

Търсене на нови леки частици при аниhilация на ускорени позитрони

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

Атестационен семинар
25.06.2026 г.

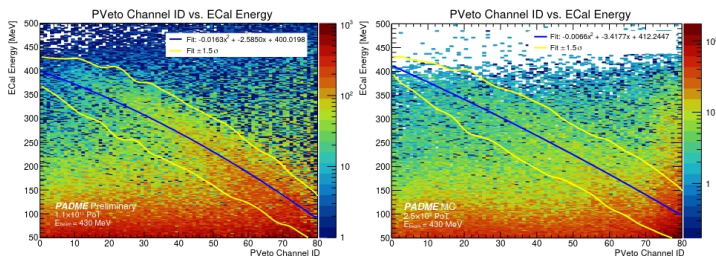
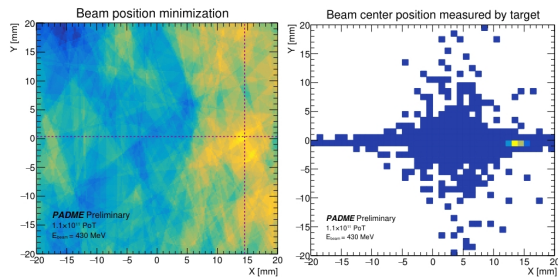


Съдържание

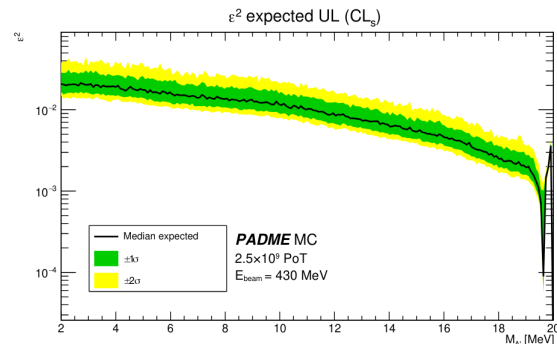
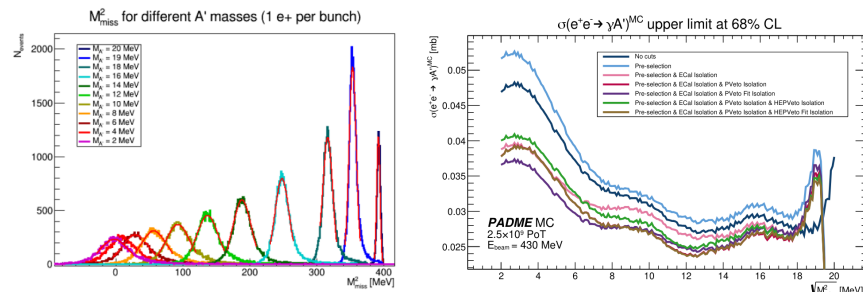


Изследване на фоновите процеси в експеримента:

- Аниhilация до 2 фотона – разработен метод за определяне положението на снопа в мишената
- Спирачно лъчение в мишената и пасивния материал – възможности за потискане



Определяне на очаквана горна граница за константата на смесване на Тъмния фотон с видимия в симуирани данни

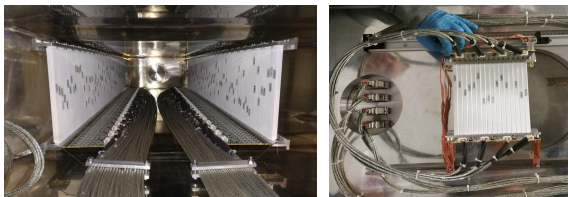


Експериментът PADME



Детектори за заредени частици

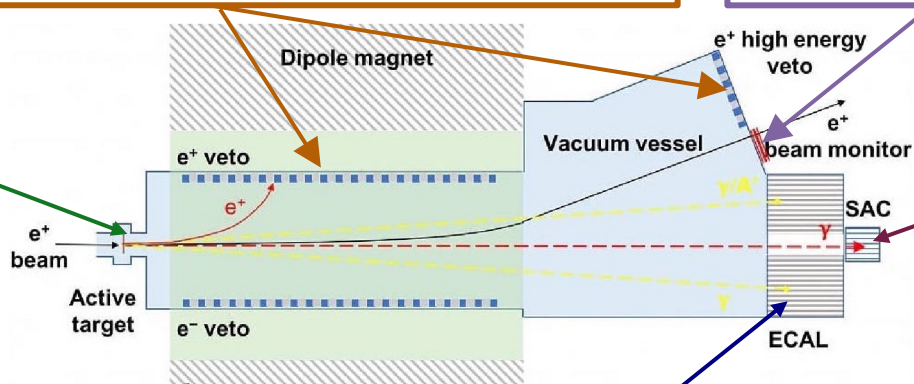
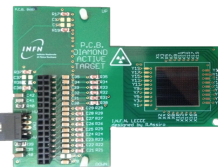
96 + 96 (90) + 16 (x2) канала:
пластмасов сцинтилатор-WLS-SiPM RO
Разделителна способност по импулс до
~5 MeV



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

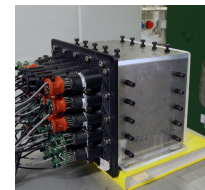
Активна диамантена мишена

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

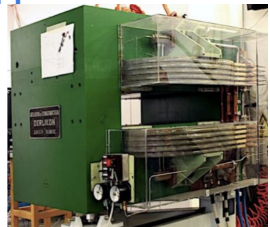


Калориметър за малки ъгли (SAC)

