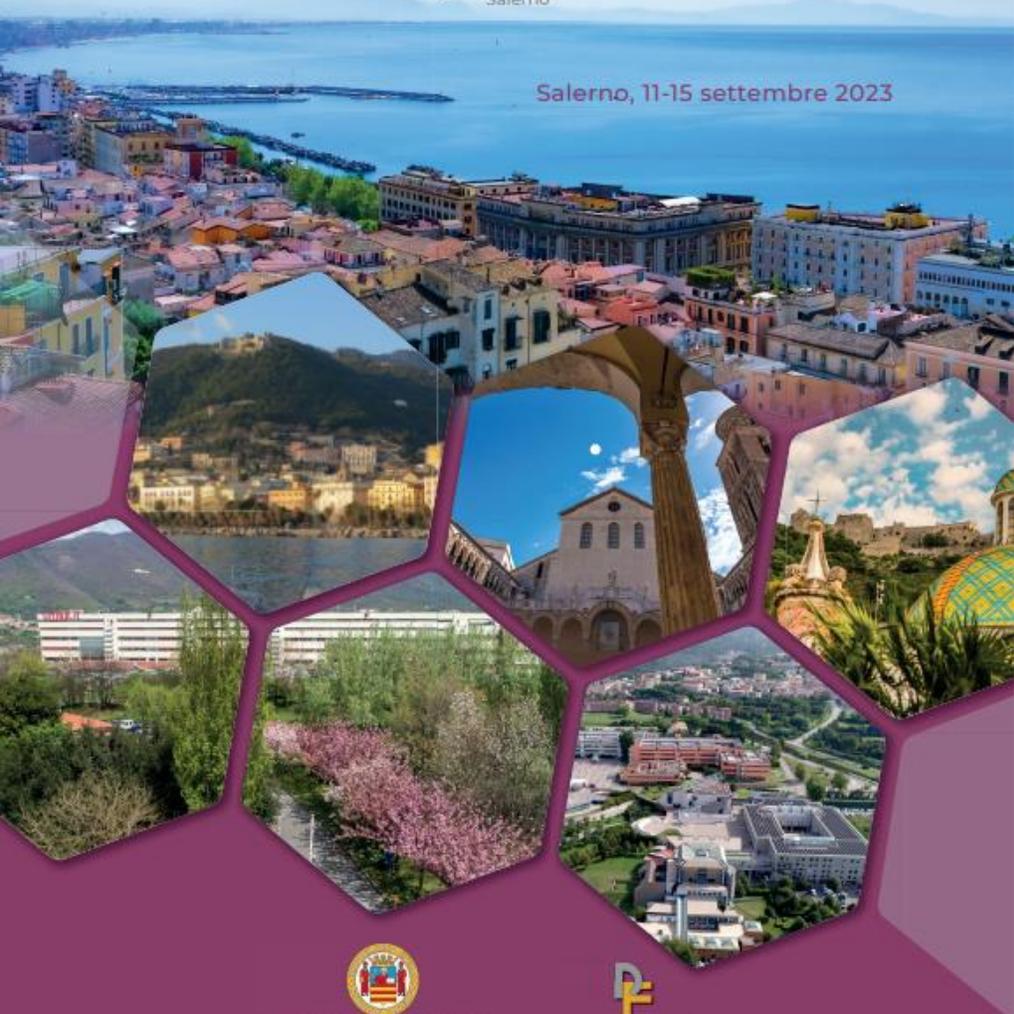




109° CONGRESSO NAZIONALE
Società Italiana di Fisica



Salerno, 11-15 settembre 2023



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI SALERNO



Dipartimento di
Fisica E.R. Caianiello



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Studio della produzione risonante del bosone X_{17} presso l'esperimento **PADME**

Marco Mancini – LNF INFN per la collaborazione PADME
15 settembre 2023

marco.mancini@Inf.infn.it

- La ricerca del Fotone Oscuro A' @PADME
- **P**ositron **A**nnihilation into **D**ark **M**atter **E**xperiment
- L'anomalia di X_{17} @PADME e la ricerca risonante
 - **II Run III**
- Conclusioni e prospettive future

Il **Fotone Oscuro A'** può essere descritto come un portale massivo e neutro tra il Modello Standard e il Settore Oscuro:

$$\mathcal{L} \sim g_V q_f \bar{\psi}_f \gamma^\mu \psi_f A'_\mu$$

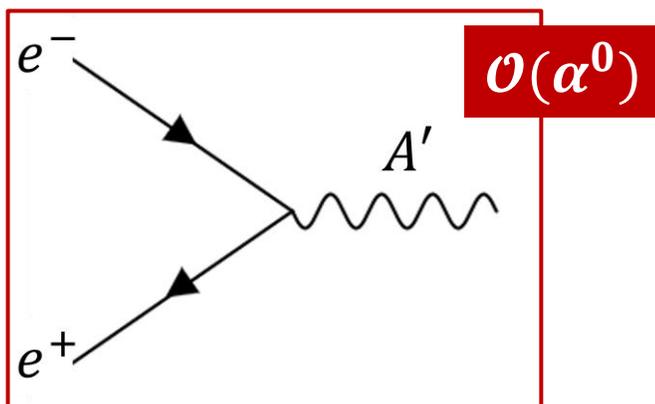
$g_V \ll 1 \rightarrow$ nascosto/oscuo

Produzione di A' tramite due differenti meccanismi, annichilazione ed emissione:

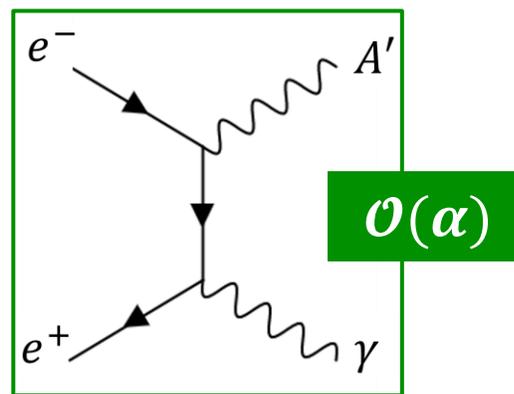
- **Annichilazione risonante:** $e^+ e^- \rightarrow A' \rightarrow \sigma_{res}(E_{e^+}) = \frac{12\pi}{m_{A'}^2} \frac{\Gamma_{A'}^2/4}{(\sqrt{s}-m_{A'})^2 + \Gamma_{A'}^2/4}$
- **Produzione associata:** $e^+ e^- \rightarrow \gamma A'$
- **Emissione radiativa A' -strahlung:** $e^\pm Z \rightarrow e^\pm Z A'$

[Nardi et al. Phys. Rev. D 97, 095004](https://arxiv.org/abs/1703.07332)

