



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO



Società Italiana di Fisica



Dipartimento di
Fisica E.R. Caianiello

IL BOSONE X17 NELLA RICERCA ITALIANA: IL CASO DI PADME E OLTRE

C. Taruggi per la collaborazione PADME

Congresso Nazionale della Società di Fisica 2023, Salerno

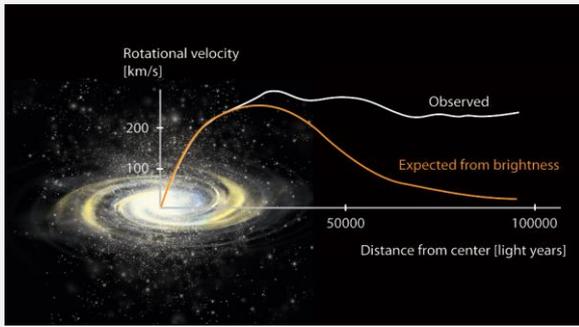


Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati

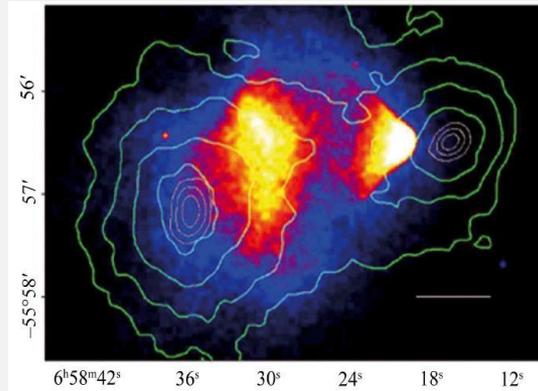
PANORAMICA DELLA PRESENTAZIONE



GRAVITAZIONE E MATERIA OSSERVABILE



GALAXY VELOCITIES DISTRIBUTION



BULLET CLUSTER

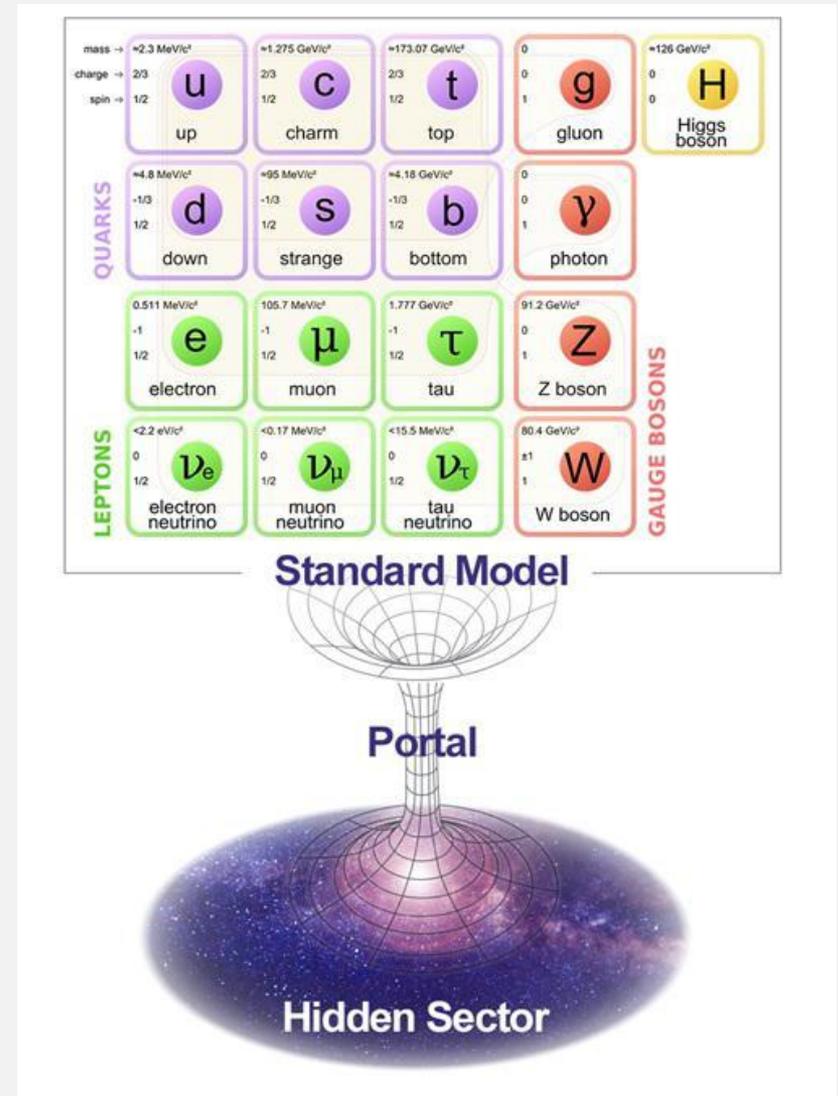


GRAVITATIONAL LENSING

- Il comportamento di alcuni fenomeni su scala cosmologica (velocità di rotazione delle galassie, *bullet cluster*, *lensing* gravitazionale, etc) non è spiegabile sulla base della teoria della gravitazione se si tiene conto della sola materia osservabile
- Al momento nessuna nuova teoria della gravitazione è in grado di spiegare queste osservazioni e conciliarsi al contempo con la teoria della relatività
- Una possibile soluzione è che esista un tipo di materia che interagisce gravitazionalmente con le particelle del Modello Standard, ma non elettromagneticamente
- Questa prende il nome di materia oscura (MO)
- Dopo decenni di esperimenti volti a trovare prove dell'esistenza della MO, non abbiamo ancora ottenuto un risultato condiviso e confrontabile tra varie misure
- **Come mai?**

UNA POSSIBILE SOLUZIONE

- Uno dei molti modi possibili di spiegare la difficoltà che gli esperimenti incontrano nella rivelazione di MO consiste nell'introdurre una nuova interazione tra particelle del Modello Standard (MS) e particelle di MO
- Queste ultime «vivrebbero» in un mondo (*dark sector*) separato da quello in cui vivono le particelle del MS
- Nel modello più semplice, questa interazione, caratterizzata da una costante di accoppiamento molto debole, è mediata da un bosone vettore leptofilico
- In analogia con il fotone del MS, il mediatore prende il nome di *dark photon*, o fotone oscuro (FO)