25
кристала
 PbF_2 в 5x5
матрица

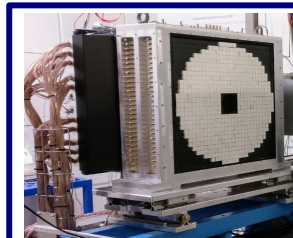


Диполен магнит



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 – $O(300 \text{ ns})$



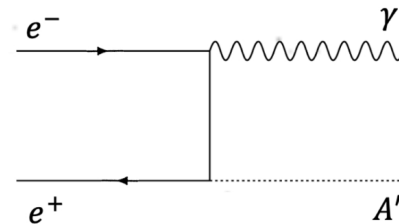
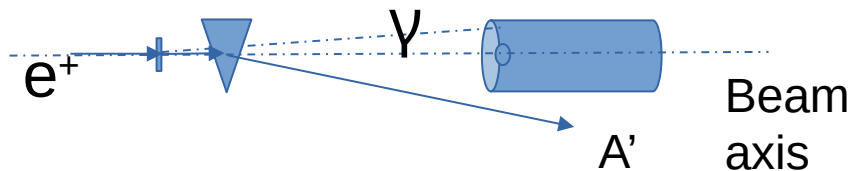
Търсене на Тъмен фотон в PADME Run II



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

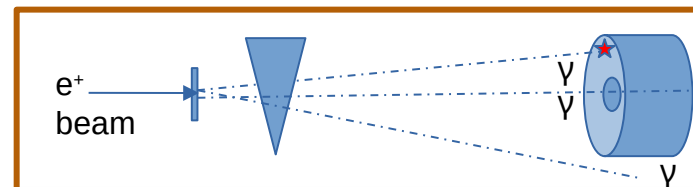
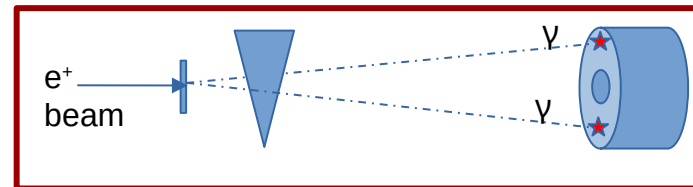
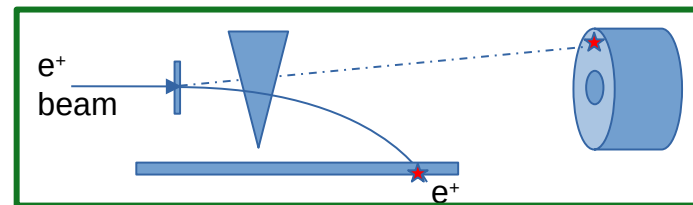
Търсене на събития с единствен регистриран фотон и пресмятане на липсващата маса

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



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}

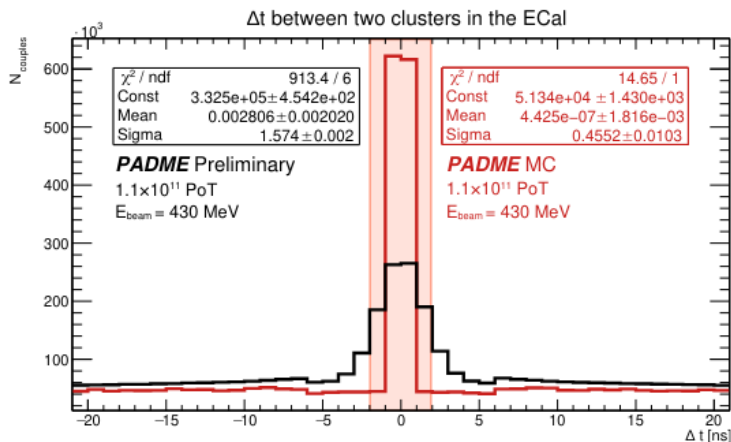


Селекция на $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$ събития



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

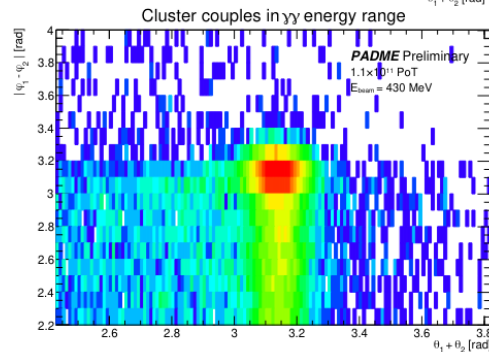
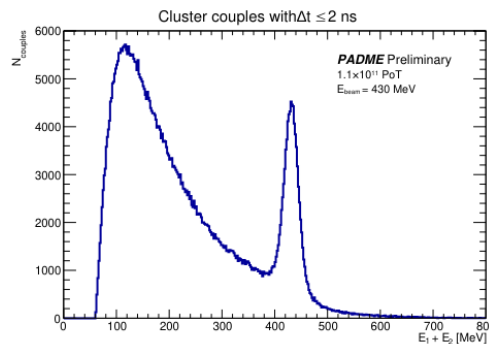
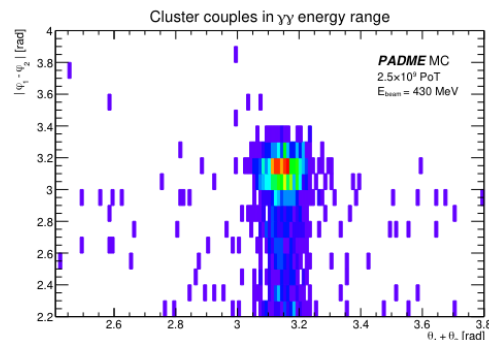
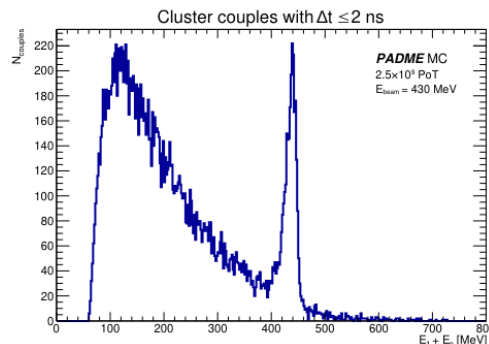


Селекция:

