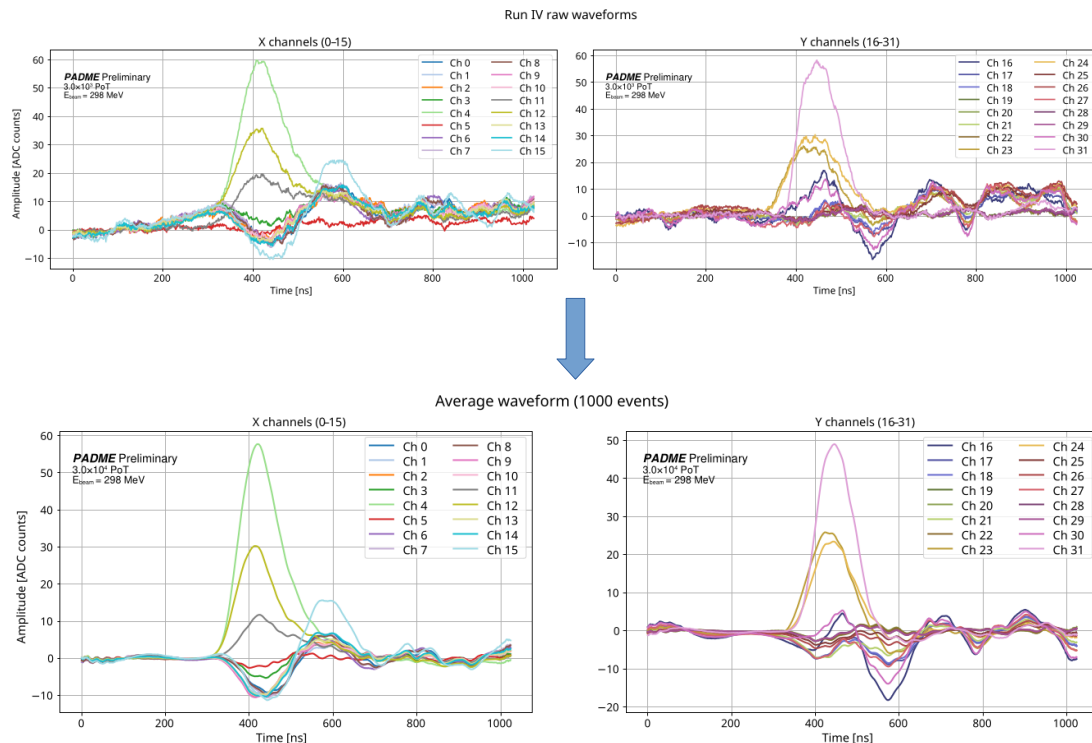
Реконструкция на данните от мишената на PADME



При ниски интензивности на снопа вълновите форми в отделните канали са с по-ниски амплитуди и отношението сигнал/шум е по-малко.

Разработен е усъвършенстван метод за реконструкция, при който вълновите форми се усредняват в рамките на N събития

- При първоначалните изследвания $N \sim 1000$
- Формата на сигнала е изгладена
- Разликите в поведението на шума между отделните събития са изчистени



Реконструкция на данните от мишената на PADME

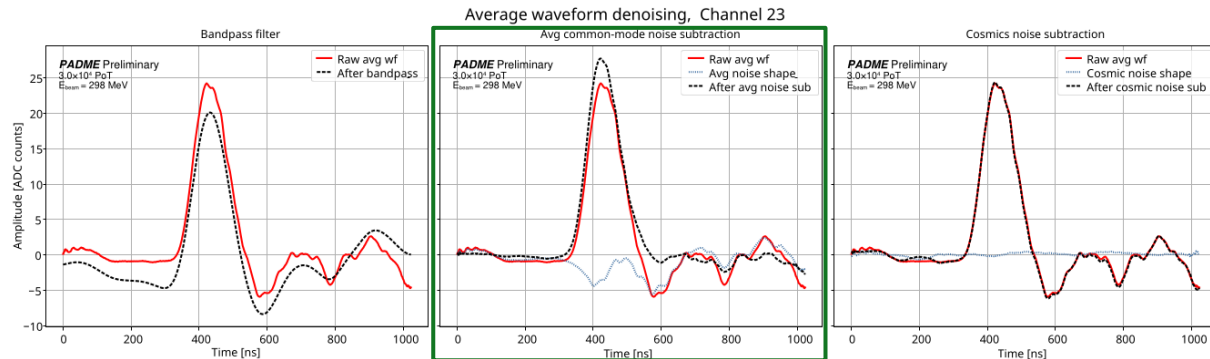


Три различни подхода за потискане на шума след усредняване на вълновите форми:

✗ Лентово-пропускателен филтър

✓ Усредняване на шума в каналите далеч от снопа

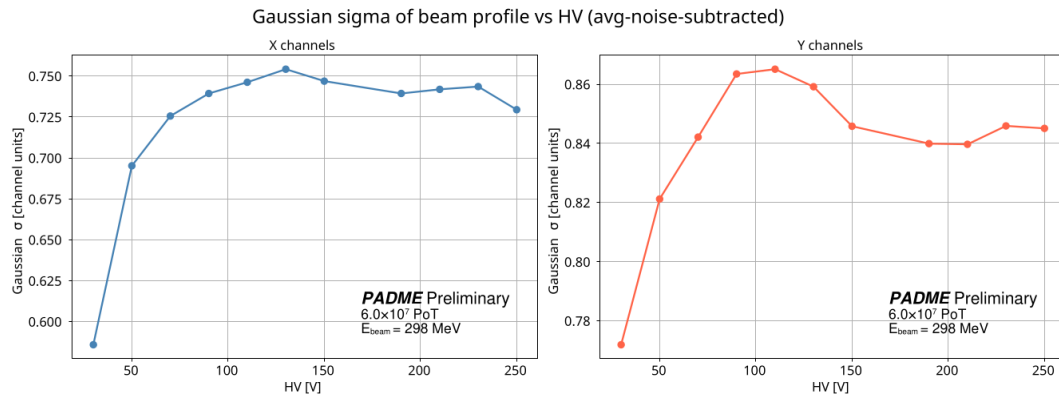
✗ Усреднени вълнови форми от космични/случайни тригери



Изследван е профилът на снопа в зависимост от приложеното върху мишената напрежение

➔ Разглеждат се стойностите $HV \geq 110$ V, при които отношението сигнал-шум е близко до оптимално.

➔ Определено е работното напрежение на мишената $HV = 210$ V.



Реконструкция на сигнали чрез машинно обучение



Симулация на сигнали

Симулиране на набор от 100 000 вълнови форми с до 4 сигнала



Брое на сигналите във всяко събитие

Класификатор, който разделя събитията по категории в зависимост от броя сигнали в тях

Комбинация от конволюционен и напълно свързани слоеве



Автоенкодер

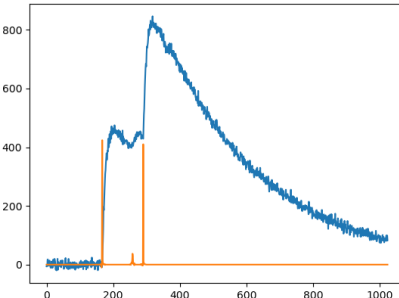
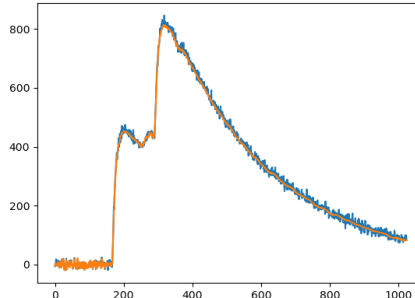
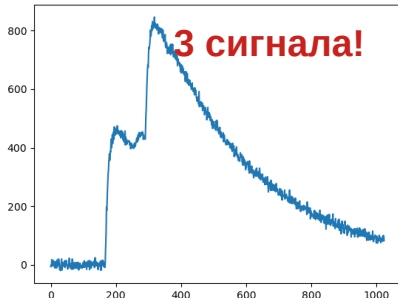
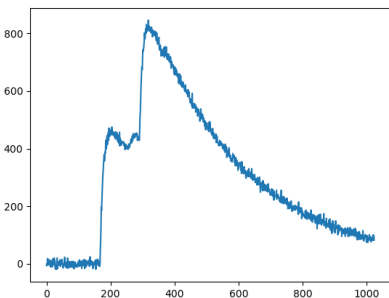
Изходната вълнова форма представлява повторение на входната, като в регионите с присъствие на сигнал шумът е потиснат и сигналът е изгладен



Модифициран автоенкодер

Определяне времената на настъпване и амплитудите на сигналите

Архитектура на автоенкодер + добавяне на желан изход



Модифициран автоенкодер (МАС)

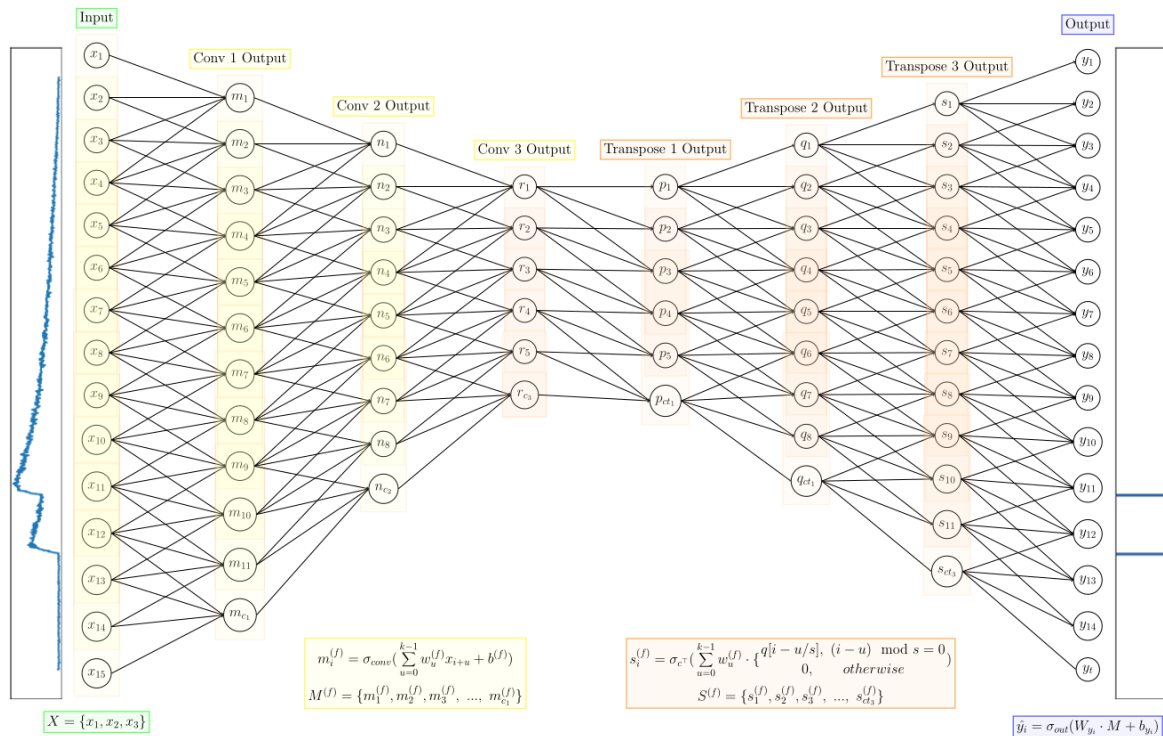


Енкодер и декодер с огледална структура, всеки с по 3 конволюционни слоя

На изхода на модела се подава търсената информация за събитието:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$$

$$y_i = \begin{cases} A_{\text{sig}} & \text{if } i = t_{\text{sig}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

