



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

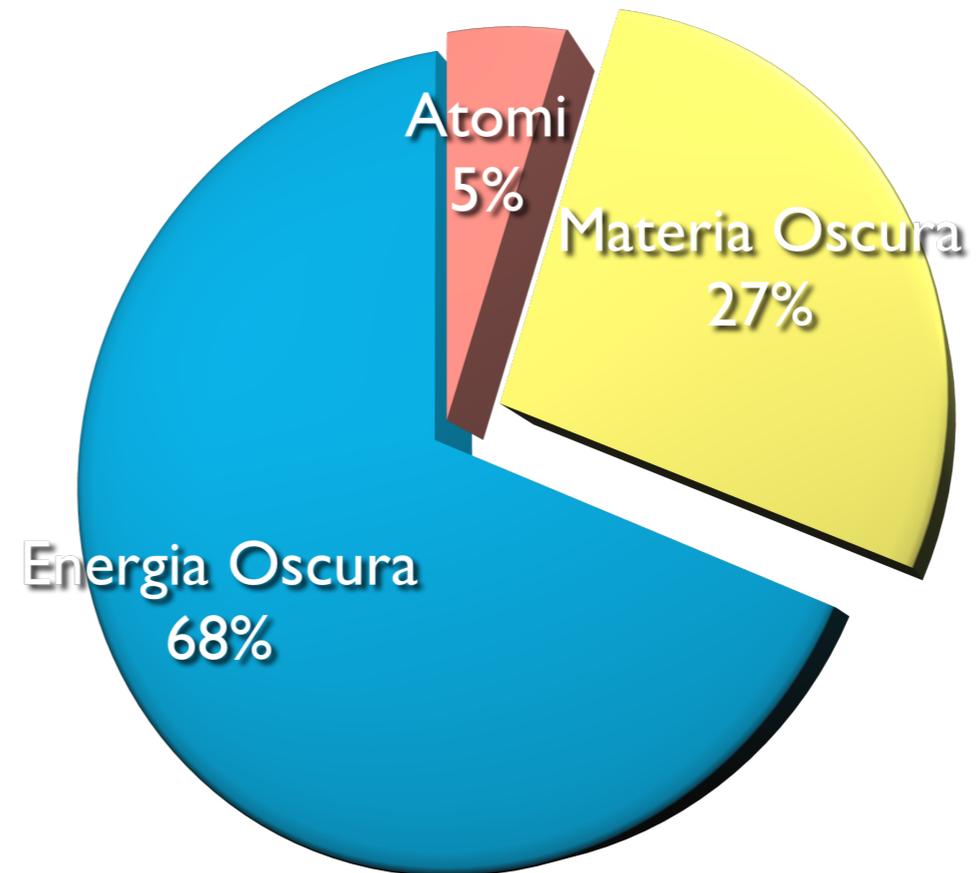
Fotone Oscuro - la ricerca

Gabriele Piperno - LNF

Il problema della Materia Oscura

Evidenze sperimentali:

- galassie a spirale
- Radiazione Cosmica di Fondo
- lensing gravitazionale
- ammassi di galassie
- Nucleosintesi da Big Bang
- strutture a larga scala



Proprietà:

- stabile (vita media ~ età dell'universo)
- fredda (non relativistica)
- interazione gravitazionale
- non barionica



Questioni irrisolte:

- natura della Materia Oscura (MO)
- interazioni col MS
- esiste un Settore Oscuro (SO)?
- forze del SO?

Fotone Oscuro

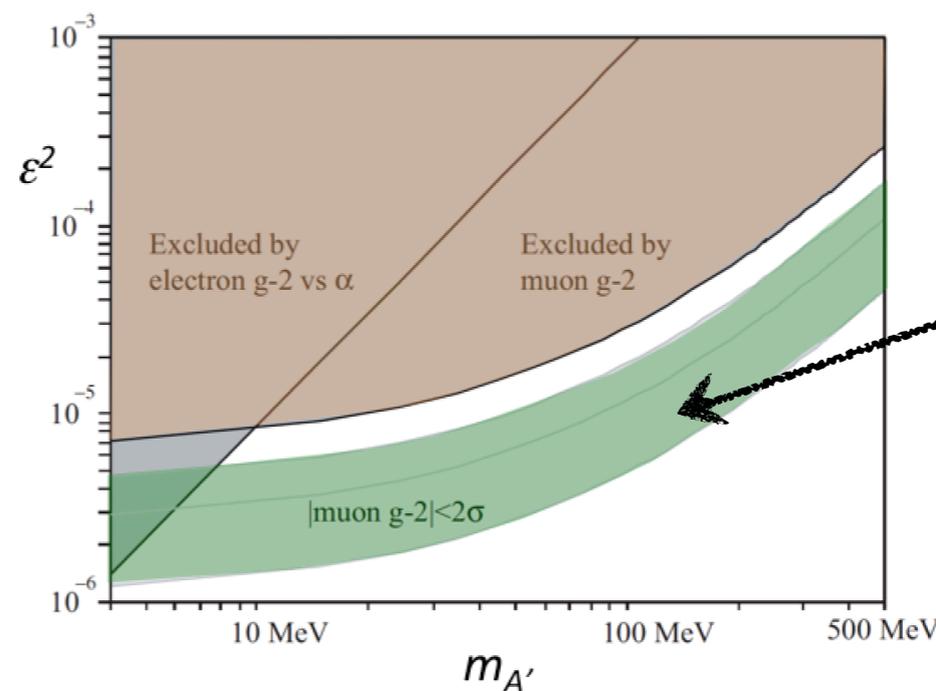
Possibile soluzione alla elusività della MO:
MO non interagisce direttamente con MS, ma per mezzo di “portali”.

Modello più semplice aggiunge una simmetria $U(1)$ di gauge e il suo bosone: il Fotone Oscuro (FO) A'



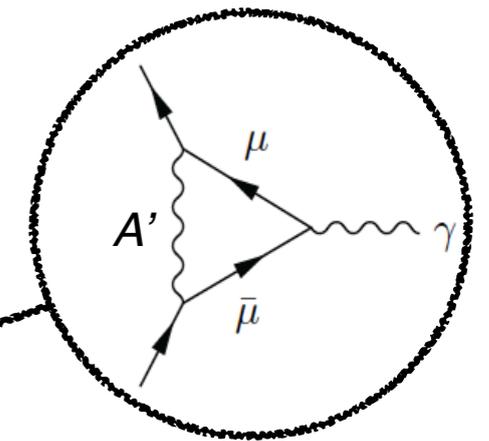
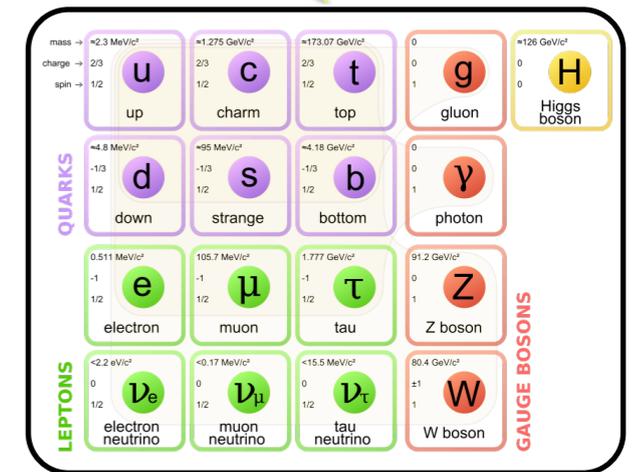
- particelle MS neutre sotto questa simmetria
- il nuovo campo si accoppia al MS con carica effettiva ϵq

In aggiunta A' può spiegare interamente o parzialmente (dip. dal modello) la discrepanza tra teoria e misura su $(g-2)_\mu$