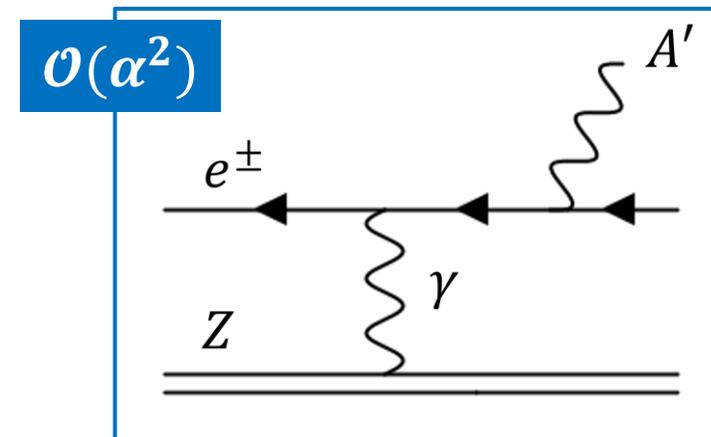
L'annichilazione risonante è accessibile solo tramite esperimenti con fascio di positroni



15/09/2023



Studio del bosone X17 presso l'esperimento PADME
Marco Mancini

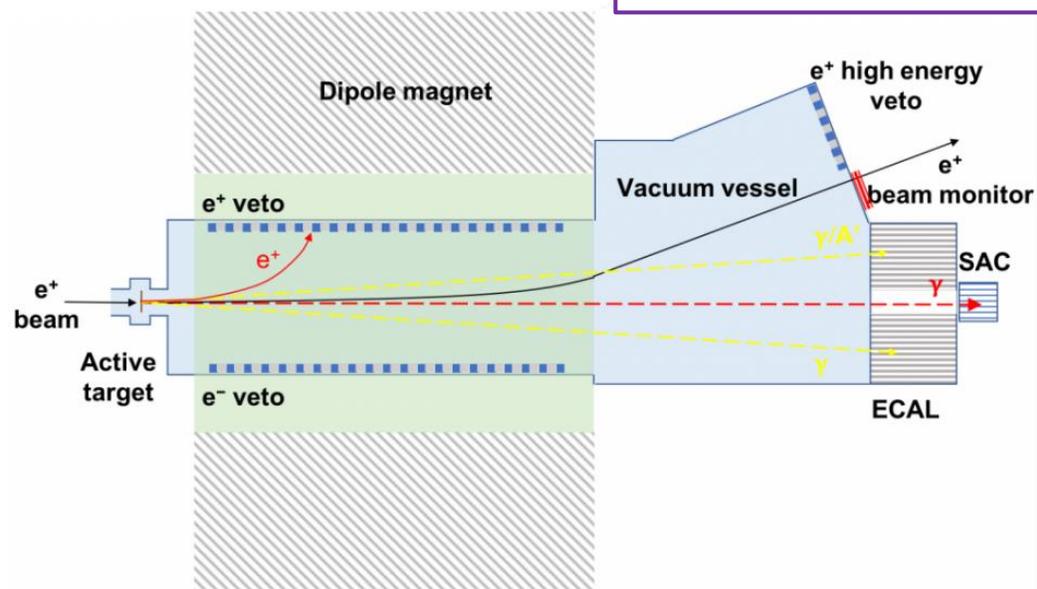


PADME si trova @Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) e ricerca gli A' nel processo $e^+e^- \rightarrow \gamma A'$

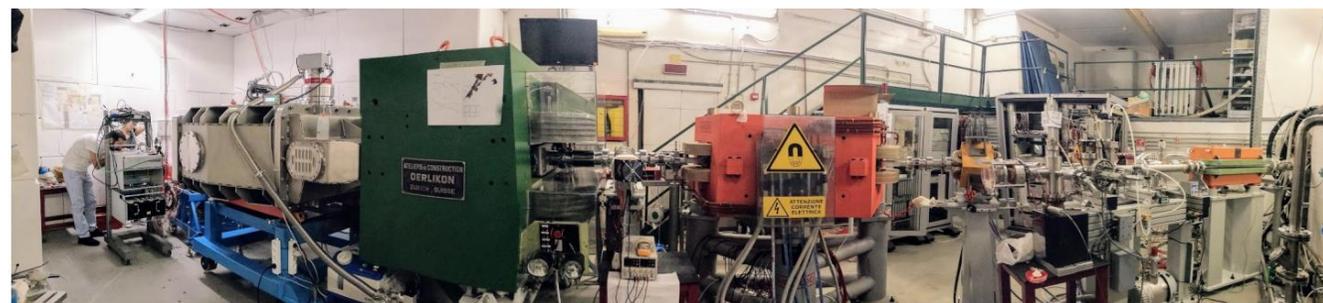


'Il bosone X_{17} nella ricerca italiana: Il caso di PADME e oltre.' C. Taruggi

- Fascio di e^+ ($E < 550$ MeV) su bersaglio attivo di $100\mu\text{m}$ di diamante
- Il **Dipolo magnetico** curva il fascio non interagente e le particelle cariche
- Il **Segnale** $\rightarrow 1\gamma$ nei cristalli di BGO del Calorimetro Elettromagnetico (ECal) & null'altro per la misura di ΔM_{miss}^2 dando accesso a $m_{A'}$
- Il fondo di Bremsstrahlung è soppresso grazie alla presenza del **buco di ECal** e dal Calorimetro a Piccoli Angoli (SAC) installato dietro
- Veto di **scintillatore plastico** per le particelle cariche



[P. Albicocco et al 2022 JINST 17 P08032](#)



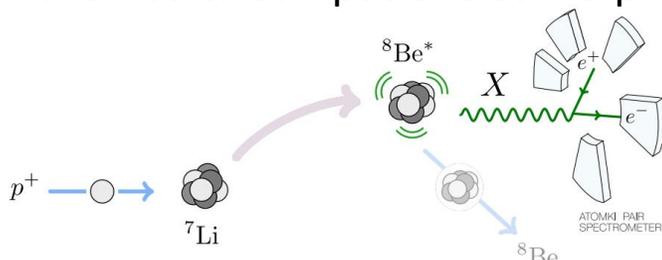
Studio del bosone X_{17} presso l'esperimento PADME
Marco Mancini

Recentemente, la collaborazione ATOMKI ha annunciato l'osservazione di un'anomalia nella correlazione angolare delle coppie e^+e^- emesse per Produzione Interna di Coppie (IPC) nelle transizioni nucleari di ${}^8\text{Be}$, ${}^4\text{He}$ e ${}^{12}\text{C}$.