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

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

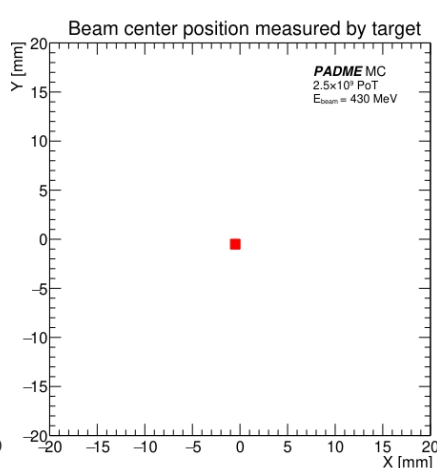
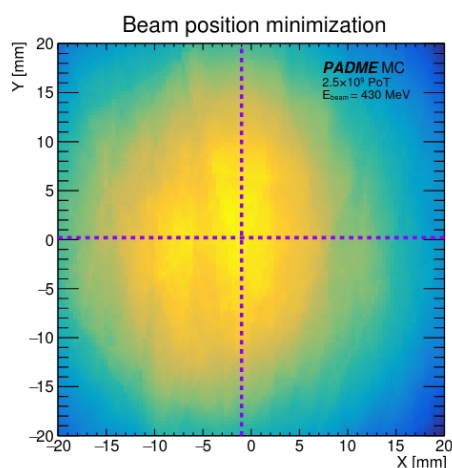
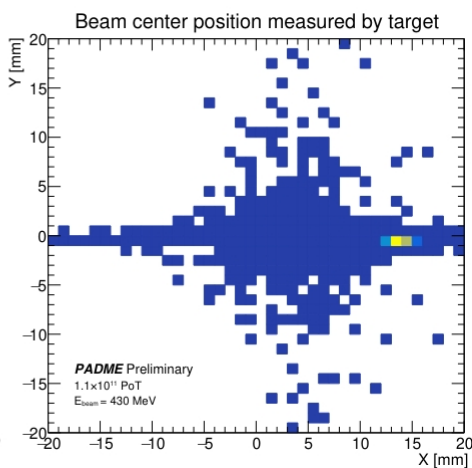
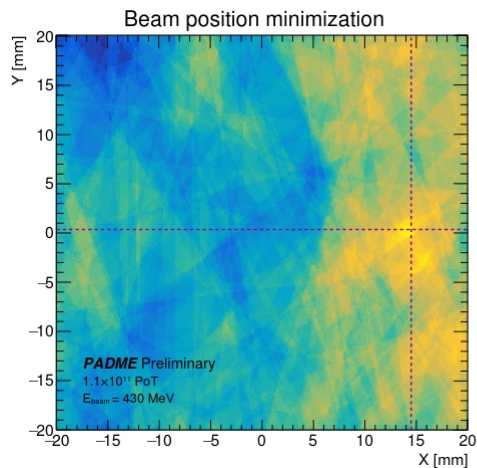
$$\Sigma \theta^{CM} = \theta_1^{CM} + \theta_2^{CM} = \pi$$