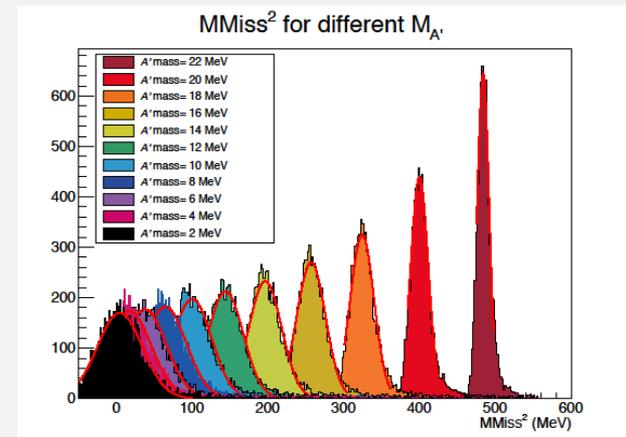
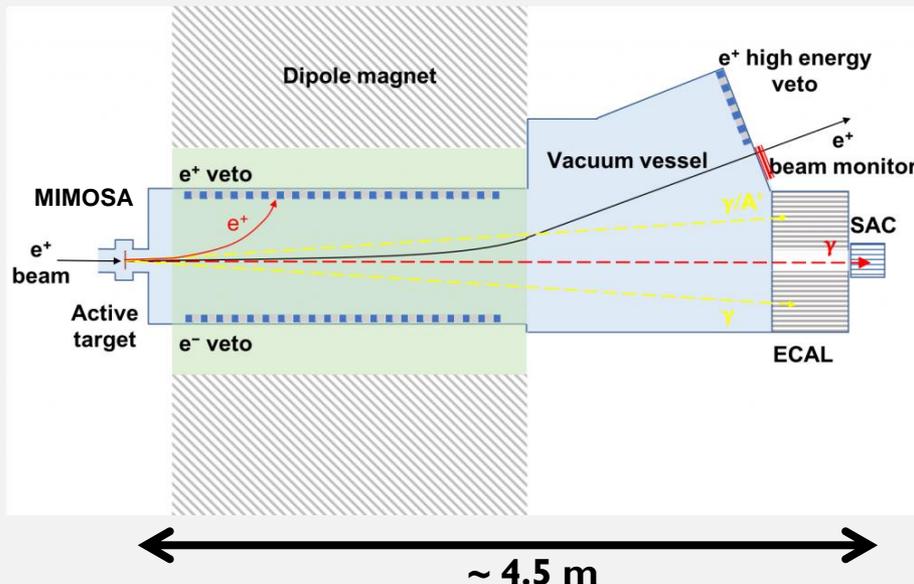
DESCRIZIONE DI PADME

- PADME (*Positron Annihilation into Dark Mediator Experiment*) è nato con lo scopo di investigare particelle di nuova fisica prodotte a seguito dell'annichilazione di un fascio di positroni su un bersaglio in diamante
- È ospitato nella Beam Test Facility (BTF) dei Laboratori Nazionali di Frascati
- Il FO, in particolare, viene essere cercato nel processo

$$e^+e^- \rightarrow \gamma A'$$

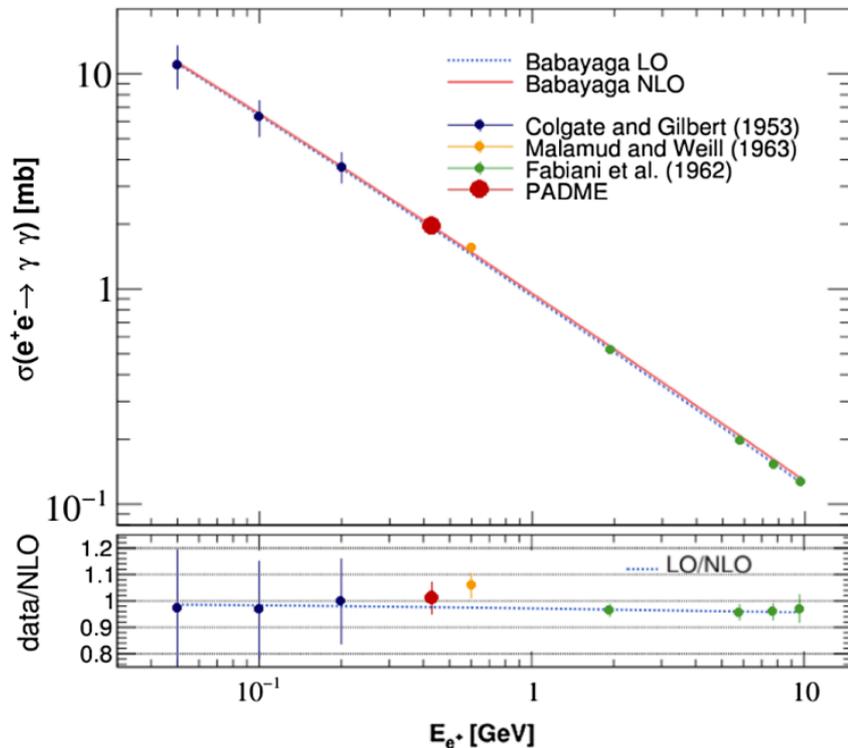
«The Frascati Beam Test Facility»,
C. Taruggi

- Nota l'energia del fascio, e sapendo che il bersaglio è a riposo, è possibile ricostruire la cinematica del processo e produrre dei plot di massa mancante
- L'esistenza del FO verrebbe evidenziata da un picco nella distribuzione di massa mancante, in prossimità della massa che è possibile produrre con un fascio di determinata energia
- Con un'energia massima del fascio di 550 MeV, è possibile arrivare a masse del FO fino a $23.7 \text{ MeV}/c^2$



$$M_{Miss}^2 = (P_{beam} + P_e - P_\gamma)^2$$

RISULTATI DELLA PRIMA PRESA DATI



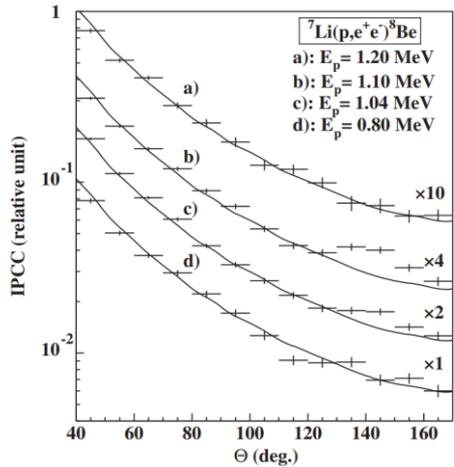
CONFRONTO TRA RISULTATO SPERIMENTALE PREDIZIONE TEORICA PER LA SEZIONE D'URTO DELL'ANNICILAZIONE e^+e^- IN FUNZIONE DELL'ENERGIA DI e^+ , IN APPROSSIMAZIONE ALL'ORDINE LEADING E NEXT-TO-LEADING.