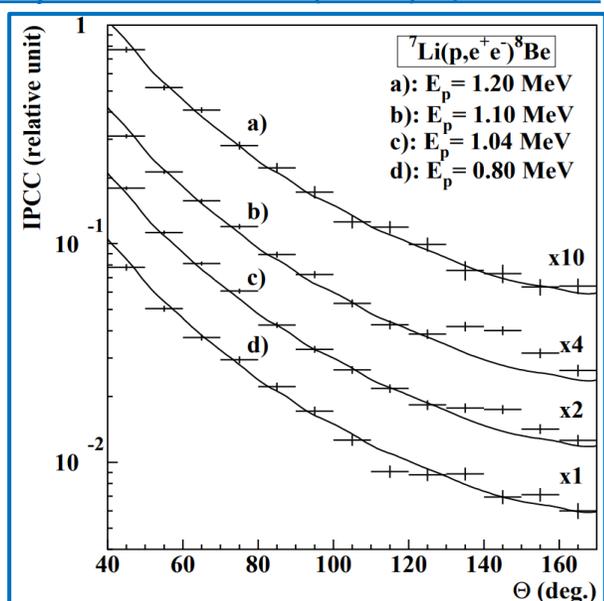
L'anomalia risulta compatibile con la produzione e successivo decadimento di un nuovo mediatore di massa ~ 17 MeV.

[Phys.Rev.C, 104\(4\):044003](https://arxiv.org/abs/1608.03263)

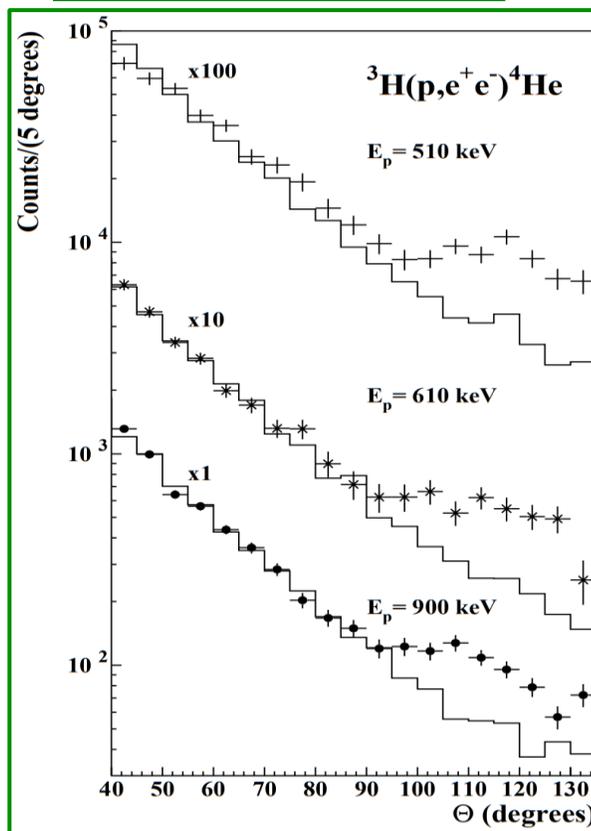
[Phys. Rev. C 106, L061601](https://arxiv.org/abs/1608.03263)



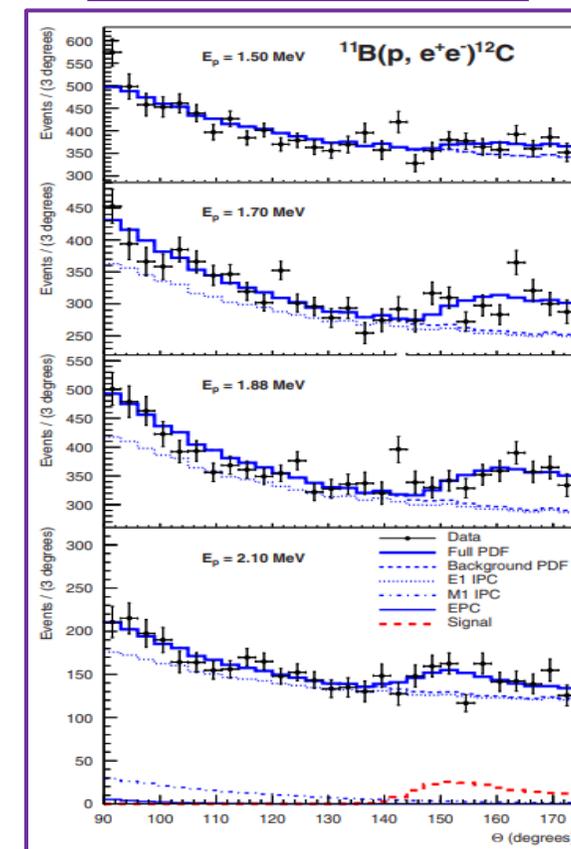
[Phys.Rev.Lett. 116 \(2016\) 4, 042501](https://arxiv.org/abs/1608.03263)



15/09/2023



Studio del bosone X17 presso l'esperimento PADME
Marco Mancini



5

In accordo con le osservazioni di ATOMKI, le principali proprietà di X_{17} sono:

- $m_{X_{17}} \simeq 17 \text{ MeV}$ [Feng et al. Phys. Rev. Lett., 117\(7\):071803, 2016](#)
- $Br(e^+e^- \rightarrow X_{17}) \simeq 5 \times 10^{-6} Br(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma)$
- $\Gamma_V \simeq 0.5 \left(\frac{g_V}{0.001}\right)^2 \text{ eV}$ per il caso vettoriale

Le regole di selezione di spin-parità $J_* = L \oplus J_0 \oplus J_X$ e $P_* = (-1)^L P_0 P_X$ sono necessarie per identificare la natura del nuovo mediatore.

[Come proposto da J. Feng in Phys.Rev.D 102 \(2020\) 3, 036016](#)

N_*	J_*^P	Scalar X17	Pseudoscalar X17	Vector X17	Axial Vector X17
$^8\text{Be}(18.15)$	1^+	\times	\checkmark	\checkmark	\checkmark
$^{12}\text{C}(17.23)$	1^-	\checkmark	\times	\checkmark	\checkmark
$^4\text{He}(21.01)$	0^-	\times	\checkmark	\times	\checkmark
$^4\text{He}(20.21)$	0^+	\checkmark	\times	\checkmark	\times

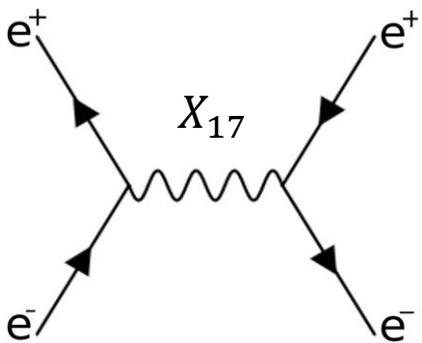
^{12}C Last results

[Phys. Rev. C 106, L061601](#)



Utilizzare la produzione risonante per cercare decadimenti visibili di X_{17} in coppie e^+e^-

LNF è attualmente l'unico laboratorio in grado di fornire un fascio di positroni con $E_{beam} < 500$ MeV



$$\sigma_{res} \propto \frac{g_{\tilde{\nu}_e}^2}{2m_e} \pi Z \delta(E_{res} - E_{beam})$$

La **produzione risonante** scala solamente con Z e perciò è dominante rispetto a quella associata e radiativa
 Per studiare $X_{17} \rightarrow e^+e^-$ alla risonanza, la \sqrt{s} deve essere il più vicina possibile alla massa attesa

