

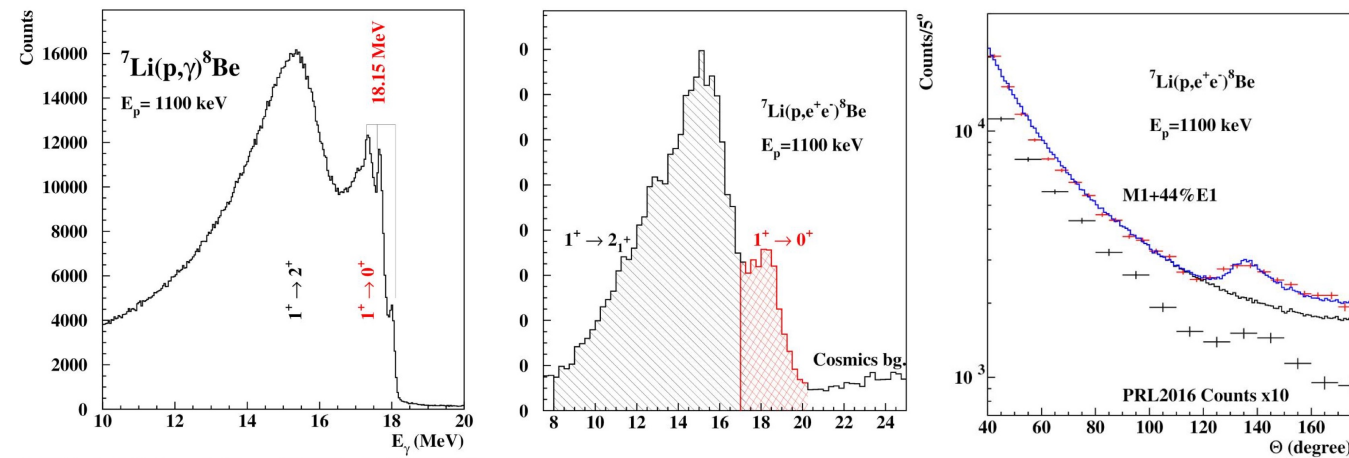
Ricerca della particella X17 con l'esperimento PADME

Paolo Valente



IFAE – Bologna 9 aprile 2026

Le anomalie di ATOMKI e l'ipotesi di un nuovo bosone leggero



1. Con un fascio di **protoni** di energia ben precisa $\approx \text{MeV}$ su un bersaglio, si eccitano delle risonanze nucleari
2. Il nucleo si **diseccita radiativamente**, si selezionano decadimenti per creazione interna di **coppie e^+e^-** (IPC)
3. Misurando la **correlazione angolare della coppia** si trova un **picco anomalo** a un ben preciso angolo, ma solo per alcune specifiche energie di eccitazione ovvero livelli nucleari eccitati

4. Cambiando il **bersaglio**, si eccitano **risonanze diverse** e, a patto di avere un'energia sufficiente, si ritrova un **picco** nella distribuzione angolare,
5. I valori dell'angolo sono diversi e corrispondono all'emissione di una **particella** di massa pari a circa **17 MeV/c²**:

$$\theta_{ee}^{\min} \approx 2 \arcsin \left(\frac{m_{X17}}{m_{N^*} - m_N} \right)$$

Anomalia angolare nella diseccitazione di $^8\text{Be}^*$, $^4\text{He}^*$ e $^{12}\text{C}^*$ e della Giant Dipole Resonance del Be

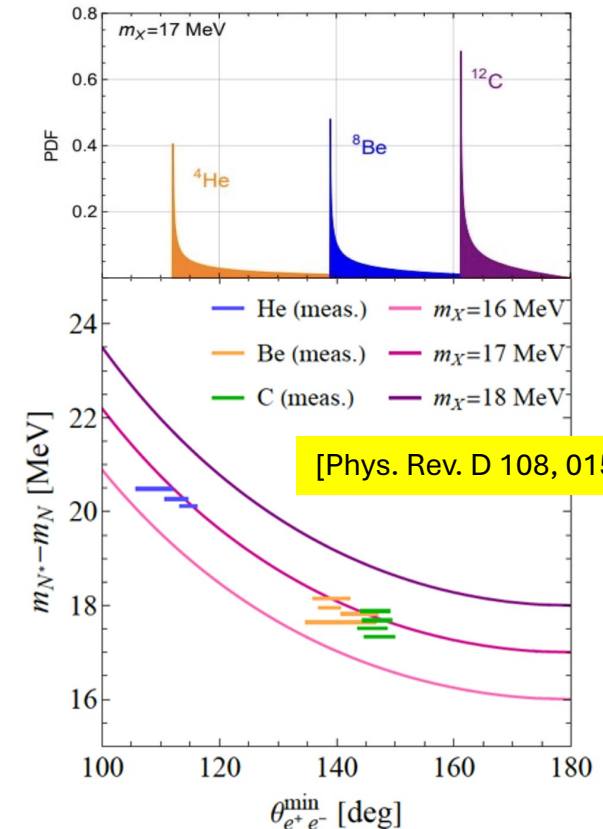
Evidenze statisticamente **rilevanti**, ma confermate solo da un esperimento con la stessa tecnica [Hanoi University of Science] e **non** da altri:

- MEG-II, rivelatore diverso $\rightarrow$ limite su massa/accoppiamento
- INFN-LNL, rivelatori in vuoto $\rightarrow$ in corso

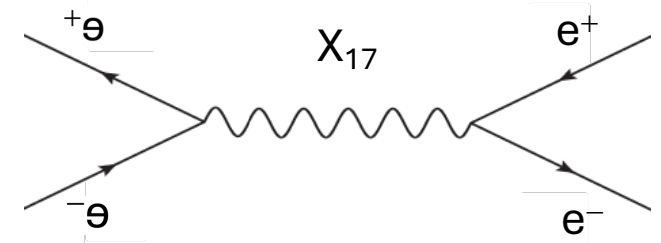
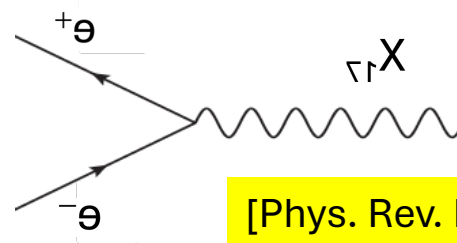
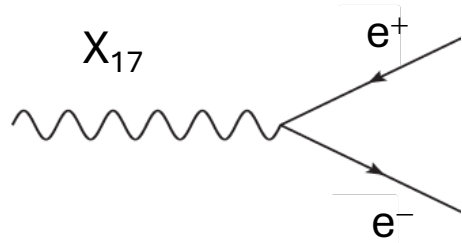
Tensione con dati sperimentali nelle varie ipotesi di **spin** e **parità**

N_*	$J_*^{P_*}$	Scalar X	Pseudoscalar X	Vector X	Axial Vector X
$^8\text{Be}(18.15)$	1^+	✗	✓	✓	✓
$^{12}\text{C}(17.23)$	1^-	✓	✗	✓	✓
$^4\text{He}(21.01)$	0^-	✗	✓	✗	✓
$^4\text{He}(20.21)$	0^+	✓	✗	✓	✗

[Phys. Rev. D **102**, 036016 (2020)]



Se l'ipotetico bosone può decadere in una coppia e^+e^- , deve esistere il diagramma «**flipped**» e quindi produrre X17 nelle **annichilazioni e^+e^-** e poi rivelarlo quando decade nuovamente in coppie e^+e^-



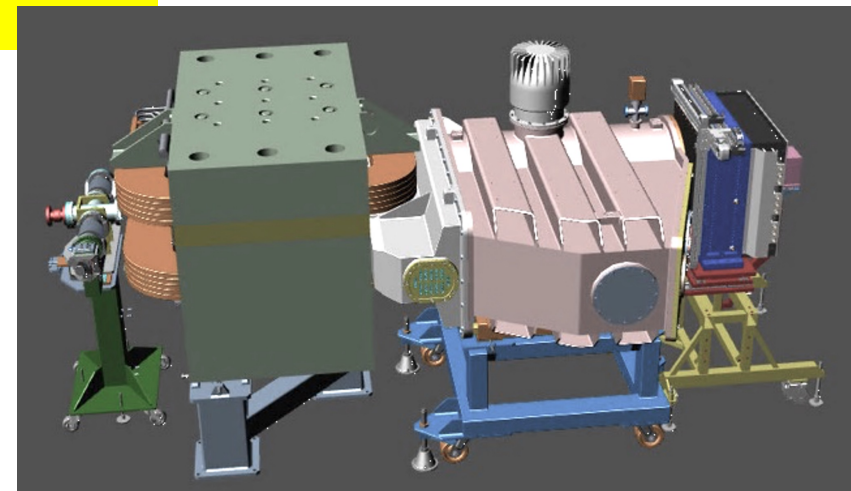
Sezione d'urto massima quando l'energia nel centro di massa è pari alla massa di X17: **produzione risonante**

Idea di base:

- Collidere e^+ di ≈ 283 MeV su **elettroni a riposo** e rivelare la coppia e^+e^-
- Distinguendo dagli altri processi ovvero:
 - $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ [scattering Bhabha: canale s e canale t]
 - $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

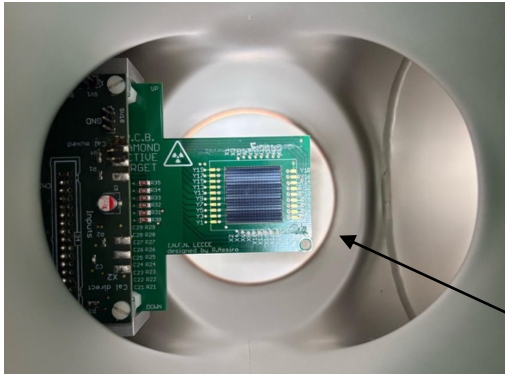
Necessità di modificare il setup esistente di **PADME**:

- Ottimizzato per la ricerca di A' nella produzione associata $e^+e^- \rightarrow \gamma A'$
- Fascio di **positroni** di **energia variabile fino a 500 MeV**
- Bersaglio sottile attivo [Carbonio], calorimetro a cristalli di BGO per misurare cluster di elettroni o fotoni, calorimetro veloce PbF_2 in avanti e spettrometro magnetico [veto] in vuoto

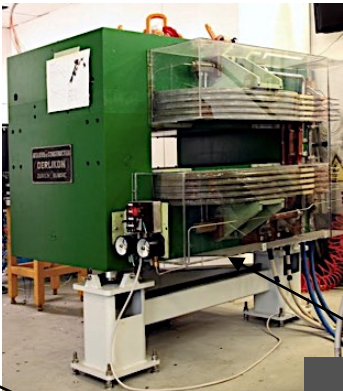


Setup di PADME – Run I e II

Bersaglio attivo [diamante]



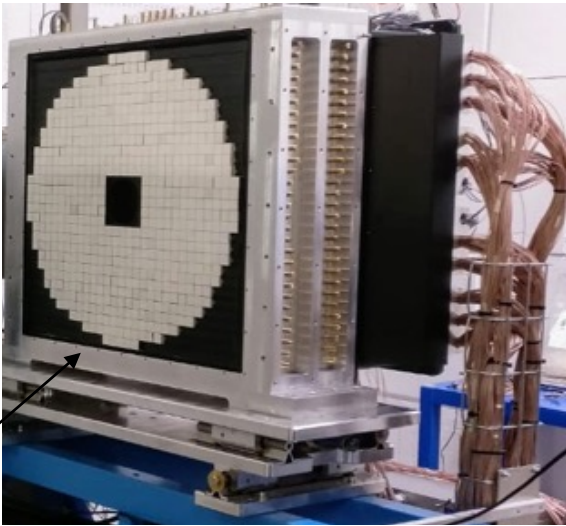
Dipolo



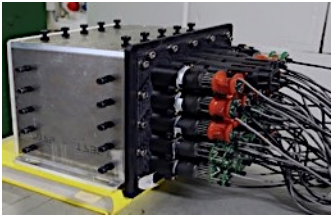
Finestra in fibra di C



Calorimetro cristalli di BGO



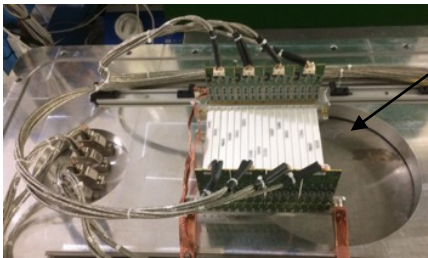
Calorimetro a cristalli di PbF₂



Matrice TimePIX3



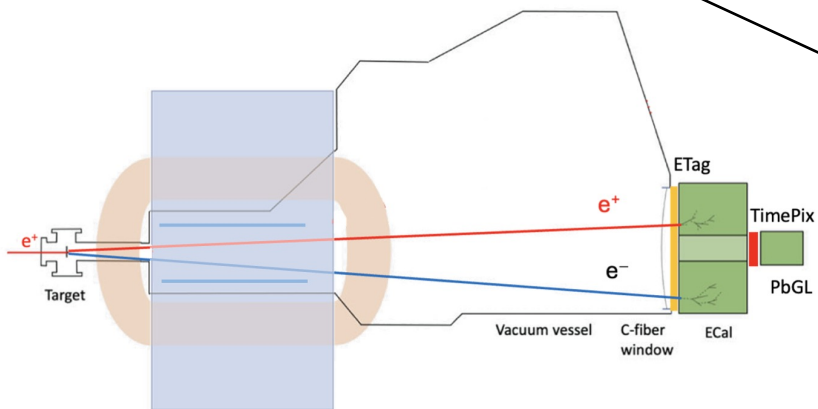
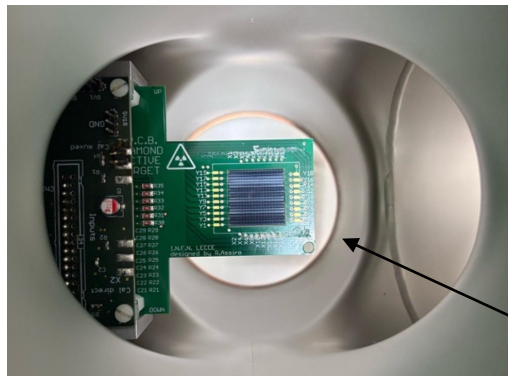
Scintillatori di veto in vuoto