- Le prese dati di PADME sono state effettuate tra il 2018 e il 2020
- Una diversa configurazione di trasporto del fascio è stata introdotta nel luglio 2019, per ridurre la componente di fondo da esso indotta
- Necessarie per calibrare il detector, migliorare l'efficienza di ricostruzione dei dati ed effettuare misure di processi di fisica
- I risultati di queste operazioni sono state riportate in [Phys. Rev. D 107, 012008, I. Oceano](#), dove viene misurata la sezione d'urto del processo $e^+e^- \rightarrow \gamma \gamma$
- Buon accordo tra misura e predizione del Modello Standard

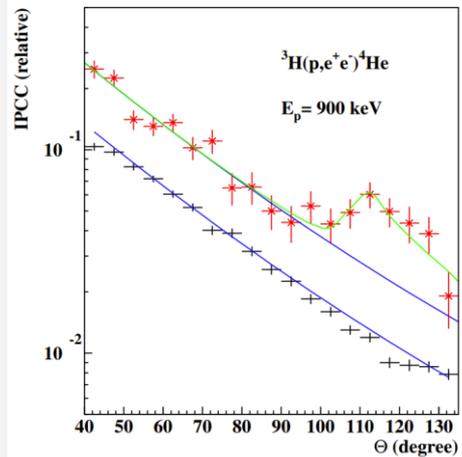
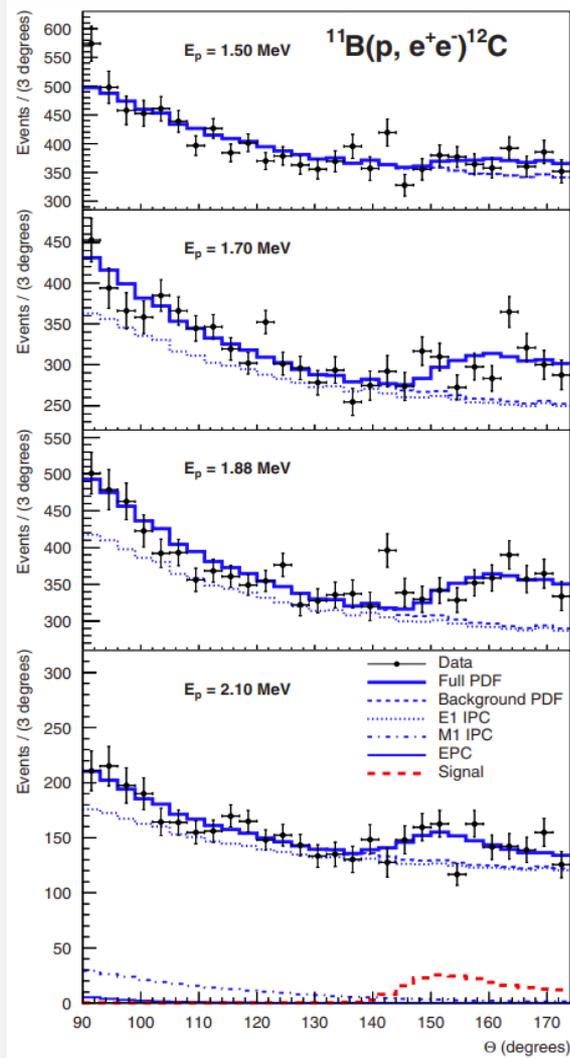
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)) = 1.930 \pm 0.029 \text{ (stat)} \pm 0.057 \text{ (syst)} \pm 0.020 \text{ (target)} \pm 0.079 \text{ (lumi)} \text{ mb}$$

$$\text{QED @ NLO } \sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)) = 1.9573 \pm 0.0005 \text{ (stat)} \pm 0.0020 \text{ (syst)} \text{ mb}$$

L'ANOMALIA OSSERVATA AD ATOMKI



CORRELAZIONE ANGOLARE DELLE COPPIE e^+e^- MISURATA NEL PROCESSO ${}^7\text{Li}(p,\gamma); {}^8\text{Be}$ CON $E_p=18\text{ MeV}$



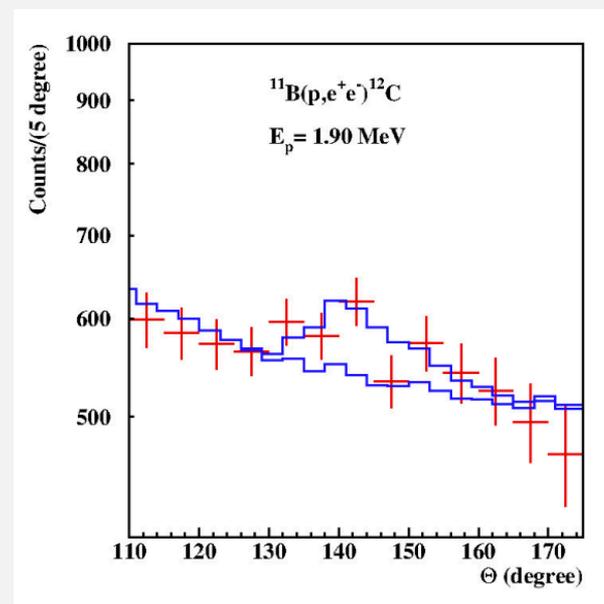
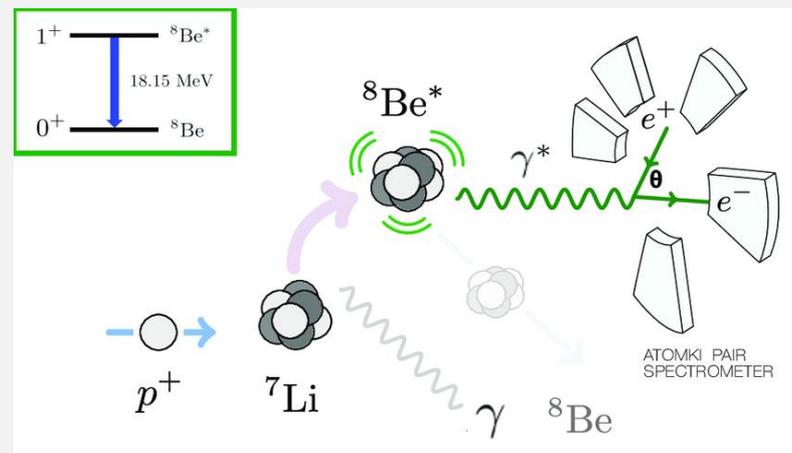
CORRELAZIONE ANGOLARE DELLE COPPIE e^+e^- MISURATA NEL PROCESSO ${}^3\text{H}(p,\gamma); {}^4\text{He}$ CON $E_p=900\text{ keV}$