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



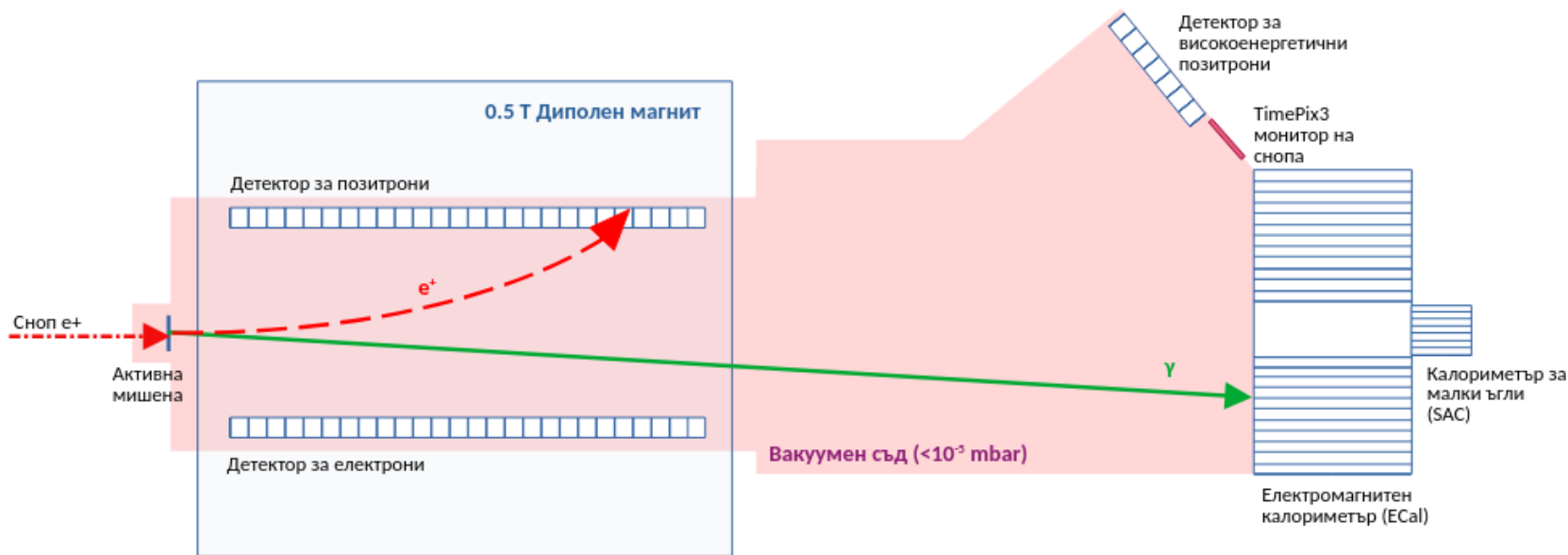
Изследване на спирано лъчение



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



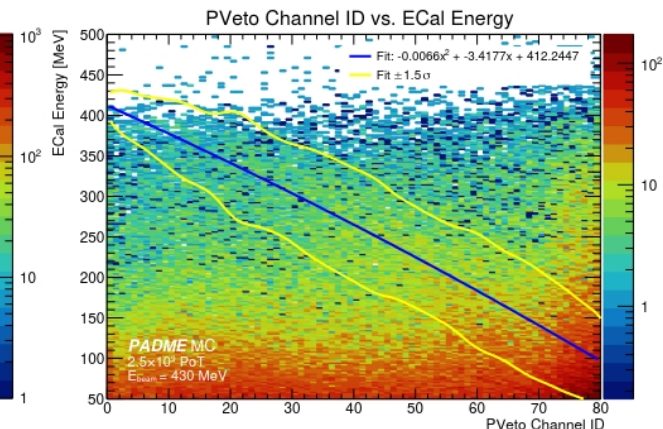
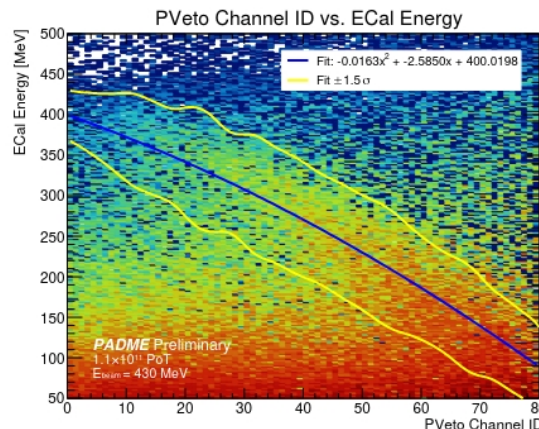
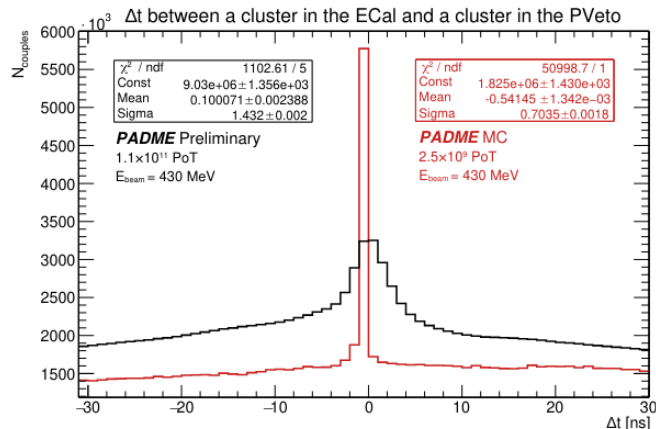
Критерий за съвпадение, получен от разпределението на разликите във времената на всички двойки:

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

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



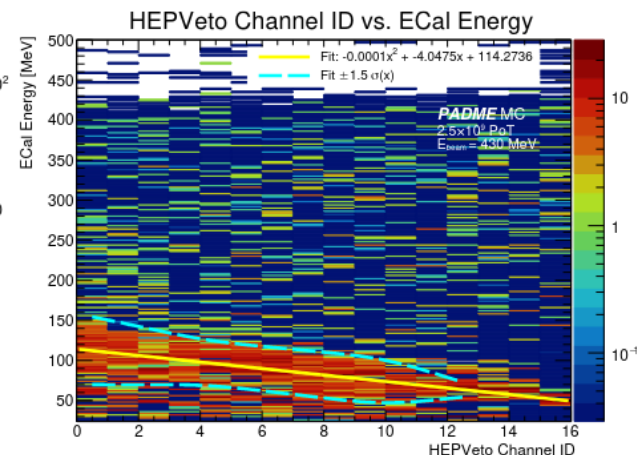
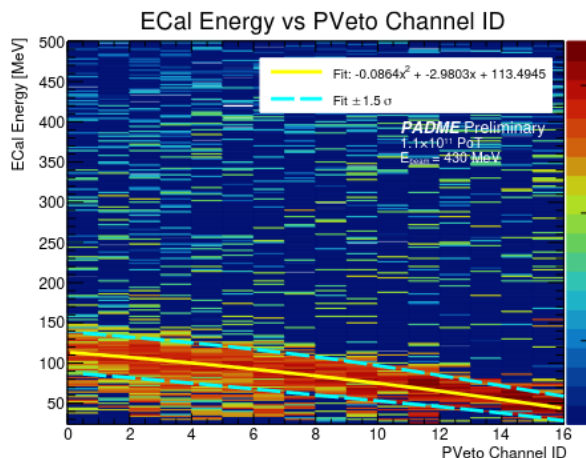
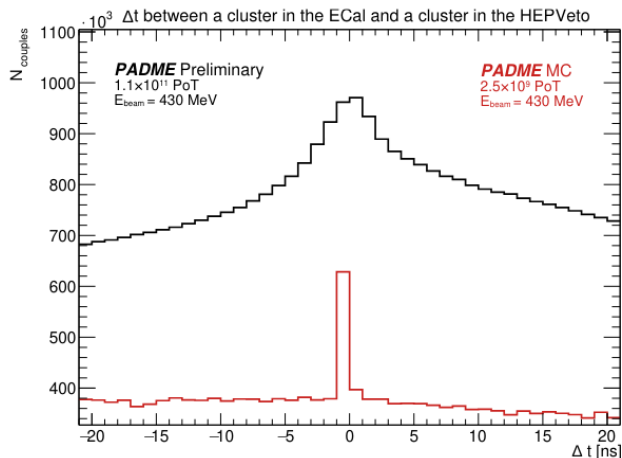
Аналогична процедура

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 спиращото лъчение в пасивния материал на експеримента