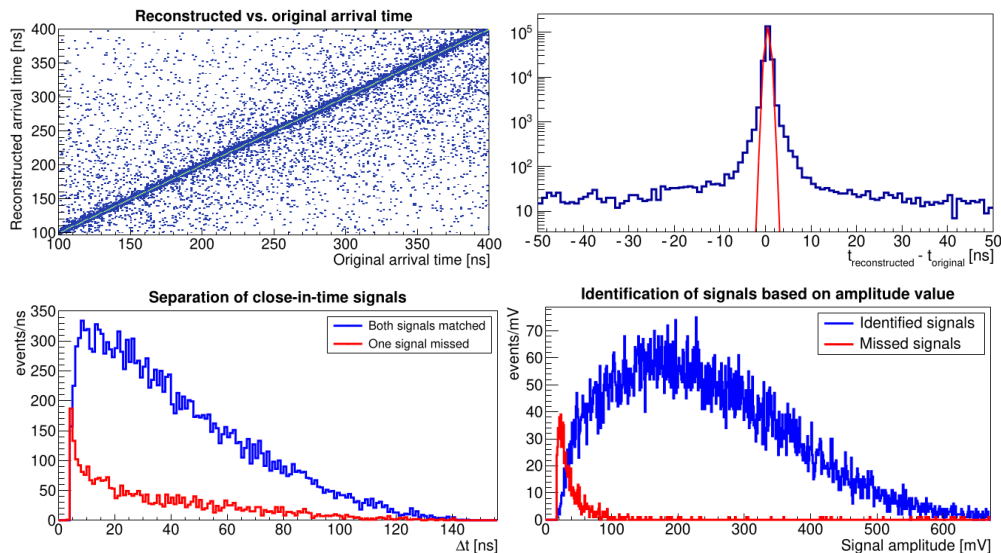


Тестване на модела



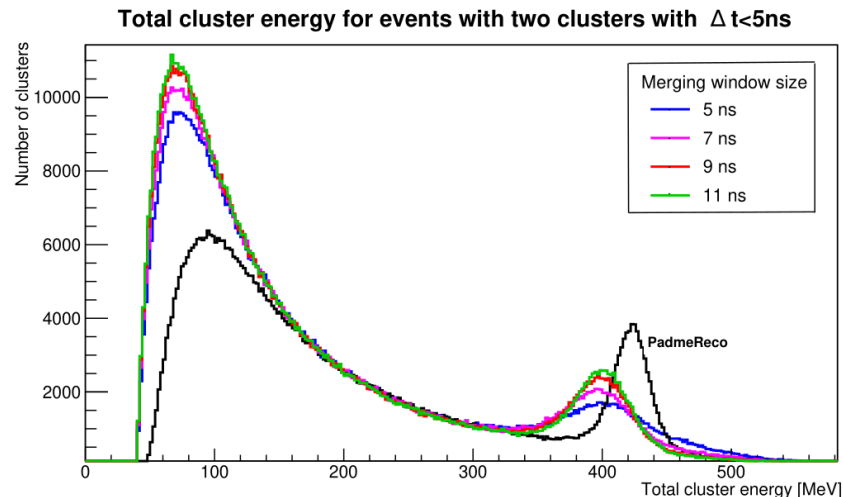
Тестване върху симуирани данни

- $\sigma \approx 520$ ps
- При разлика между два сигнала $\Delta t < 10$ ns, те са слети в един
- При амплитуди под 50 mV сигналите не могат да бъдат идентифицирани над шума



Тестване върху реални данни

- Идентифициране на $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ събития в данни от Run II на PADME
- Изследване параметрите на пост-обработка

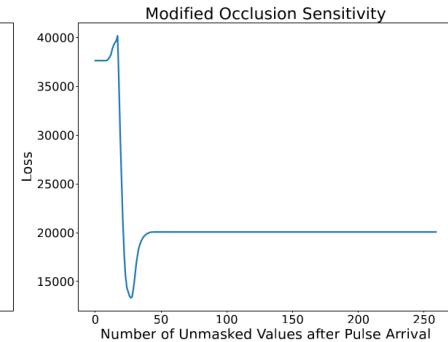
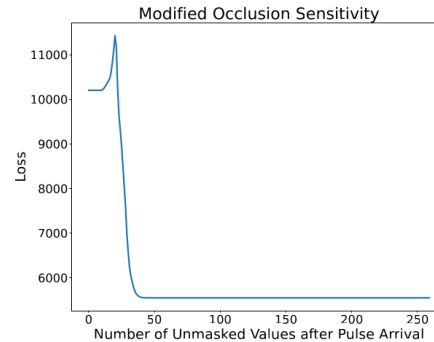
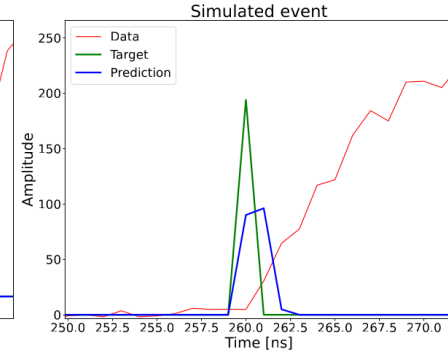
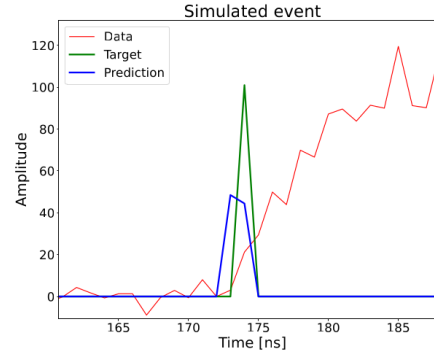
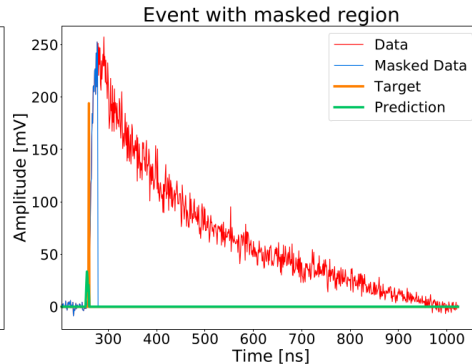
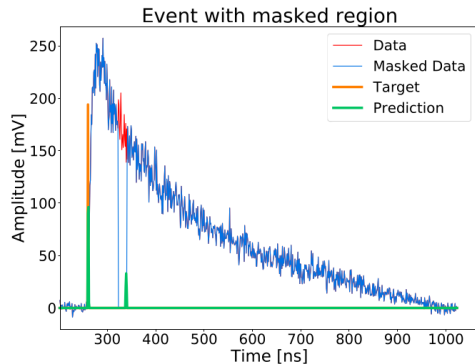


Методи за обяснение на изкуствения интелект (xAI)



Чувствителност към маскирани данни

- Замаскиране на части от входните данни с маска от базови стойности (0) и прилагане на модела върху тях
- Модификация: замаскиране на целия сигнал и последователно откриване на стойности
- Загубата достига минимум след откриване на по-малко от 30 ns след настъпването на сигнала



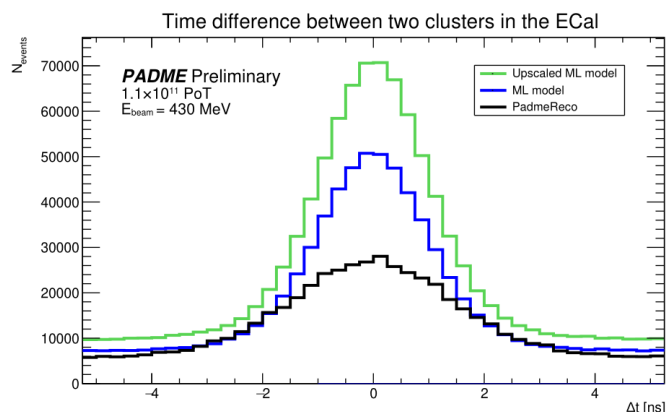
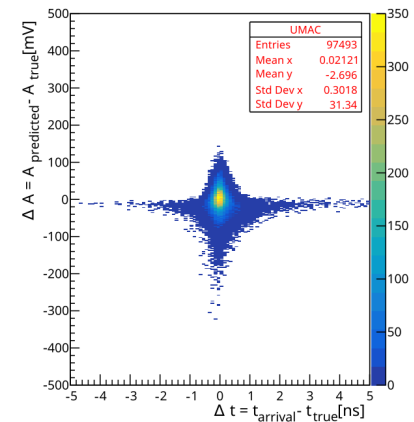
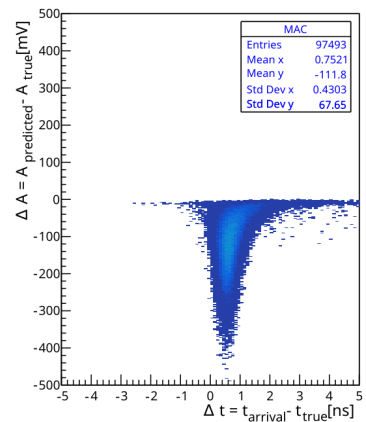
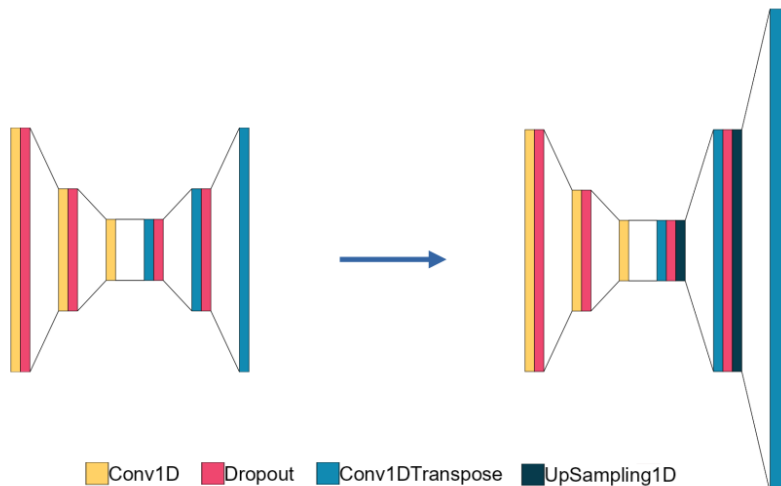
Различно поведение на загубата в зависимост от положението на предсказанието спрямо истината

Увеличаване размерността на изхода



Подобрение на MAC → UMAC

- Добавени upsampling слоеве
- Постигната по-добра реконструкция на времето и амплитудата при симуирани данни
- Въведен в реконструкцията на реални данни → по-голям брой разпознати събития



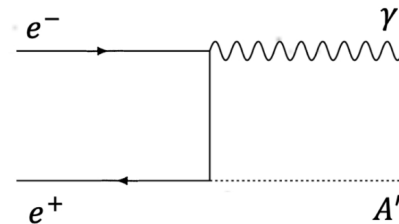
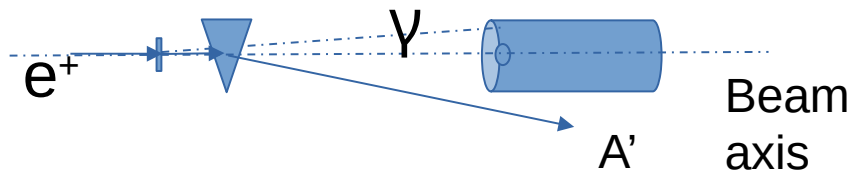
Търсене на Тъмен фотон в PADME Run II