$E_{res} = \frac{m_{X_{17}}^2}{2m_e} \rightarrow$ È richiesta una procedura di **scan** dell'energia del fascio di e^+

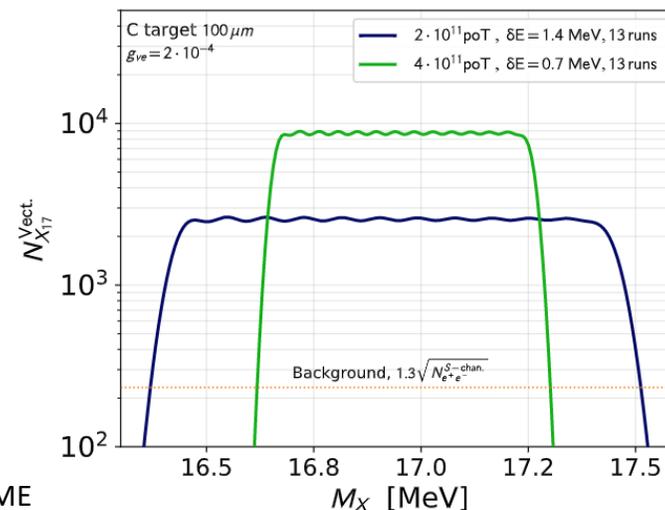


La **strategia di analisi**: cambiare l'energia del fascio, fittare il fondo, calibrare la luminosità e cercare la risonanza

$$N_{X_{17}}^{perPoT} \simeq \frac{g_{\tilde{\nu}_e}^2}{2m_e} \ell_{tar} \frac{N_A \rho Z}{A} f(E_{res}, E_{beam})$$

$f(E_{res}, E_{beam})$ dispersione energetica del fascio

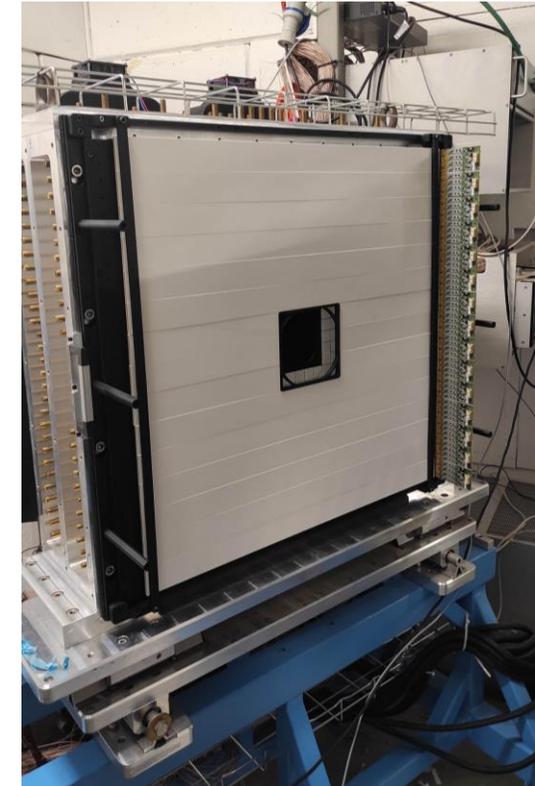
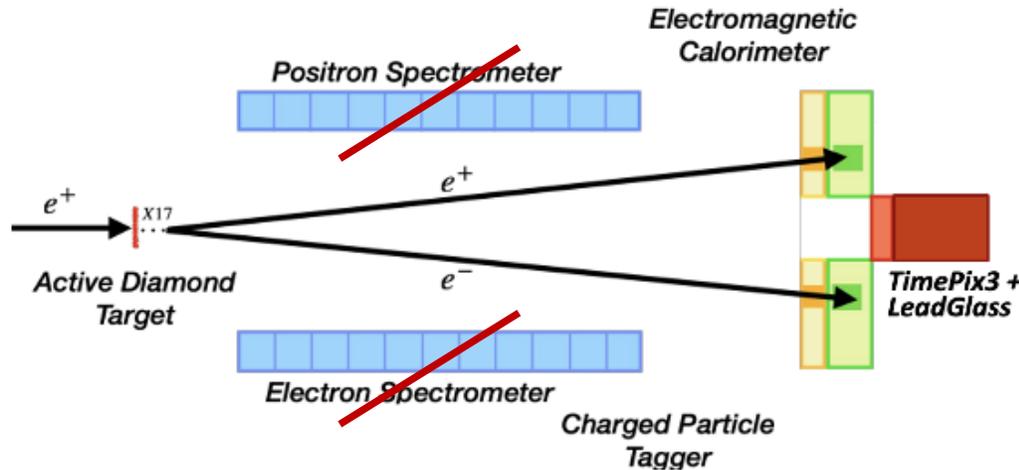
\rightarrow Distribuzione gaussiana con **dispersione δE**



[Nuovo setup dell'apparato sperimentale PADME per la rivelazione di \$X_{17}\$](#) E. Di Meo

Il fondo è dominato dallo scattering di Bhabha e dalla produzione di coppie $\gamma\gamma$ e viene fittato direttamente dai dati → Modifiche al set-up sperimentale sono necessarie!

- Magnete di PADME spento
- Aggiunta del nuovo rivelatore **ETagger** per identificazione delle particelle cariche
- Sostituzione del SAC con monitor di fascio TimePix3 e cristallo di LeadGlass



Il fondo è dominato dallo scattering di Bhabha e dalla produzione di coppie $\gamma\gamma$ e viene fittato direttamente dai dati \rightarrow Modifiche al set-up sperimentale sono necessarie!

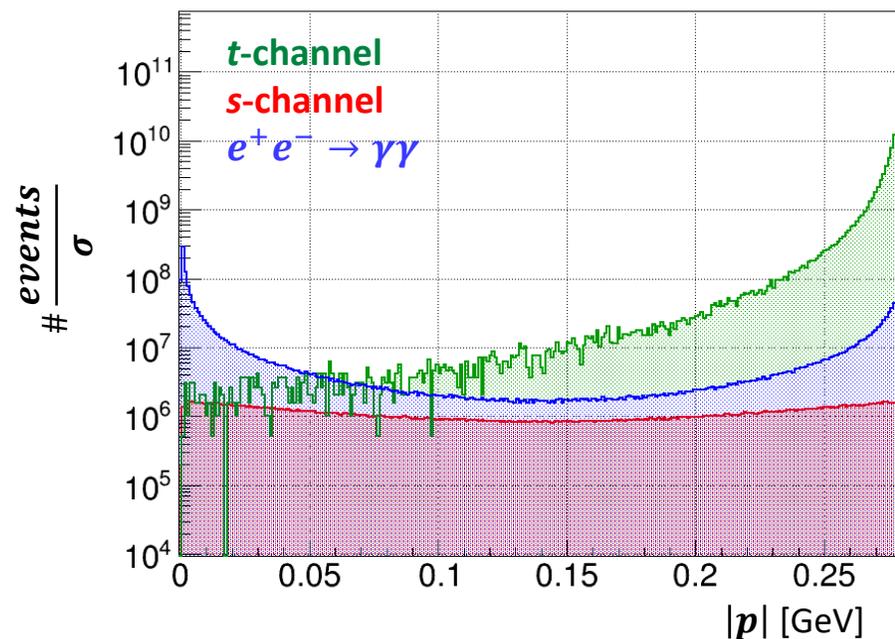
[Nuovo setup dell'apparato sperimentale PADME per la rivelazione di \$X_{17}\$](#) E. Di Meo