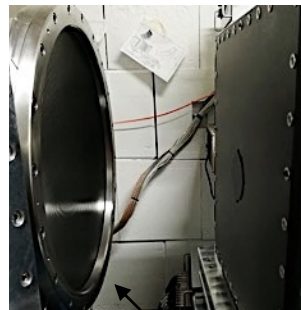
Rivelatore: [JINST **17** (2022) 08, P08032]
Linea di fascio: [JHEP **08** (2024) 121]

Setup di PADME – Run III

Bersaglio attivo [diamante]



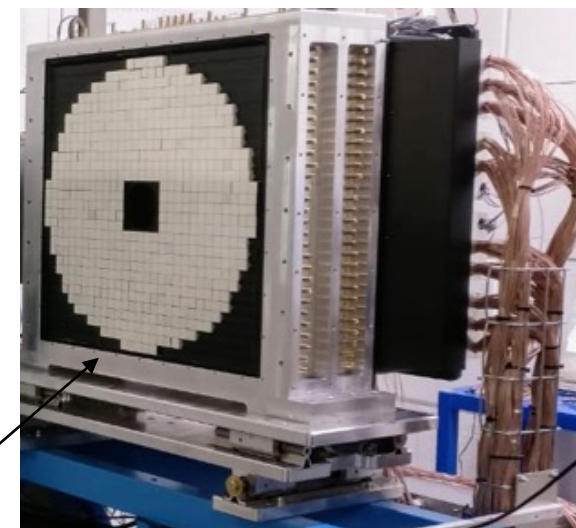
Finestra in
fibra di C



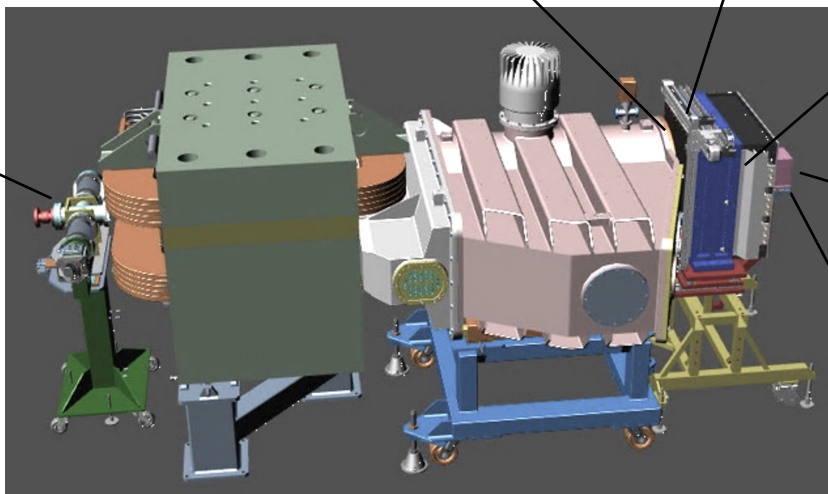
Tagger elettronici



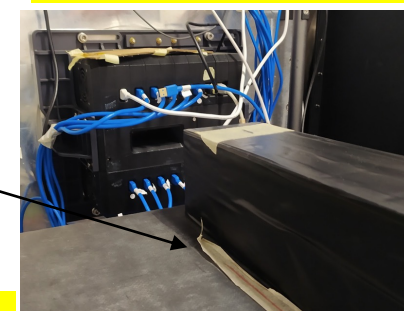
Calorimetro cristalli di BGO



Dipolo spento



Luminometro vetro al Pb

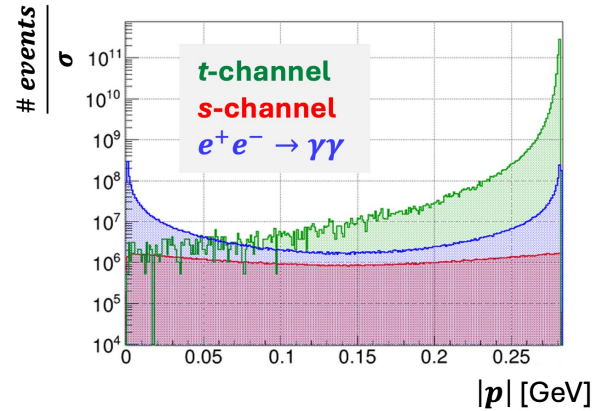


Matrice TimePIX3



- Dipolo spento: **calorimetro BGO** rivela **e^+e^-** e **$\gamma\gamma$**
- Rivelatore a **scintillatore** davanti al calorimetro per **tag elettronici**
- **Monitor di fascio** a pixel di Silicio spostato dietro il calorimetro
- A seguire beam-catcher, **vetro al Pb**, per misura del flusso
- **Energia del fascio variabile** attorno a **283 MeV** per cercare il picco risonante

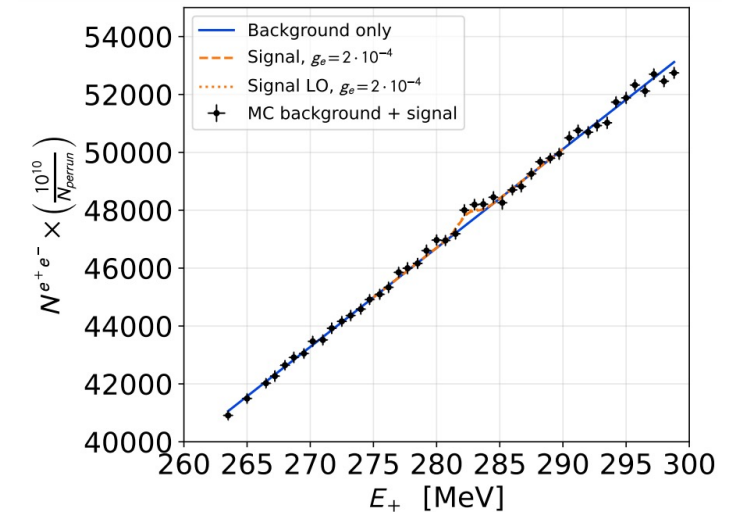
PADME e X17



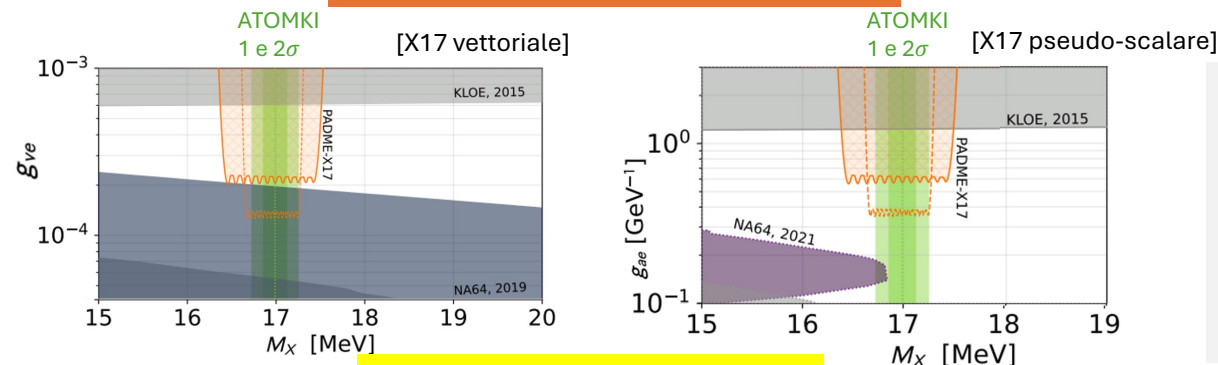
- Esperimento di **conteggio** completamente basato sui **dati**
- Picco della **produzione risonante** di X17 dovrebbe emergere chiaramente sul fondo
- Anche **senza distinguere 2 cluster Bhabha** da quelli neutri: $\gamma\gamma$ praticamente piatto
- Fondo stimabile dalle side-band **direttamente dai dati**
- **Passo dello scan** determinato per avere un eventuale **eccesso in più bin**

Idea di base:

- Collidere e^+ di ≈ 283 MeV su **elettroni a riposo** e rivelare la coppia e^+e^-
- Distinguendo dagli altri processi ovvero:
 - $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ [scattering Bhabha: canale s e canale t]
 - $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$



10¹⁰ positron on target [POT] per punto



[Phys. Rev. D **106**, 115036]

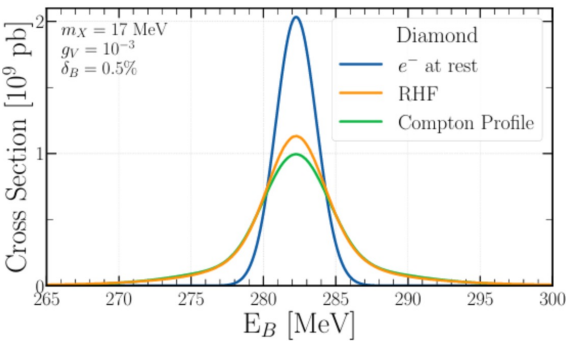
- Sensibilità determinata, data la statistica per punto, da **passo dello scan** e **risoluzione in $\sqrt{s}$**
- Se si assumono gli **elettroni a riposo** la risoluzione in $\sqrt{s}$ è determinata solo dallo **spread σ_p** del fascio, stimato $\lesssim 0.25\%$

MA...

6

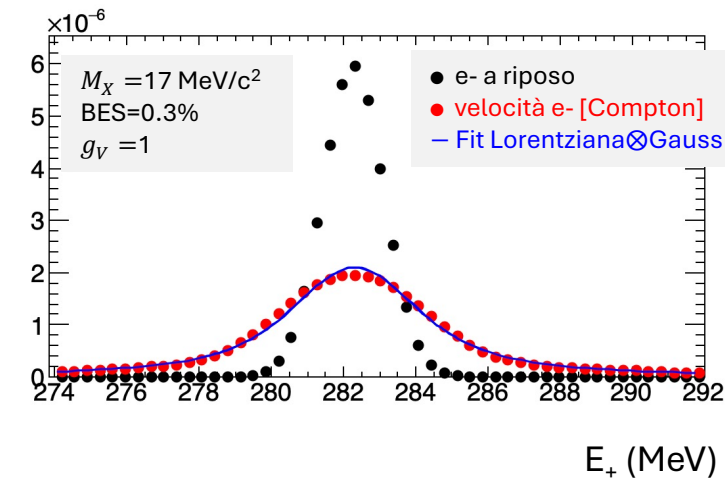
Effetto della velocità degli elettroni

[PRL 132 (2024) 261801]



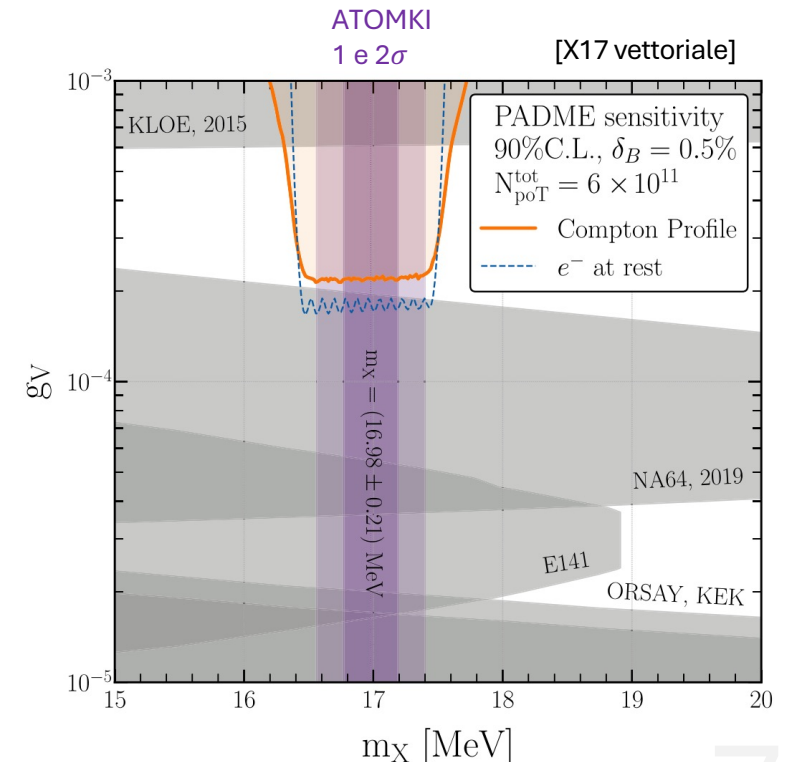
Dato il target in **Carbonio** [diamante]:

- L'effetto della **velocità** =degli elettroni **non è trascurabile** rispetto a uno spread del fascio $\ll 1\%$
- Velocità determinata da calcoli Hartree-Fock della densità di carica negli orbitali atomici o da misure **sperimentali** di **scattering Compton**

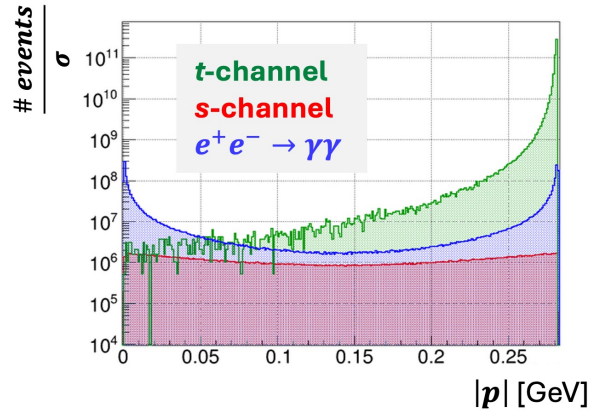


Utilizzando i profili Compton misurati:

- Sensibilità [a parità di statistica per punto] si riduce a causa dell'allargamento dell'incertezza in $\sqrt{s}$
- Forma del segnale descritta dalla **convoluzione** di una **Lorenziana** con uno **spread Gaussiano** [**3 parametri**]



PADME e X17



Varie possibili **osservabili** utilizzando il setup di PADME con diversi pro e contro dal punto di vista della **sensitività** e delle **sistematiche**:

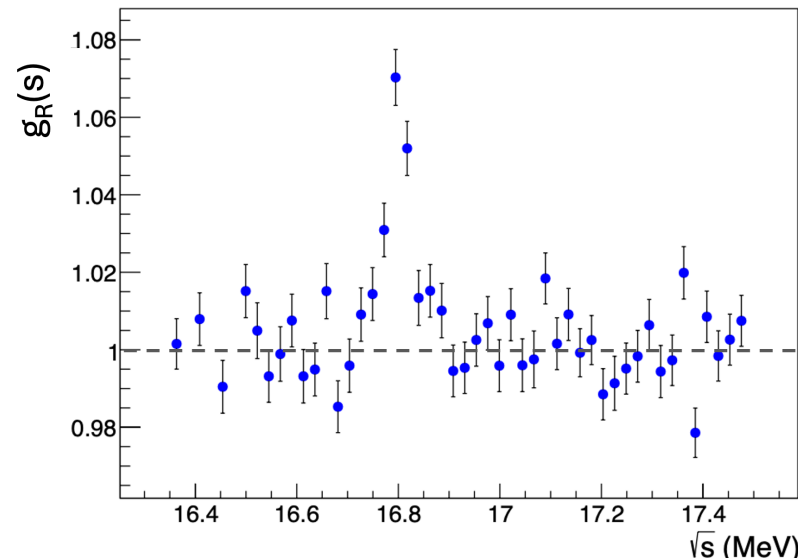
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N(e^+e^-)}{N_{PoT}} \text{ vs } \sqrt{s} \quad ; \quad \frac{N(\gamma\gamma)}{N_{PoT}} \text{ vs } \sqrt{s} \\ \frac{N(e^+e^- + \gamma\gamma)}{N_{PoT}} \text{ vs } \sqrt{s} \\ \frac{N(e^+e^-)}{N(\gamma\gamma)} \text{ vs } \sqrt{s} \end{array} \right.$$

- Contributi alla sistematica sia dalla misura di N_{PoT} sia dall'efficienza del tagging e/γ
- Indicazioni anche sulla natura di X17: **vettoriale** [e^+e^-] o **pseudo-scalare** [$\gamma\gamma$]
- **Maggiore statistica**, ma contributo dal fondo $\gamma\gamma$
- **Assenza di contributo alla sistematica del tagging e/γ**
- Contributo significativo alla sistematica dalla misura di N_{PoT}
- Minore statistica, dovuta alla piccola sezione d'urto $\gamma\gamma$
- Assenza di contributo alla sistematica dalla misura di N_{PoT}
- Contributo significativo alla sistematica dal tagging e/γ

PADME e X17

$$\frac{N(e^+e^- + \gamma\gamma)}{N^{POT}} \text{ vs } \sqrt{s}$$

Monte Carlo con segnale
 $M_X = 16.8 \text{ MeV}$, $g_V = 8 \times 10^{-4}$



Selezionare eventi a 2 cluster e contarne il numero $N_2(s)$, per ciascun punto dello scan in $\sqrt{s}$ confrontare **due ipotesi**:

- Solo **background**:

$$N_2(s) = N_{POT}(s) \cdot B(s)$$

- **Segnale+background**:

$$N_2(s) = N_{POT}(s) \cdot [B(s) + S(s; M_X, g) \cdot \epsilon_S(s)]$$

$N_{POT}(s)$: Positroni su target, stimati dal **vetro al Pb** di fine linea

$B(s)$: Numero di **eventi di fondo per POT** attesi

$S(s; M_X, g)$: Numero di **eventi di segnale per POT** attesi per ogni dato valore di **massa** e **coupling**

$\epsilon_S(s)$: Accettanza $\times$ efficienza di selezione per il **segnale**

Cancellazione di parte della sistematica nel rapporto ϵ/B , riformulando in termini di:

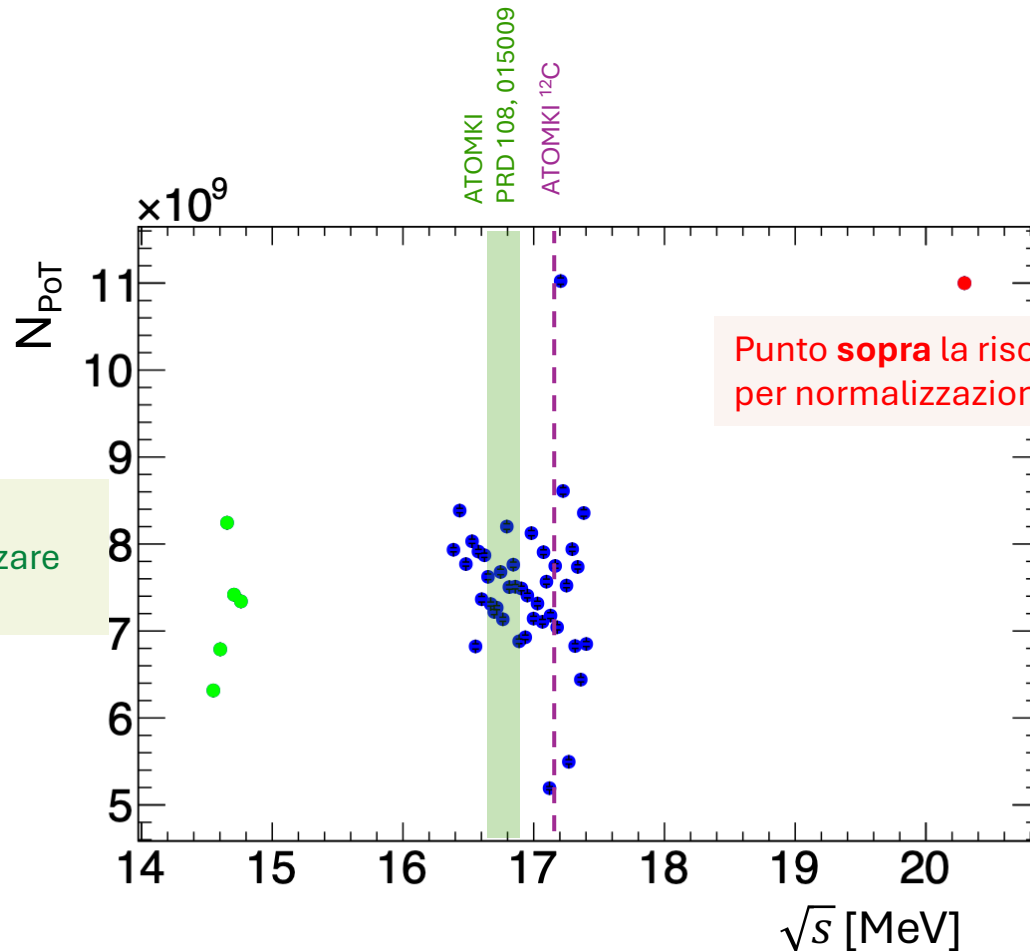
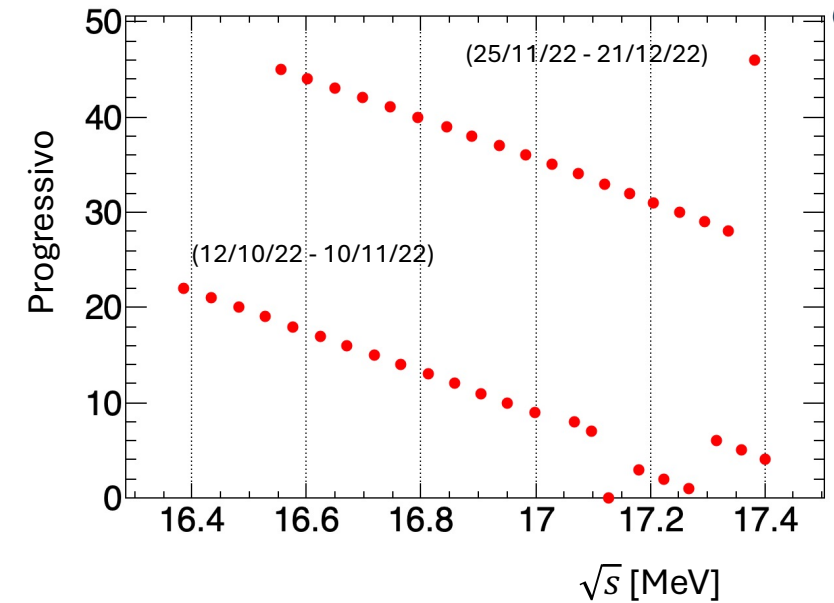
$$g_R(s) = \frac{N_2(s)}{N_{POT}(s) \cdot B(s)} = K(s) \cdot \begin{cases} 1 & \text{in assenza di X17} \\ 1 + S(s; M_X, g) \cdot \epsilon_S(s)/B(s) & \text{con X17} \end{cases}$$

Dove $K(s)$ fattore di scala dati/MC, in funzione di s ben descritto da una funzione lineare [**2 parametri**]

Dati del Run III

Due scan distinti e **sfalsati** di mezzo passo:

- Punti adiacenti in $\sqrt{s}$ acquisiti a più di **un mese** di distanza
- Energia dei positroni sempre **decescente** per minimizzare effetti di isteresi nei magneti della linea di fascio

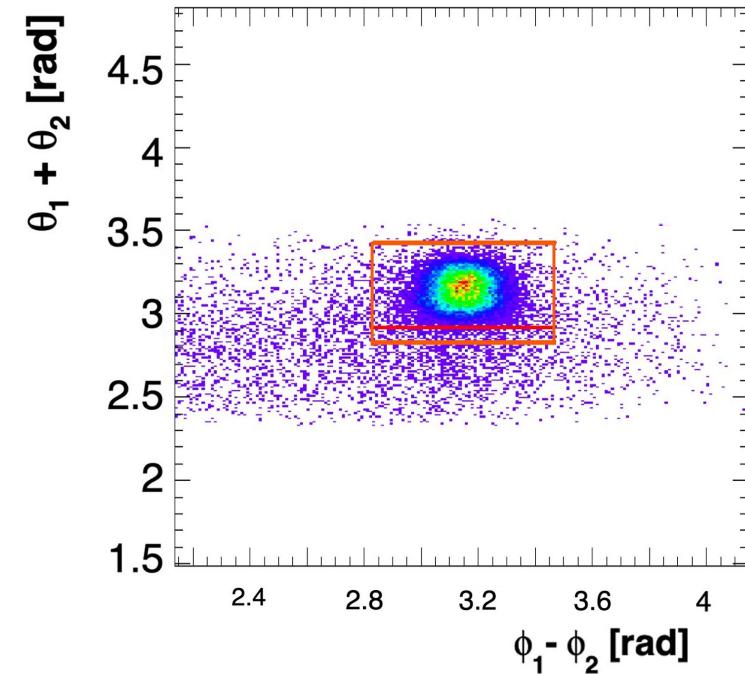


Punti **al di sotto** della risonanza per normalizzare lo yield

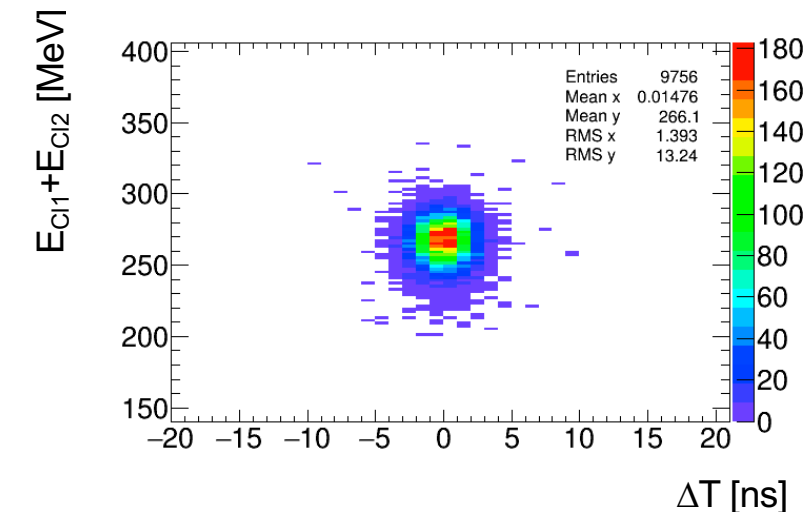
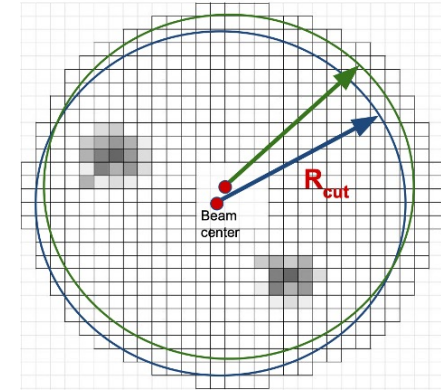
Passo $\sim 0.75 \text{ MeV} \cong \sigma_p$
Range: $16.4 \text{ MeV} < M_{X17} < 17.5 \text{ MeV}$