Асоциирано раждане: $e^+ e^- \rightarrow A' \gamma$

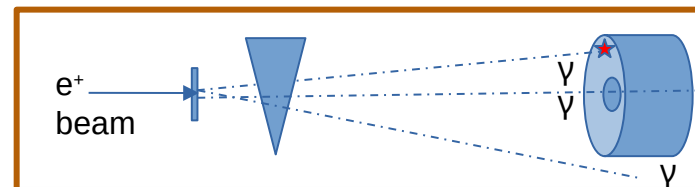
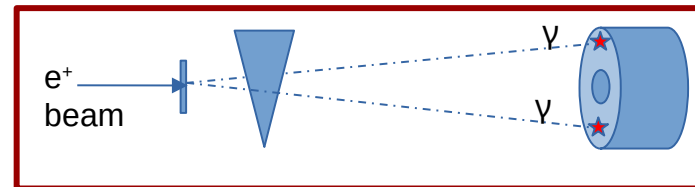
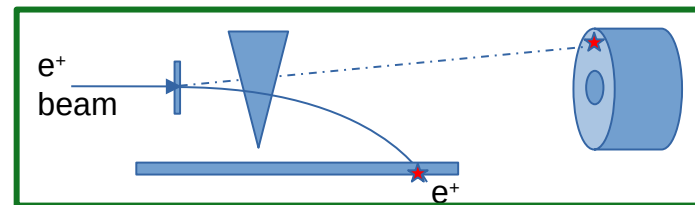
Търсене на събития с единствен регистриран фотон и пресмятане на липсващата маса

$$M_{\text{miss}}^2 = (p_{\text{pos}} + p_{\text{elec}} - p_{\gamma})^2$$



Основни фонови процеси:

- **Спирачно лъчение на позитроните от снопа в мишената:** Предимно фотони с ниска енергия, основен фон при големи липсващи маси
- **Аниhilация до 2 фотона:** Пик, центриран на $M_{\text{miss}} = 0$
- **Аниhilация до 3 фотона:** По цялото разпределение на M_{miss}

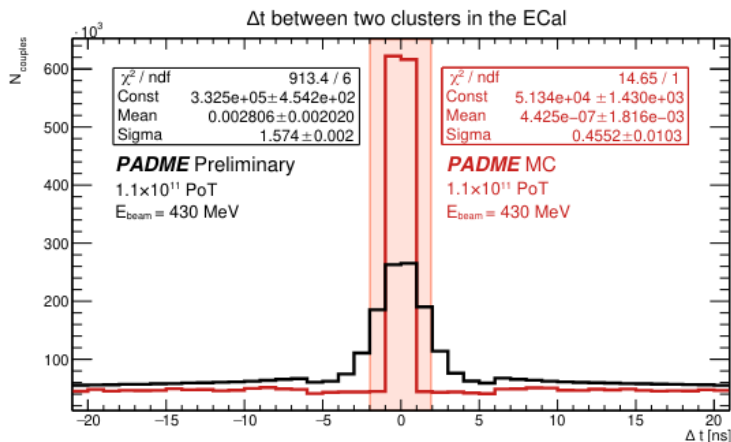


Селекция на $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$ събития



Разпределение на разликата във времената между двойки клъстери в ECal:

- При отделяне на еднофотонни събития се осигурява 2 ns изолация във времето от други клъстери, за да се обяви фотон за единствен
- Аналогично към селекция преминават двойки с $\Delta t < 2$ ns

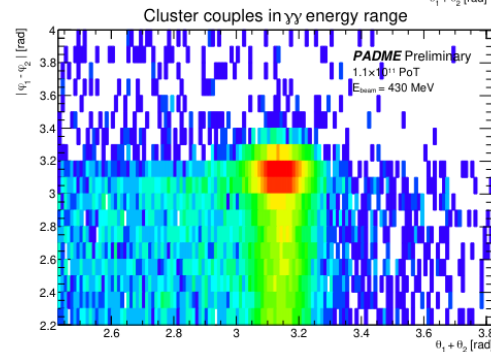
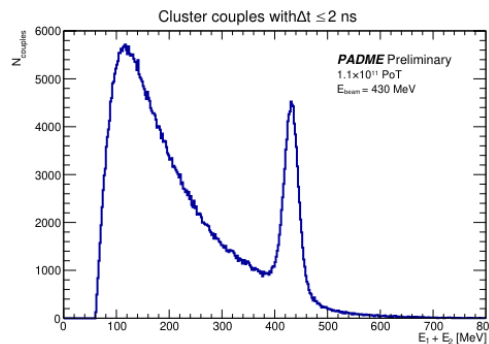
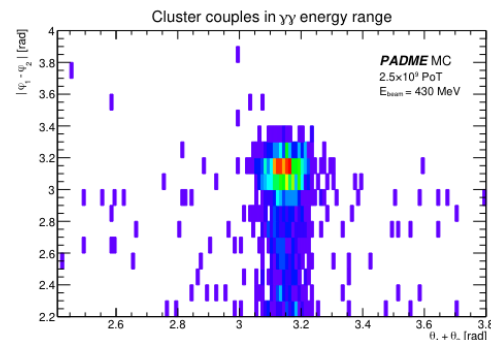
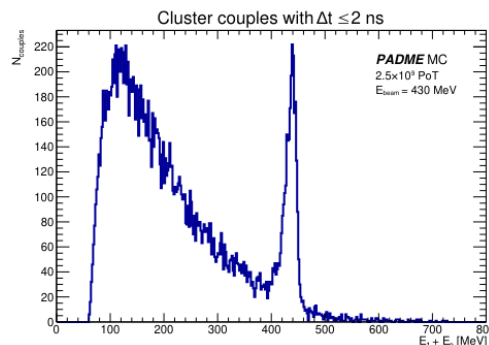


Селекция:

$$E_1^\gamma + E_2^\gamma = E^{\text{beam}}$$

$$\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2| = \pi$$

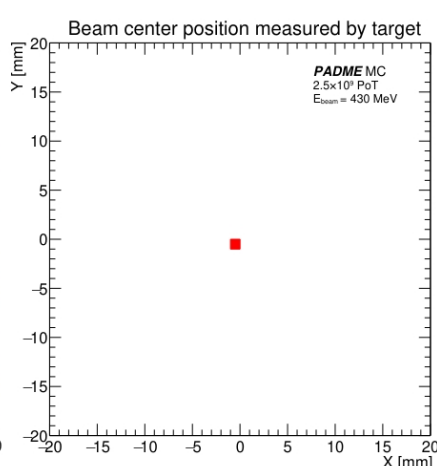
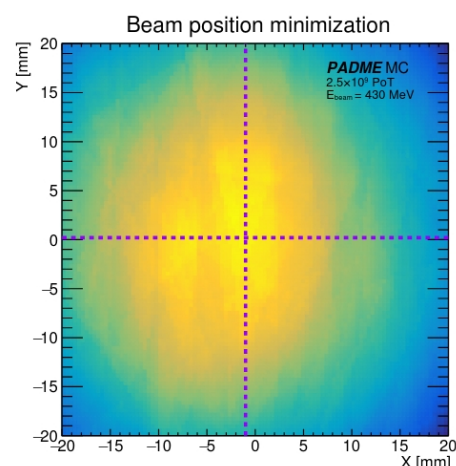
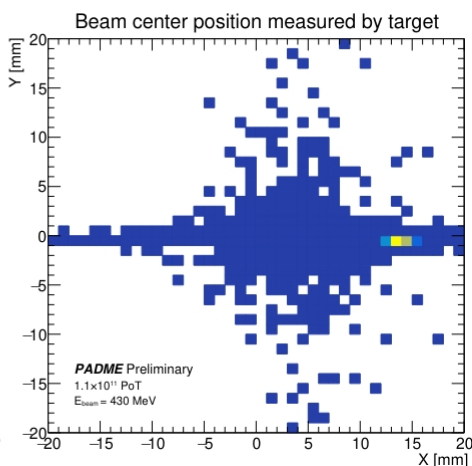
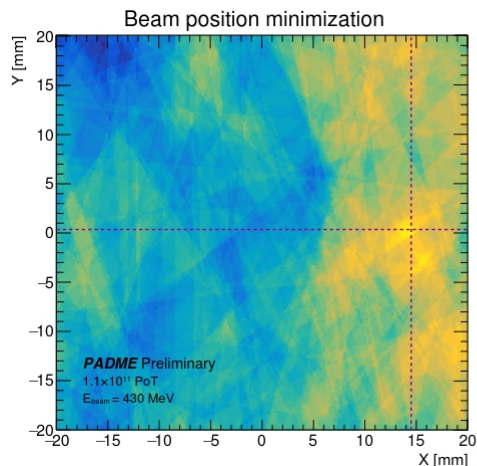
$$\Sigma \theta^{CM} = \theta_1^{CM} + \theta_2^{CM} = \pi$$



Определяне координатите на снопа в мишената чрез $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$ събития



- Записват се енергиите и координатите в калориметъра на всички двойки клъстери с $\Delta t < 2$ ns
- Обхождат се възможните координати на снопа в мишената и **за всяка двойка (x,y) се прави оценка колко двойки преминават селекцията успешно** (координатите на снопа в мишената се използват за пресмятане на полярния ъгъл на фотона)
 - 1 етап: ръчна процедура
 - 2 етап: Minuit минимизация
- Процедурата е приложена върху реални данни и върху симулация и дава добро съгласие с измерените координати от мишената



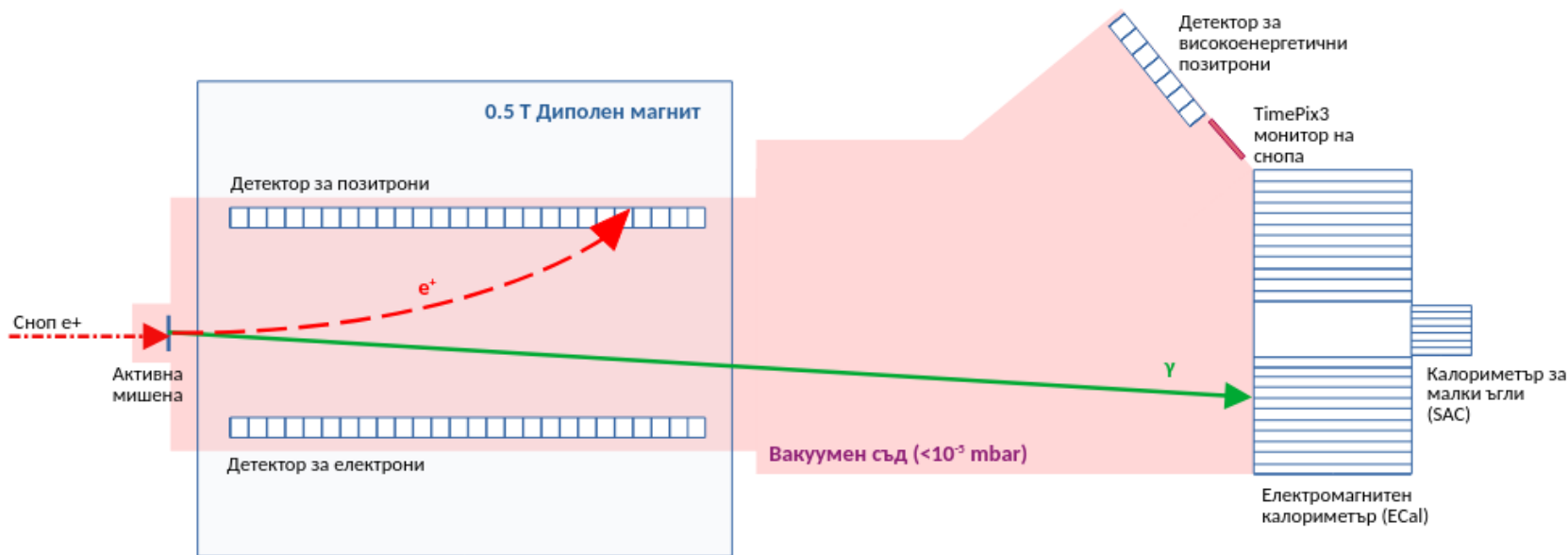
Изследване на спирано лъчение



Търсене на съвпадения между фотони, попаднали в калориметрите, и позитрони, регистрирани в детекторите за заредени частици

- PVeto + SAC
 - HEPVeto + SAC
- Не се използват при селекция на еднофотонни събития