CORRELAZIONE ANGOLARE DELLE COPPIE e^+e^- MISURATA A DIVERSE ENERGIE DEL PROTONE

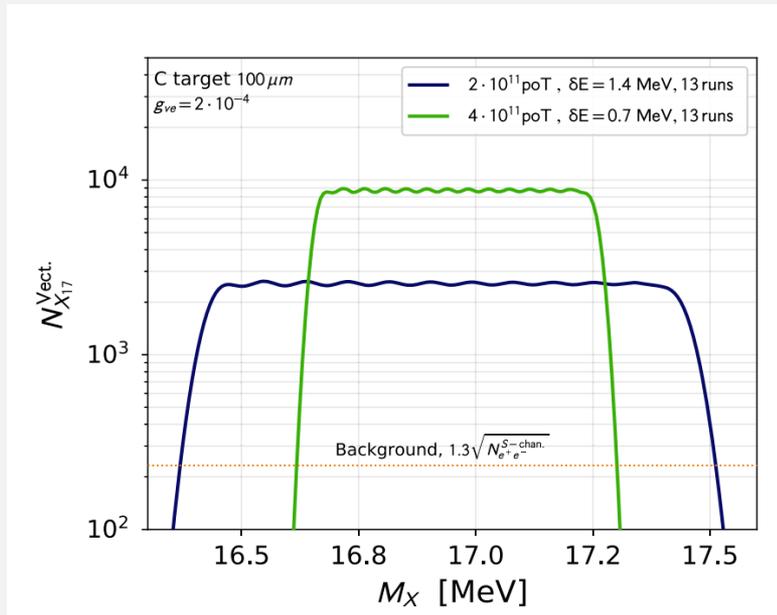
- Studio della diseccitazione di nuclei leggeri tramite IPC (*Internal Pair Creation*), condotto dal gruppo di A. Krasznahorkay presso ATOMKI
- Prima osservazione $\rightarrow {}^8\text{Be}$: un fascio di protoni a diversa energia colpisce un bersaglio di ${}^7\text{Li}$, facendolo transire in uno stato eccitato
- L'emissione angolare delle coppie e^+e^- emesse a seguito del diseccitamento degli atomi ha un andamento decrescente ben definito
- Osservata un'anomalia nell'emissione angolare per atomi di ${}^8\text{Be}$, ${}^4\text{He}$ e ${}^{12}\text{C}$

INTERPRETAZIONE TEORICA DELL'ANOMALIA

- La significatività statistica della misura (6.8σ) non fa pensare a fluttuazioni statistiche
- Possibile spiegazione: nel processo di diseccitazione viene prodotta una particella leggera che, decadendo in e^+e^- , dà luogo all'emissione anomala
- Caratteristiche della particella: massa ~ 17 MeV/ c^2 , profobica, leptofilica, non sappiamo se vettore (spin 1, parità -) o vettore assiale (spin 0, parità +)
- Nuovo risultato sperimentale!
<https://indico.cern.ch/event/1258038/contributions/5538280/attachments/2700698/4687589/X17%20HUS%20ISMD2023.pdf>
(VNU University of Science, Hanoi, Vietnam, ISMD2023)



RICERCA X17 IN PADME



NUMERO DI X17 IN FUNZIONE DI M_X , PER DUE SCAN A STEP DI ENERGIA DIVERSI E CON $g_{ve} = 2 \times 10^{-4}$. LA LINEA ARANCIONE CORRISPONDE ALLA RADICE QUADRATA DEL NUMERO DI EVENTI BHABHA (FONDO IRRIDUCIBILE).

«Studio della produzione risonante del bosone X17 presso l'esperimento PADME», M. Mancini

- **PADME e la BTF hanno la possibilità di cercare X17 in maniera risonante**



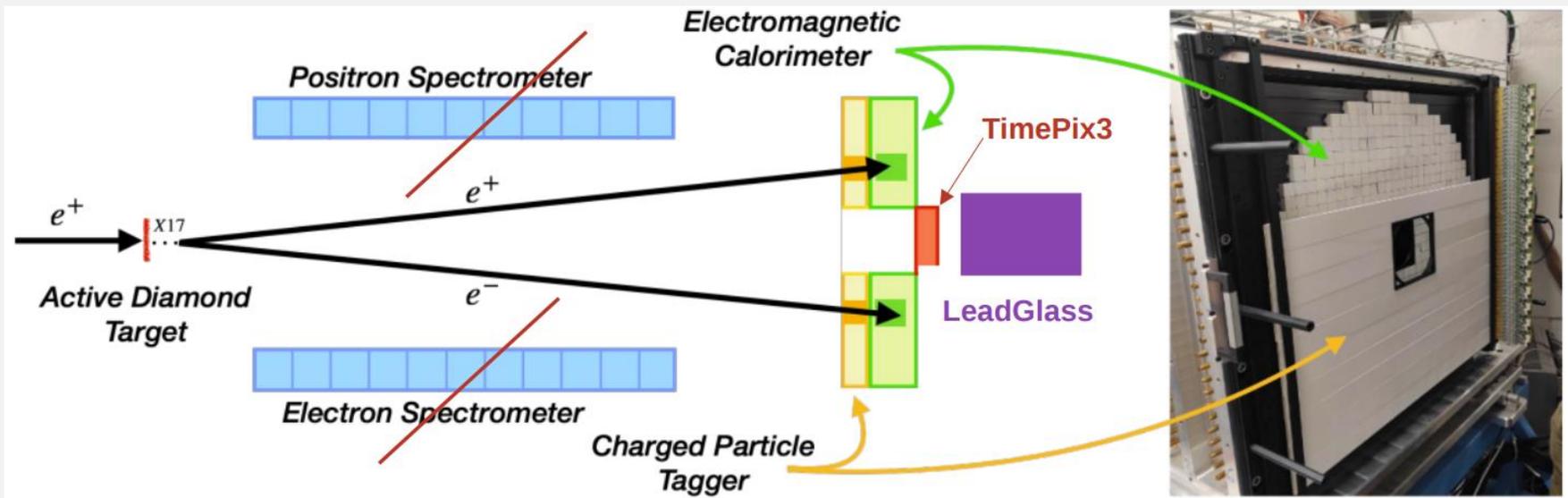
- **In questo modo, la sezione d'urto di produzione di X17 è caratterizzata da un picco molto stretto e ben distinguibile dal fondo**
- **«Resonant search for the X17 boson at PADME», Phys. Rev. D 106, 115036**
- Con un fascio di positroni a 282 MeV è possibile arrivare ad un'energia nel centro di massa $\sqrt{s} \approx 17$ MeV
- Per questo motivo, la presa dati è stata effettuata variando l'energia del fascio nell'intervallo tra i 265 MeV e i 297 MeV, a step di 0.7 MeV (plot verde)
- Parametro fondamentale per l'ottimizzazione del segnale rispetto al fondo → allargamento del fascio