Statistica $\sim 1 \times 10^{10} N_{PoT}/\text{punto}$
 $3 \cdot 10^3 \text{ e}^+/\text{impulso} \times 49 \text{ impulsi/s} \approx 1 \text{ punto/giorno}$

Selezione: N₂



- Non basare la selezione sull'energia del cluster
- Ricalcolare il **centro del fascio** run per run [errore <mm]
- A meno di termini m_e/E , gli angoli nel centro di massa sono indipendenti dall'energia nel laboratorio, tagliare su $\theta_1 + \theta_2 = \pi$ e $\phi_1 + \phi_2 = \pi$
- Fondo di Bremsstrahlung $\approx 4\%$ [dovuto alla finestra di separazione del vuoto] valutato **nella sideband**
- Circa **30k candidati** per punto in s

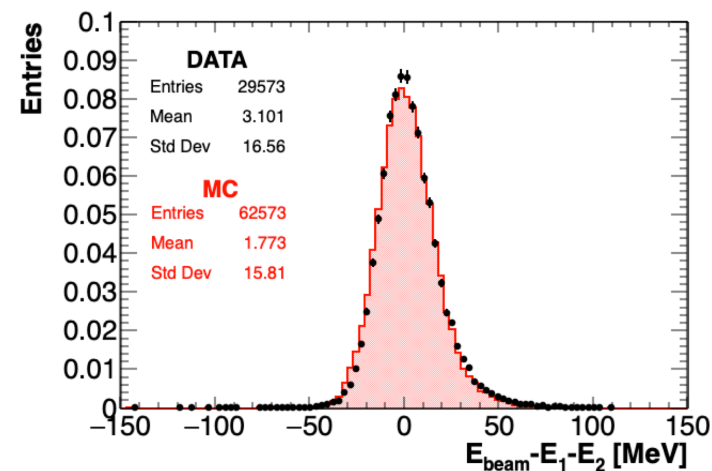


Check:

$$E_{TOT} \approx E_{e^+}$$

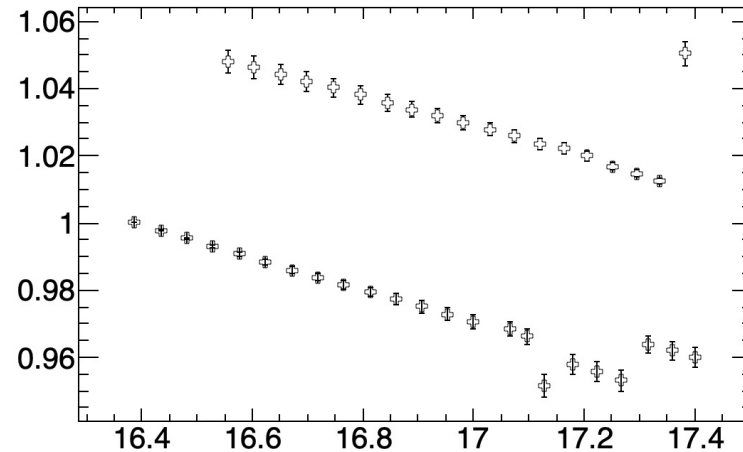
$$\Delta t \approx 0$$

Eventi a 2 cluster



Sorgente	Errore su N ₂
Statistica	~0.6%
Sottrazione del fondo [sidebands]	0.3%
Totale	0.65%

Luminosità: N_{POT}



Due contributi principali di errore non correlato:

- Perdita di yield del vetro al Pb per **irraggiamento**
- Perdita di energia nei **materiali passivi**

Errore correlato dominato dalla normalizzazione energia/molteplicità:

$$N_{\text{POT}} = Q_{\text{PbGlass}} / Q_{1e+, 402 \text{ MeV}} \times 402 / E_{\text{beam}} [\text{MeV}]$$

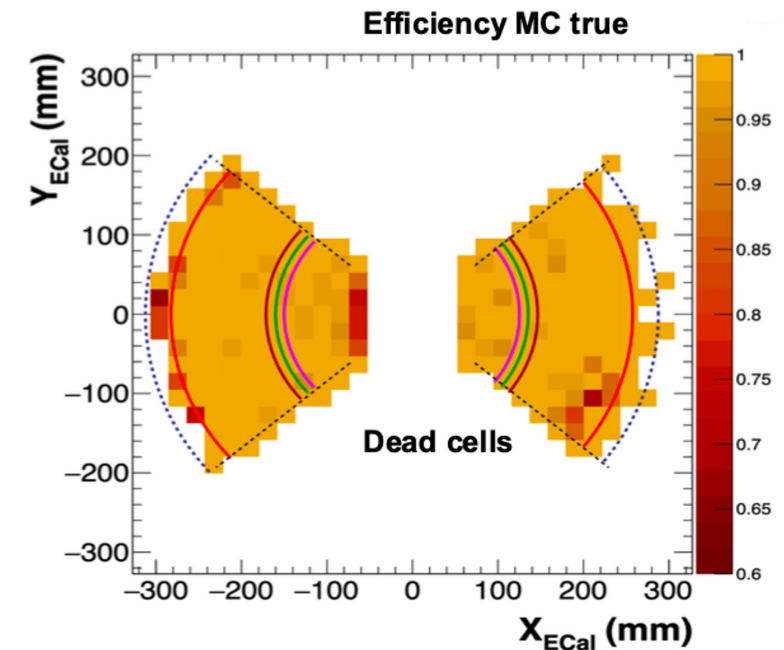
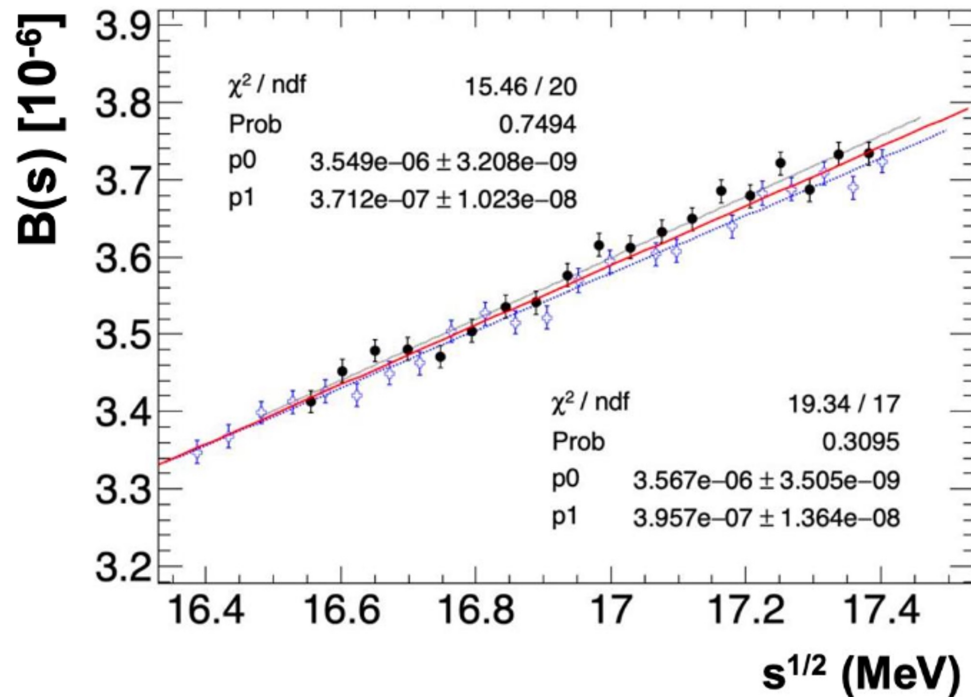
Sorgente	Errore non correlato
Statistica, sottrazione dei piedistalli	trascurabile
Scala di energia [BES]	0.3%
Perdita per irraggiamento [pendenza]	~0.35%
Totale	0.45%

Sorgente	Errore comune
pC /MeV	2.0%
Perdita di energia [dati/MC]	0.5%
Perdita per irraggiamento [costante]	0.3%
Totale	2.1%

Fondo atteso: B

Monte Carlo + check sui dati: **tag & probe**

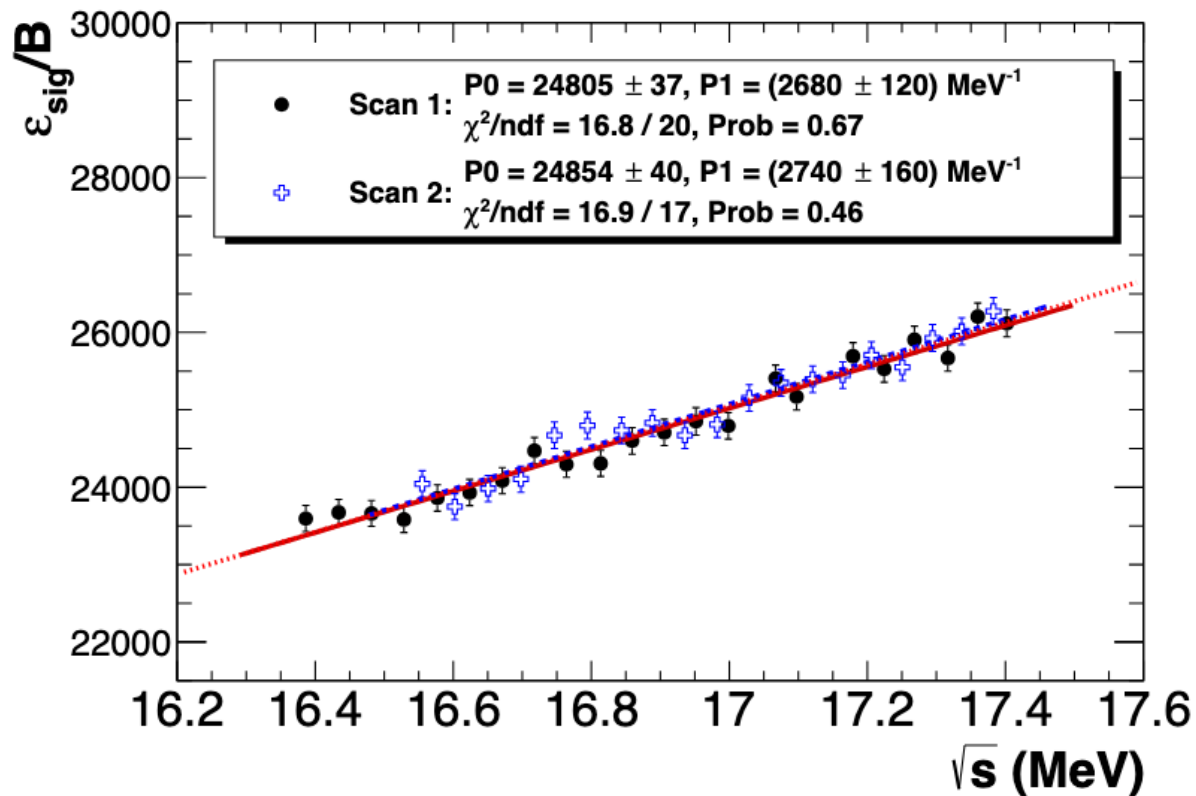
- Dipendenza **lineare** da s [fit usato solo come controllo]
- Andamento atteso confrontato con punti sotto la risonanza, errore comune determinato dalla statistica di questi run: **0.4%**
- Insieme ad altri errori correlati inclusi in **K(s)**, la **scala dati/MC**:
correzioni radiative [$\sim 3\%$], incertezza sullo spessore del target [$\sim 5\%$]



Sorgente	Errore su B
Statistica Monte Carlo	0.4%
Dati/MC [tag&probe]	0.2%
Stabilità tagli	0.2%
Spot del fascio	0.1%
Totale	0.5%