- Sezione d'urto approssimata: $\sigma_{Bhabha} = \sigma_{s-ch} + \sigma_{t-ch}$ e processi simulati solo al 1° ordine con **CalcHEP**
- Condizioni di fascio: $N^{POT} = 2 - 4 \times 10^{11}$ e $E_{res} = 282$ MeV $\rightarrow \sqrt{s} = 17$ MeV
- Il meccanismo di produzione di X_{17} si assume abbia la stessa accettazione del canale-s dello scattering di Bhabha
- Sono stati effettuati tagli geometrici ed energetici su entrambe le particelle nello stato finale

Resonant search for the X17 boson at PADME
[Phys. Rev. D 106, 115036](#)
 Luc Darmé,^{1,*} Marco Mancini,^{2,†} Enrico Nardi,^{3,‡} and Mauro Raggi^{4,§}

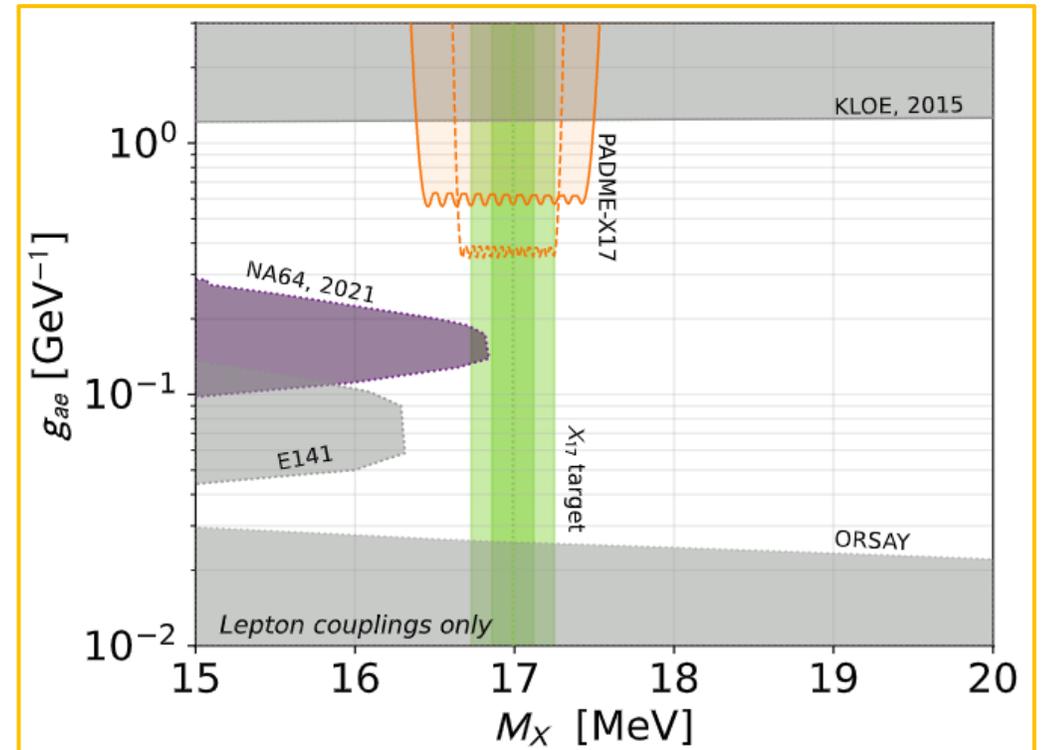
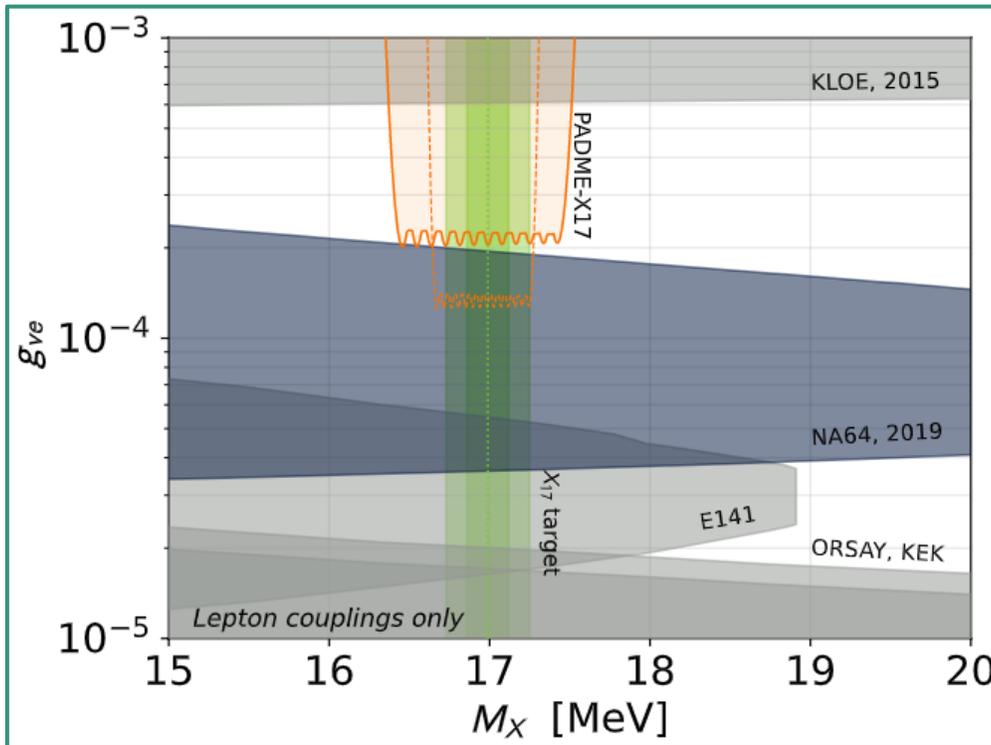
$$g_{V_e} = 2 \times 10^4 \text{ and } \delta E = 1.4 \text{ MeV}$$

BG process	No. of Ev.	No. of Ev. in Acc.	Acc.
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ (t-ch.)	5.4×10^7	6.9×10^4	0.13%
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ (s-ch.)	3.2×10^4	6.4×10^3	20%
$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$	2.9×10^5	1.3×10^4	4.5%
$e^+e^- \rightarrow X_{17} \rightarrow e^+e^-$	1250	250	20%



Utilizzando il MC toy e l'accettazione geometrica, si ottengono limiti attesi per entrambi i modelli possibili:

- Modello **Vettoriale**, per il quale ci si aspetta di coprire tutto lo spazio dei parametri ancora libero
- Modello **Pseudoscalare**, nel solo caso in cui un ALP decada in una coppia di leptoni.