Settore Oscuro

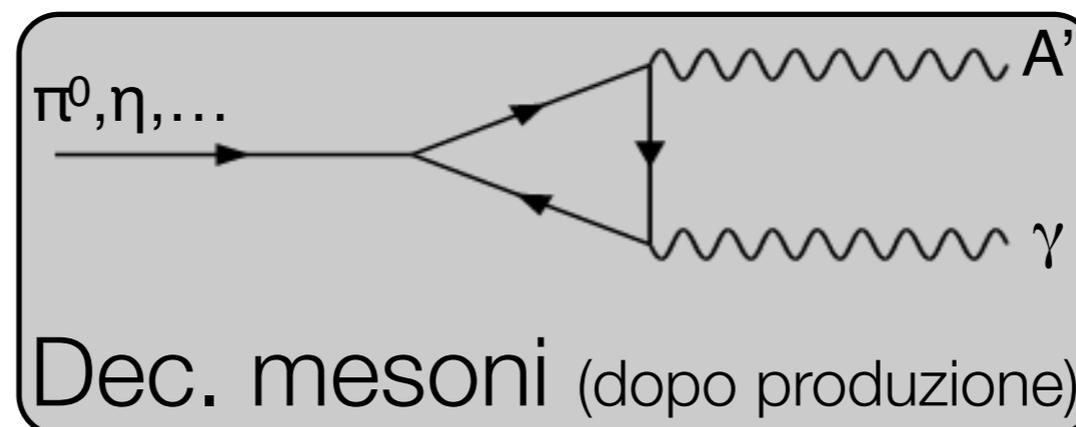
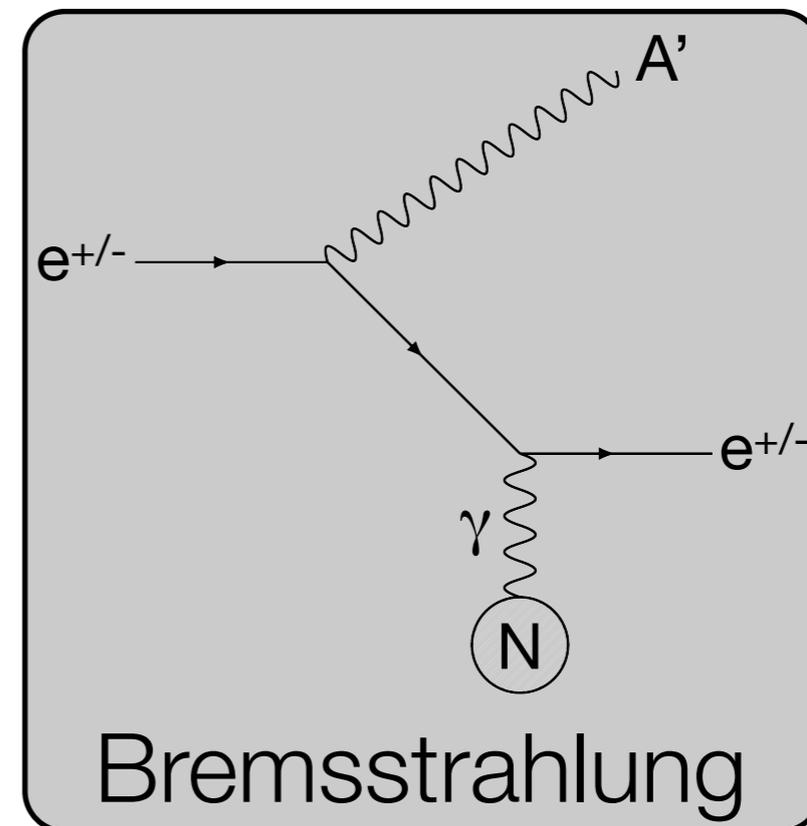
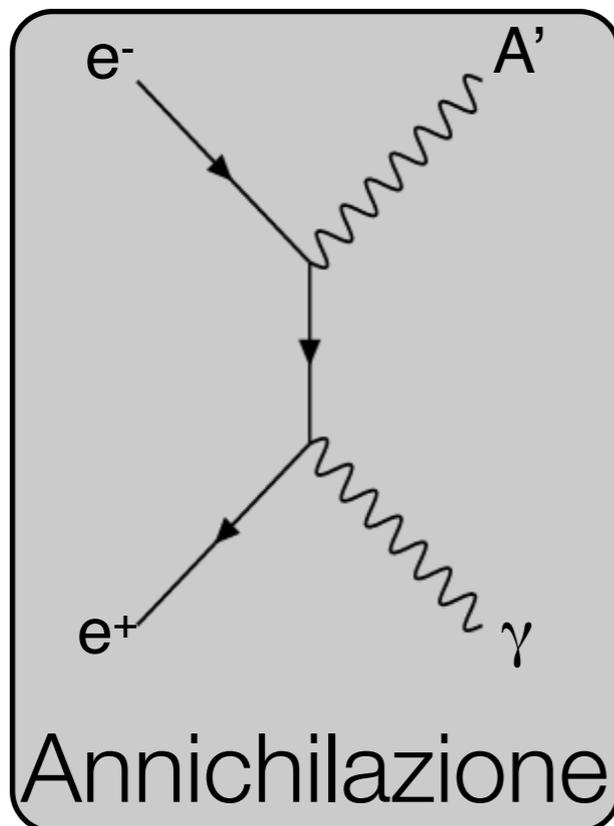
Portale (A')



Questo semplice modello è stato recentemente escluso

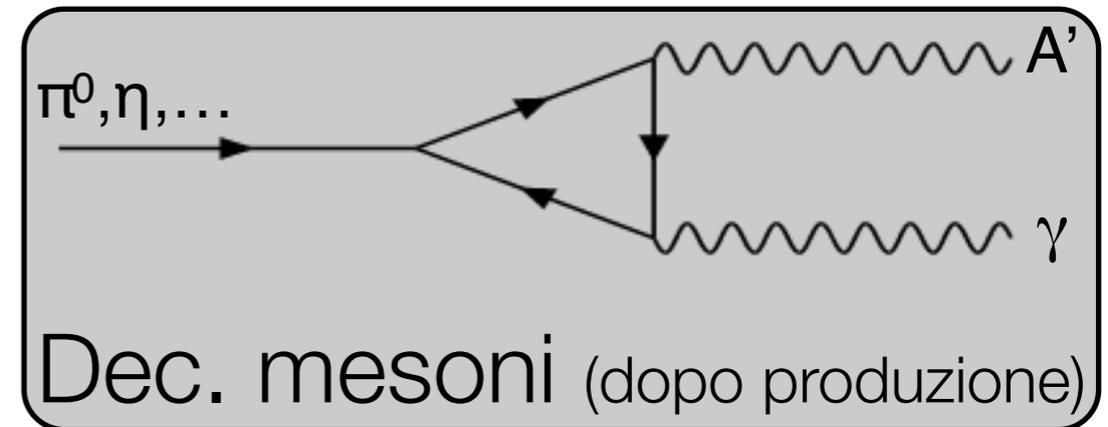
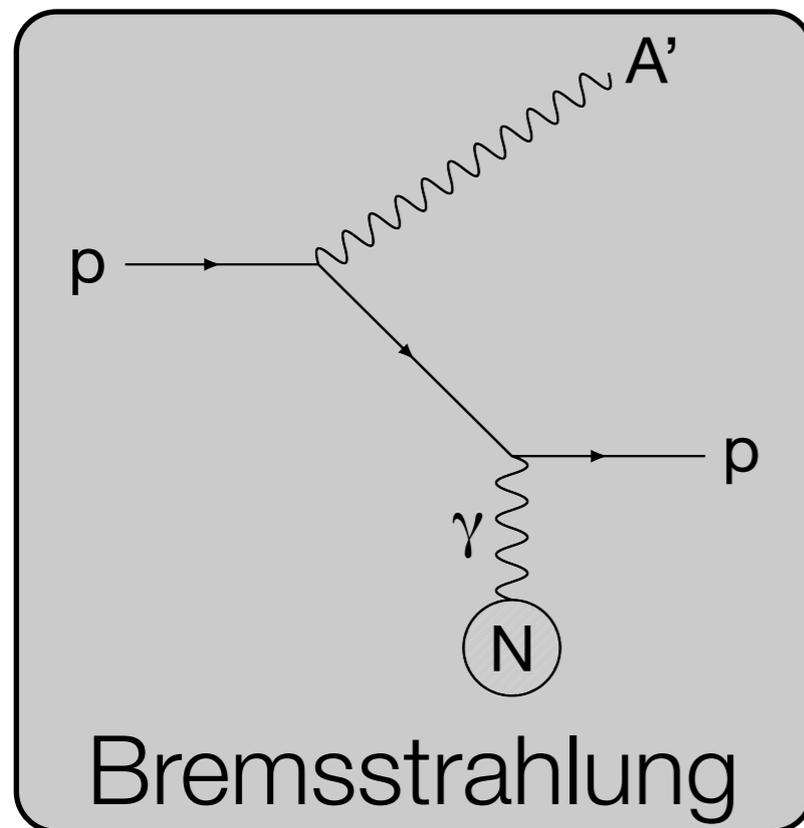
Fotone Oscuro da interazioni leptoniche e^+/e^-

Nelle collisioni e^+/e^- il FO può essere prodotto in 3 modi principali:



Fotone Oscuro da interazioni adroniche

Nelle collisioni adroniche (includono anche gli ioni pesanti) il FO può essere prodotto in 2 modi principali:



- Tipicamente protone considerato come particella senza struttura (nelle interazioni con alto momento trasferito c'è la possibilità di bremsstrahlung da quark)
- Al momento non esistono strumenti universalmente accettati il per calcolo delle sezioni d'urto e delle distribuzioni di impulso delle particelle nello stato finale

È fondamentale usare fasci sia leptonici sia adronici per sondare FO leptofobici o leptofilici

Decadimenti del Fotone Oscuro

Decadimenti visibili

Se non esiste MO con $m_{MO} < m_{A'}/2$:

- $A' \rightarrow SM$ (visibile)
 - fino a $2m_\mu$, $BR(e^+e^-) = 1$ (se $m_{A'} > 2m_e$)

Vita media A' proporzionale a:
 $1/(\alpha \varepsilon^2 m_{A'})$

Decadimenti invisibili

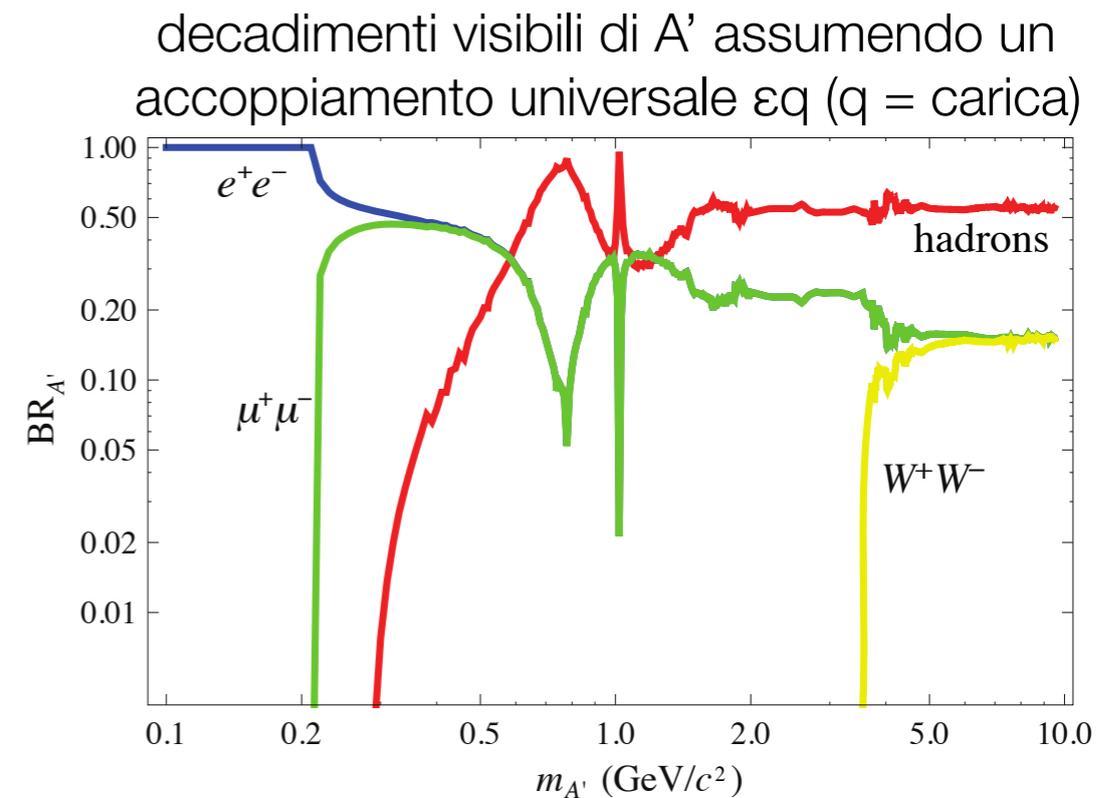
Se esiste MO con $m_{MO} < m_{A'}/2$:

- $A' \rightarrow DM$ (invisibile) con $BR \approx 1$
- decadimenti MS soppressi di un fattore ε^2

Vita media A' proporzionale a:

$$1/(\alpha_D m_{A'})$$

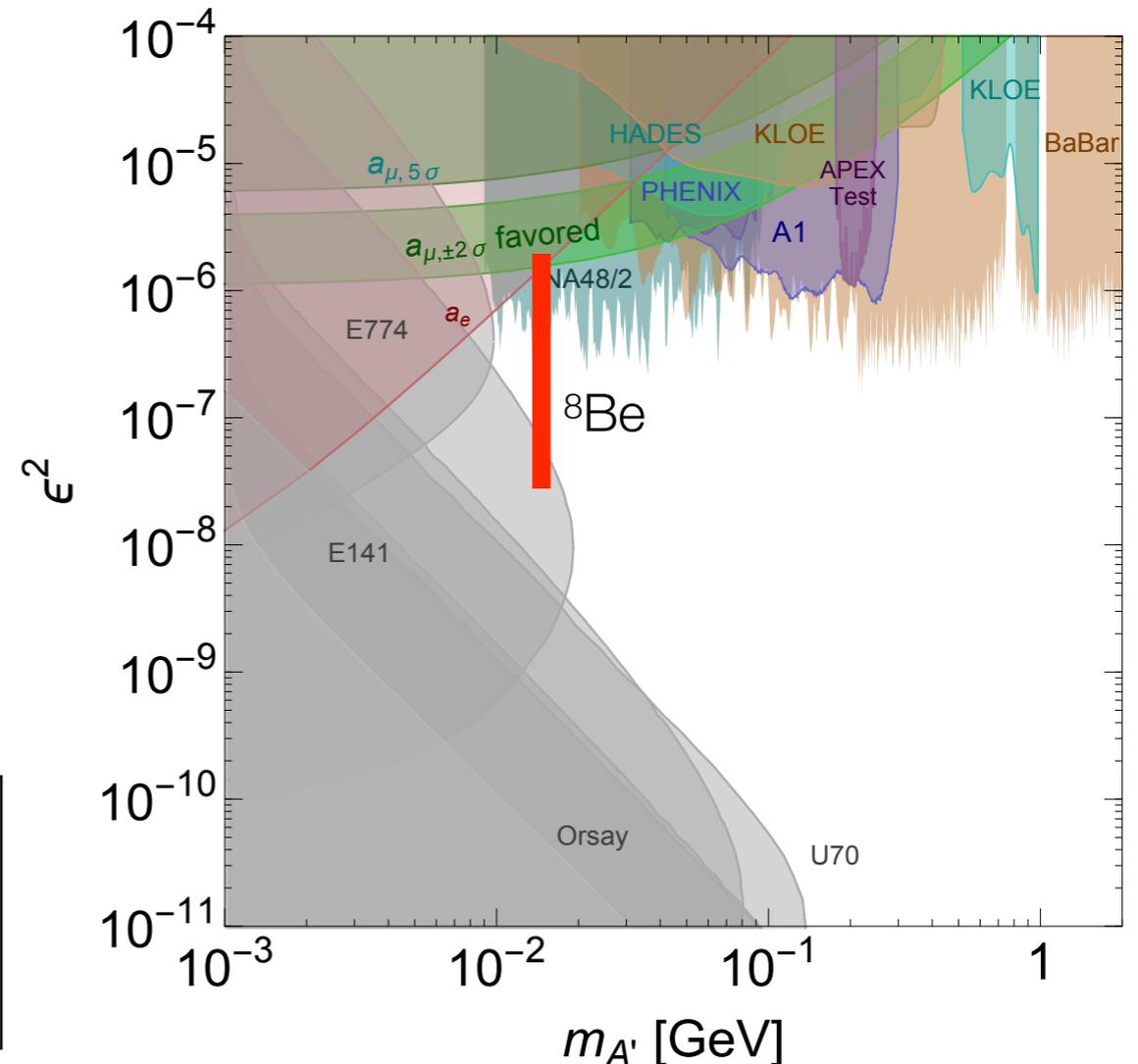
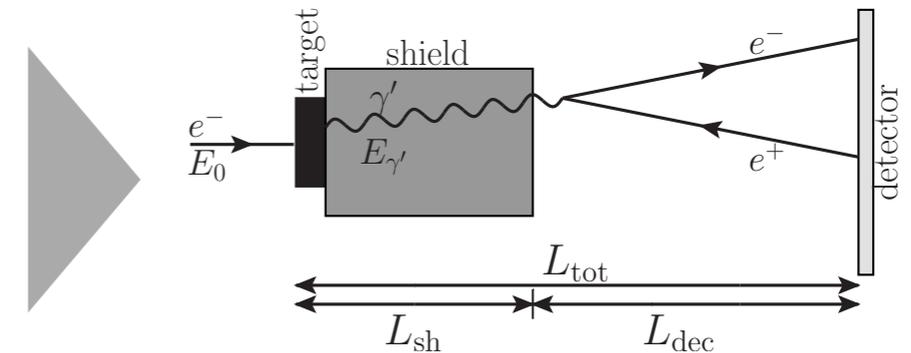
α_D : costante di accoppiamento di A' al Settore Oscuro



Status della ricerca nel visibile

Tecniche:

- beam dump (bremsstrahlung)
 - rivelazione prodotti di decadimento di A' dopo bersaglio alto z (produz. A') + schermo (assorb. MS)
- bersaglio fisso (bremsstrahlung, annichilazione)
 - ricerca picchi in spettro massa invariante, vertici isolati
- decadimento mesoni
 - solo se A' si accoppia con quarks
 - rianalisi di vecchi esperimenti

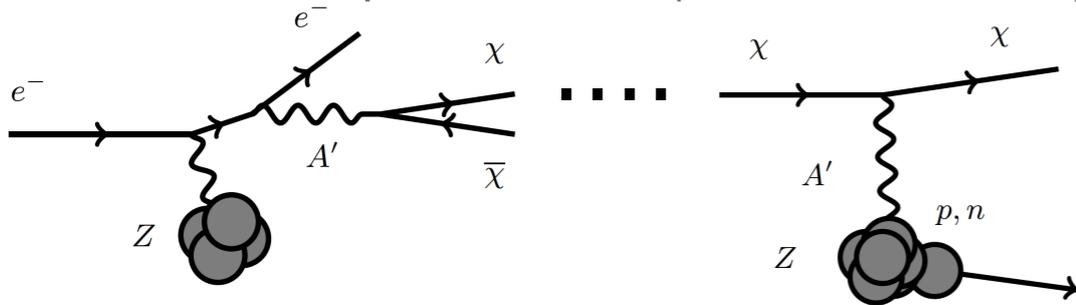


$(g-2)_\mu$ escluso (nel modello più semplice), ma ancora interesse per questo tipo di ricerca. In particolare anomalia del ^8Be .

Stato della ricerca nell'invisibile

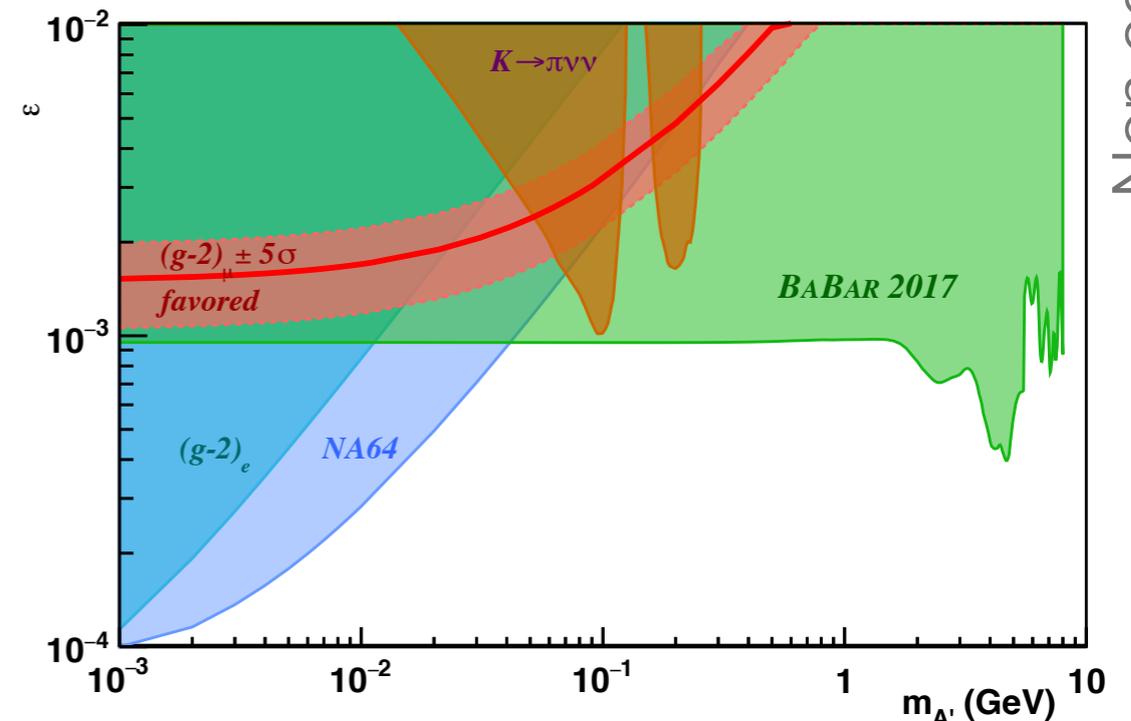
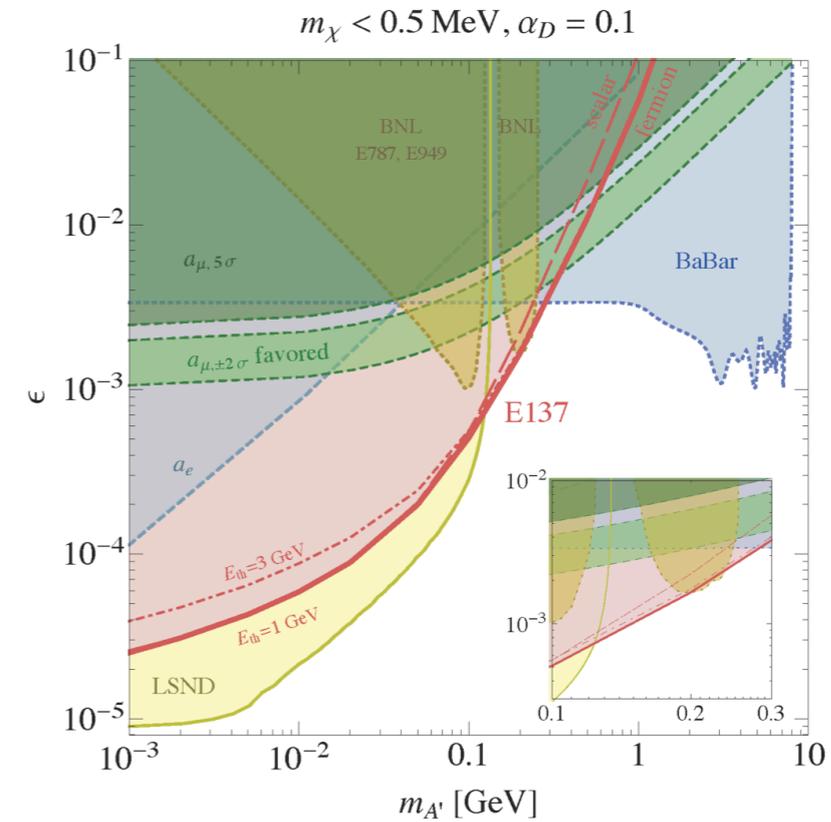
Tecniche:

- diffusione MO (bremsstrahlung)
 - rivelazione MO prodotta con urti
 - necessari 4 parametri ($\epsilon, m_{A'}, m_{MO}, \alpha_D$)



- ricerca energia/momento mancante (bremsstrahlung)
 - processo cinematicamente non vincolato
 - si osserva energia/momento minori di quanto atteso

- ricerca massa mancante (annichilazione)
 - processo cinematicamente vincolato
 - no assunzioni su catena di dec. di A'



Non comparabili
direttamente

Il rivelatore di PADME

bersaglio attivo

- diamante (basso z)
- spessore 100 μm
- info su tempo, dim. spot fascio, numero e^+

veto (alta energia) e^+/e^-

- barre scint. plastico

calorimetro di piccolo angolo

- 25 PbF_2
- $3 \times 3 \times 14 \text{ cm}^3$
- 0-20 mrad cop. ang.

calorimetro elettromagnetico

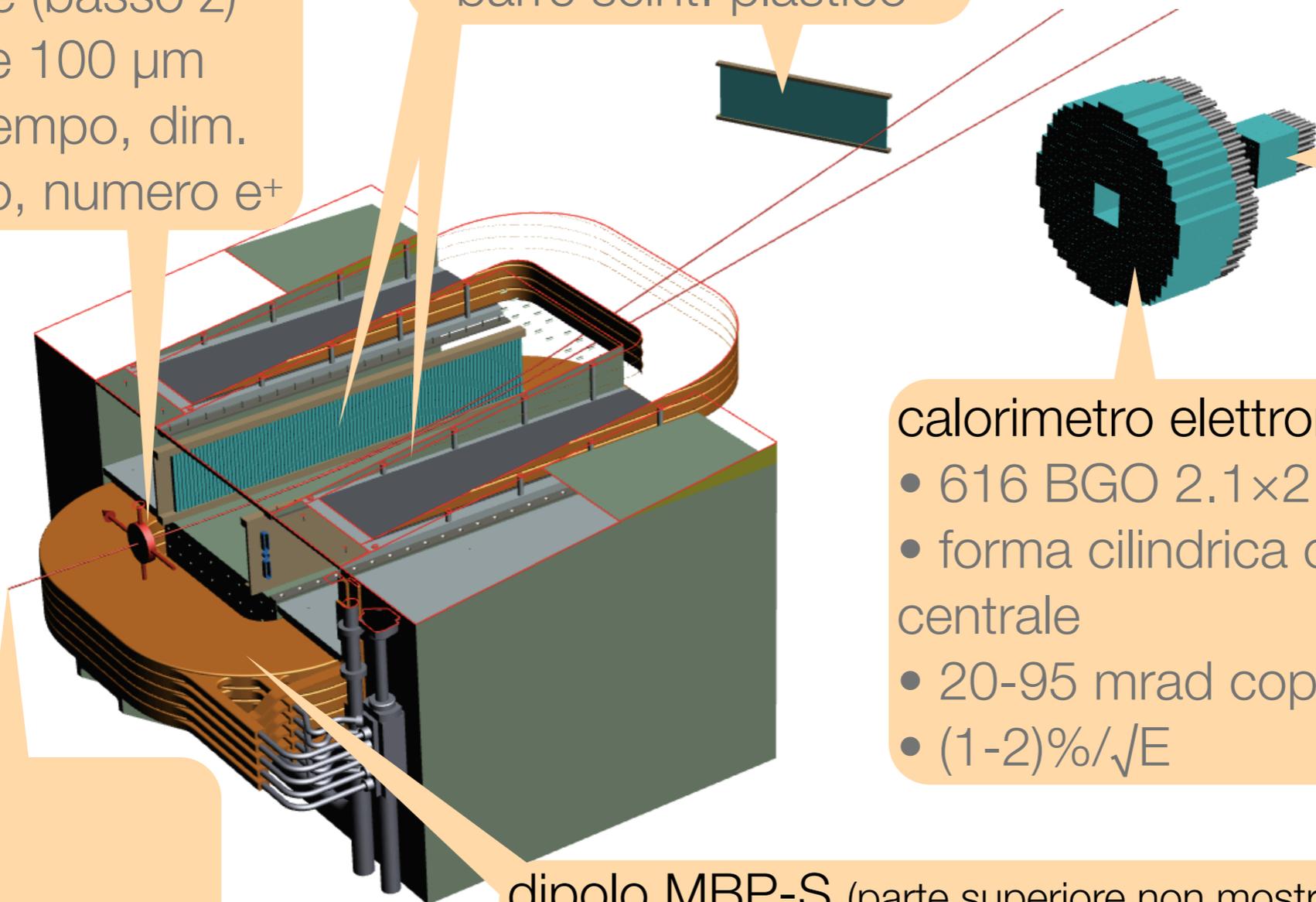
- 616 BGO $2.1 \times 2.1 \times 23 \text{ cm}^3$
- forma cilindrica con buco centrale
- 20-95 mrad cop. ang.
- $(1-2)\%/\sqrt{E}$

fascio e^+

- 550 MeV
- 5000 e^+ per bunch
- bunch 40 ns, ogni 20 ms

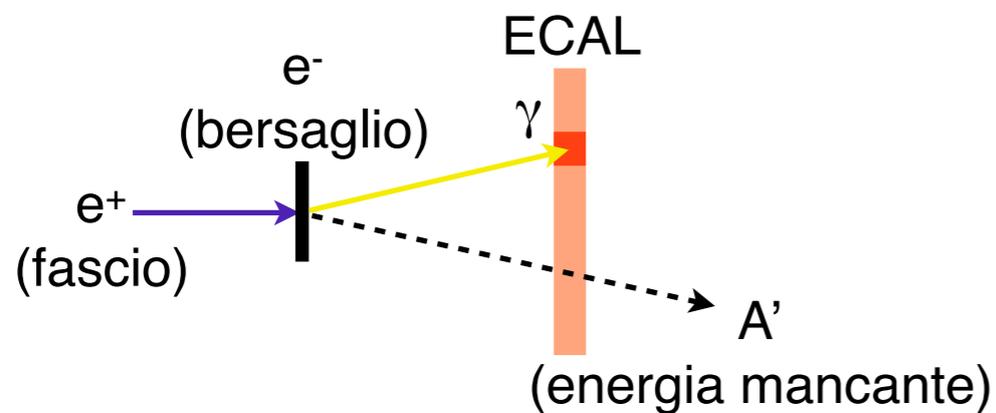
dipolo MBP-S (parte superiore non mostrata)