$$N_{X17}^{Vect} \simeq 1.8 \times 10^{-7} \times \left(\frac{g_{ve}}{2 \times 10^{-4}} \right)^2 \left(\frac{1 \text{ MeV}}{\sigma_E} \right)$$

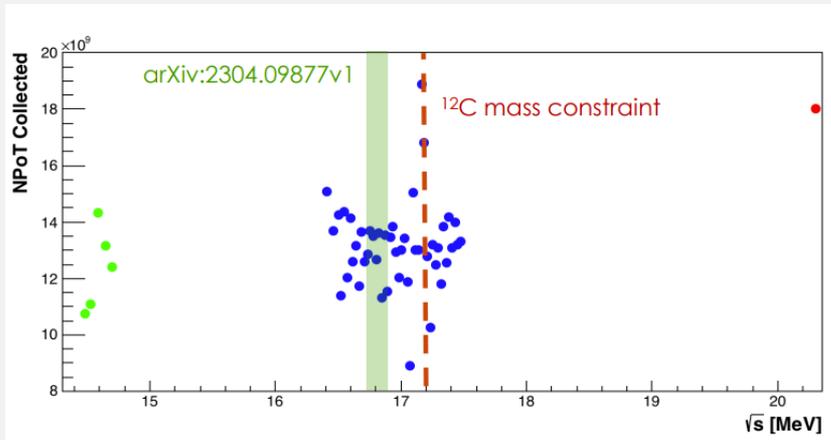
UPGRADE DETECTOR PADME

- Segnale cercato $e^+e^- \rightarrow X17 \rightarrow e^+e^-$
- Principali fondi della misura di X17: *scattering* Bhabha e annichilazione $\gamma\gamma$
- Per cercare le coppie e^+e^- , viene utilizzato ECal, con il campo magnetico spento (massa invariante della coppia e^+e^-)
- Necessario un rivelatore per discriminare i fotoni dalle particelle cariche \rightarrow ETag, barre di scintillatori plastici e SiPM, posizionato davanti a ECal
- SAC rimosso, al suo posto TimePix3 e calorimetro in vetro al piombo per misure di luminosità

«Nuovo setup dell'apparato sperimentale PADME per la rivelazione dell'X17», E. Di Meco



PRESA DATI XI7: RISULTATI PRELIMINARI



BLU: ENERGIE STUDIATE DA PADME

ROSSO: INTERVALLI DI MASSA COPERTI DA ATOMKI

VERDE: INTERVALLO DI MASSA OTTENUTO DAI RISULTATI DEI FIT IN ARXIV:2304.09877V1 (^8Be E ^4He)

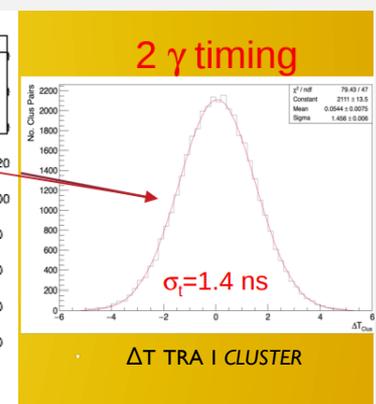
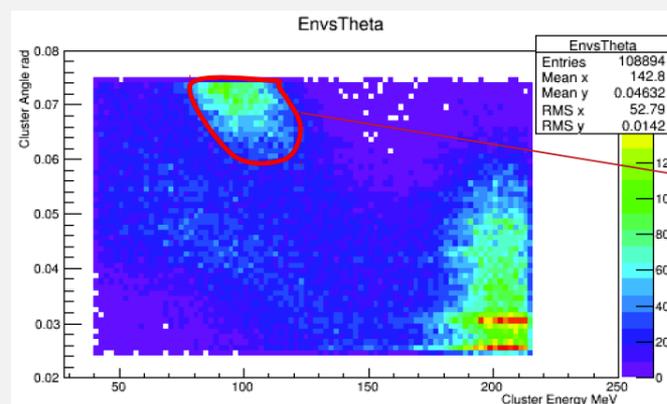
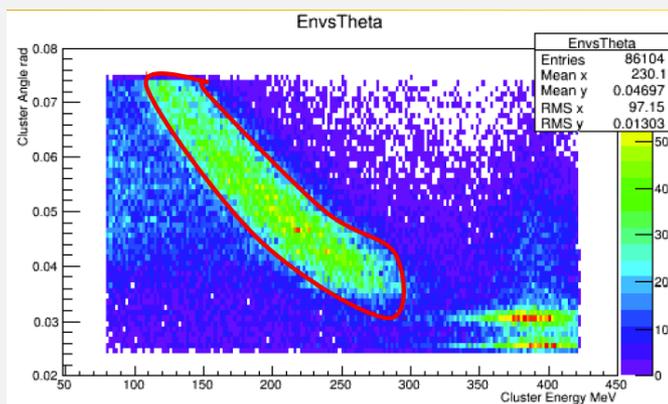
TRATTEGGIO: LIMITE IN MASSA IN ARXIV:2209.10795V2 (^{12}C)

Preso dati fine 2022, 10^{10} positroni su bersaglio per punto di energia:

- 47 punti intorno alla risonanza
- 6 punti fuori risonanza (confronto dati/Montecarlo, controllo sistematici)
- 3 punti senza target, per valutare il fondo

Studi su N_{2clus}/N_{POT}

relazione cinematica tra E_γ and $\theta_\gamma + 2$ cluster in tempo in ECal ($\Delta t < 5$ ns) \rightarrow fondo ben definito, buona separazione dal segnale.