Efficienza del segnale: ε

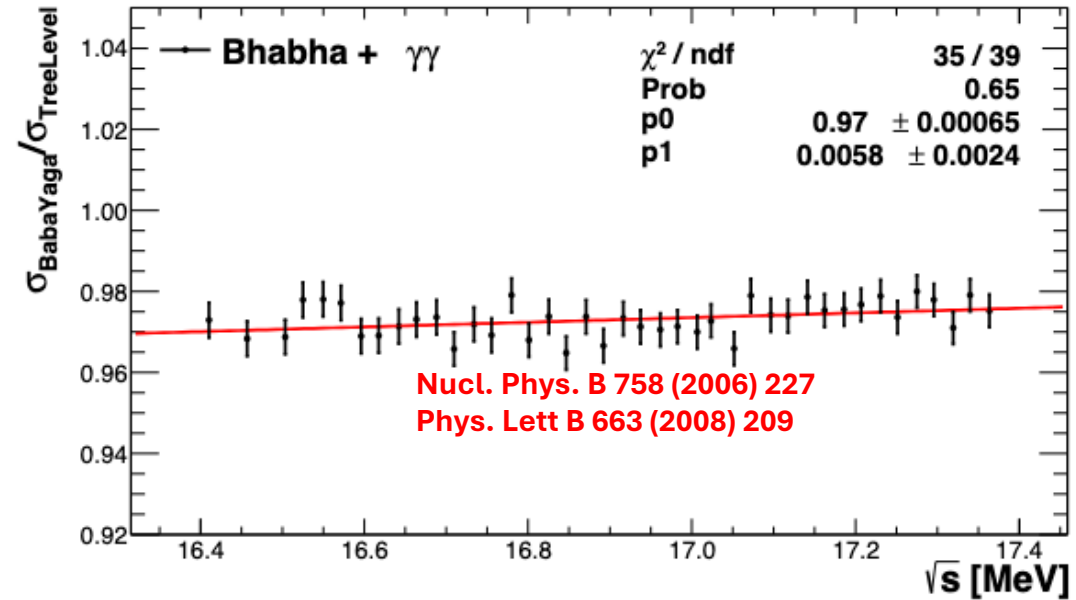
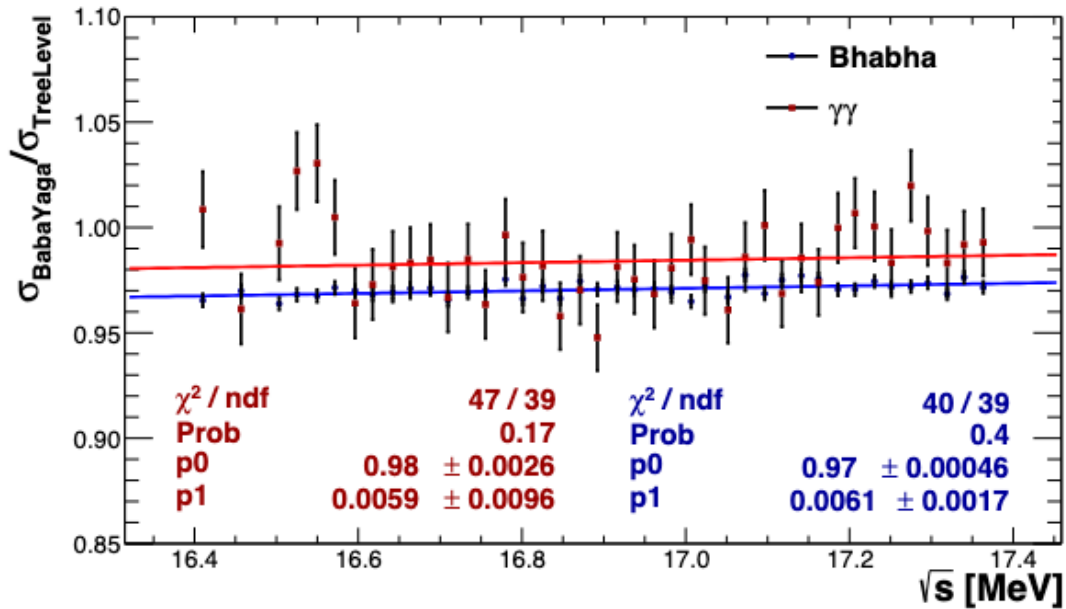
- Efficienza ε **determinata dal Monte Carlo**
- Fit **lineare** di $\varepsilon/B(s)$; fit **separati** dei 2 periodi di scan



$\delta P0/P0 \sim 0.1\%$,

$\delta P1/P1 = 3\%$, correlazione = -2.5%

Correzioni radiative valutate con Babayaga: $ee(\gamma)$ and $\gamma\gamma(\gamma)$

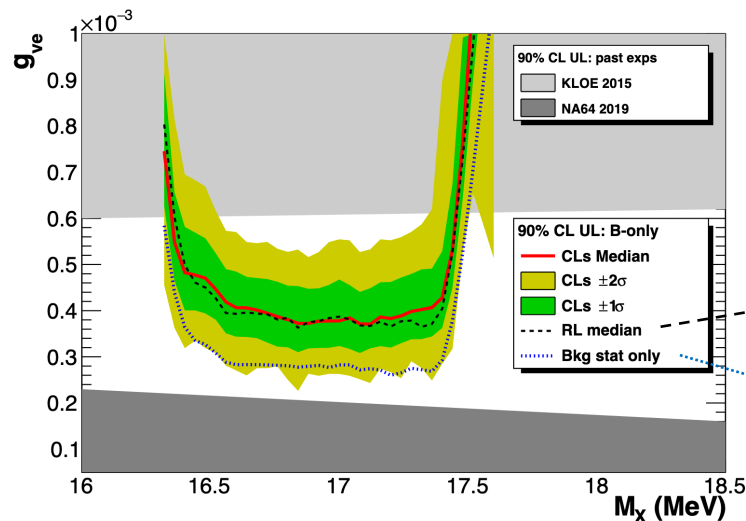
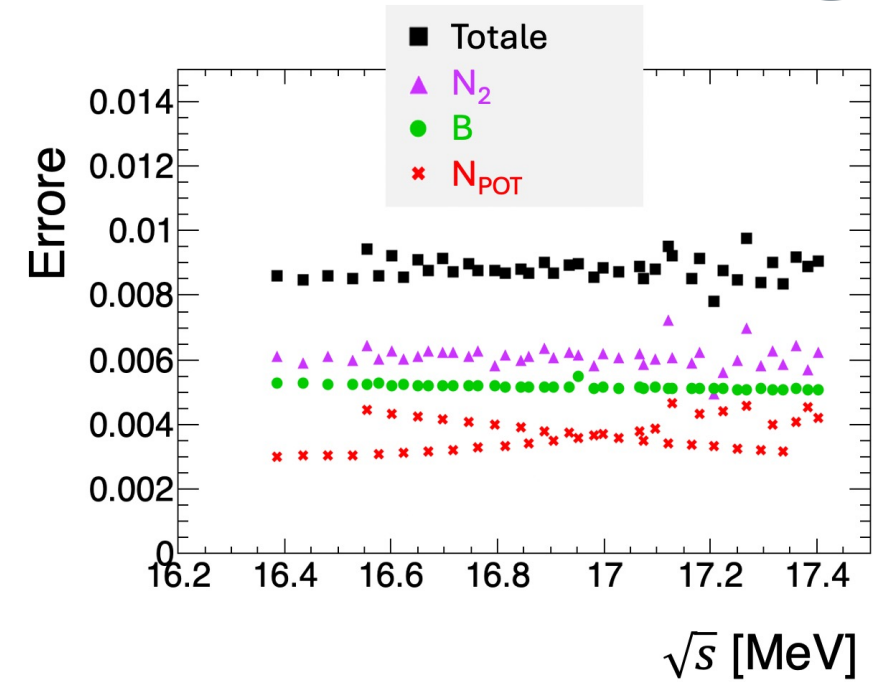


Sensitività

Confidence level al **90% atteso in assenza di segnale**

- Approccio frequentista modificato: fit della likelihood **separatamente** nell'assunzione di “**solo Background**” e “**Segnale+Background**”
- **Rapporto di likelihood [Q statistics]:** $Q = \frac{L_{S+B}(g_\nu, M_X)}{L_B}$
- La **likelihood** include termini per **ciascuno dei parametri di nuisance**
- Per ciascun valore di M_X : $CLs = \frac{P_s}{1 - P_B}$ usato per definire il limite superiore su g_ν

Le probabilità P_B e P_S sono ottenute da **simulazioni** nelle quali vengono **campionate** le osservabili, mentre i **parametri di nuisance** vengono fissati ai valori di **fit** per le ipotesi di **solo Background** e **Segnale+Background**



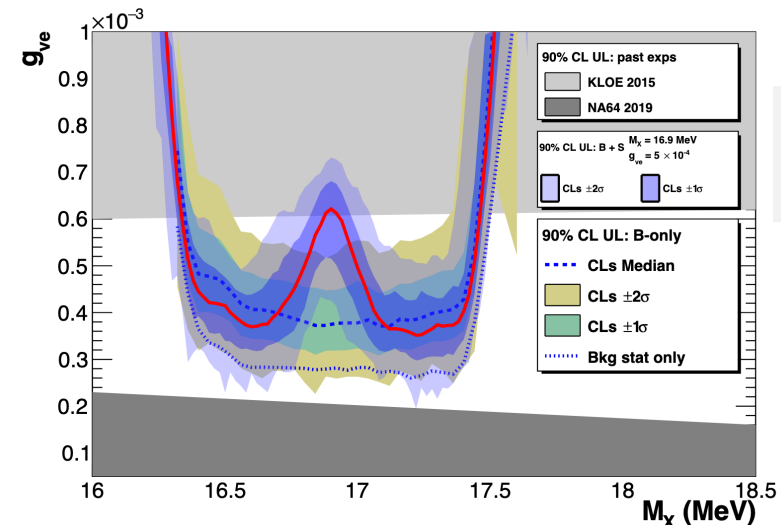
Limite atteso [MC]
solo Background

Mediana dei limiti ottenuti con Rolke-Lopez likelihood-ranking [5 punti con segnale più grande]

$$1.28 \sqrt{N_2}$$

[JHEP 06 (2025) 040]

In presenza di un **segnale**, il limite atteso si **indebolisce**



Limite atteso [MC]
Segnale+Background
(16.9 MeV, 5×10^{-4})

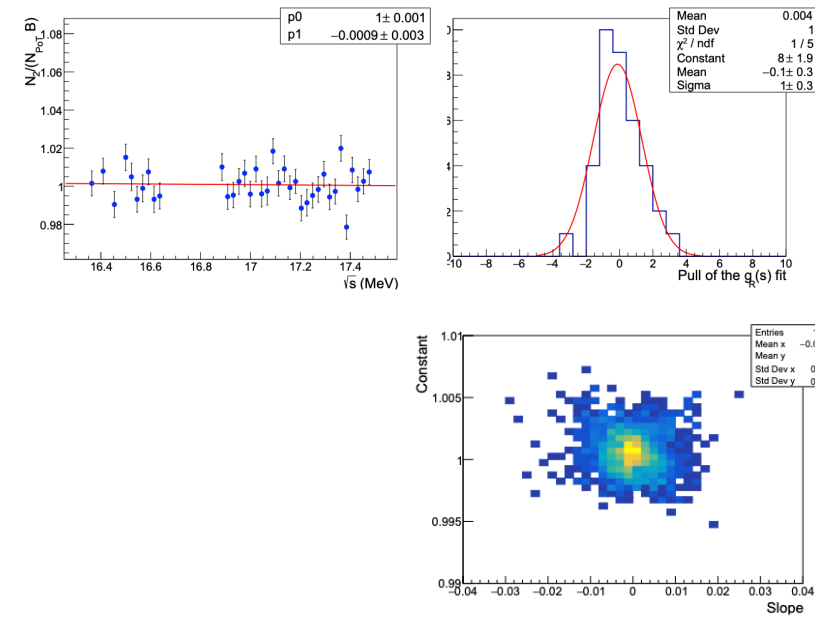
Blinding e unblinding

Scelta del gruppo di punti da **mascherare** [10 su 42] anch'essa **blind**, dovuta all'incertezza sulla determinazione della M_{X17} dalle varie misure di ATOMKI.

Ottimizzare la probabilità di un fit lineare di N_2/B in funzione di $\sqrt{s}$

1. χ^2 del fit nelle side-band: $P(\chi^2) = 20\%$
2. Fit pulls Gaussiani
3. Fit dei pulls con pendenza nulla in funzione di $\sqrt{s}$ (entro 2σ)
4. Check del fit lineare [entro 2σ dai valori attesi: slope=0 e costante=1]

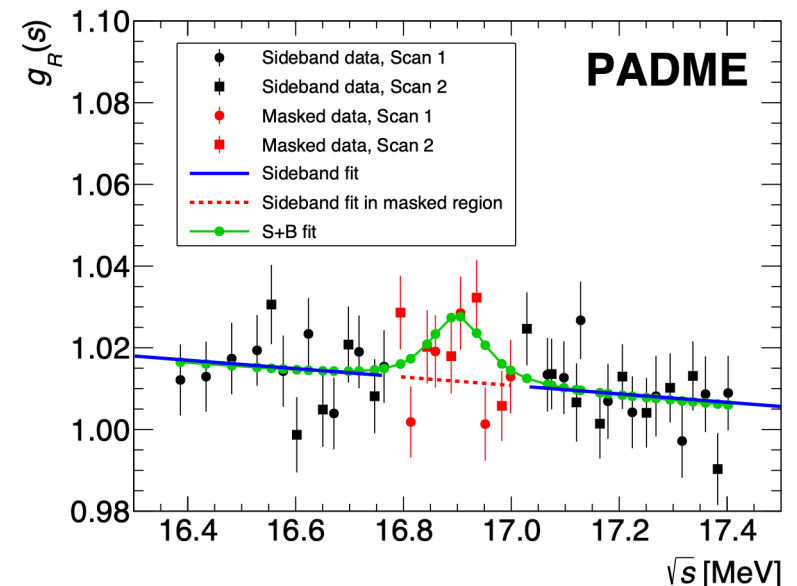
Monte Carlo



Risultati della procedura

1. $P(\chi^2) = 74\%$
2. Fit dei pull gaussiani, $P=60\%$
3. Pendenza compatibile con zero
4. Fit lineare:
Costante: $1.012(2)$ vs $1.00(3)$,
Slope $(-0.010 \pm 0.005) \text{ MeV}^{-1}$ vs $(-0.006 \pm 0.006) \text{ MeV}^{-1}$