- **PVeto + ECal**
- **HEPVeto + ECal**



Изследване на спирачното лъчение: PVeto + ECal



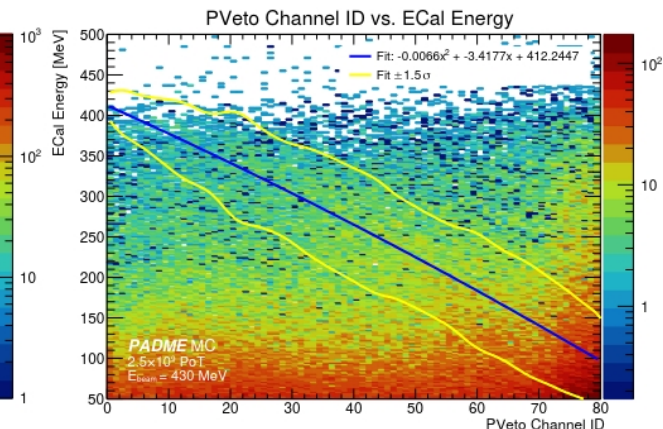
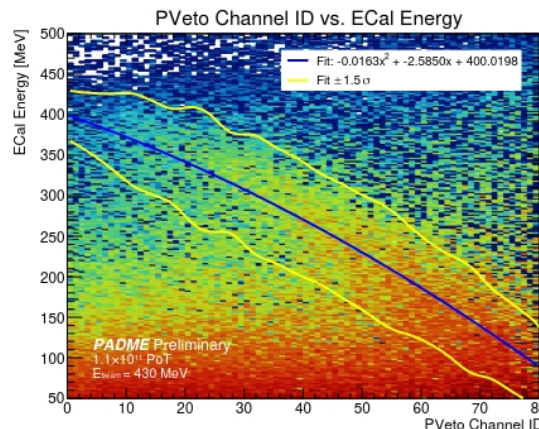
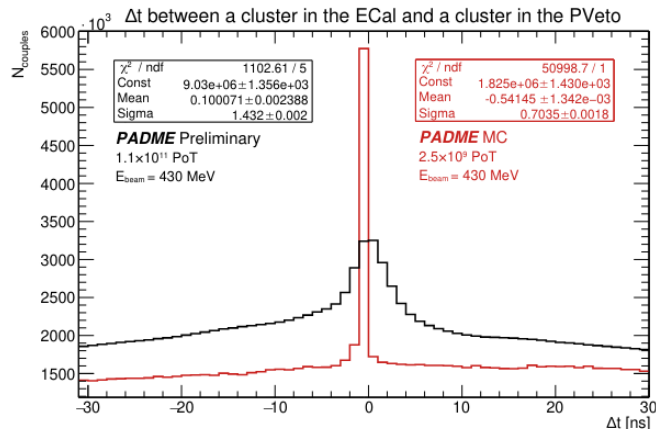
Критерий за съвпадение, получен от разпределението на разликите във времената на всички двойки:

$$\Delta t = |t_{\text{ECal}} - t_{\text{PVeto}}| < 2 \text{ ns}$$

При спирачно лъчение $E_{\gamma}^{\text{Brem}} = f(z_{e^+}^2)$

Получени са разпределенията за съвпадащите двойки в реланите и симулираните данни и са дефинирани ивици от събития на спирачно лъчение

$$E_{\text{ECal}} = (-0.01629 \pm 0.00129) \text{ChID}^2 + (-2.5850 \pm 0.1106) \text{ChID} + (400.02 \pm 2.07)$$



Изследване на спирачното лъчение: HEPVeto + ECal



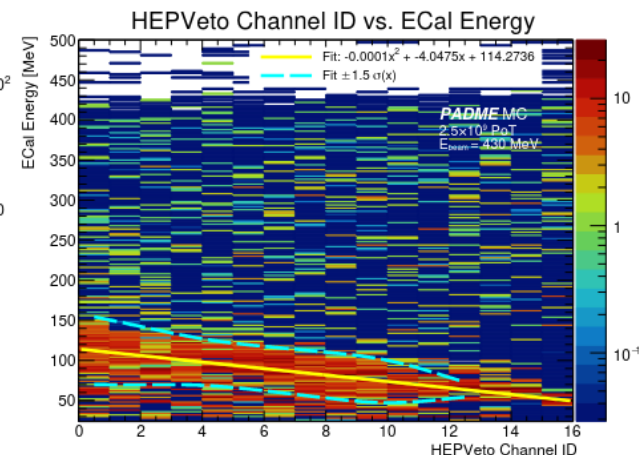
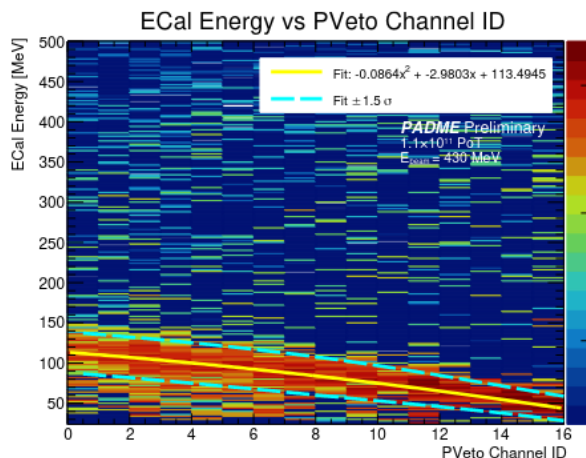
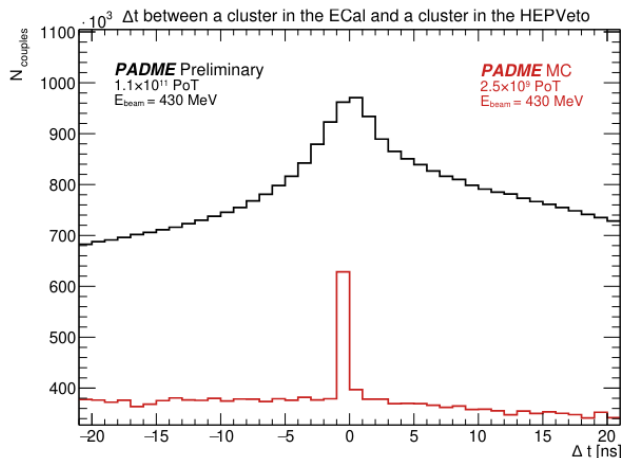
Аналогична процедура

Критерий за съвпадение, получен от разпределението на разликите във времената на всички двойки:

$$\Delta t = |t_{\text{ECal}} - t_{\text{PVeto}}| < 2 \text{ ns}$$

Получени са разпределенията за съвпадащите двойки в реланите и симулираните данни и са дефинирани ивици от събития на спирачно лъчение

$$E_{\text{ECal}} = (-0.08641 \pm 0.05413) \text{ChID}^2 + (-2.9803 \pm 0.6103) \text{ChID} + (113.495 \pm 2.307)$$



Изследване на спирачното лъчение в пасивния материал на експеримента

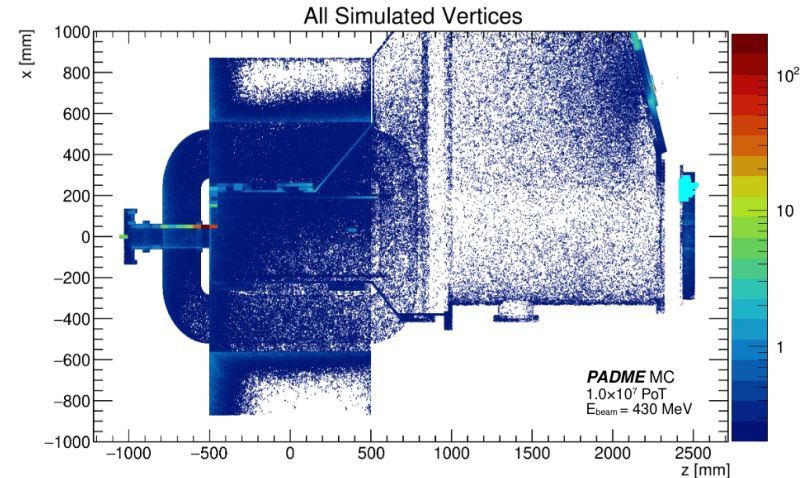
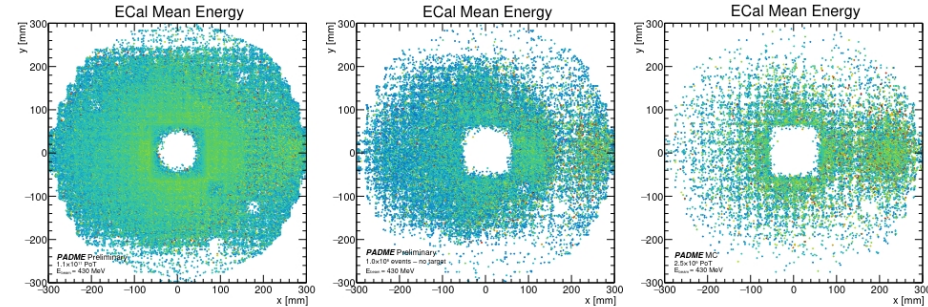


Разпределение на средната депозирана енергия в ECal според позицията → откроява се област във външната част на калориметъра, в която се натрупва голямо количество енергия

Ефектът е видим при реални данни, реални данни без мишена и симуирани данни

Целенасочена Монте Карло симулация с 1 e^+ и селекция на събития, попадащи в тази област

- Почти изцяло спирачно лъчение
- Локация: ръба на вакуумната камера
- Вето единствено чрез съвпадение по време



Анализ на данните от Run II



При наличие на сигнал: определяне на сечението

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A') = \frac{N_{A'}}{N_{POT} Acc_{(A'\gamma)} N_{e/S}} \quad \epsilon^2 = \frac{1}{\delta} \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma)}$$

$N_{A'}$ – брой отчетени събития с раждане на Тъмен фотон

N_{POT} – брой позитрони в мишената

$Acc_{(A'\gamma)}$ – ефективност за регистрацията на A' събития

$N_{e/S}$ – брой e^- / единица площ в мишената = 0.0106 b^{-1}

При отсъствие на сигнал, поставяне на горна граница за константата на смесване ϵ^2

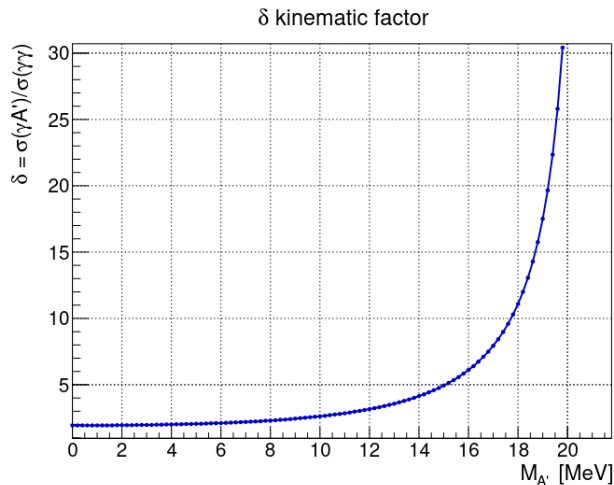
$$\epsilon^2 > \frac{\sqrt{N_{bkg}}}{\delta \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma) N_{POT} Acc_{sig} N_{e/S}}$$

Понастоящем се използва резултатът от PADME Run II

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma} = (1.977 \pm 0.018_{\text{stat.}} \pm 0.119_{\text{syst.}}) \text{ mb}$$

δ - кинематичен фактор, пресметнат чрез CalcHEP симулация на A' събития при $\epsilon^2=1$

$$\delta = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')|_{\epsilon=1}}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma)}$$