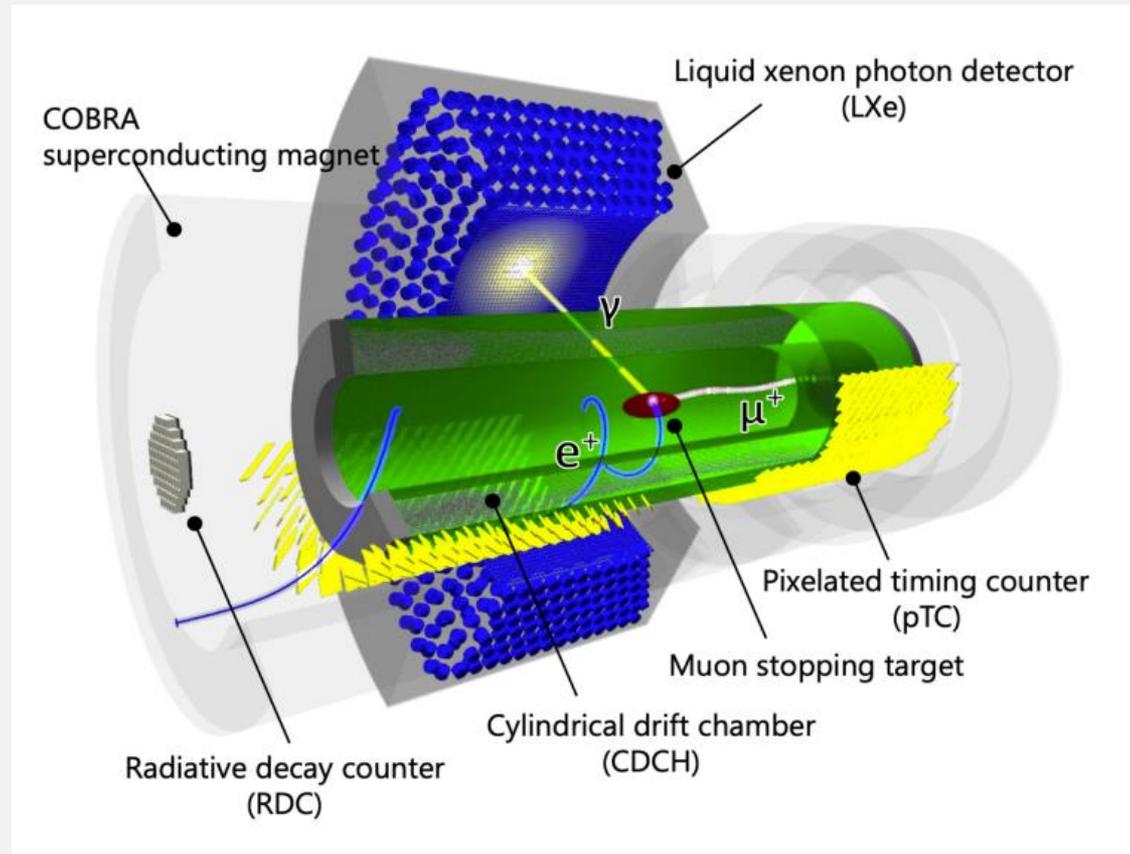


ANGOLO DEL CLUSTER VS ENERGIA DEL CLUSTER AL DI SOPRA DELLA RISONANZA (SINISTRA) E AL DI SOTTO (DESTRA)

X17: ESPERIMENTI ESISTENTI

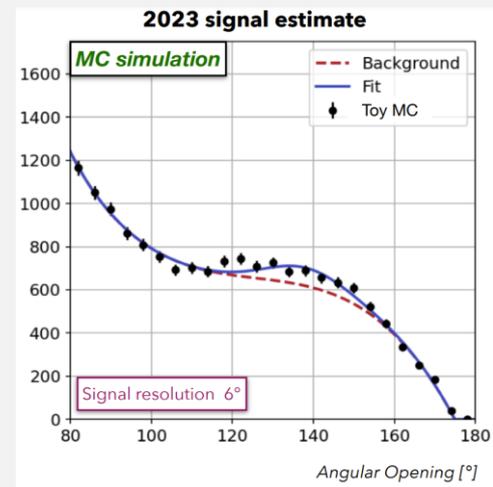
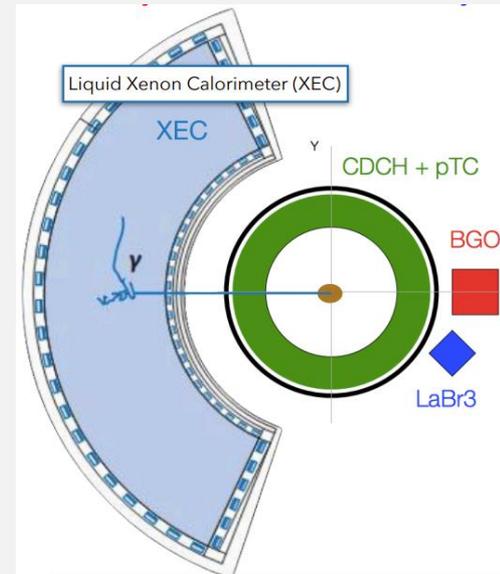
MEG-II

- MEG-II è l'upgrade di MEG, ideato per studiare il decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$, proibito dal MS
- Detector per fotoni \rightarrow xenon liquido (LXe), detector per e^+ \rightarrow spettrometro magnetico (Cylindrical Drift Chamber + Timing Counter + COntant Bending RAdius)
- Lo scopo di MEG-II è di migliorare ulteriormente la misura del *branching ratio* del decadimento di μ^+ (miglior limite stabilito da MEG nel 2013: 4.2×10^{-13} al 90% C.L.)