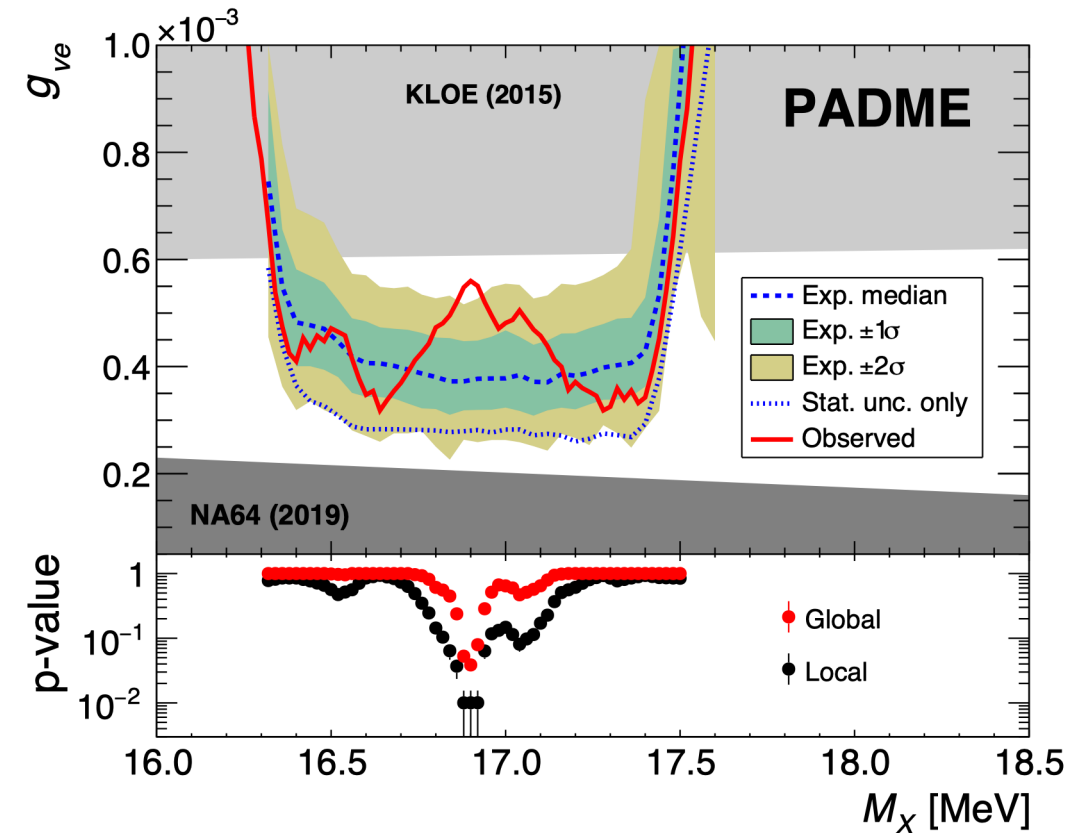
Unblinding



Risultato di Run III

Eccesso rispetto alla copertura

- Per $M_X = 16.90(2) \text{ MeV}$, $g_{Ve} = 5.6 \times 10^{-4}$, la probabilità globale scende a $3.9^{+1.5}_{-1.1}\%$, pari a $(1.77 \pm 0.15)\sigma$ one-sided (look-elsewhere calcolato da pseudo-eventi toy MC)
- Assumendo un intervallo di 3σ attorno al valore aspettato $M_X = 16.85(4) \text{ MeV}$ [da media misure di ATOMKI] il p-value scende a $2.2^{+1.2}_{-0.8}\%$ pari a $(2.0 \pm 0.2)\sigma$ one-sided



Occorre più statistica → Run IV nel 2025

Da Run III a Run IV

Statistica [N_2]

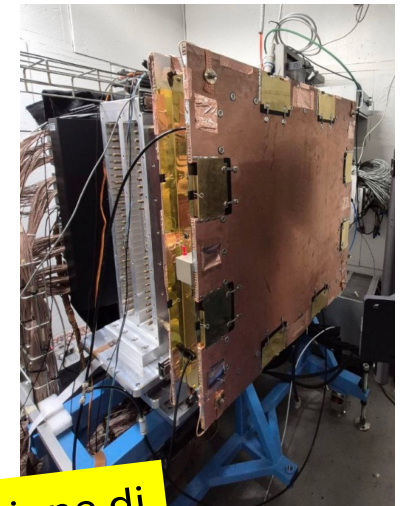
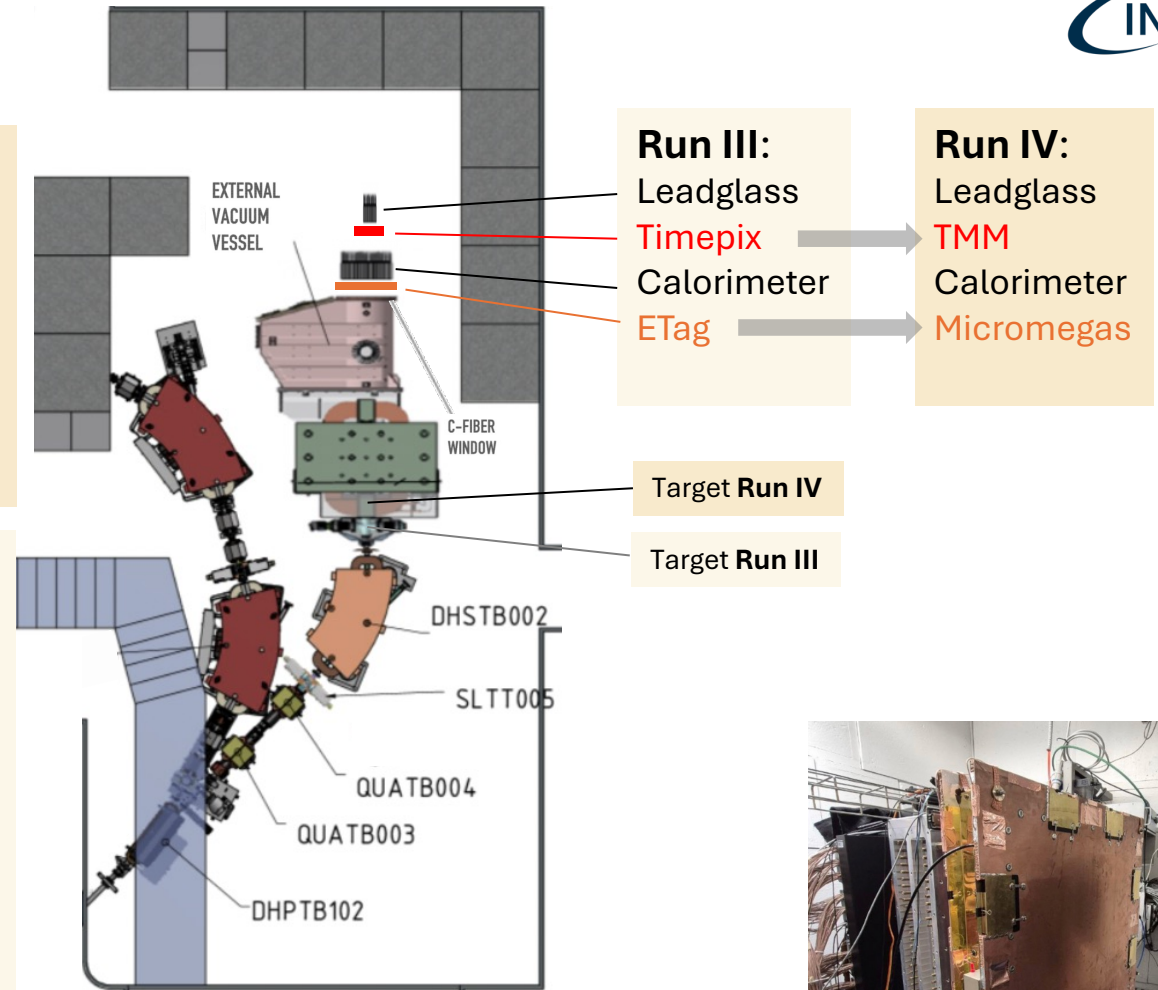
- Aumentare l'**accettanza**
 - Date le dimensioni date del calorimetro, **diminuire la distanza dal target** [avvicinandolo il target al magnete]
 - Di conseguenza, eliminata l'**ombra** del magnete [camera da vuoto tra i poli], possibile **rimuovere taglio in ϕ**
- Aumentare la **statistica per punto** [da 1 a $2 \cdot 10^{10}$ POT/punto]

Rivelatori [B]

- Migliorare la discriminazione tra carichi e neutri
 - Sostituito il tagger a scintillatore con **camera a micromegas**
- Migliorare monitor di fascio
 - Sostituita la matrice di Timepix con **monitor a micromegas**
 - Più punti di misura: misura della **divergenza/fuoco del fascio**
 - **Degauss** campo residuo dipolo: da ≈ 10 G a < 1 G
 - Migliorato controllo posizione target
- Check fondo indotto dal fascio con **run no-target** più sistematici

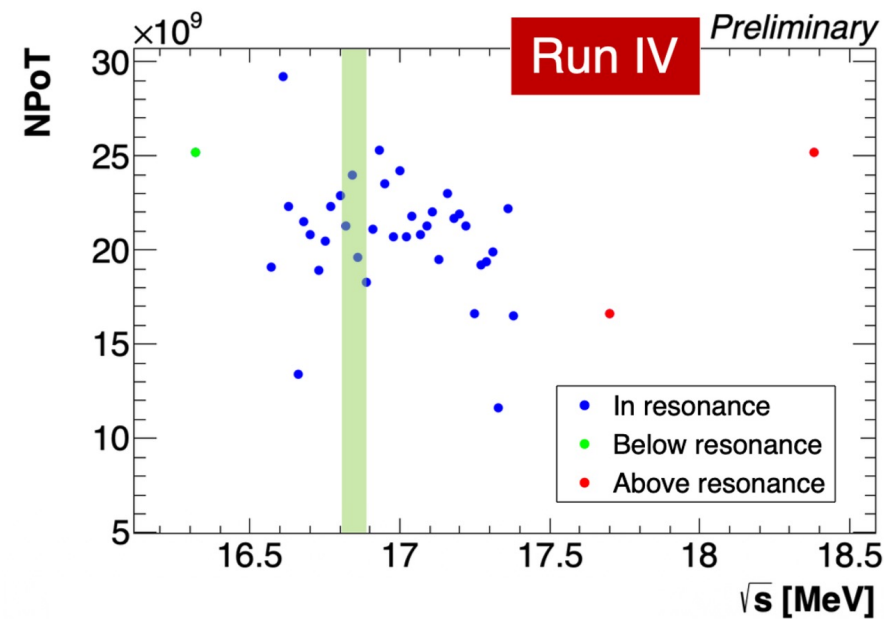
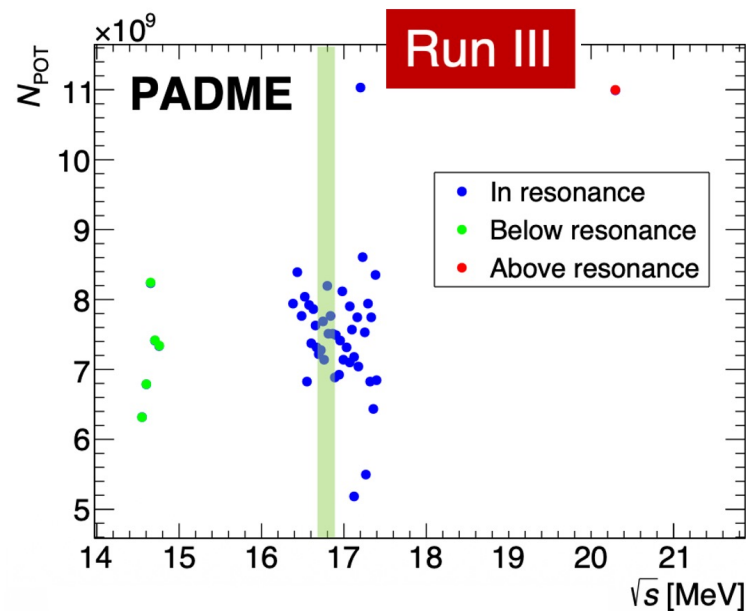
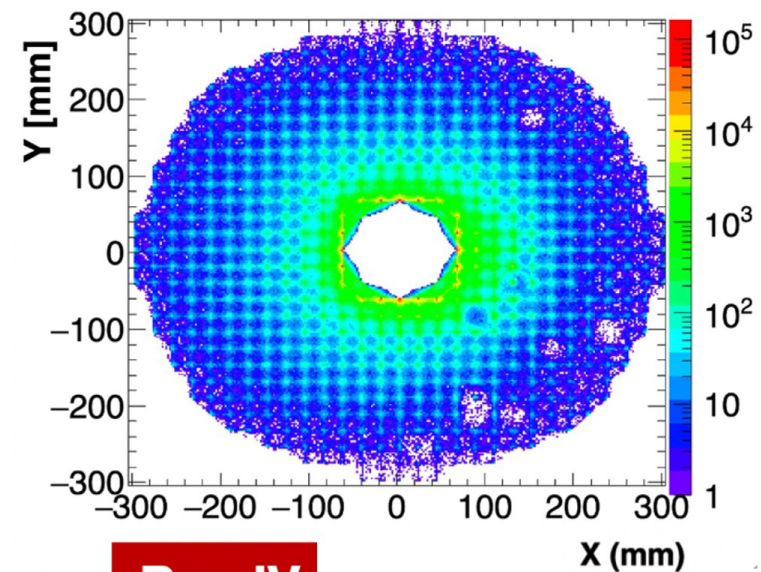
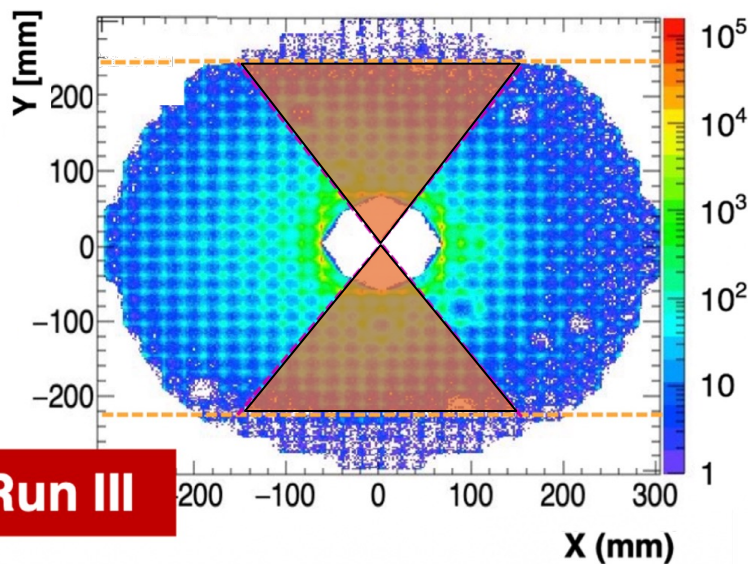
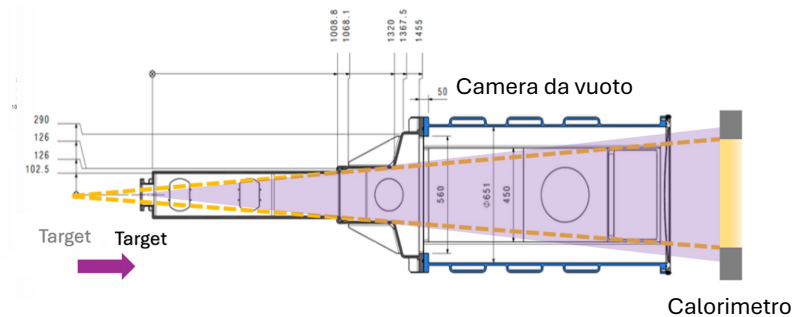
Misura di luminosità [N_{POT}]