Монте Карло изследване на формата на сигнала



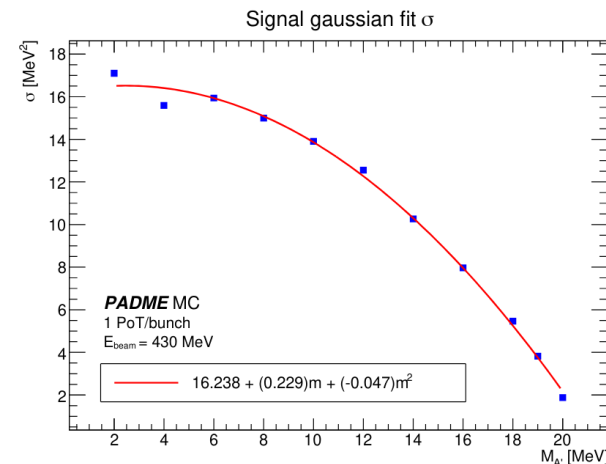
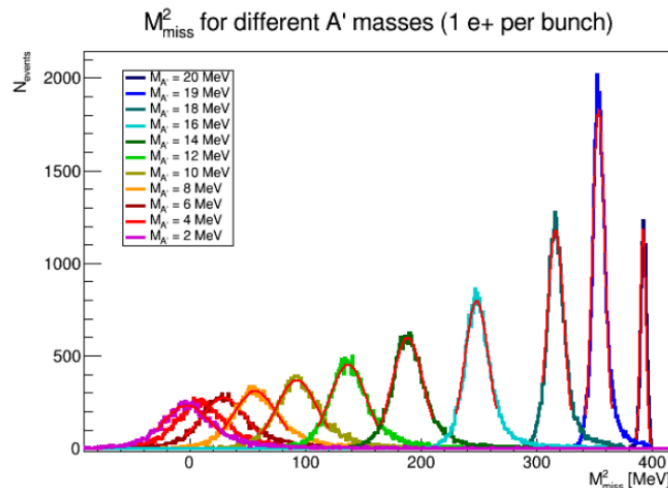
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A') = \frac{N_{A'}}{N_{POT} Acc_{(A'\gamma)} N_{e/s}} \quad N_{A'}/\sqrt{N_{bkg}} = 1. \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\int \frac{\mu(M_{A'}^2) + n\sigma(M_{A'}^2)}{\int \mu(M_{A'}^2) - n\sigma(M_{A'}^2)} \frac{dN}{dM^2} dM^2}{N_{POT} \cdot Acc_{\gamma A'}^{MC}(M_{A'}^2, n\sigma) \cdot N_{e^-/s}}$$

Определяне на $\mu(M_{A'}^2)$ и $\sigma(M_{A'}^2)$ за дефиниране прозореца на интегриране

Разпределенията на липсващата маса в Монте Карло симулация (1-10⁴ POT, 1A', 10⁶ MC events) за 11 различни маси на A' са описани с Гаусово разпределение

→ μ (средната стойност на разпределението в термини на $M_{A'}^2$) се интерполира за 200 стойности на масата, за които ще се пресмята горната граница

→ $\sigma(M_{A'}^2)$ е описано с квадратична функция



Изследване на ефективността за регистрация

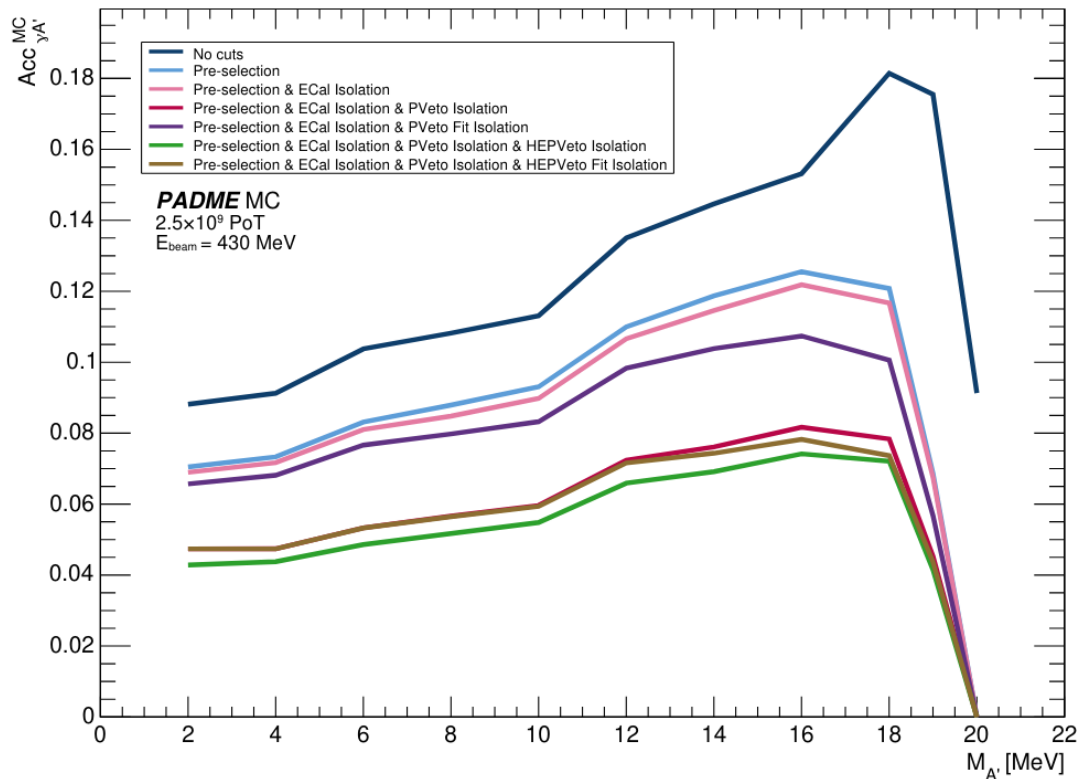


$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\sqrt{\int_{\mu(M_{A'}^2) - n\sigma(M_{A'}^2)}^{\mu(M_{A'}^2) + n\sigma(M_{A'}^2)} \frac{dN}{dM^2} dM^2}}{N_{\text{POT}} \cdot \text{Acc}_{\gamma A'}^{MC}(M_{A'}^2, n\sigma)} \cdot N_{e^-/s}$$

Изследвани са разпределенията на липсващата маса в симулирана извадка (25000 POT, 1A', 10⁶ MC events) при 11-те различни маси на A' :

- 7 различни варианта на селекция
- Определяне броя оцелели A' събития и построяване на 11 точки
- Интерполация за 200-те тествани стойности

Acceptance for $\gamma A'$ events

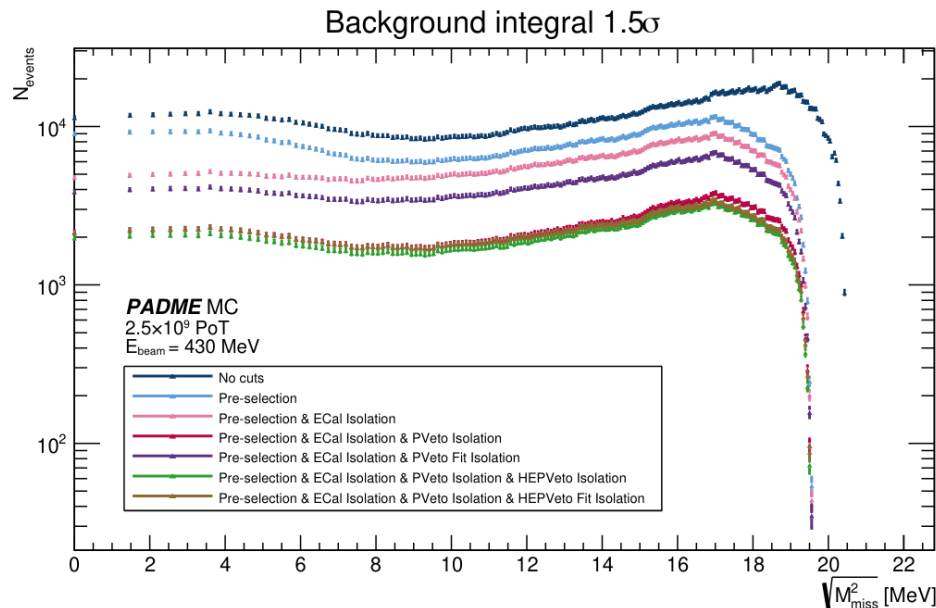


Интегриране на фона

- Прозорецът на интегриране се определя от σ и μ на симулираните разпределения на сигнала за съответната маса
- 7 варианта на селекция:
 - Без ограничения
 - Pre-selection
 - Pre-selection & ECal Isolation
 - Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Isolation
 - Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Fit Isolation
 - Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Isolation & HEPVeto Isolation
 - Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Isolation & HEPVeto Fit Isolation

По-голямото потискане на фона води и до ограничаването на потенциален сигнал!

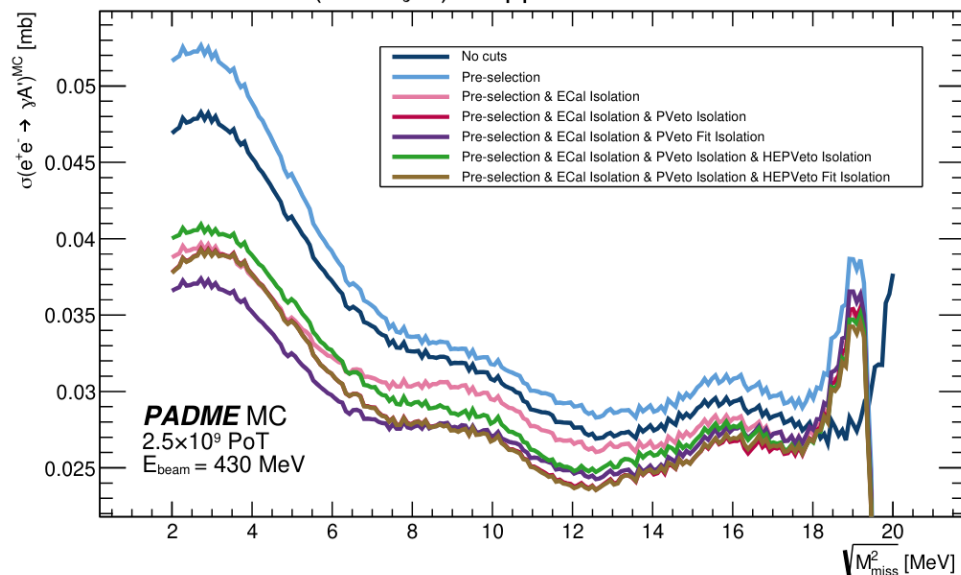
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\int_{\mu(M_{A'}) - n\sigma(M_{A'})}^{\mu(M_{A'}) + n\sigma(M_{A'})} \frac{dN}{dM^2} dM^2}{N_{\text{POT}} \cdot \text{Acc}_{\gamma A'}^{MC}(M_{A'}, n\sigma) \cdot N_{e^-/s}}$$



Горна граница на сечението за раждане на A'

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\sqrt{\int_{\mu(M_{A'}^2) - n\sigma(M_{A'}^2)}^{\mu(M_{A'}^2) + n\sigma(M_{A'}^2)} \frac{dN}{dM^2} dM^2}}{N_{\text{POT}} \cdot \text{Acc}_{\gamma A'}^{MC}(M_{A'}^2, n\sigma) \cdot N_{e^-/s}}$$