- 0.5 T
- 1 m lungh. \times 23 cm gap



Run approvato

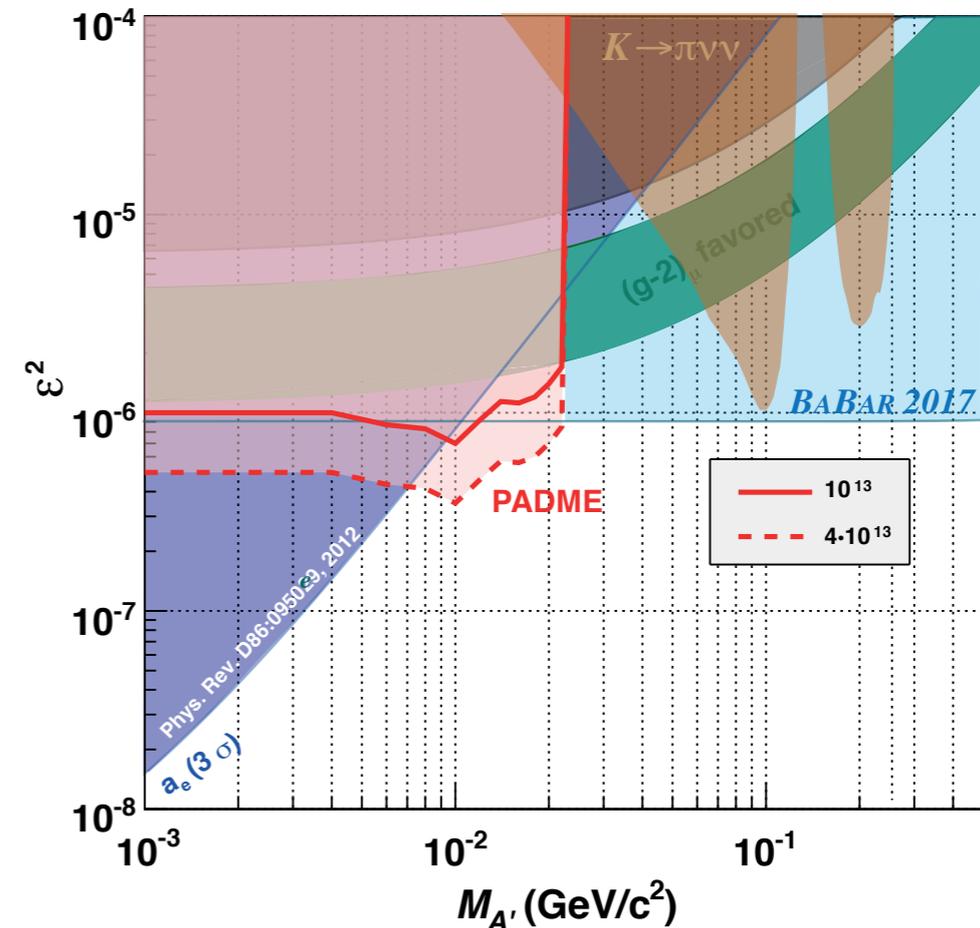
Tecnica sperimentale: ricerca di massa mancante nella reazione $e^+e^- \rightarrow \gamma A'$



Approccio sperimentale per la ricerca nell'invisibile

- energia e posizione fascio note
- energia e posizione γ misurate (ECAL)

➔ $m^2_{\text{Miss}} = (\mathbf{P}_{\text{fascio}} + \mathbf{P}_e - \mathbf{P}_\gamma)^2$



PADME può esplorare in maniera model-independent la regione fino a $\epsilon \approx 10^{-3}$ (10^{13} POT) con $m_{A'} < 23.7$ MeV ($E_{\text{fascio}} = 550$ MeV)

Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
Commissioning			PADME run 1				DAΦNE			run 1	

PADME+

Piccole modifiche al rivelatore

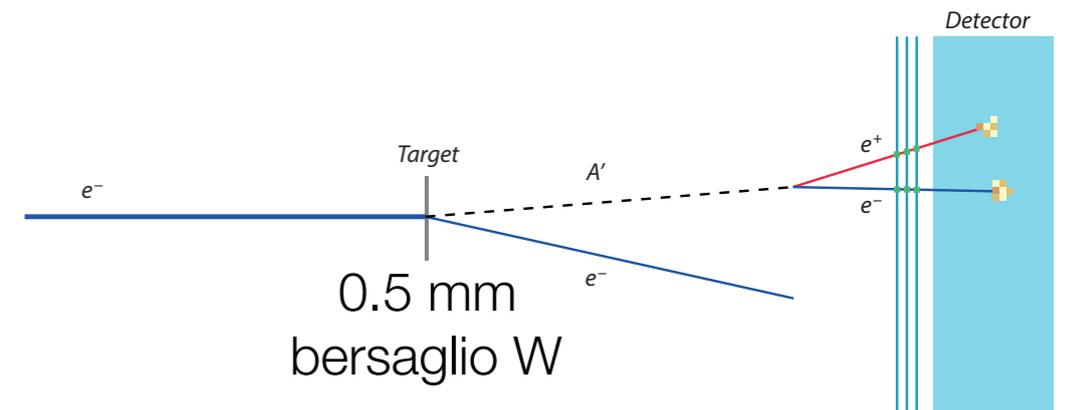
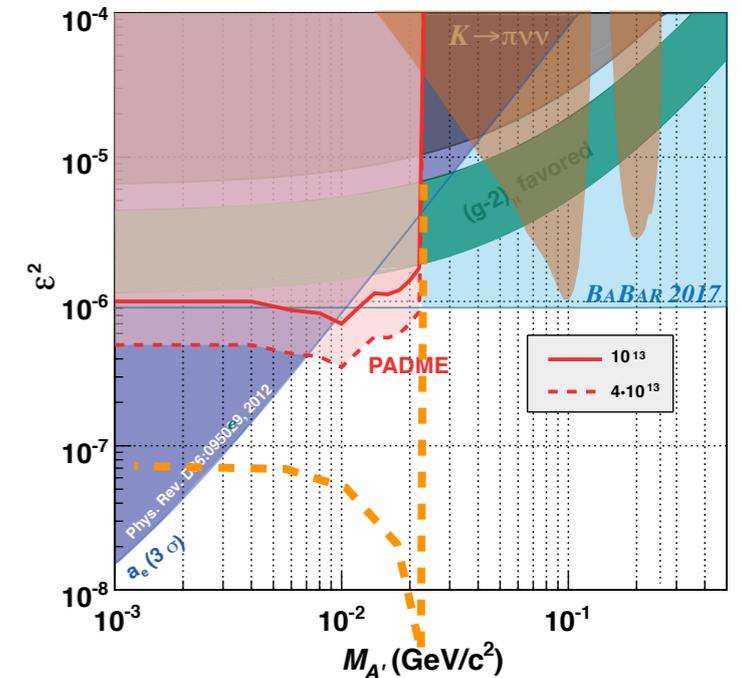
- diversi bersagli per ottimizzare spessore e materiale (es. H₂)
- ➔ avvicinarsi ad assenza di fondo

- misure con fascio di e⁻ per controllare fondi e sistematiche

- bersaglio sottile ad alto z (più bremsstrahlung A')

- E_{A'} può essere $> \sqrt{2}m_e E_{\text{beam}}$
- E_{A'} non nota (cinematica non chiusa)

➔ solo dec. visibili sono interessanti

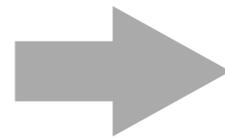


Calcoli preliminari con 10¹⁸ EOT danno una sensibilità su $\epsilon^2 \sim 10^{-7}$ nella regione di bassa massa, che peggiora all'aumentare di $m_{A'}$

PADME++

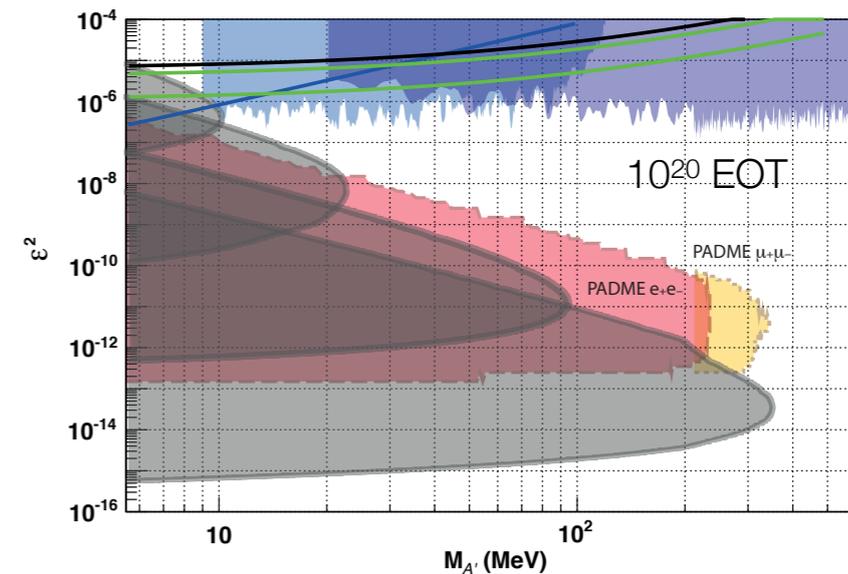
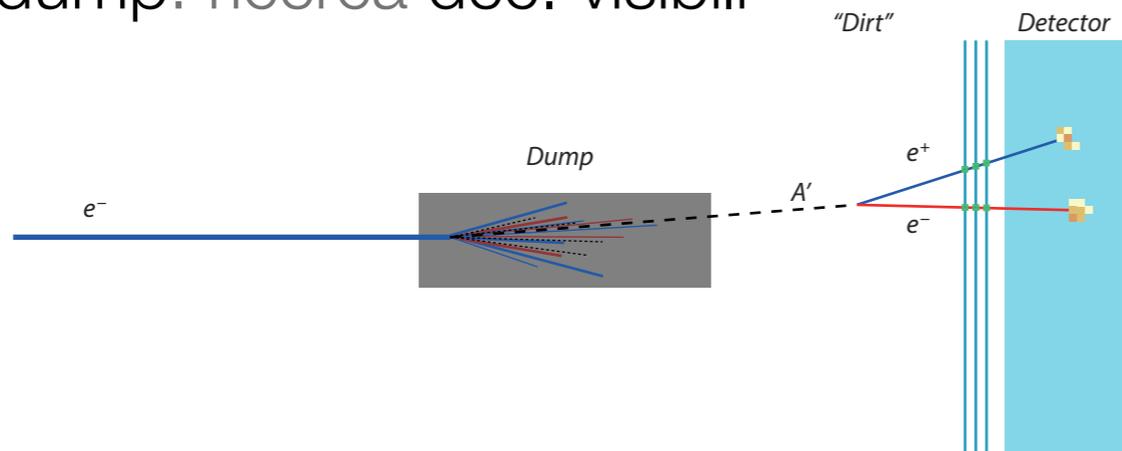
Modifiche a rivelatore, sala sperimentale e linea di fascio (4 μ s, 1.2 GeV)