XI7 A MEG-II

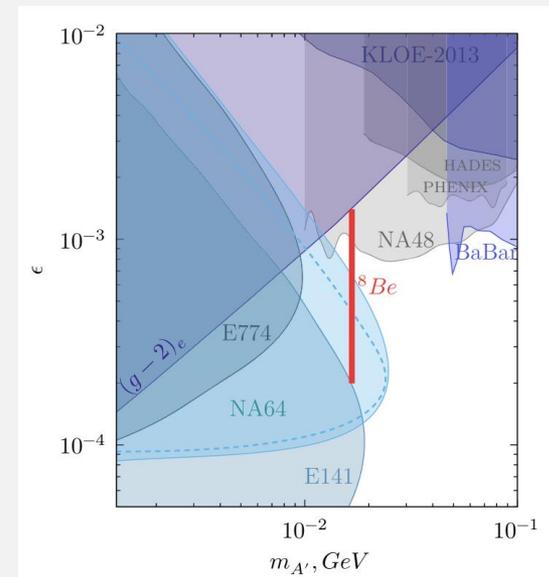
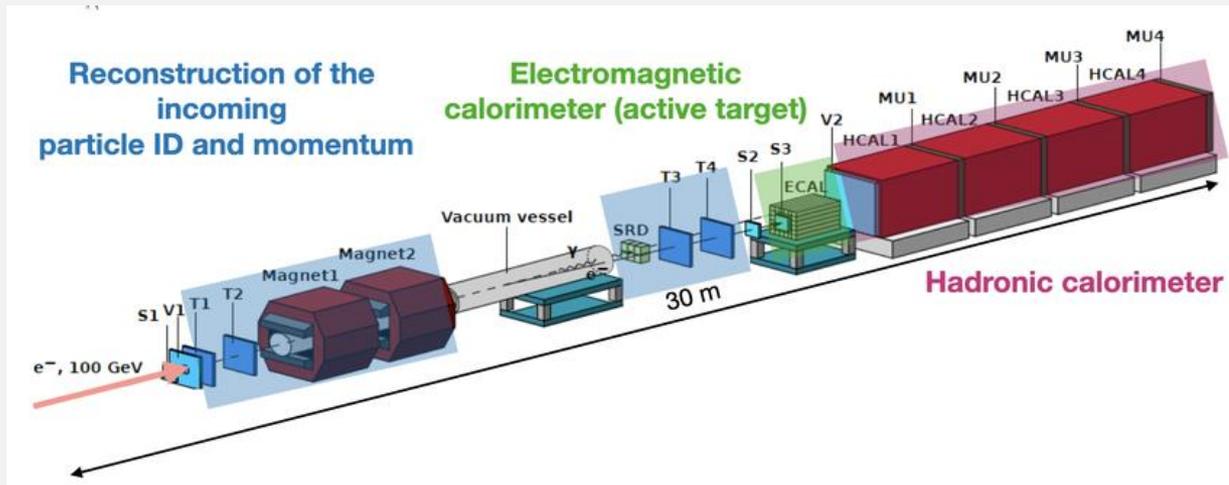
- La misura di XI7 è stata effettuata utilizzando un acceleratore di protoni Cockroft – Walton, utilizzato normalmente per le calibrazioni dei detector (energia massima 1.1 MeV)
- Il bersaglio di MEG-II è composto da $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, ma non può essere utilizzato per XI7 perché troppo spesso → sostituito da LiPON
- Due ulteriori calorimetri sono stati aggiunti, con funzione di monitor (BGO e LaBr_3)
- *Engineering run* nel 2022: MEG-II ricostruirebbe solo e^+ , il run è servito per modificare la ricostruzione e consentire di ricostruire anche e^- (in particolare, necessario ricostruire $E_+ + E_-$ e angolo di emissione)
- *Physics run* nel 2023: 4 settimane di presa dati a $E_p = 1080 \text{ keV}$, in corso studi sul fondo e *reprocessing* dei dati



[SEARCH FOR THE XI7 PARTICLE WITH THE MEG-II APPARATUS](#)

NA64

- NA64 è un esperimento che è stato costruito presso la linea H4 del CERN SPS con lo scopo di cercare bosoni leggeri di materia oscura, prodotti tramite *Bremsstrahlung* (segnale: e^- con energia pari a quasi metà dell'energia del fascio in ECAL, nulla in veto e HCAL)
- Per la misura di X17, è stato aggiunto un piccolo calorimetro in tungsteno (WCAL) con la funzione di bersaglio attivo
- Segnatura della nuova configurazione: bilanciamento dell'energia tra somma delle energie misurate in ECAL e WCAL, ed energia del fascio in assenza di segnale nei veto e in HCAL
- Fondo principale proveniente da contributi di pioni ($K_0^S \rightarrow \pi_0 \pi_0$) prodotti in ECAL
- Un *upgrade* del detector potrebbe migliorare l'efficienza di rivelazione ("[NA64 Status Report 2021](#)")

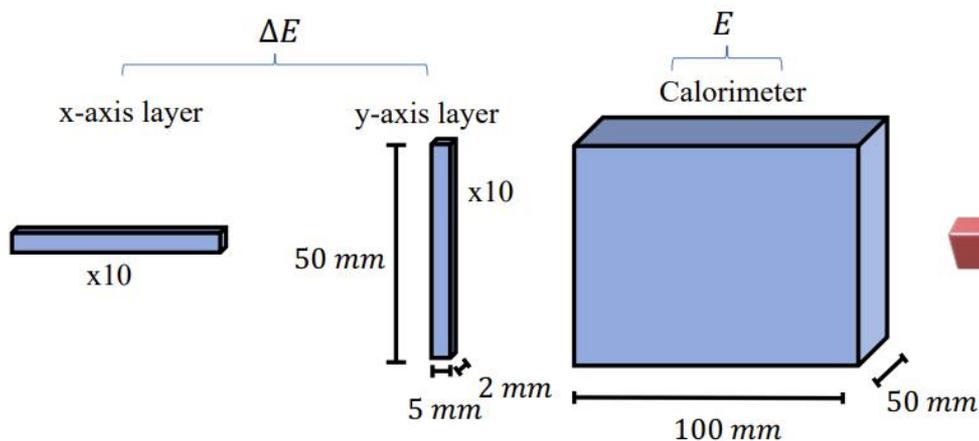


X17 ANOMALY AND PROSPECTS FOR ITS VERIFICATION WITH NA64

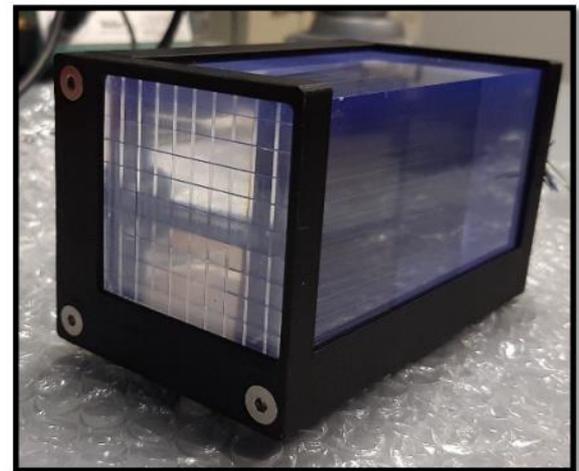
X17: ESPERIMENTI DEDICATI

ATOMKI @ LNL

- Apparato sperimentale per lo studio della spettroscopia IPC in ^8Be , ottimizzato per rivelare coppie e^+e^- con energia cinetica fino a 20 MeV
- Fascio di protoni a bassa energia presso i Laboratori Nazionali di Legnaro
- Telescopio composto da tre livelli di rivelatori: tre piani di scintillatore EJ200 in vari spessori, letti da SiPM (5 moduli a diversi angoli)
- Può operare nel vuoto e sottoposto a campo magnetico
- Obiettivi del setup: risoluzione angolare $\sim 1^\circ$, intervallo energetico di rivelazione keV – 20 MeV