[Darmé et al. Phys. Rev. D 106, 115036](https://arxiv.org/abs/2205.01001)

In totale sono stati raccolti $\sim 6 \times 10^{11}$ PoT , corrispondenti a $\sim 10^{10}$ PoT per \sqrt{s} :

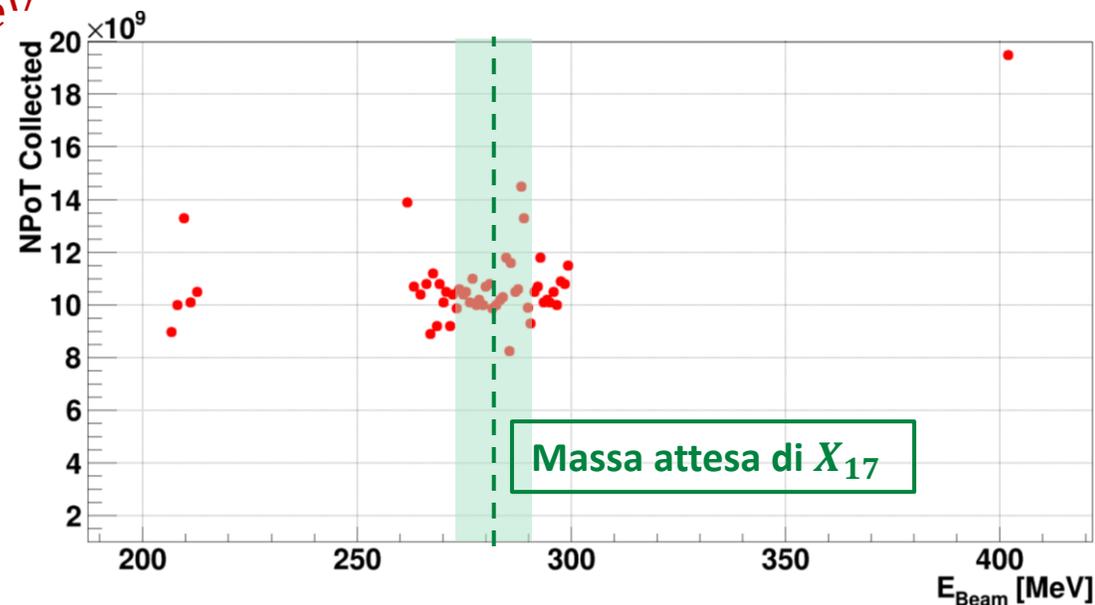
- **47 punti in massa invariante** nell'intervallo di energia del fascio $260 \text{ MeV} < E_{beam} < 300 \text{ MeV}$ e $\delta E_{beam} \simeq 0.75 \text{ MeV}$
- Lunghezza del pacchetto $\Delta t_{bunch} \simeq 200 \text{ ns}$ e molteplicità $N_{bunch}^{PoT} \simeq 2500$
- L'intensità del fascio è stata ridotta di un fattore ~ 10 rispetto ai Run precedenti \rightarrow **Riduzione del fondo di pile-up**

6 punti lontano dalla risonanza: 5 punti sotto and 1 sopra dove la produzione di X_{17} è cinematicamente proibita e soppressa

- **5 punti** con $N^{PoT} \sim 10^{10}$ ciascuno e $205 \text{ MeV} \leq E_{beam} \leq 212 \text{ MeV}$
- **1 punto** con $N^{PoT} \sim 2 \times 10^{10}$ e $E_{beam} = 402 \text{ MeV}$

Questi dataset saranno utili per:

- Confrontare i dati con le predizioni MC
- Studiare il fondo di Modello Standard
- Misurare sezioni d'urto entro il Modello Standard senza eventuali incrementi dovuti a Nuova Fisica
- Affinare la tecnica di ricerca
- Stabilire la precisione della misura della luminosità



Prima analisi della relazione tra le variabili cinematiche E_γ e $\theta_\gamma \rightarrow$ Ottima separazione tra segnale-fondo e corrispondenza temporale.

Quantità sperimentali a disposizione: $N(e^+e^-)$, $N(\gamma\gamma)$, $N(e^+e^- + \gamma\gamma)$, $N^{PoT} \rightarrow$ **Differenti osservabili**

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

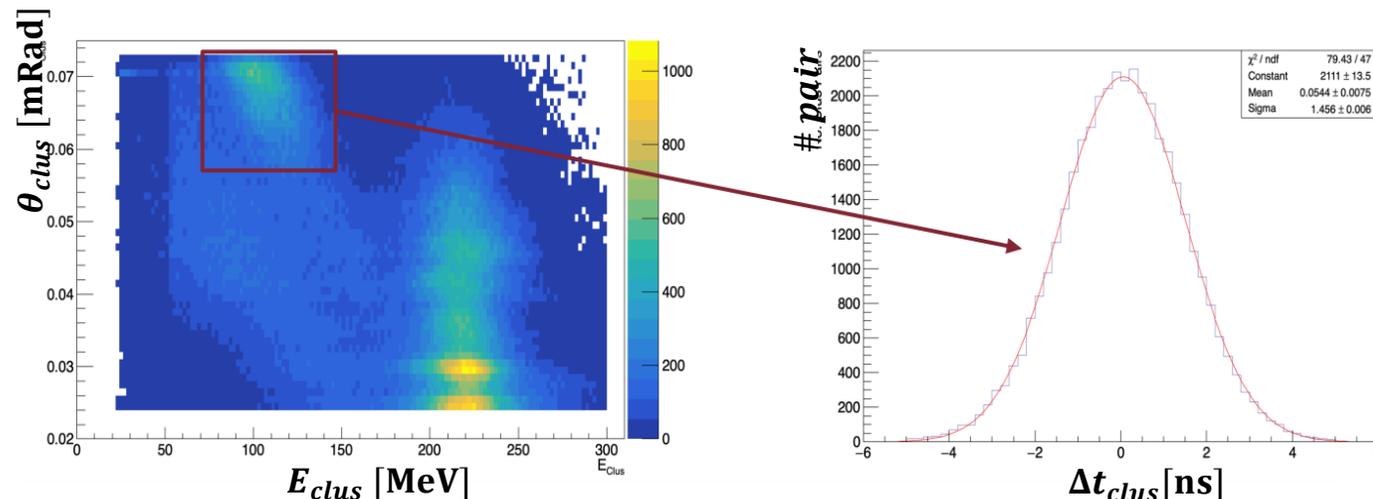
- Accessibile solo se $\varepsilon_{tag}(\gamma) > 95\%$
- È richiesto un alto controllo sui sistematici di PID e N^{PoT}