bersaglio spesso ad alto z

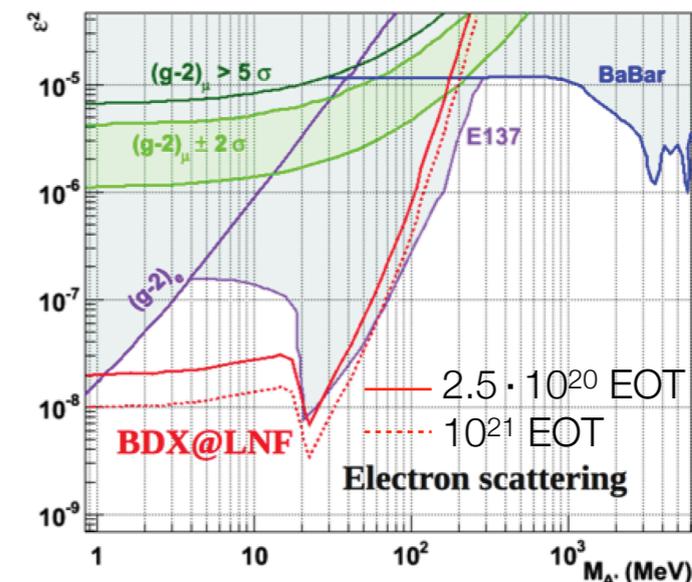
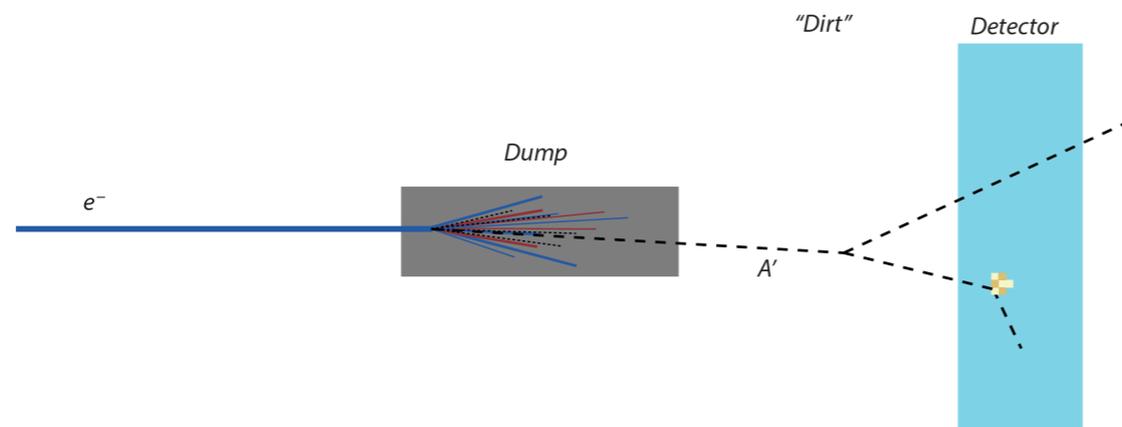


- $E_{A'}$ può essere $> \sqrt{2}m_e E_{\text{beam}}$
- $E_{A'}$ non nota (cinematica non chiusa)
- Solo A' attraversa il bersaglio

- PADME dump: ricerca dec. visibili



- Diffusione di MO su rivelatore (poco probabile)
eventualmente con bersaglio/dump attivo

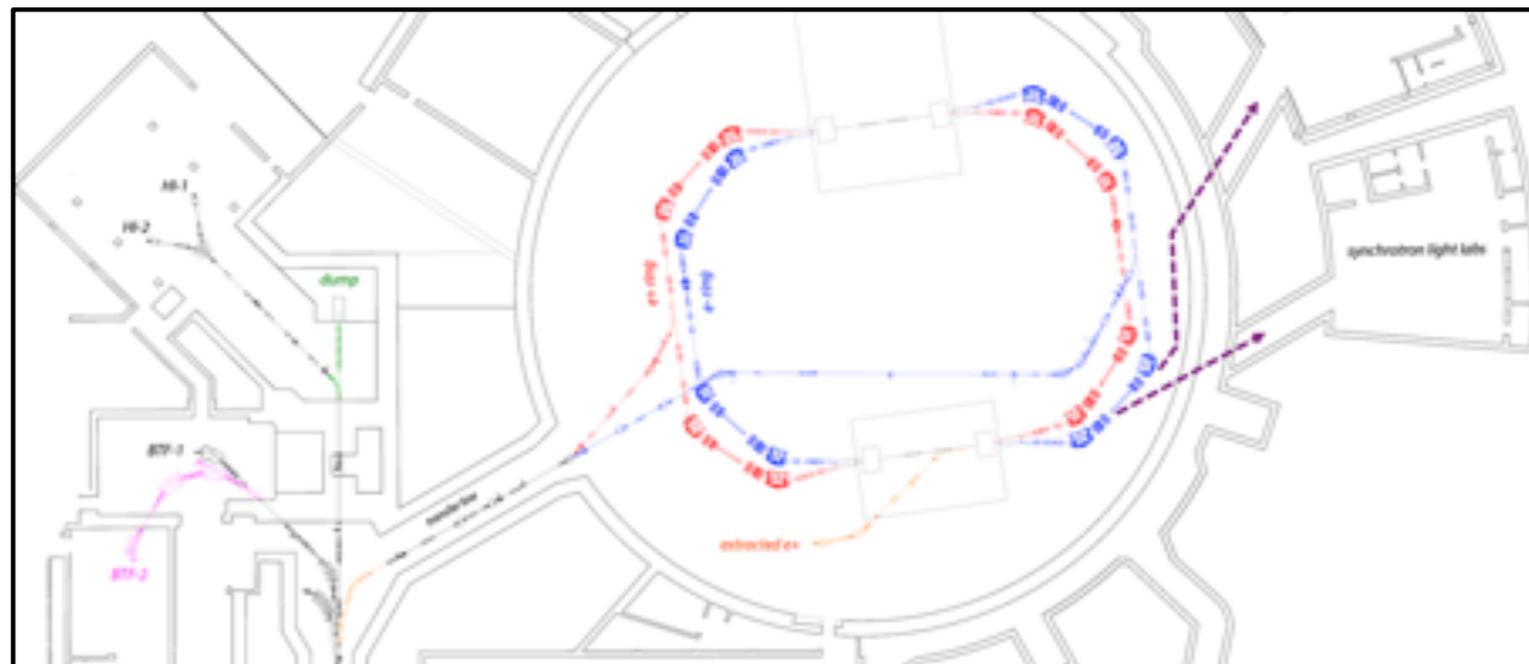
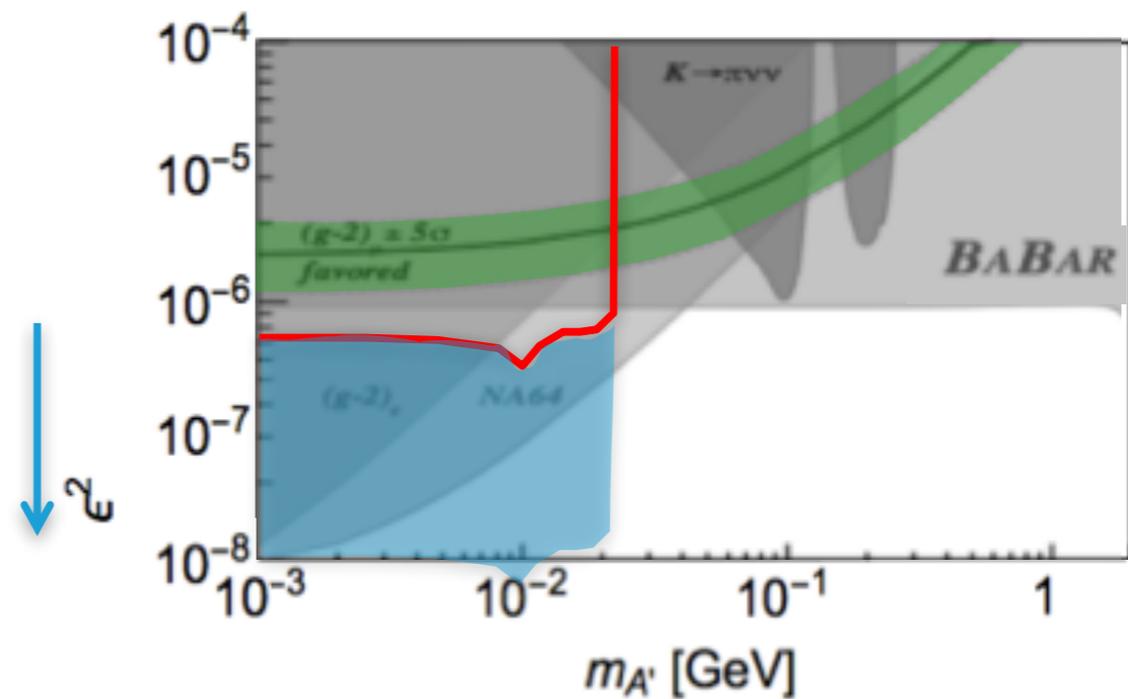


Fattibilità sotto studio, problema principale: radioprotezione utenti

PADME a DAΦNE

Usando l'anello degli e^+ di DAΦNE è possibile allungare il pacchetto fino a $400\mu\text{s}$

- 2000× nella statistica (il limite scala con $\sqrt{n_{\text{eventi}}}$)
- necessari nuovi:
 - setti per estrazione
 - linea magnetica
 - readout
 - DAQ