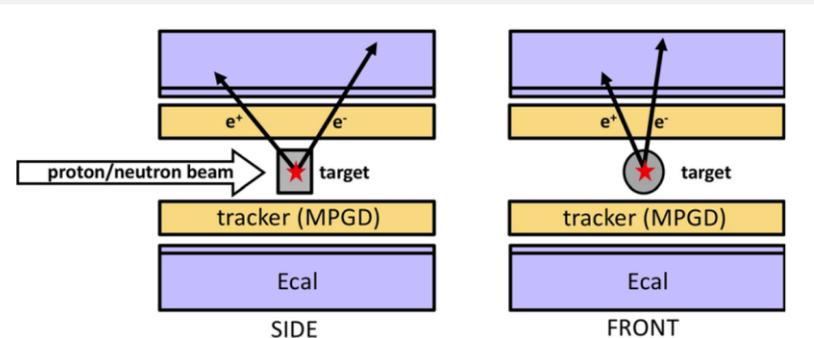
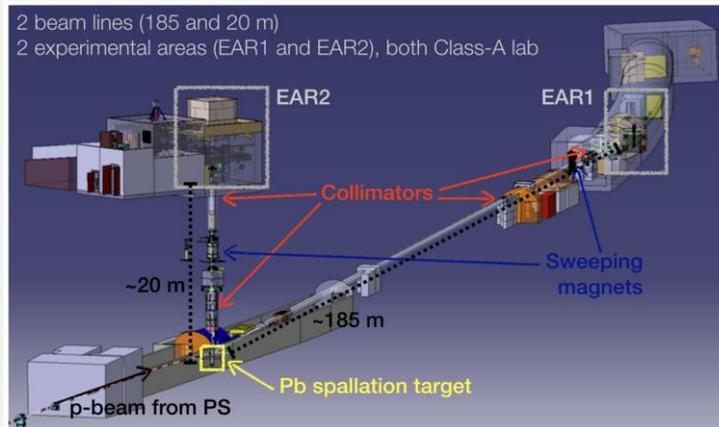
Plastic scintillator: EJ-200



ATOMKI @ LNL

n_TOF

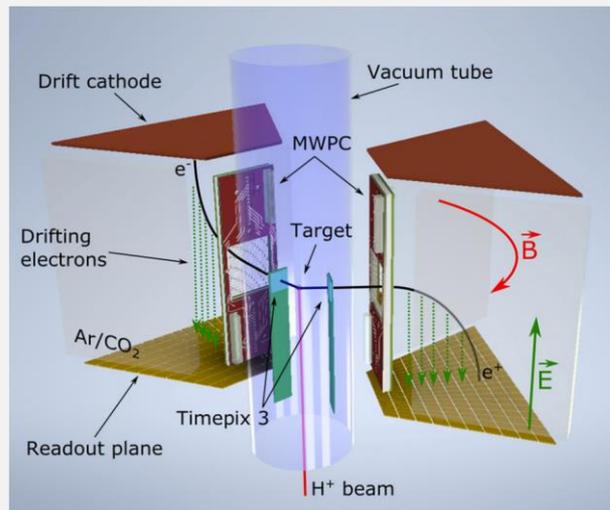
- n_TOF è una *facility* del CERN che studia interazioni tra nucleoni e neutroni tramite una sorgente pulsata di neutroni, con energie nell'intervallo (1 – 10⁸) eV
- Ricerca di X17 nel decadimento di stati eccitati di nuclei di trizio, ³He e ⁴He, per la prima volta tramite un fascio di neutroni e non di protoni
- TPC a geometria radiale, campo elettrico ortogonale alla direzione del fascio, che ricostruiscono la traccia delle particelle; ECAL LYSO o EJ200
- Sono state realizzati due prototipi di μ Rwell, 30 × 30 cm² (gap 2 cm)
- Per misurare l'energia delle particelle, al momento è in fase di studio la progettazione di piani scintillanti spessi 10 cm, con una superficie di 40 × 40 cm²



SHEDDING LIGHT ON X17: COMMUNITY REPORT

ATOMKI IN PRAGUE

- Costruzione di uno spettrometro simile a quello utilizzato da ATOMKI, per lo studio dello stesso processo (^8Be e ^4He), ma con diverso metodo di rivelazione, presso l'Institute of Experimental and Applied Physics (Czech Technical University)
- Scopo della misura: misurare l'angolo di emissione delle coppie e^+e^- in due dei processi esaminati da ATOMKI, ovvero $^7\text{Li}(p, e^+e^-)^8\text{Be}$ e $^3\text{H}(p, e^+e^-)^4\text{He}$
- *Time Projection Chamber (TPC)* + campo magnetico + *Multiwire Proportional Chamber (MWPC)* + TimePix3 per migliorare la risoluzione angolare
- Stato attuale: struttura esagonale di TimePix3 pronta per la misura su fascio; TPC installata, elettronica da assemblare; MWPC da costruire



THE CONSTRUCTION OF THE X17 SPECTROMETER AT CTU IN PRAGUE

CONCLUSIONI

- L'anomalia osservata dal gruppo di A. Krasznahorkay presso ATOMKI ha destato grande interesse nella comunità scientifica della fisica delle particelle
- Molti esperimenti già esistenti hanno adattato il proprio apparato sperimentale per condurre misure di X17, mentre tanti altri sono in fase di costruzione
- Una prima conferma della misura di ATOMKI sembra venire dalla VNU University of Science (Hanoi): [«Confirmation the \$^8\text{Be}\$ anomaly with a different spectrometer»](#)
- Lo stesso gruppo di ATOMKI ha raffinato la sua misura: [«An update on the hypothetical X17 particle »](#) (agosto 2023)
- PADME è l'unico tra gli esperimenti citati che cerca di produrre X17 in maniera risonante, utilizzando un fascio di positroni su bersaglio
- Nuovi risultati ci attendono!



[«FARE LUCE SULLA MATERIA OSCURA», LE SCIENZE, SETTEMBRE 2023](#)