- Monitorare la perdita di risposta con l'**irraggiamento** [secondo vetro al Pb di riferimento, impulsatore LED]
- **Minimizzare** perdita di energia e le sue variazioni per es. dovute dal movimenti dello spot del fascio
- Misura indipendente con corrente delle **micromegas**
- Migliorare il noise e la ricostruzione del **target; calibrazione** vs. posizione

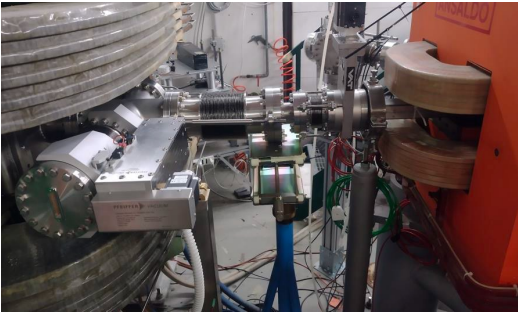


Vedi presentazione di
William Natale

Da Run III a Run IV



Da Run III a Run IV

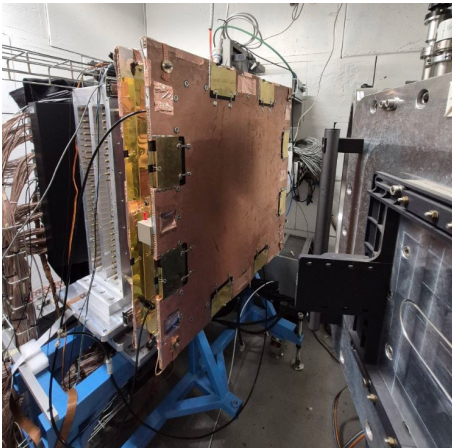
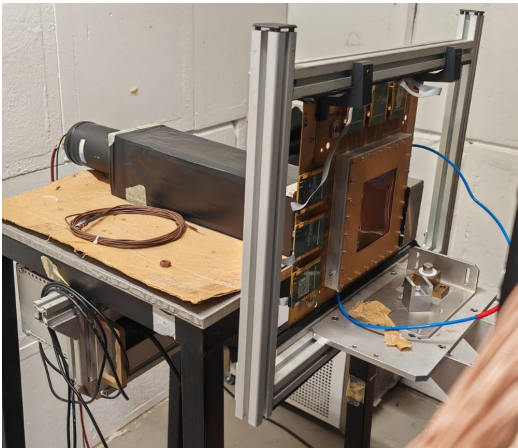
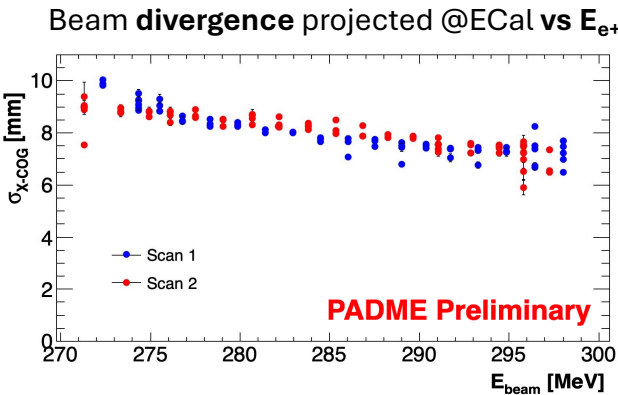
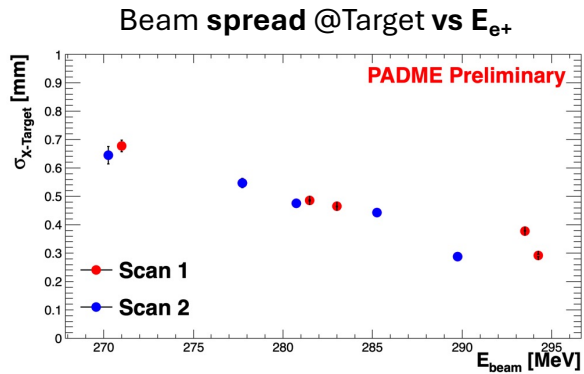


Incremento di accettazione [preliminare]:

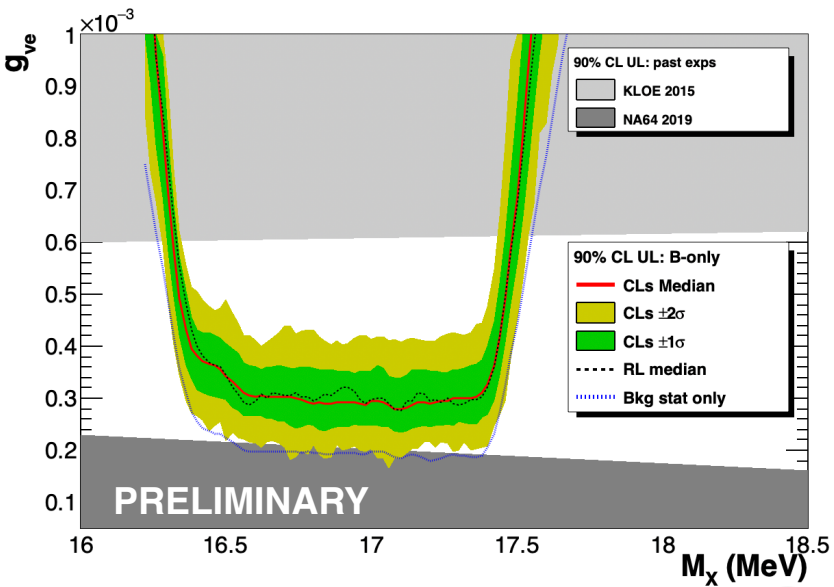
Run III: $N_2 = 3.705 \times 10^{-6}$ (su 0.78×10^{10} POT)

Run IV: $N_2 = 9.948 \times 10^{-6}$ (su 10^{10} POT)

Sorgente	Errore [%]	
	Run III	Run IV [obiettivo]
N_2	0.6	0.3
B	0.35	0.3
N_{POT}	0.55	0.3
TOTALE	0.88	0.5



Run IV – Background only



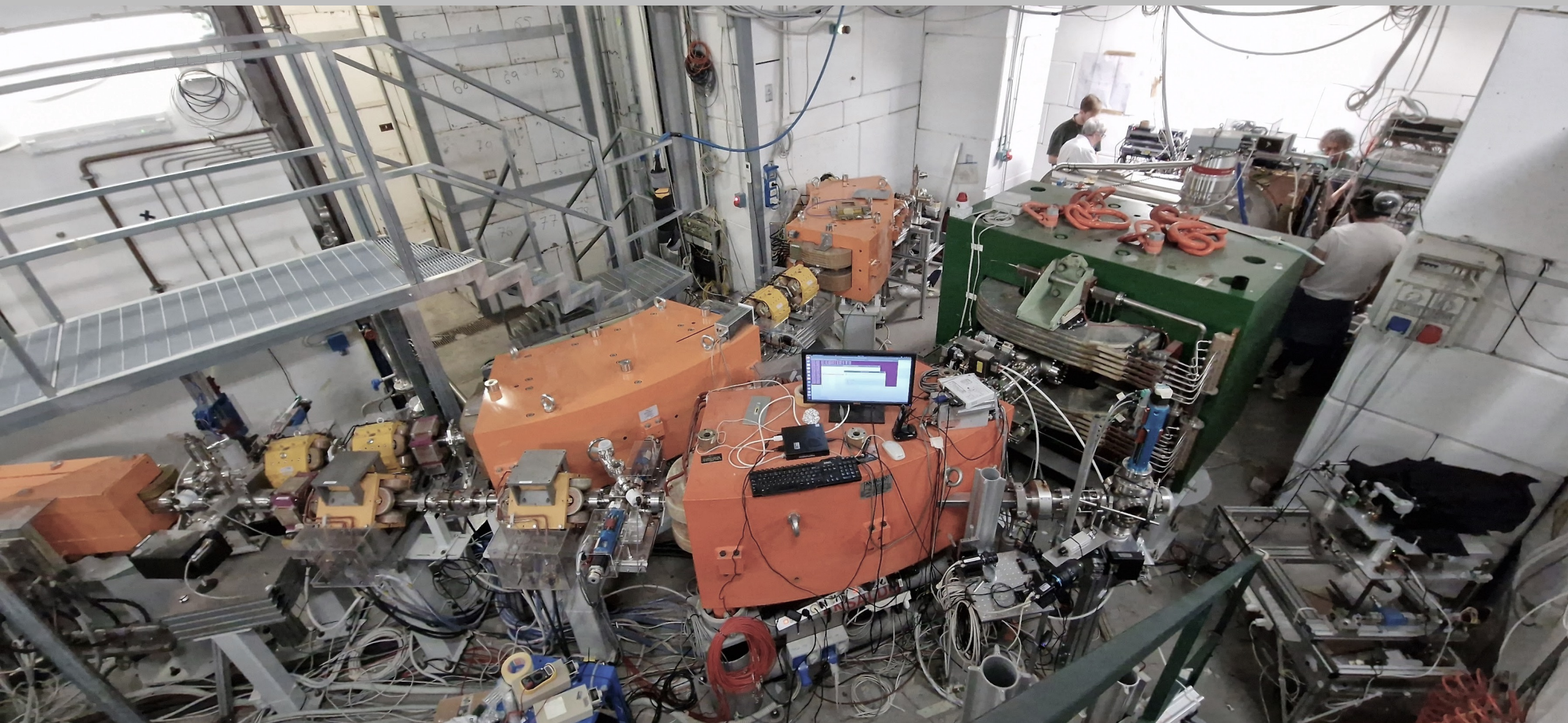
Run III:

- **22+20 punti in energia** ($\approx 1 \times 10^{10}$ POT ciascuno) in due periodi di scan separati di 0.75 MeV
 - 5 punti sotto risonanza, 1 sopra
- Ottenuto un errore sistematico complessivo sotto l'1% su tutto il dataset: circa 0.9%
- Non c'è evidenza statisticamente significativa per l'esistenza di X_{17} , **tuttavia** osservato un **eccesso di eventi**, e quindi un limite indebolito, per $M_X = 16.90$ MeV (**2.5 σ** locale - **1.8 σ** globale)
 - Risultato interpretato con l'approccio dei CLs **frequentisti** per dare **un limite superiore** (ipotesi particella vettoriale)

Run IV:

- **18+18 punti in energia** ($\geq 2 \times 10^{10}$ POT ciascuno) separati di 0.75 MeV
 - Yield di eventi atteso aumentato di circa un fattore 2.5 rispetto a Run III (luminosità+accettanza)
 - 2 punti sopra risonanza, 1 sotto; 15 run no-target
- Al lavoro su:
 - Uso delle informazioni dalle tracce nelle micromegas
 - Misura ridondante dei parametri di fascio