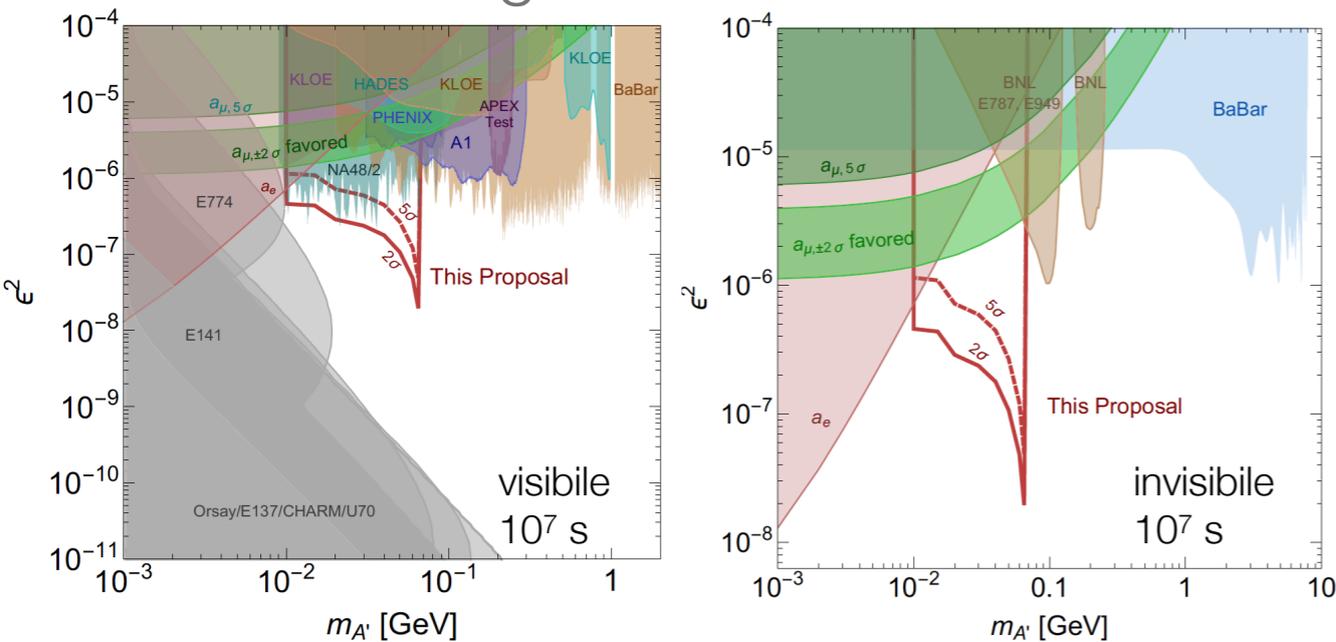
PADME in USA

Possibilità di trasportare il calorimetro di PADME nei USA e di sfruttare:

- sale sperimentali più grandi → maggiore distanze tra bersaglio e calorimetro → migliore risoluzione spaziale
- fasci con energia maggiore → sensibilità a masse maggiori
- fasci continui $\times 10^4$ - 10^5 volte la statistica → più statistica a parità di tempo o meno fondi

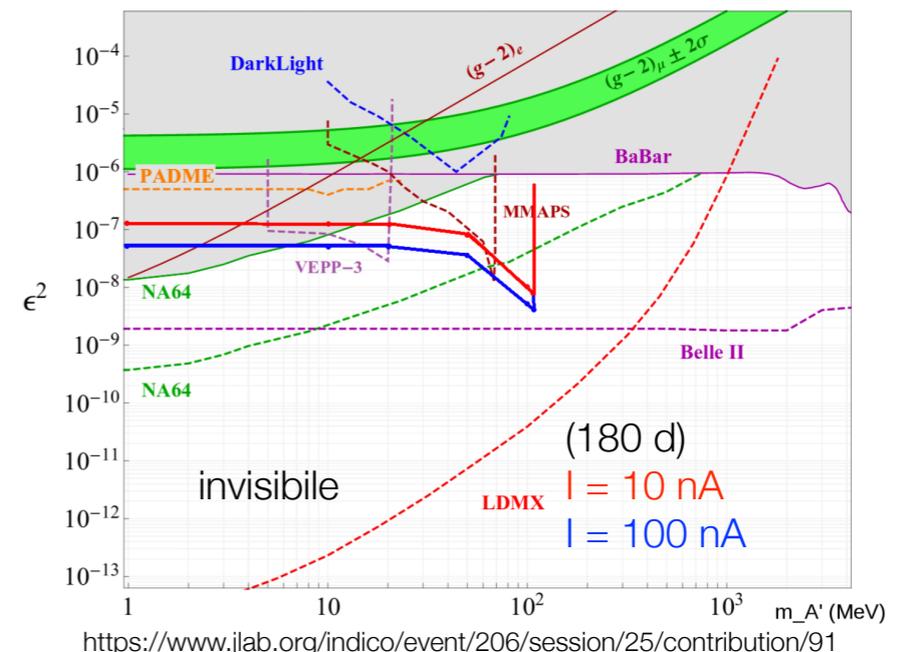
Wilson Laboratory (Cornell)

- fascio di 6 GeV estratto dall'anello di accumulazione CESR → $m_{A',\text{max}} = 78$ MeV
- bersaglio di Be
- distanza bersaglio/calorimetro ≈ 10 m



Jefferson Laboratory

- fascio di 11 GeV estratto dall'acceleratore CEBAF → $m_{A',\text{max}} = 106$ MeV
- bersaglio di C (100 μm)
- distanza bersaglio/calorimetro ≈ 10 m



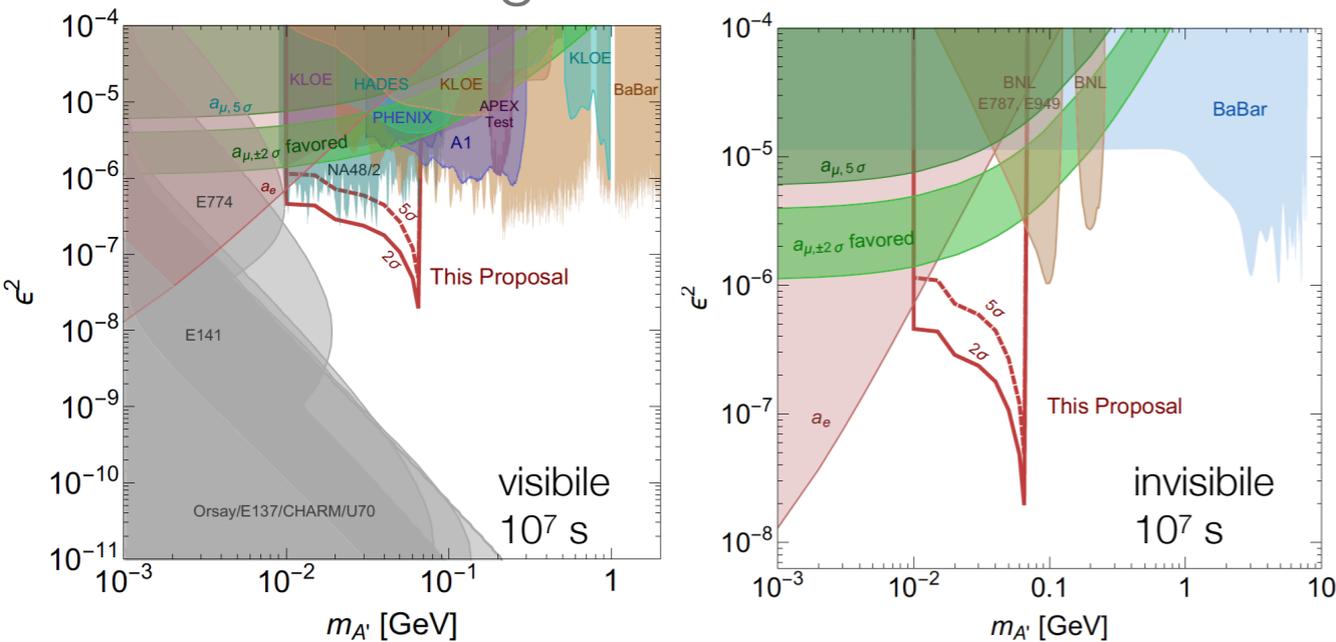
PADME in USA

Possibilità di trasportare il calorimetro di PADME nei USA e di sfruttare:

- sale sperimentali più grandi → maggiore distanze tra bersaglio e calorimetro → migliore risoluzione spaziale
- fasci con energia maggiore → sensibilità a masse maggiori
- fasci continui $\times 10^4$ - 10^5 volte la statistica → più statistica a parità di tempo o meno fondi

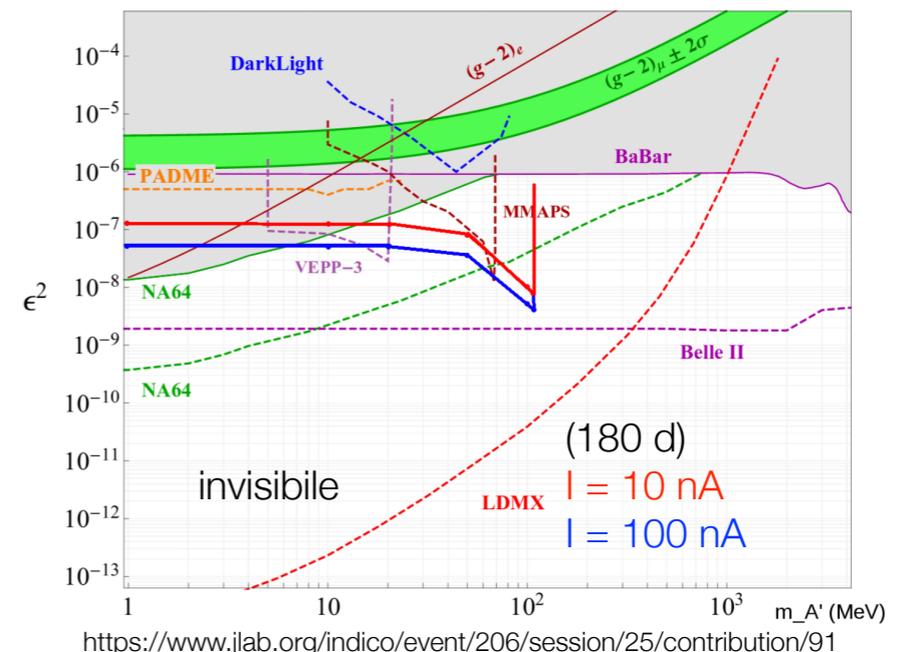
Wilson Laboratory (Cornell)

- fascio di 6 GeV estratto dall'anello di Entro fine gennaio sarà preparata la richiesta per la costruzione linea di fascio dedicata
- distanza bersaglio/calorimetro ≈ 10 m