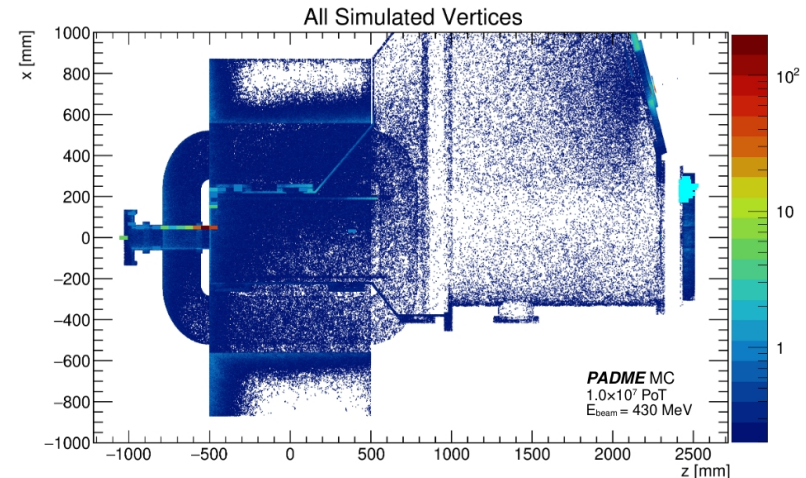
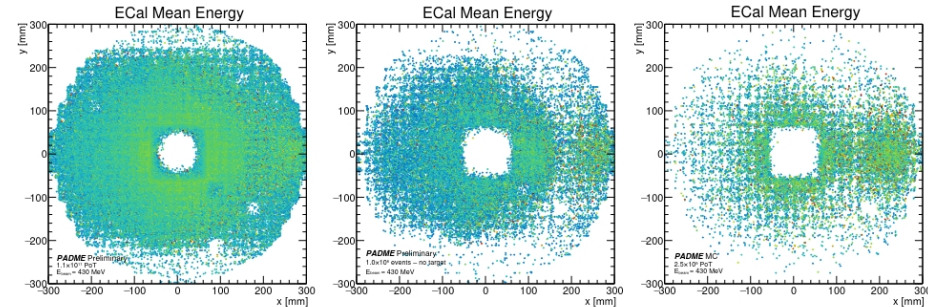


Разпределение на средната депозирана енергия в ECal според позицията → откроява се област във външната част на калориметъра, в която се натрупва голямо количество енергия

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 спиращо 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

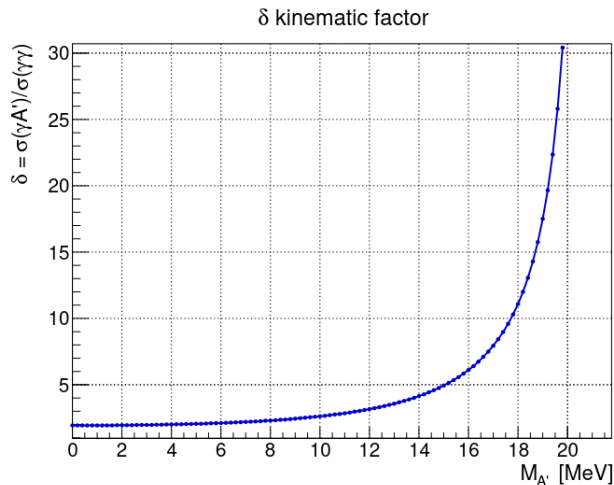
$$\epsilon^2 > \frac{\sqrt{N_{bkg}}}{\delta \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma) N_{POT} Acc_{sig} N_{e/S}}$$

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



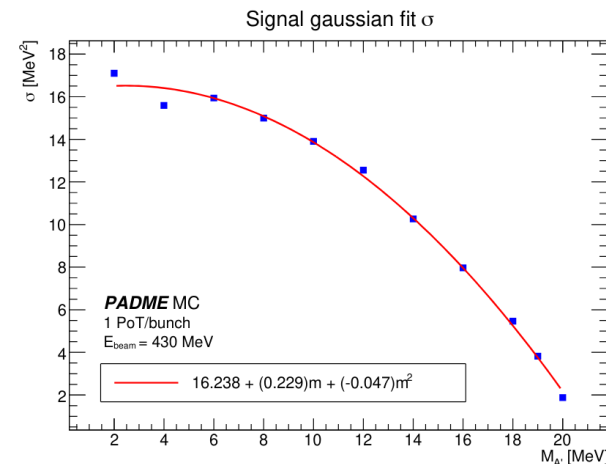
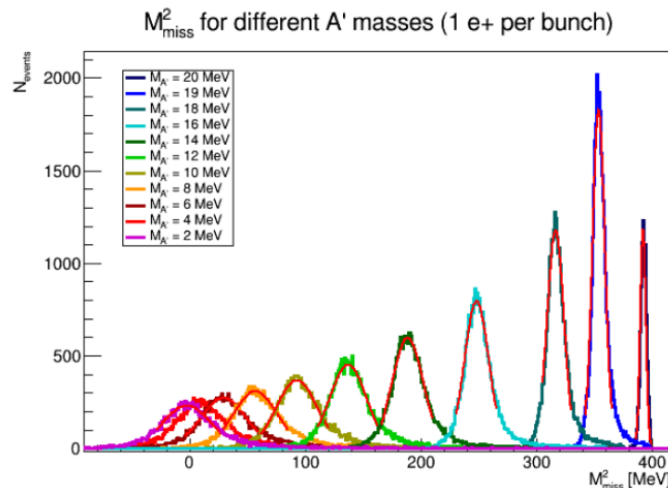
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A') = \frac{N_{A'}}{N_{POT} Acc_{(A'\gamma)} N_{e/s}} \quad N_{A'}/\sqrt{N_{bkg}} = 1. \quad \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\sqrt{\int_{\mu(M_{A'}^2)-n\sigma(M_{A'}^2)}^{\mu(M_{A'}^2)+n\sigma(M_{A'}^2)} \frac{dN}{dM^2} dM^2}}{N_{POT} \cdot Acc_{\gamma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