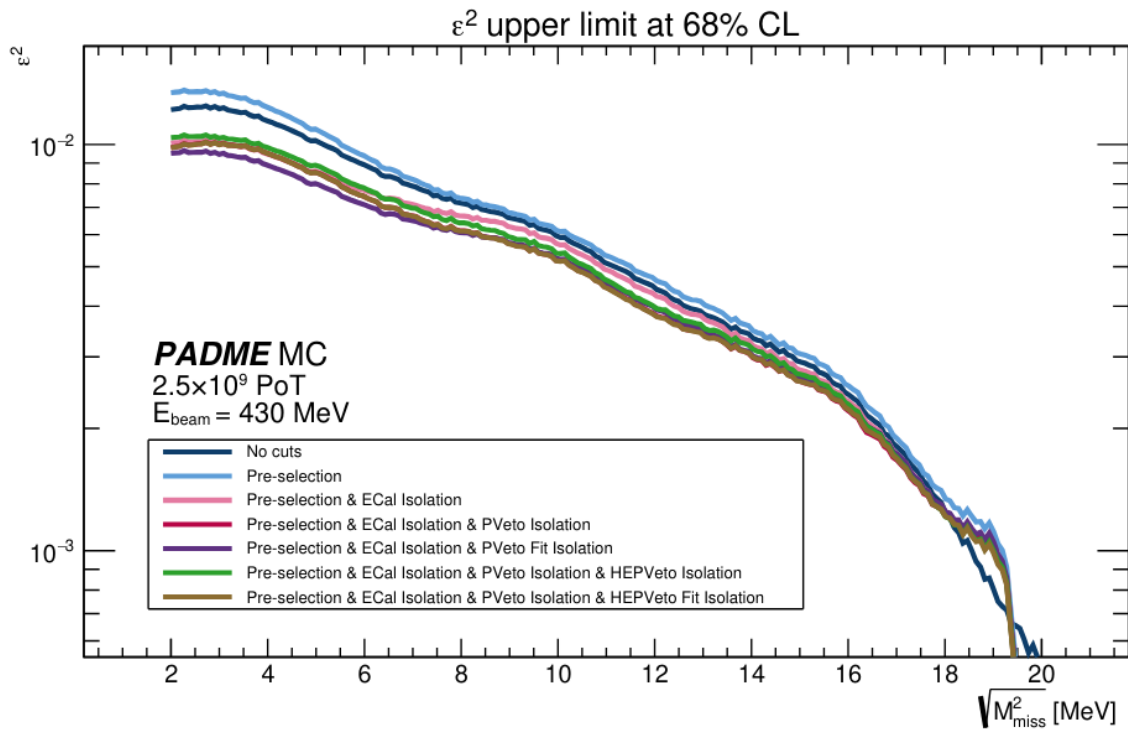
$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC}$ upper limit at 68% CL



Изследване върху симулация без раждане на A'

- Първоначално приемаме $\text{sig} = \sqrt{\text{bkg}}$ за гранично условие за наблюдение на A'
- 200 тествани стойности на масата между 0 и 20 MeV
- За всяка стойност прозорецът на интегриране е 1.5σ около максимума, спрямо разпределенията, получени при симулиране на сигнал
- Асс определена чрез MC изследвания
- 7 изследвани варианта на селекция

Определяне горната граница на ϵ^2



$$\epsilon^2 = \frac{1}{\delta} \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma)}$$

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma} = (1.977 \pm 0.018_{\text{stat.}} \pm 0.119_{\text{syst.}}) \text{ mb}$$

За сечението за $\gamma\gamma$ аниhilация е ползвано

δ пресметнат чрез CalcHeP симулацията

Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Isolation дава най-добър резултат

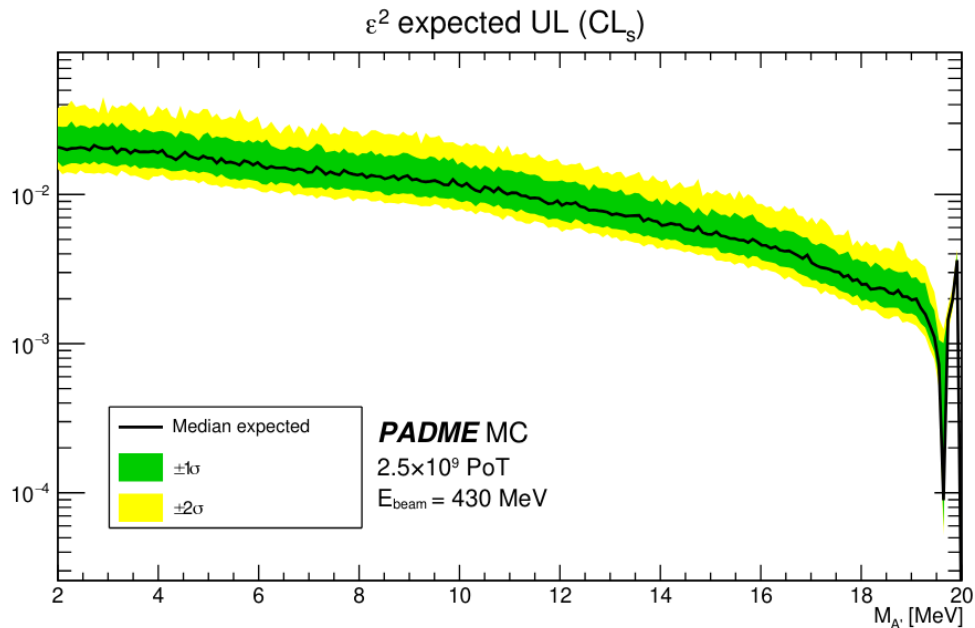
ϵ^2 варира от 10^{-2} за малките маси $M_{A'} \sim 2$ MeV до 10^{-3} за $M_{A'} \sim 18$ MeV

Определяне на горната граница за ϵ^2 по CL_s метода



Използвано разпределение на M_{miss}^2 : Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Isolation; 1.5σ прозорец на интегриране

- 1) Разпределението на M_{miss}^2 е разделено на 200 точки между 2 и 20 MeV
- 2) За всяка точка се генерират 200 псевдо-експеримента, като N_{POT} , Асс, σ и N_{bkg} са варирани спрямо неопределеностите им
- 3) За всеки псевдо-експеримент се тестват 25 различни хипотези s+b
- 4) Достига се граничната стойност на s, за която $CL_s = 0.1$, съответно с 90% сигурност отсъства сигнал
- 5) Пресмята се ϵ^2 с тази стойност

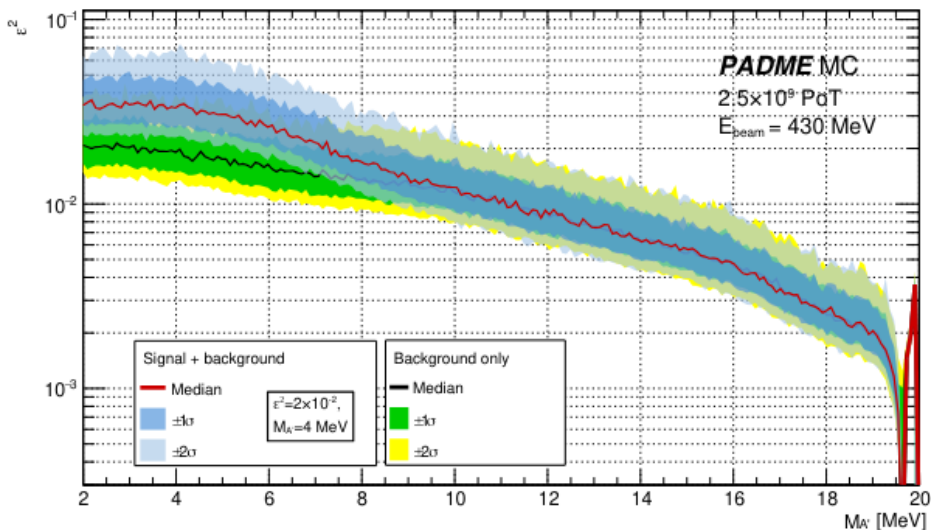


Тест на метода чрез инжектиране на сигнал

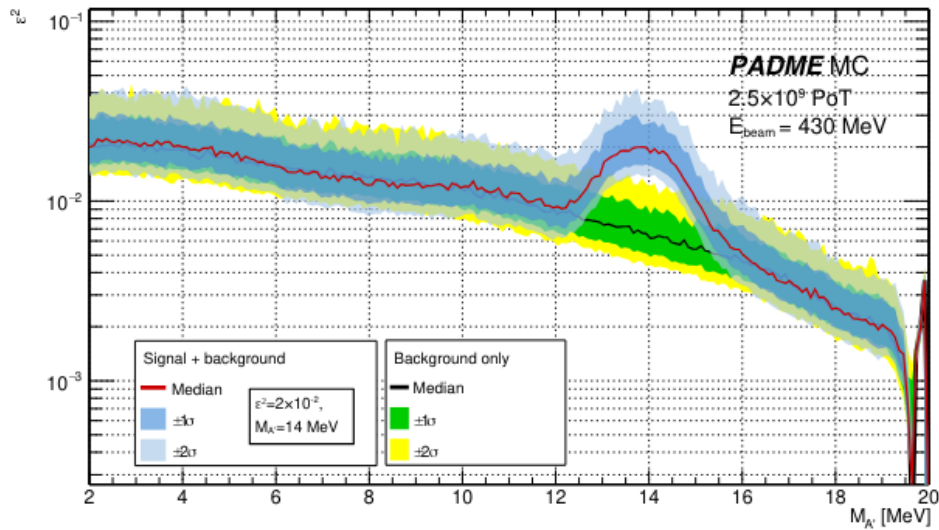
Добавени A' събития при маса на A' 4 и 14 MeV, $\epsilon^2=2 \times 10^{-2}$

- Границата се отмества нагоре и тестваната стойност на ϵ остава под нея, съответно не може да бъде изключена

ϵ^2 expected UL (CL_s)



ϵ^2 expected UL (CL_s)

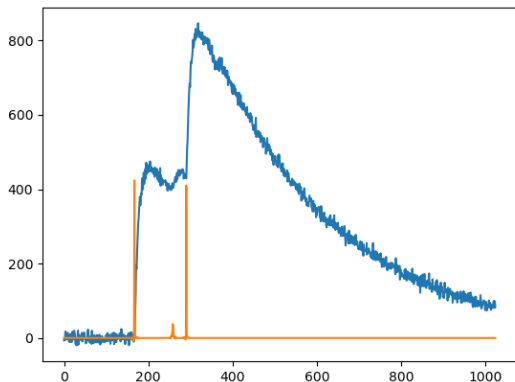
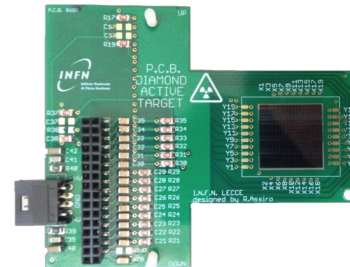


Заклучение



Реконструкция на данните от мишената на PADME при ниски интензивности на снопа:

- ✓ Разработен е нов метод чрез усредняване на множество вълнови форми – сигналът е изгладен и шумът е потиснат → **очаква се подобрене в определянето на параметрите на снопа при анализа на Run IV**
- ✓ Определени са работните параметри на детектора за Run IV



Реконструкция на сигналите в електромагнитния калориметър чрез машинно обучени методи:

- ✓ Разработен е нов метод на машинно обучение за определяне времето на настъпване и амплитудата на сигналит; изследван е чрез методи за обяснение на изкуствения интелект (AI)
- ✓ Обучените модели са успешно въведени в софтуера на експеримента и са използвани за реконструкция на $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ събития
- ✓ **Постигната е разделителна способност по време < 1 ns – от голяма важност при анализа на Run II**

Заклучение



Изследвани са основните фонове процеси в Run II на експеримента PADME:

- ✓ $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$ събитията са използвани за разработването на **метод за определяне позицията на снопа в мишената**
- ✓ Спирачното лъчение е изследвано чрез комбинации от сработвания на различни детектори и е **разработена процедура за ограничаването му**
- ✓ Обяснен е произходът на фотоните, попадащи в особена област на калориметъра с по-висока средна енергия

Определена е очакваната горна граница за константата на смесване ϵ на Тъмния фотон с видимия в симулирана извадка от данни

- ✓ Описана е методология за анализ, основан на липсващата маса на единични фотони, регистрирани в калориметъра
- ✓ Изследвани са различни варианти за селекция
- ✓ **Разработена е процедура за определяне очакваната горна граница за ϵ чрез CLs метода**

Очакваната горна граница при отсъствие на наблюдаван сигнал е определена чрез прилагане на CLs метода за статистическо третиране на данните върху симулиран набор от събития, съдържащ 2.5×10^9 позитрона, като получената стойност за константата на смесване е $\epsilon^2 < 2 \times 10^{-2}$ за $M_{A'} \approx 2 \text{ MeV}$ и достига $\epsilon^2 < 2 \times 10^{-3}$ за $M_{A'} \approx 18 \text{ MeV}$.