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

- Errore su PID assente, incremento del 20% del fondo \rightarrow La significanza peggiora dell'8%
- È richiesto un alto controllo sui sistematici di N^{PoT}

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

- Errore su N^{PoT} assente, parziali cancellazioni dei sistematici. Richiesto un alto controllo su PID e tagging
- L'errore statistico influenza la normalizzazione \rightarrow La significanza peggiora di un fattore 3



Scopo: mantenere al livello del % l'errore sistematico

Il Run III è terminato alla fine del 2022 e l'analisi dati è in corso:

- Lo studio dei punti lontano dalla risonanza permetteranno di ottenere misure di sezioni d'urto entro il Modello Standard a basse energie
- Sulla base delle simulazioni del MC toy, ci si aspetta di porre stringenti limiti alle costanti di accoppiamento di X_{17} con gli elettroni
- L'obiettivo è ottenere risultati preliminari sia sul modello **Vettoriale** che **Pseudoscalare** entro la fine del 2023

Il Run III è terminato alla fine del 2022 e l'analisi dati è in corso:

- Lo studio dei punti lontano dalla risonanza permetteranno di ottenere misure di sezioni d'urto entro il Modello Standard a basse energie
- Sulla base delle simulazioni del MC toy, ci si aspetta di porre stringenti limiti alle costanti di accoppiamento di X_{17} con gli elettroni
- L'obiettivo è ottenere risultati preliminari sia sul modello **Vettoriale** che **Pseudoscalare** entro la fine del 2023

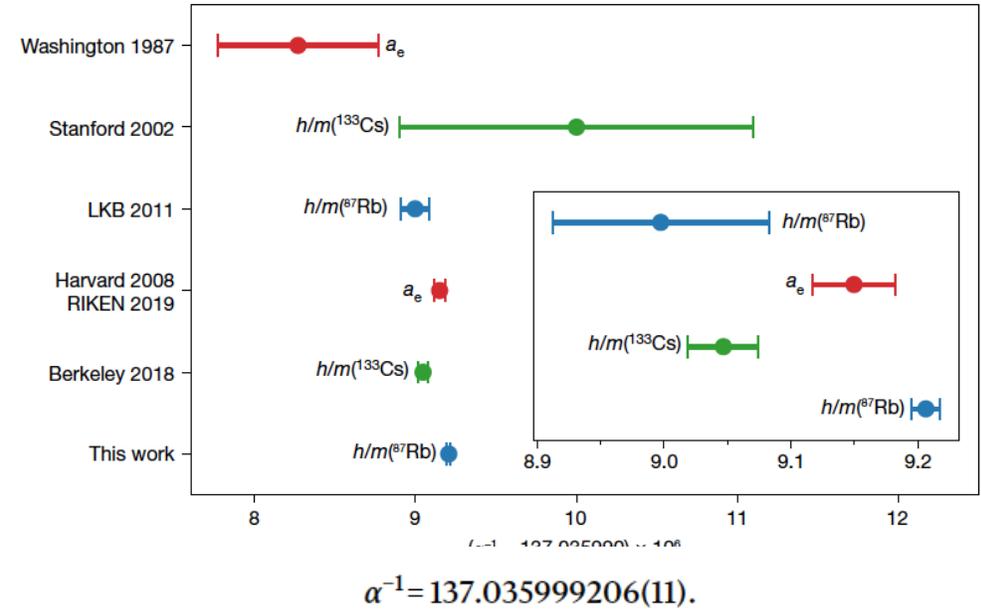
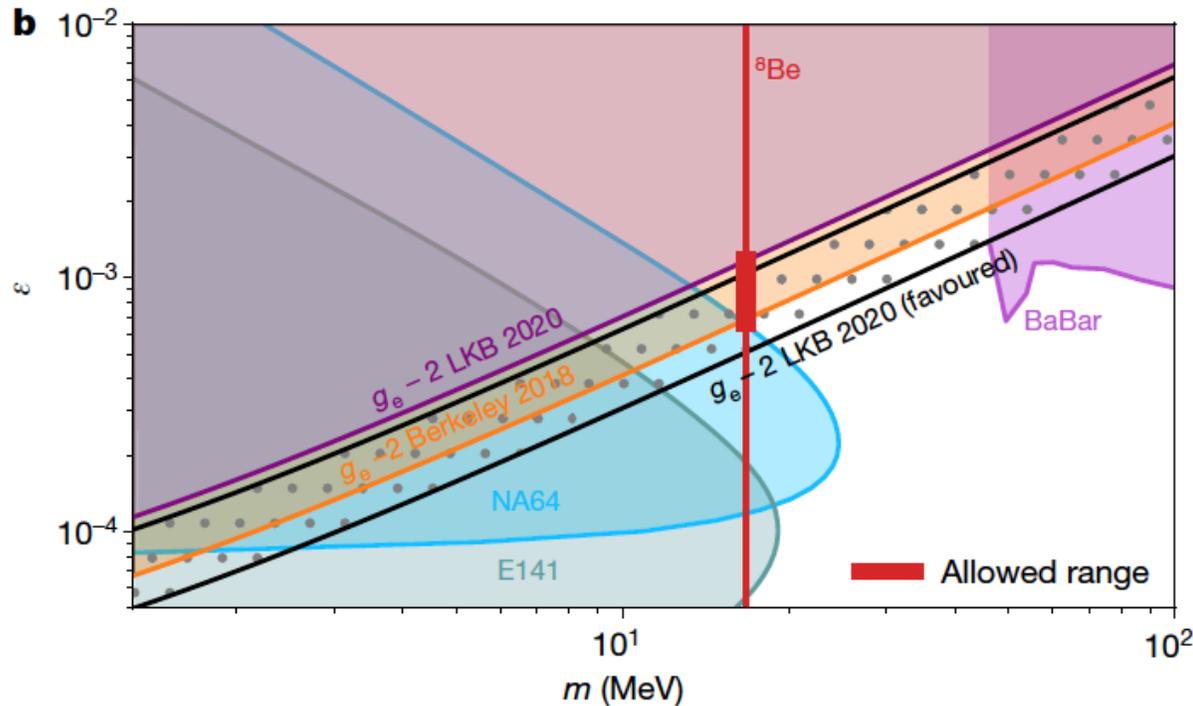
**Grazie per la vostra attenzione
diamo luce al lato Oscuro!**

BACKUP SLIDES



'The Frascati Beam Test Facility.' C. Taruggi

Discrepanza significativa nelle ultime due misure della determinazione di a_e
 → Produzione di un'esclusione per $(g - 2)_e$ che rende accessibile la regione in cui X_{17} è atteso.



The uncertainty contribution from the ratio $h/m(^{87}\text{Rb})$ is 2.4×10^{-11} (statistical) and 6.8×10^{-11} (systematic). Our result improves the

<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2964-7>

experimental measurement $a_{e,\text{exp}}$ (ref. ⁹) gives $\delta a_e = a_{e,\text{exp}} - a_e(\alpha_{\text{LKB2020}}) = (4.8 \pm 3.0) \times 10^{-13}$ ($+1.6\sigma$), whereas comparison with caesium recoil measurements gives $\delta' a_e = a_{e,\text{exp}} - a_e(\alpha_{\text{Berkeley}}) = (-8.8 \pm 3.6) \times 10^{-13}$ (-2.4σ). The uncertainty on δa_e is dominated by $a_{e,\text{exp}}$.