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

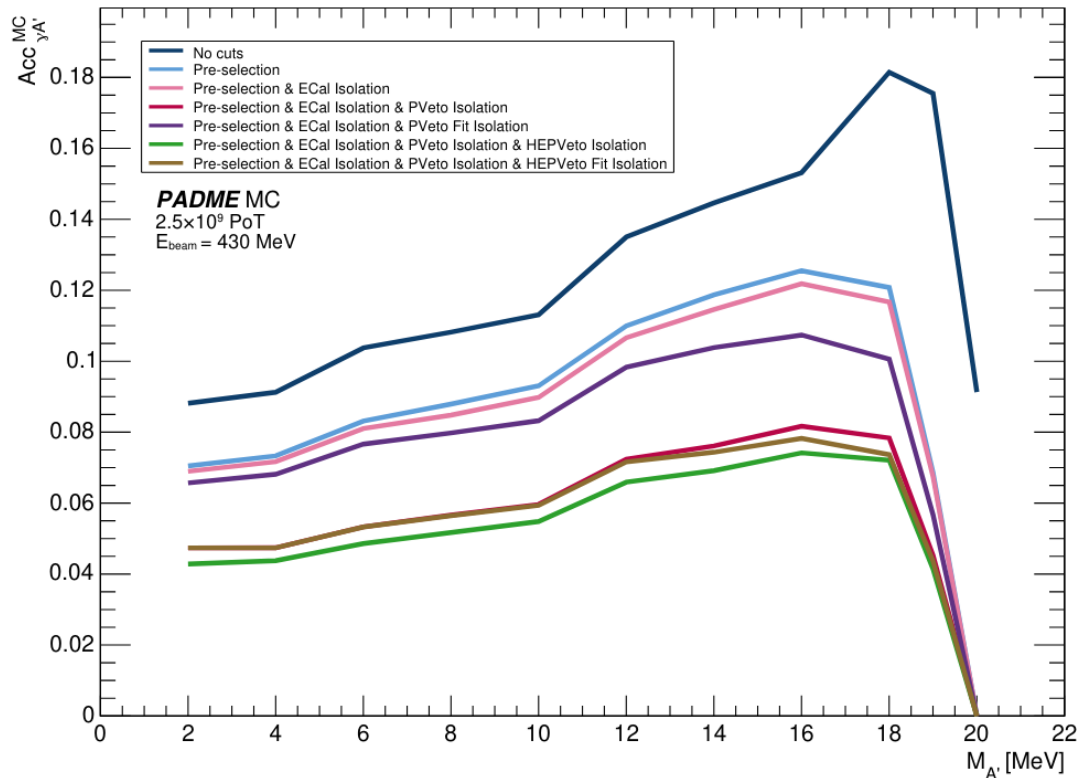


$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\sqrt{\int_{\mu(M_{A'}^2) - n\sigma(M_{A'}^2)}^{\mu(M_{A'}^2) + n\sigma(M_{A'}^2)} \frac{dN}{dM^2} dM^2}}{N_{\text{POT}} \cdot \text{Acc}_{\gamma A'}^{MC}(M_{A'}^2, n\sigma) \cdot N_{e^-/s}}$$

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

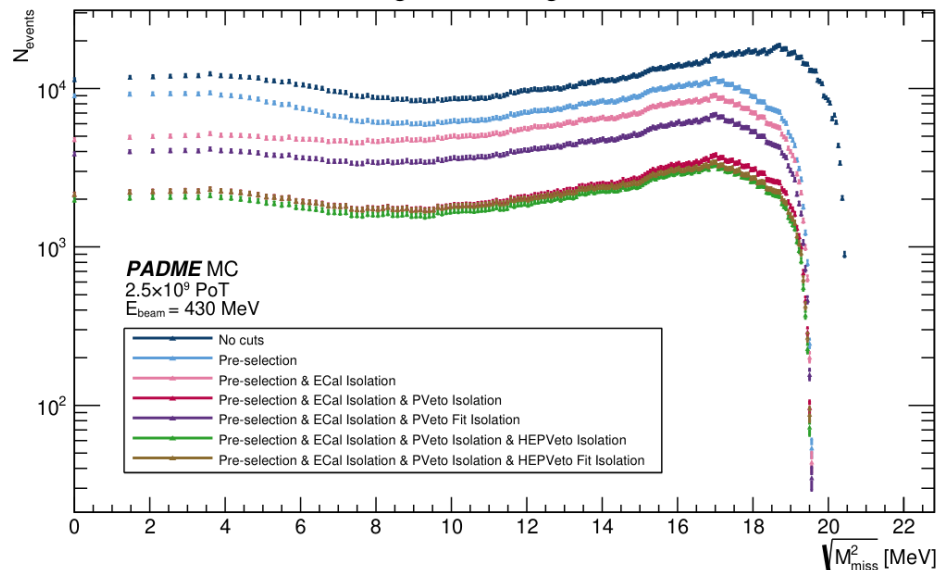


Интегриране на фона

- 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

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

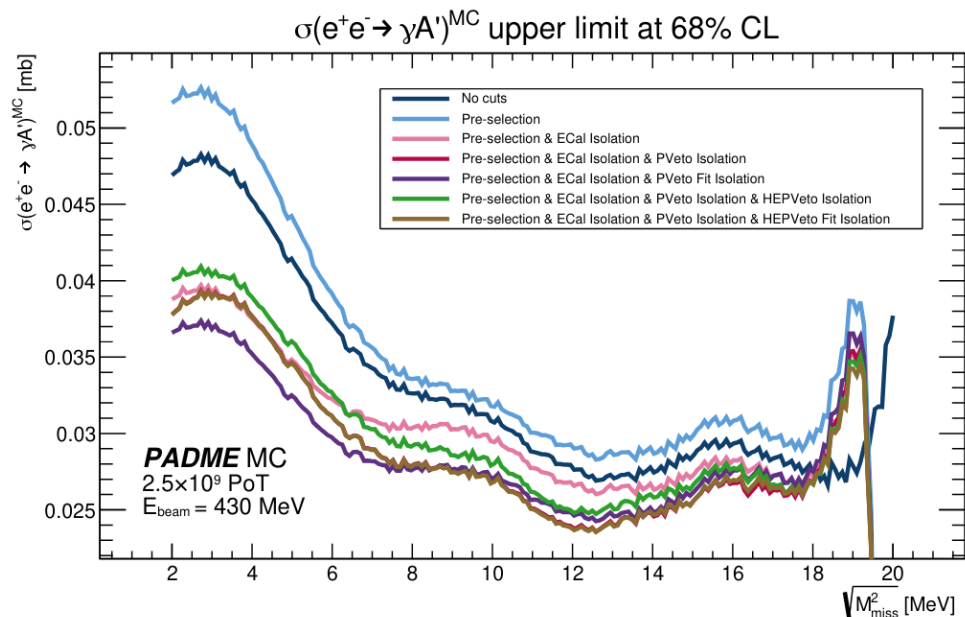
Background integral 1.5σ



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

Горна граница на сечението за раждане на A'