1. Using Artificial Intelligence in the Reconstruction of Signals from the PADME Electromagnetic Calorimeter, K. Dimitrova et al. 2022 Instruments 6, 46 **(Q2)**
2. Machine learning assisted reconstruction of positron-on-target annihilation events in the PADME experiment, K. Dimitrova et al. 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2794 012001 **(Q4)**
3. Pattern recognition and signal parameters extraction using machine learning methods, K. Dimitrova et al 2023 J. Phys.: Conf. Ser. 2668 012001 **(Q4)**
4. Development and explainability of models for machine-learning-based reconstruction of signals in particle detectors, K. Dimitrova, V. Kozhuharov, P. Petkov 2025 Particles 8, 48 **(Q1)**
5. Applicability evaluation of selected xAI methods for machine learning algorithms for signal parameters extraction, K. Dimitrova, V. Kozhuharov, P. Petkov 2025 J. Phys.: Conf. Ser. 3002 012005 **(Q4)**
6. New Light Particles Searches with PADME, K. Dimitrova et al 2025 Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. 18, 4-A3 **(Q4)**
7. Searching for the Dark Photon with PADME, K. Dimitrova et al 2026 PoS COSMICWISPers2025 063 **(Q4)**

Участие в конференции



1. 5th Inter-experiment Machine Learning Workshop, CERN, 9 - 13 May, 2022: Application of artificial intelligence in the reconstruction of signals from the PADME electromagnetic calorimeter **(доклад)**
2. 19th International Conference on Calorimetry in Particle Physics (CALOR2022), Brighton, 16 - 20 May 2022: Using artificial intelligence in the reconstruction of signals from the PADME electromagnetic calorimeter **(доклад)**
3. 3rd National Forum on Contemporary Space Research, Sofia, Bulgaria, 10 – 12 November 2022: Application of machine learning for the identification of signals in time series **(доклад)**
4. 4th National Forum on Contemporary Space Research, Sofia, Bulgaria, 19 – 20 October 2023: Machine learning assisted reconstruction of positron-on-target annihilation events **(доклад)**
5. 2nd Workshop on Soliton Theory, Nonlinear Dynamics and Machine Learning, Varna, Bulgaria, 16 – 21 August 2024: Applicability evaluation of selected xAI methods for machine learning algorithms for signal parameters extraction **(доклад)**
6. Workshop at 1GeV scale: From mesons to axions, Krakow, Poland, 19 – 20 September 2024: New light particle searches with PADME **(доклад)**
7. 4th MODE Workshop on Differentiable Programming for Experiment Design, Valencia, Spain, 23 – 25 September 2024: Development and explainability of models for machine-learning-based signal reconstruction **(постер)**
8. 4-ти Национален конгрес по физически науки, София, България, 07 – 09 октомври 2024 г.: Reconstruction of signals in the PADME Electromagnetic calorimeter using machine learning methods **(доклад)**
9. 5th National Forum on Contemporary Space Research, Sofia, Bulgaria, 22 – 24 October 2024: Cluster Reconstruction in Electromagnetic Calorimeters Using Machine Learning Methods **(постер)**
10. 3rd Training School COST Action COSMIC WISPer (CA21106), Annecy, France, 16 – 19 September 2025: Searching for the Dark Photon with PADME **(доклад)**
11. 39th Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, La Thuile, Italy, 01 - 07 March 2026: Searching for a new light boson with PADME **(доклад)**
12. 80 години катедра Атомна физика, София, България, 16 – 18 април 2026: Searching for new light particles with PADME **(доклад)**