Obiettivo: migliorare la sensibilità di circa un **fattore 2**, sia con una **statistica** maggiore sia grazie a un miglior controllo delle **sistematiche**



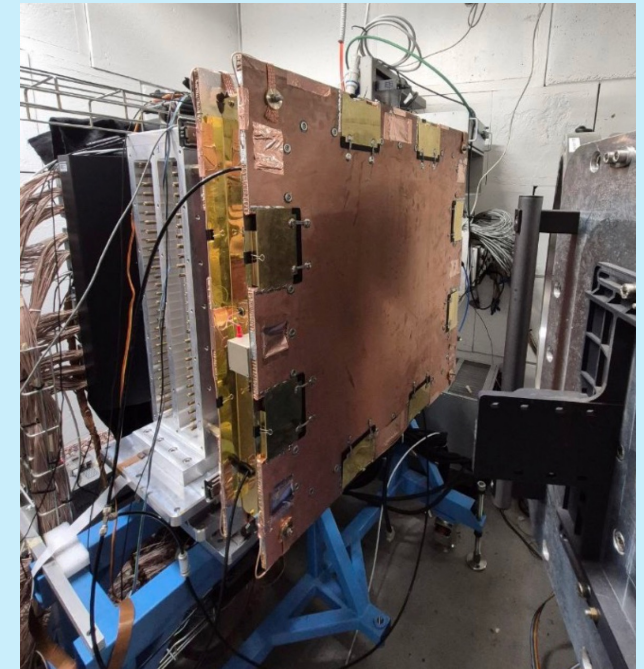
How to improve

Reducing the positron **beam density** would:

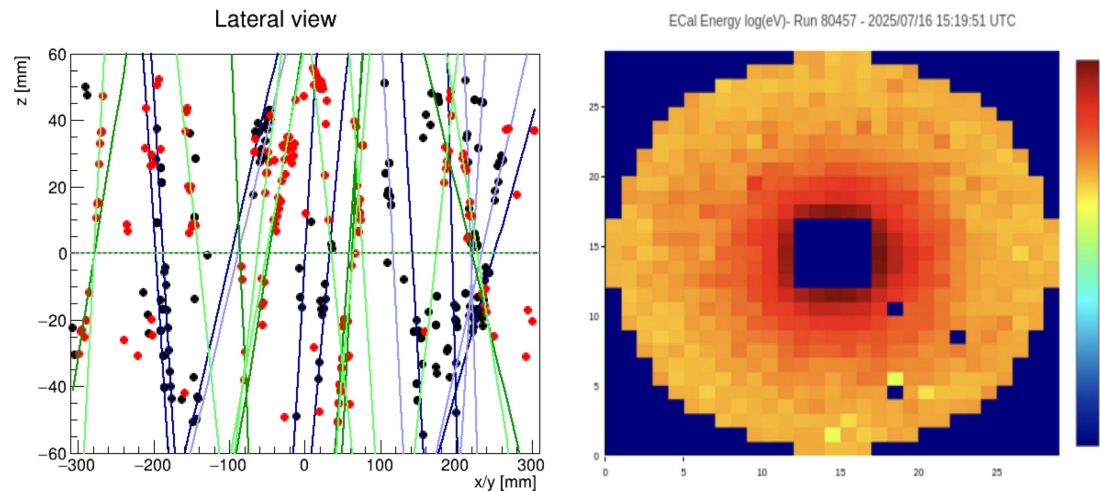
- 😊 Allow reconstructing individual events with **tracking** detectors
- 😊 Dramatically **reduce background** in the calorimeter
- 😞 But **also** require a **trigger** for opening the acquisition window at the right time

Drastically **reduce the material budget** in front of the tracking detectors and calorimeter

AND



PADMME
Micromegas
tracker



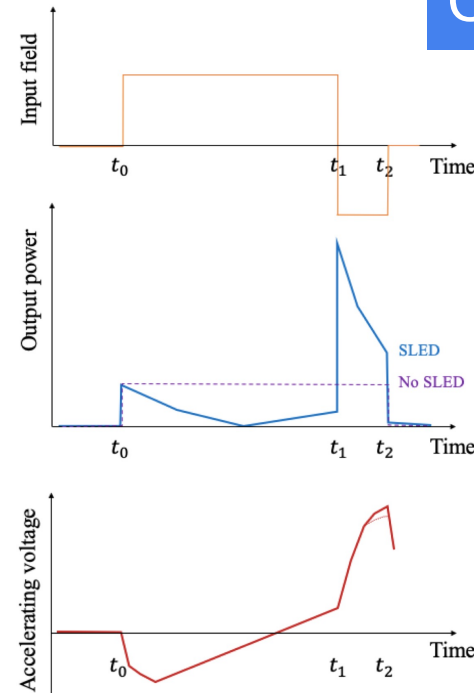
How to improve: increase the beam pulse length

Working on the LINAC only

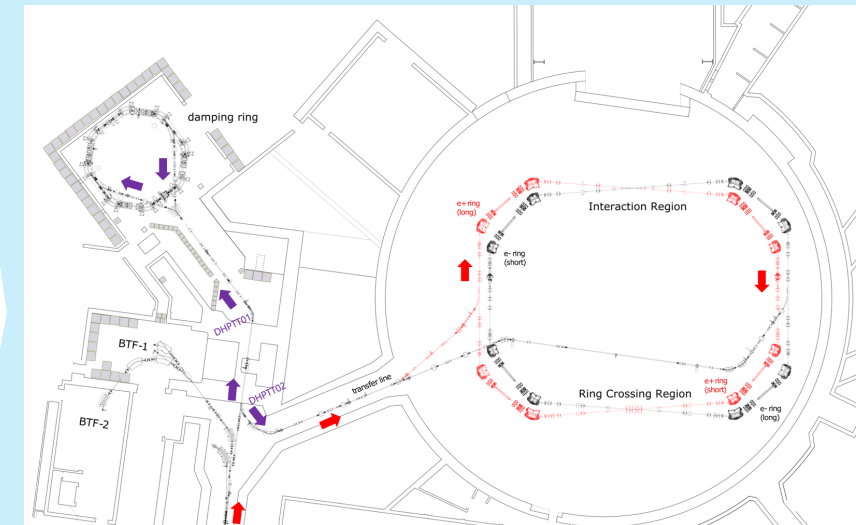
Two main **limitations**:

- **SLED compression**, used to increase the RF power, largely reduces the «flat top» of the accelerating voltage
 - Working “off-crest” allowed us to extend the pulse duration from 10 ns to **250 ns**
[*J.Phys.Conf.Ser.* 874 (2017) 1, 012017]
 - Some **ideas** for further extending the beam pulse put forward in [*arXiv:2001.10258*]
- **Modulator** pulse length limited to $5\ \mu\text{s}$
 - Considering the time needed for **filling** the accelerating cavities
 - Reduction of RF power if detuning/bypassing the SLED's

OR



Using a ring in the DAFNE complex as pulse stretcher



Expected performance vs. impact

	BTF	Extend LINAC RF flat-top	Extraction from damping ring	
			Resonant, RF off	RF knock-out
Beam max. E	500 MeV	320 MeV	400 MeV	
Pulse length	250 ns	2-3 μ s	100→300 μ s	O(ms)
Repetition rate	49 Hz	49 Hz	2 Hz 49 Hz	
				Crystal
Infrastructure		De-tune or by-pass SLED's	Separated injection, extraction lines and new hole to BTF-1 Electrostatic septum	Vacuum goniometer
Gain factor	1	10	16→50 400→1.2·10 ³	10 ² →10 ³

- Running the entire DAFNE complex requires a lot of resources + modifications to the ring and transfer lines: let's consider the extraction **from the damping ring only**
- Gaining **2 or 3 orders of magnitude** requires either running at **49 Hz** or **RF knock-out**
- **Crystal** kick substitute the **electrostatic septum**
- However, very long beam pulses from **RF knock-out** put more stringent requirements on PADME TDAQ, even though there is plenty of time for pre-processing/storing data in between spills

A staged plan

Phase 1

Machine:

- Study the **optics** for resonant extraction from the DR with crystal + existing magnetic septa
- Build the **vacuum goniometer + holder + crystal** for ~ 1 mrad kick

PADME:

- Test **new readout** or **trigger** system for O(ms) pulses

Phase 2

Machine:

- **Remove** part of the transfer-line towards the main rings
- **Test** the extraction:
 - RF off: up to $300 \mu\text{s}$ at **2 Hz**
 - RF knock-out: try to further extend beam pulses

PADME :

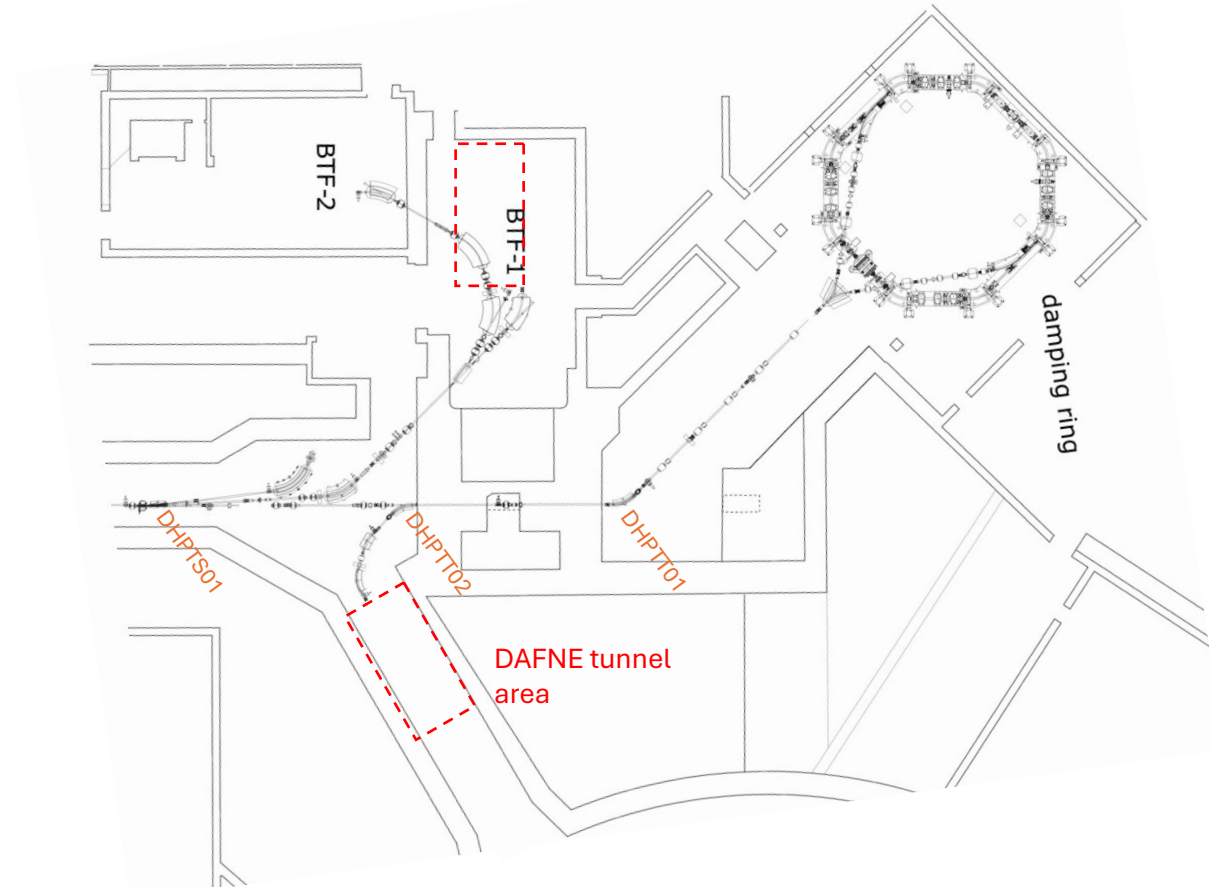
- Procure **new boards** and crates or implement **trigger**

Phase 3

- Move PADME setup to the “DAFNE tunnel” area
- Commission detectors and TDAQ
- **Take data**

General rationale:

- 👎 Give up civil engineering, new transfer lines, installing new magnets
- 👍 Use as much as possible existing infrastructure



Moreover:

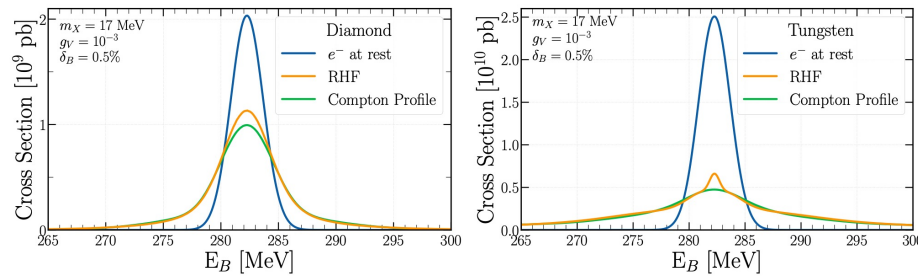
- 😊 Completely decouple from BTF-1 and BTF-2 operations
- 😊 Do not occupy DAFNE main hall

How to improve: signal shape

Limiting factor:

electrons motion spread $\otimes$ **positron beam momentum spread**

Change **target material** to reduce electron motion and decrease beam **energy spread**



[Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 261801]

→ Be, Li, ... target