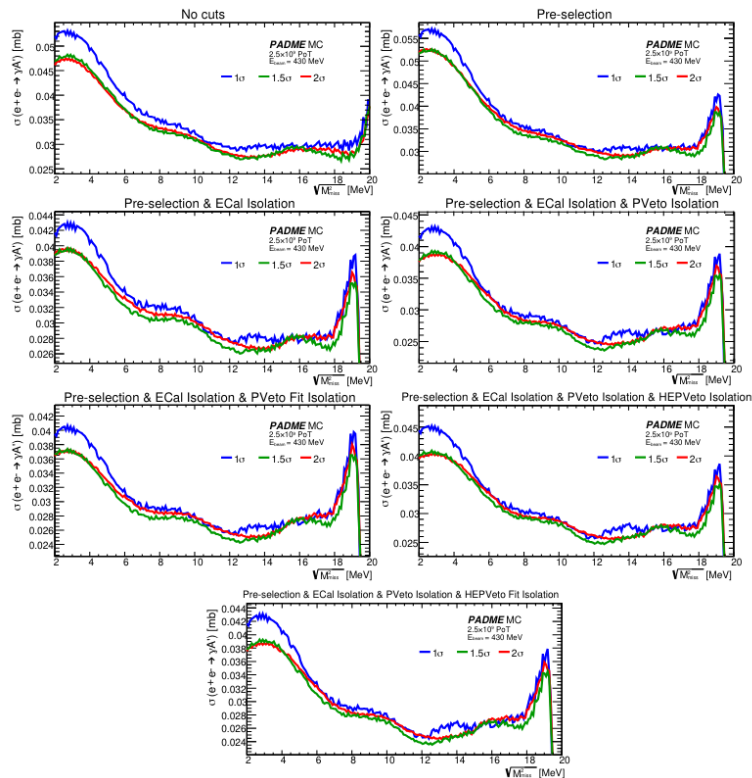
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma A')^{MC} = \frac{\sqrt{\int_{\mu(M_{A'}^2) - n\sigma(M_{A'}^2)}^{\mu(M_{A'}^2) + n\sigma(M_{A'}^2)} \frac{dN}{dM^2} dM^2}}{N_{\text{POT}} \cdot \text{Acc}_{\gamma A'}^{MC}(M_{A'}^2, n\sigma) \cdot N_{e^-/s}}$$



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

пσ проверка



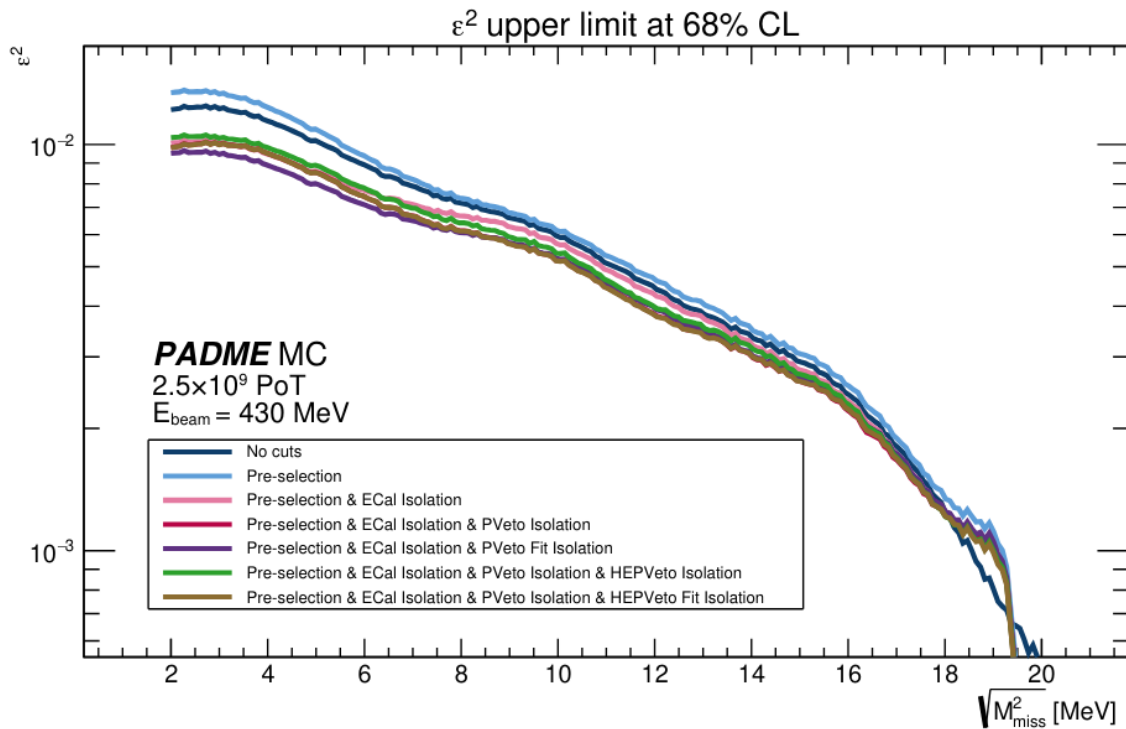
Поради сложната форма на разпределението на липсващата маса е направена проверка за оптималната стойност на $n\sigma$ за всички селекции: $n=1.5$ (зелено) дава най-добър резултат

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

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.