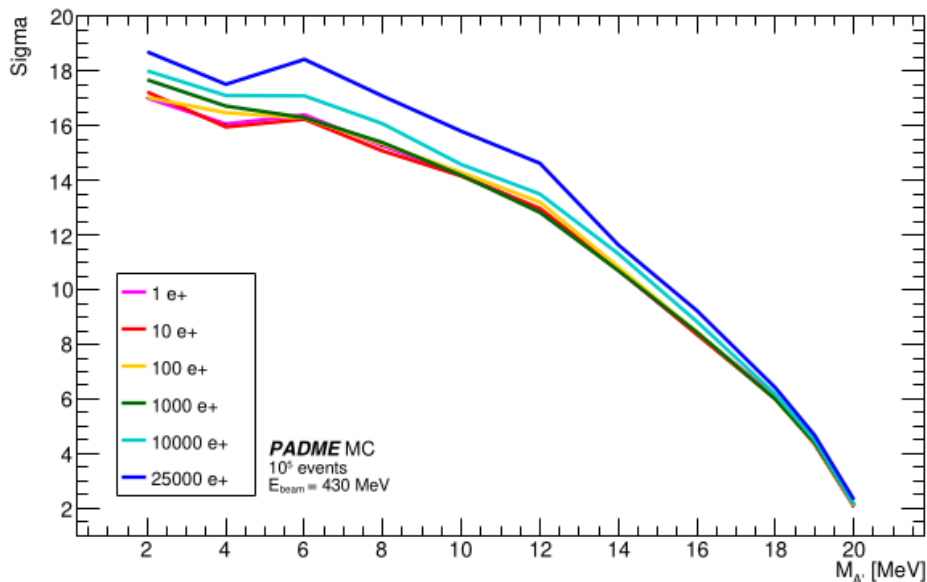
Допълнителни слайдове



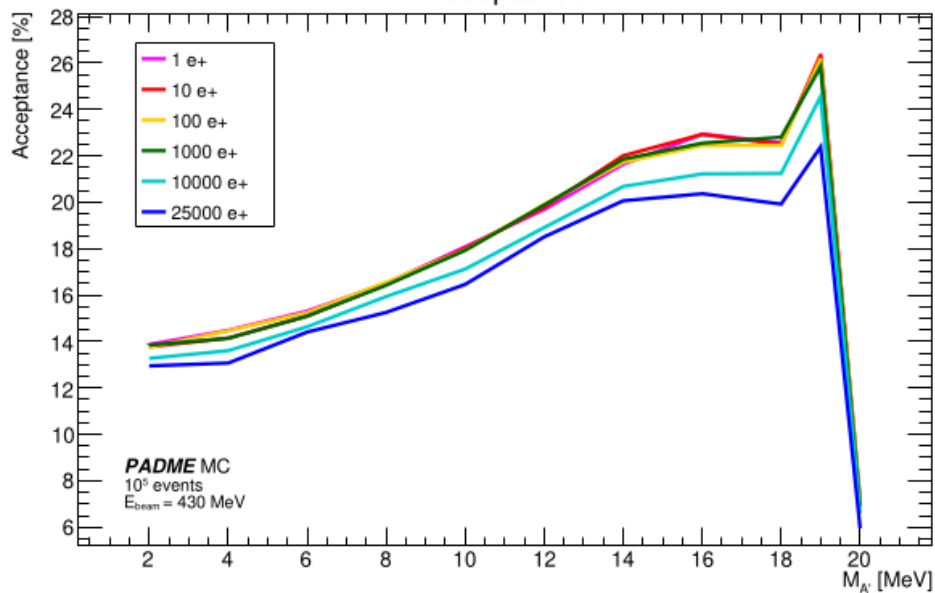
Допълнителни слайдове



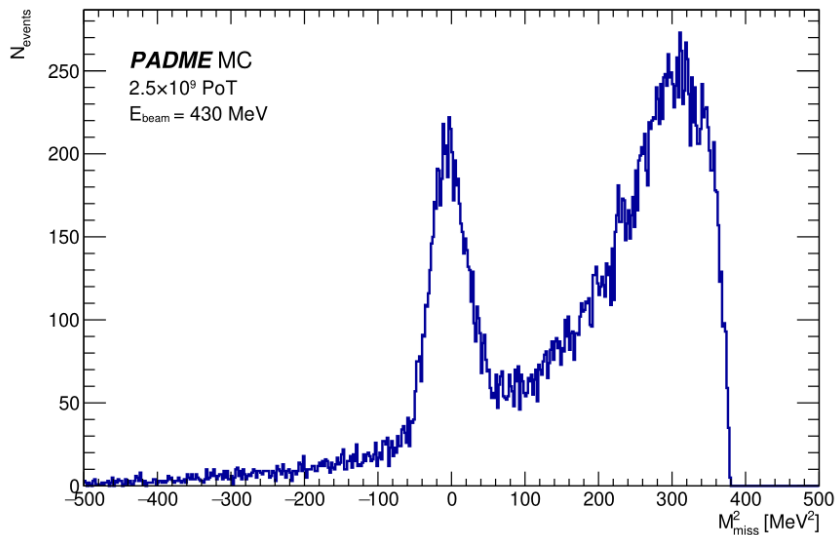
Sigma



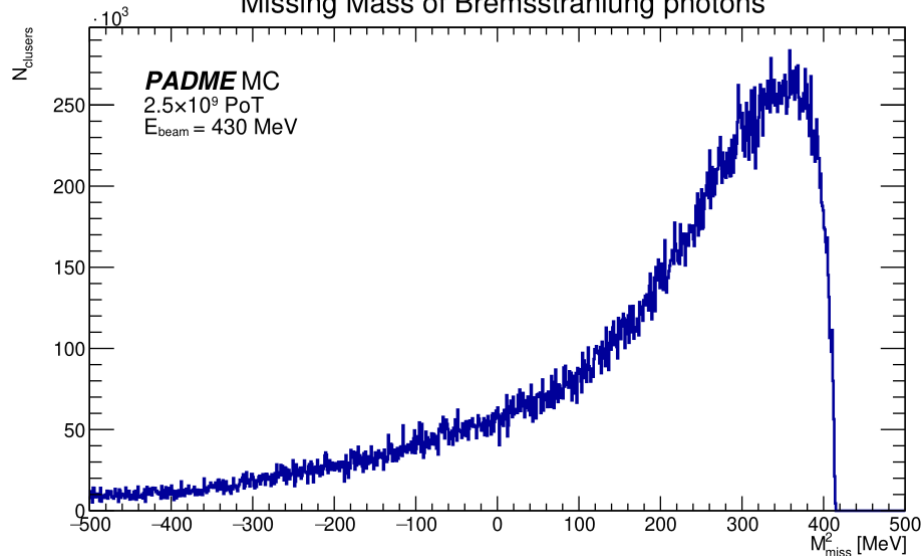
Acceptance



Missing mass for clusters with $\Delta t \leq 2$ ns



Missing Mass of Bremsstrahlung photons



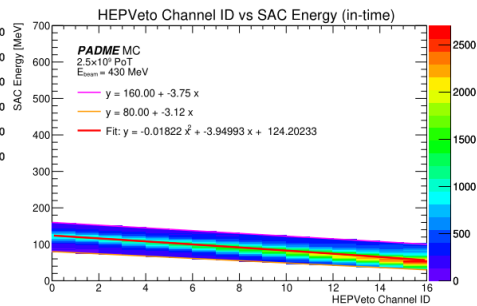
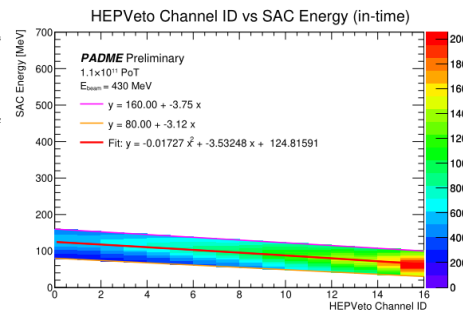
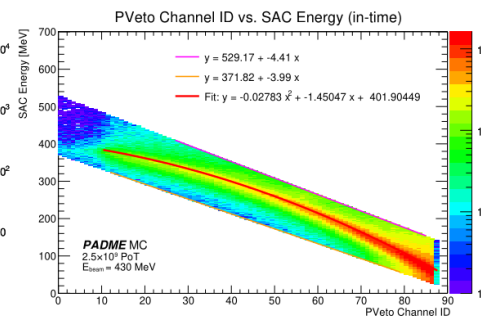
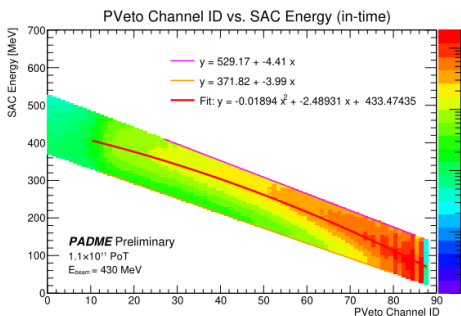
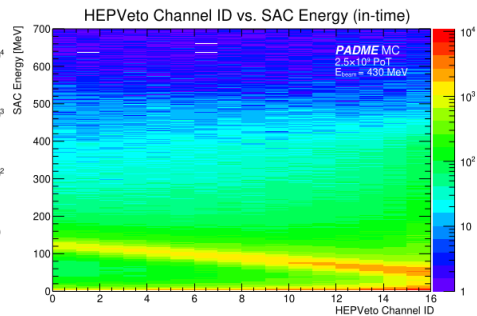
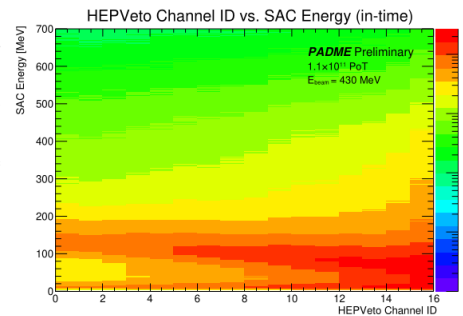
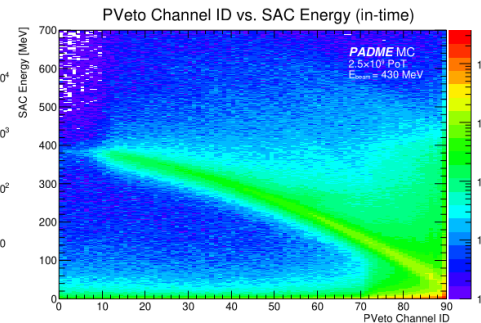
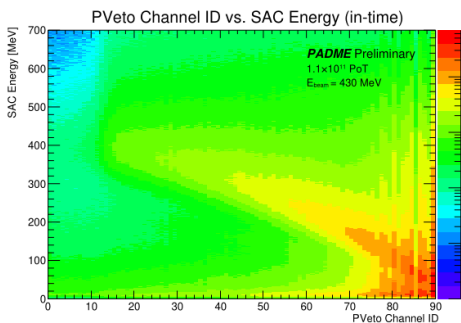


$$\mathcal{L}_{\text{like}} = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\theta}} \exp\left(-\frac{\delta\theta_i^2}{2\sigma_{\theta}^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\phi}} \exp\left(-\frac{\delta\phi_i^2}{2\sigma_{\phi}^2}\right)$$

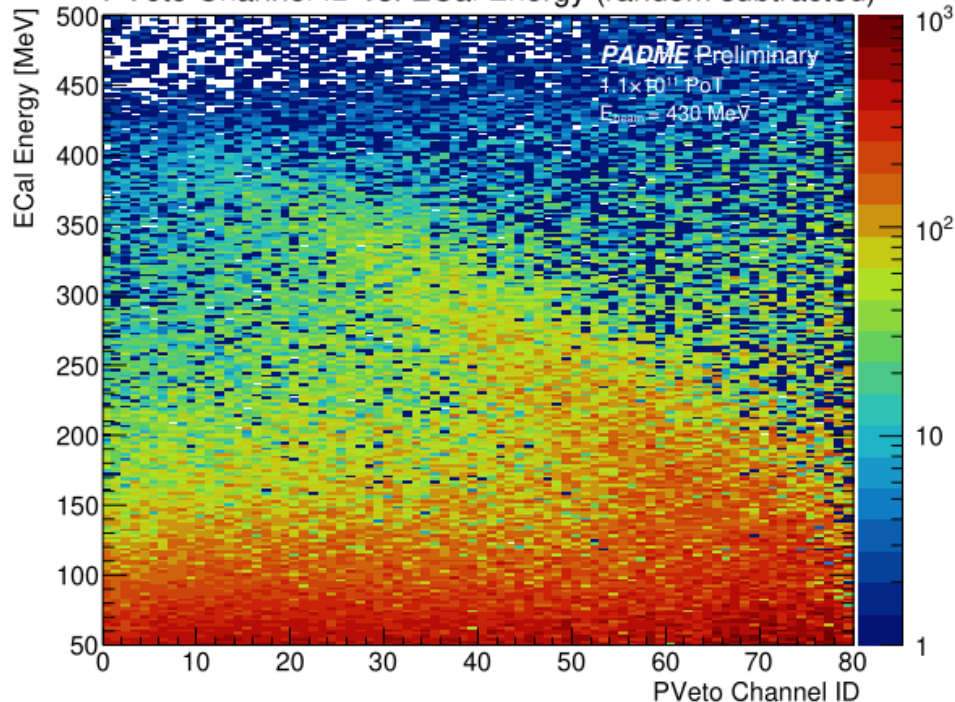
$$-\ln \mathcal{L}_{\text{like}} = \frac{N}{2} \ln(2\pi) + N \ln \sigma_{\theta} + \frac{1}{2\sigma_{\theta}^2} \sum_{i=1}^N \delta\theta_i^2 + \frac{N}{2} \ln(2\pi) + N \ln \sigma_{\phi} + \frac{1}{2\sigma_{\phi}^2} \sum_{i=1}^N \delta\phi_i^2$$

$$\frac{\partial(-\ln \mathcal{L}_{\text{like}})}{\partial \sigma_{\theta}^2} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \hat{\sigma}_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\theta_i^2 \equiv \hat{V}_{\theta}, \quad \text{аналогично} \quad \hat{\sigma}_{\phi}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta\phi_i^2 \equiv \hat{V}_{\phi}$$

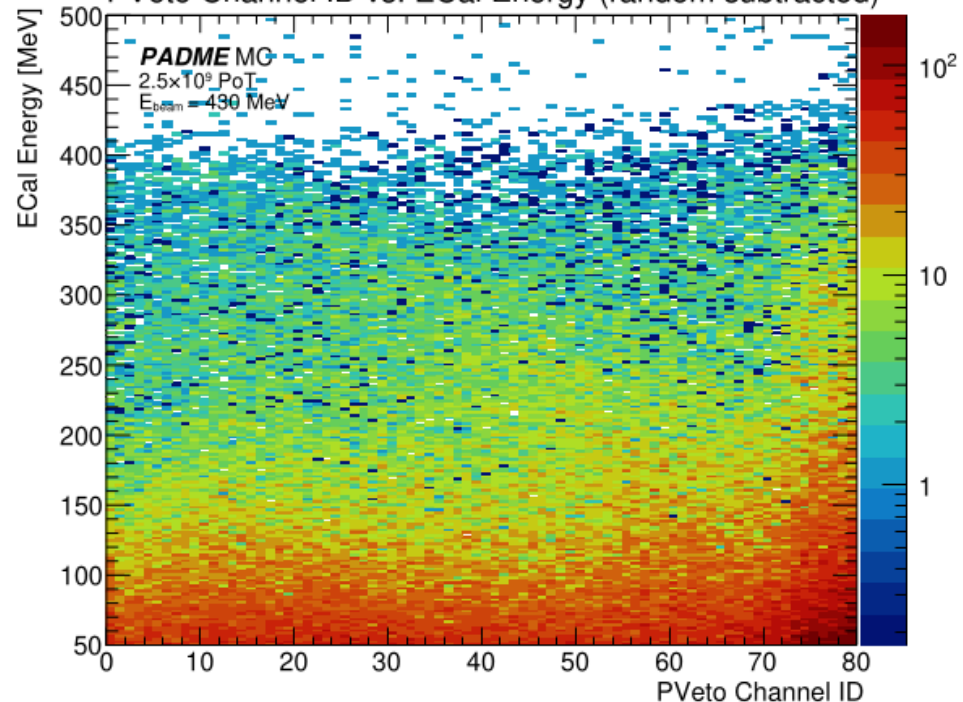
$$\mathcal{F}(x_t, y_t) = \frac{N}{2} \left(2 + \ln \hat{V}_{\theta} + \ln \hat{V}_{\phi} \right)$$



PVeto Channel ID vs. ECal Energy (random subtracted)



PVeto Channel ID vs. ECal Energy (random subtracted)





$$q_{\mu}(n, s, b) = -2 \ln \left(\frac{\mathcal{L}(n | s + b)}{\mathcal{L}(n | \hat{\mu} + b)} \right); \quad \hat{\mu} = \max(0, n - b),$$

$$\mathcal{L}(n | s, b) = \frac{(s + b)^n}{n!} e^{-(s+b)}$$

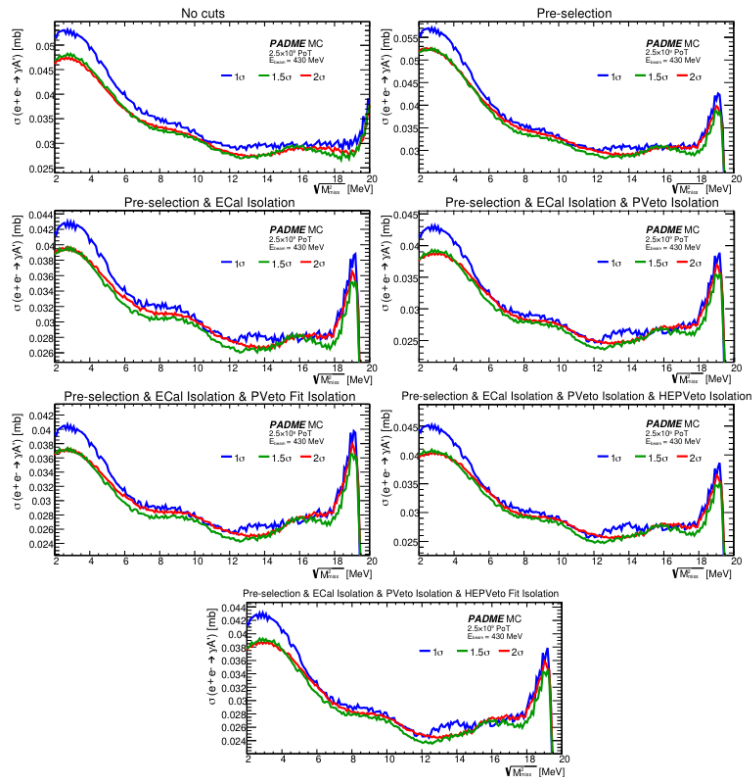
$$q_{\text{obs}} = q_{\mu}(n_{\text{obs}}, s, b)$$

$$q_{\text{sb}} = q_{\mu}(n_{\text{sb}}, s, b); \quad n_{\text{sb}} = \text{Poisson}(s + b)$$

$$q_{\text{b}} = q_{\mu}(n_{\text{b}}, s, b); \quad n_{\text{b}} = \text{Poisson}(b)$$

$$\text{CL}_s = \frac{n_{\text{s+b}}}{n_{\text{b}}}$$

пσ проверка



Поради сложната форма на разпределението на липсващата маса е направена проверка за оптималната стойност на $n\sigma$ за всички селекции: $n=1.5$ (зелено) дава най-добър резултат

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\sqrt{\int_{\mu(M_{A'}^2) - n\sigma(M_{A'}^2)}^{\mu(M_{A'}^2) + n\sigma(M_{A'}^2)} \frac{dN}{dM^2} dM^2}}{N_{\text{POT}} \cdot \text{Acc}_{\gamma A'}^{MC}(M_{A'}^2, n\sigma) \cdot N_{e^-/s}}$$

Няма и универсална селекция, която да даде най-ниска горна граница по целия спектър от изследвани маси.

- До 8 MeV: Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Fit Isolation
- Над 8 MeV: Pre-selection & ECal Isolation & PVeto Isolation
- Включването на HEPVeto на този етап не води до съществено по-ниска горна граница.