Feng et al. hanno proposto diversi modelli oltre il Modello Standard in grado di descrivere le anomalies del ${}^8\text{Be}$, ${}^4\text{He}$ e ${}^{12}\text{C}$ sulla base della conservazione di **spin-parità** e **momento angolare** [J. Feng et al, Phys.Rev.D 102 \(2020\) 3, 036016](#)

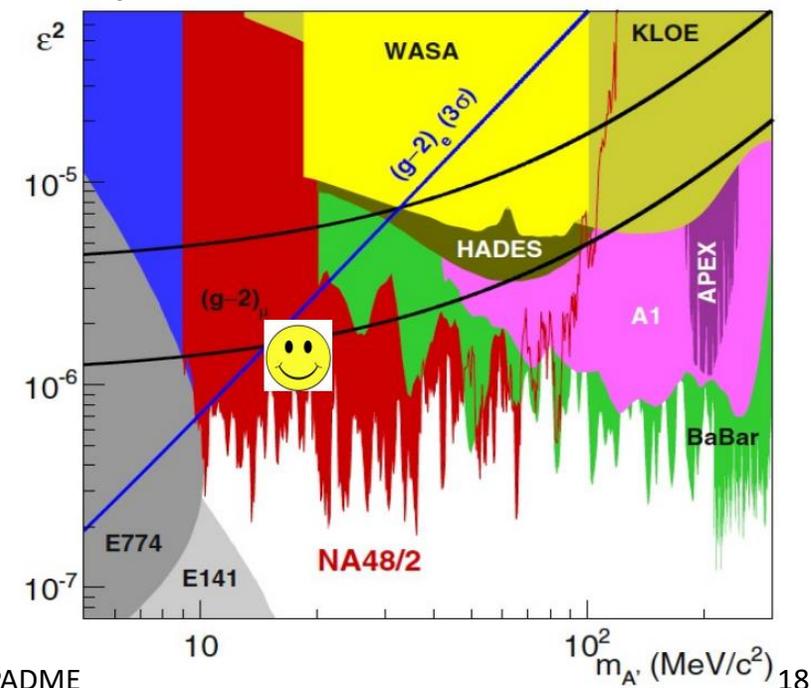


Bosone **vettore protofobico** con $J_{X_{17}}^P = 1^-$

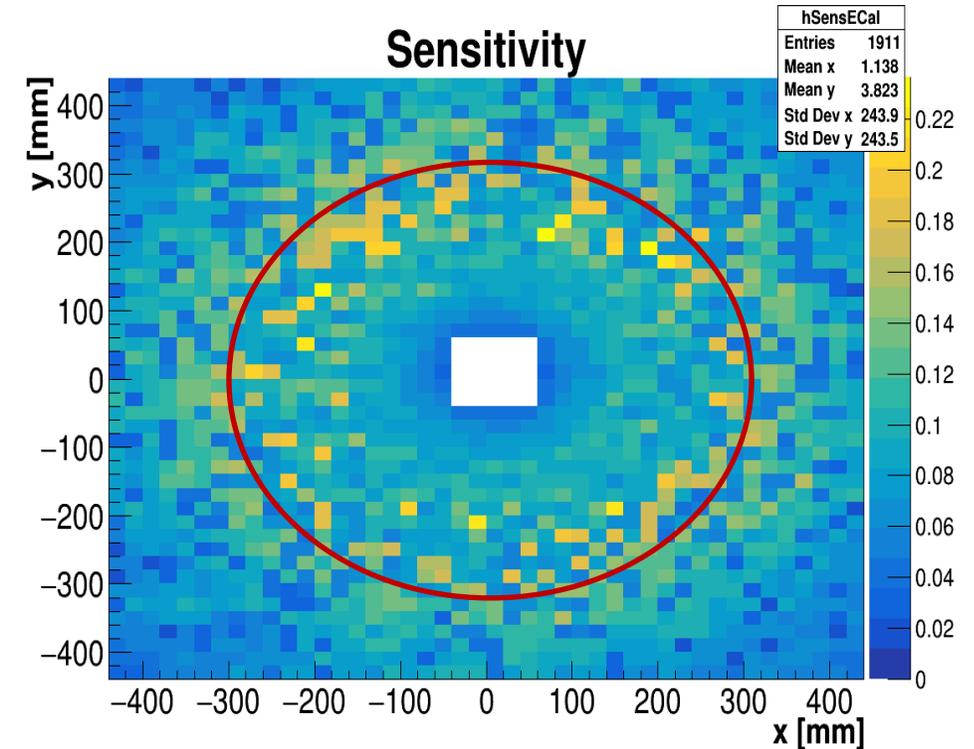
La protofobia è necessaria per tenere in considerazione le limitazioni imposte dall'esperimento NA48/2 determinate dalle osservazione del processo $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$

La collaborazione NA48/2, Phys. Lett. B, 746:178–185

Protofobia: la costante di accoppiamento di X_{17} con pioni e protoni deve essere soppressa per soddisfare tutti i vincoli sperimentali.



- σ_{Bhabha}^{full} incluso il termine di **interferenza** e il diagramma con il **bosone Z**
- $\sqrt{s} = 17 \text{ MeV} \rightarrow E_{beam} = 282 \text{ MeV}$ con **dispersione** $\sigma(E_{beam}) = 0.7 \text{ MeV}$
- Distanza **Bersaglio-Ecal** $\Delta Z = 3720 \text{ mm}$ (aggiunto ETag)
- L'energia degli elettroni nello stato finale nel canale- t è richiesta essere $E_{e_t^-} > 1 \text{ MeV}$ per regolarizzare la divergenza IR
- Tagli geometrici ed energetici su entrambe le particelle (clusters):
 $90 \text{ mm} < R_{max} < 270 \text{ mm} - E > 100 \text{ MeV}$
- L'**ombra del magnete di PADME** è inserita in accettazione



- Tenere in considerazione le unità scintillanti rotte di ECal e l'inefficienza di ricostruzione di quelle esterne
- Tenere in considerazione tutti gli effetti sperimentali che sono presenti nel MC completo
- Considerare $\sigma_{full} = \sigma_{full}(\sqrt{s})$ e $\alpha_{EM} = \alpha_{EM}(\sqrt{s})$ come parametri 'running'
- Simulare gli ordini successivi con un software più sofisticato per migliorare la predizione sulle sezioni d'urto teoriche
- Valutare la σ_{SM} solamente nell'intervallo angolare dell'esperimento

Le linee rosse rappresentano gli attuali tagli radiali, quindi studiando gli eventi in quelle unità scintillanti non si è completamente in grado di ricostruire un cluster