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

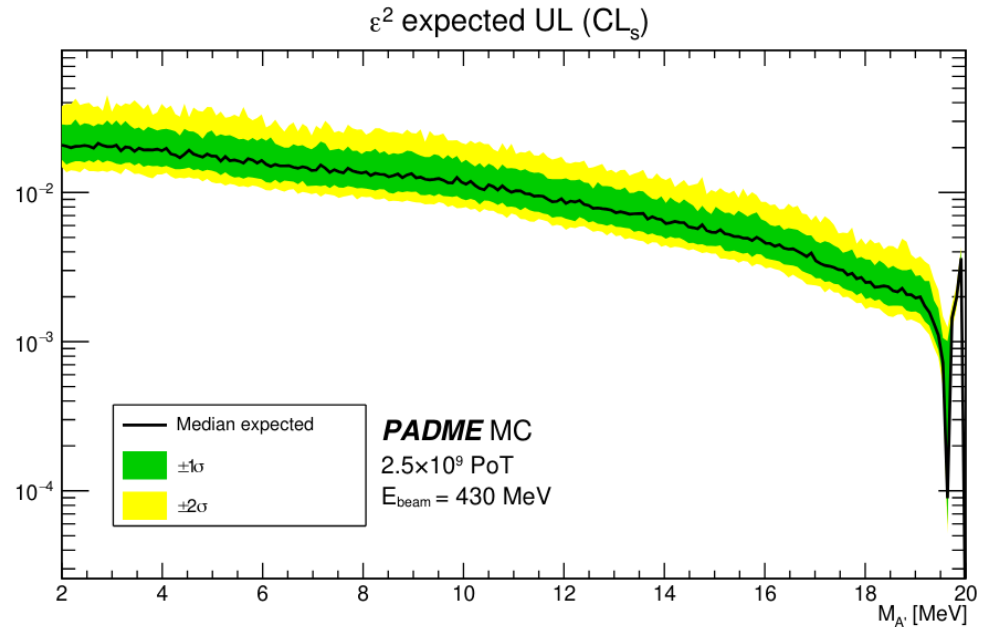
ϵ^2 варира от 10^{-2} за малките маси $M_{A'} \sim 2$ MeV до 10^{-3} за $M_{A'} \sim 18$ MeV

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} , Acc , 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

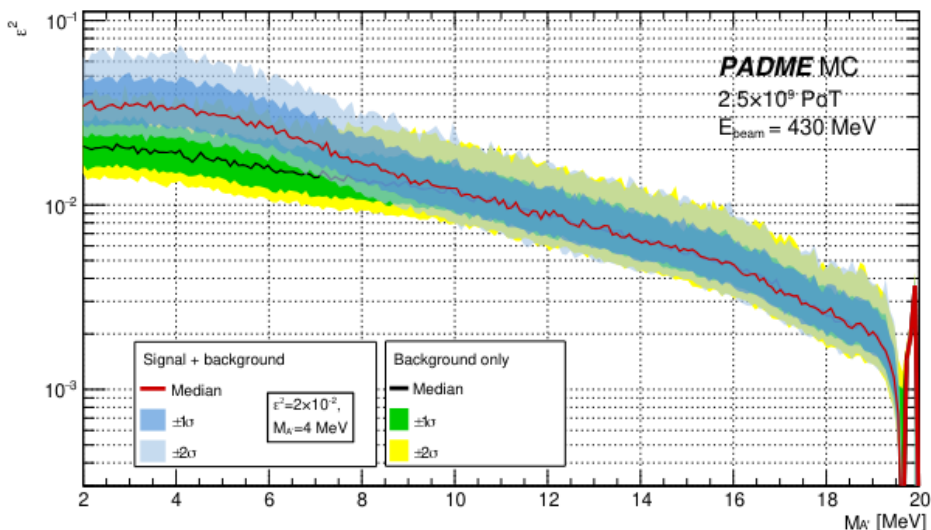


Тест на метода чрез инжектиране на сигнал

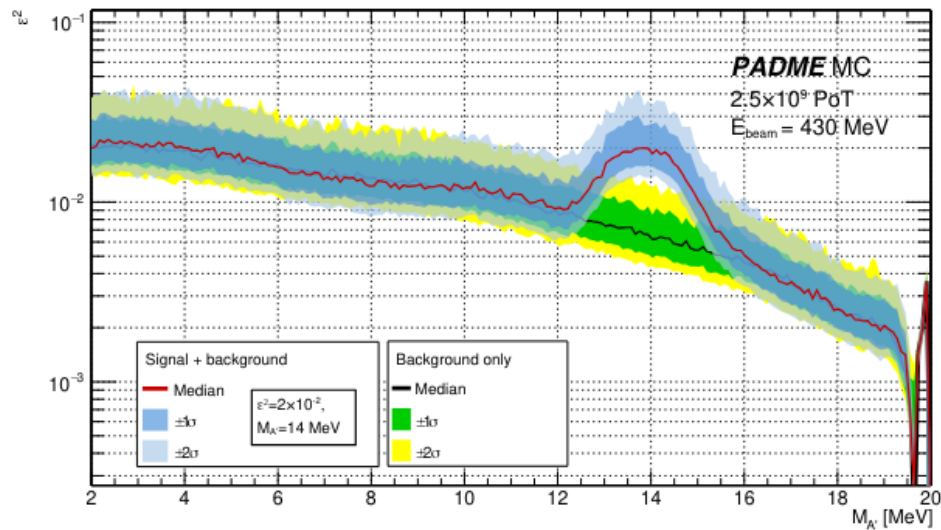
Добавени A' събития при маса на A' 4 и 14 MeV, $\epsilon^2=2 \times 10^{-2}$

- 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

Изследвани са основните фонови 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 методологията за анализ, основан на липсващата маса на единични фотони, регистрирани в калориметъра
- ✓ Изследвани са различни варианти за селекция

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 $M_{A'} \approx 2$ MeV и достига $\epsilon^2 < 2 \times 10^{-3}$ за $M_{A'} \approx 18$ MeV.

Публикации с основен принос и участие в конференции

Публикации:

- Dimitrova, K. et al. "Cluster Reconstruction in Electromagnetic Calorimeters Using Machine Learning Methods". Journal of Physics: Conference Series 3116.1 (2025), 012004 doi: 10.1088/1742-6596/3116/1/012004
- Dimitrova, K. et al. [PADME Collaboration]. "Searching for the Dark Photon with PADME". PoS COSMICWISPers2025 (2026), 063. doi: 10.22323/1.507.0063

Участие в конференции:

- 3rd Training School COST Action COSMIC WISPers (CA21106), Annecy, France, 16 – 19 September 2025: **Searching for the Dark Photon with PADME**
- 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**
- 80 години катедра Атомна физика, Sofia, Bulgaria, 16 – 18 April 2026: **Searching for new light particles with PADME**