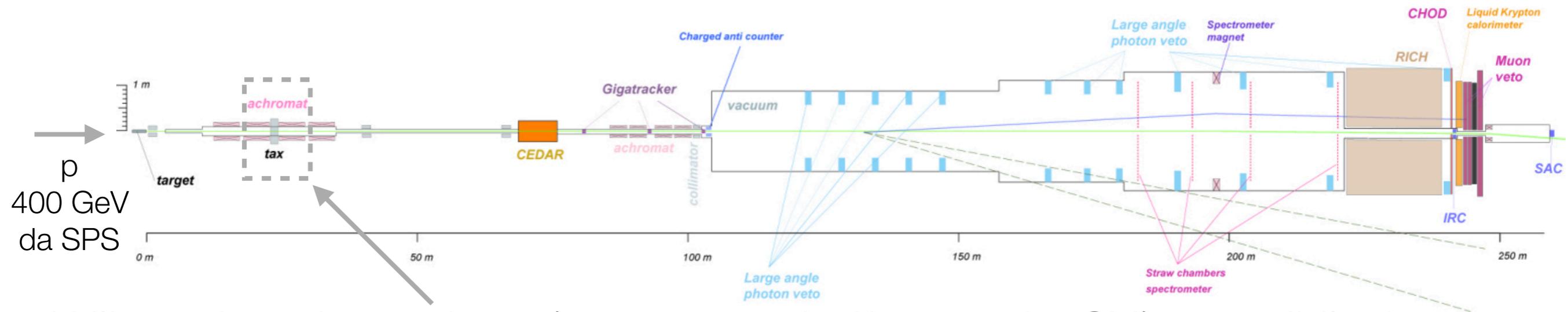
Jefferson Laboratory

- fascio di 11 GeV estratto dall'acceleratore CEBAF → $m_{A',max} = 106$ MeV
- bersaglio di C ($100 \mu\text{m}$)
- distanza bersaglio/calorimetro ≈ 10 m



Altri esperimenti CSN1 per FO: NA62

Scopo principale: misura del BR ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) con precisione del 10%



Utilizzando un beam dump (attraversato da A' + assorbe SM) è possibile ricercare decadimenti del tipo: $A' \rightarrow e^+ e^-$, $\mu^+ \mu^-$ a valle.

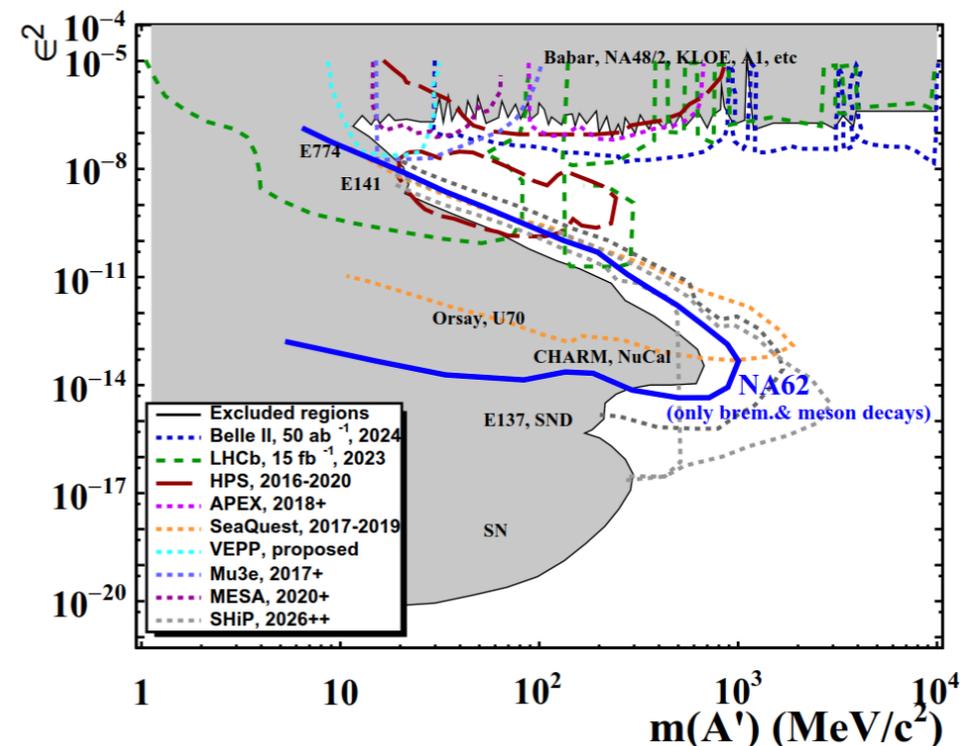
Assumendo 10^{18} POT da 400 GeV:

produzione:

- decadimento di mesoni
- bremsstrahlung

decadimento nel volume fiduciale:

- tiene in conto l'accettanza geometrica
- assume zero fondo

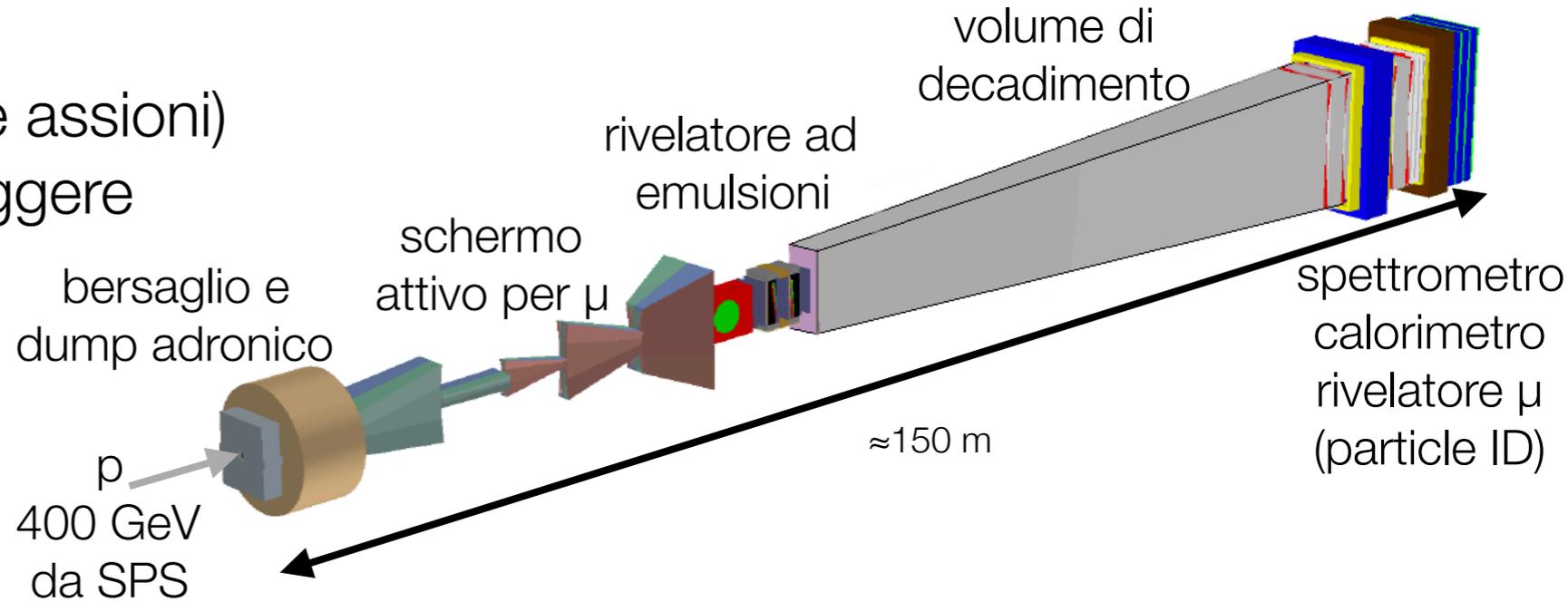


<https://indico.cern.ch/event/644287/contributions/2724460/>

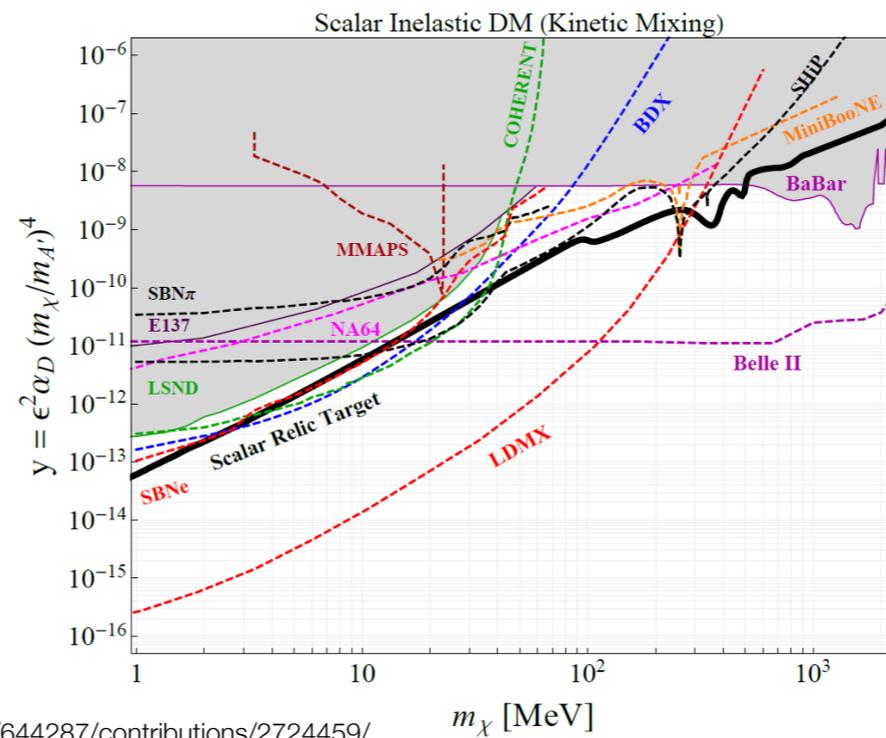
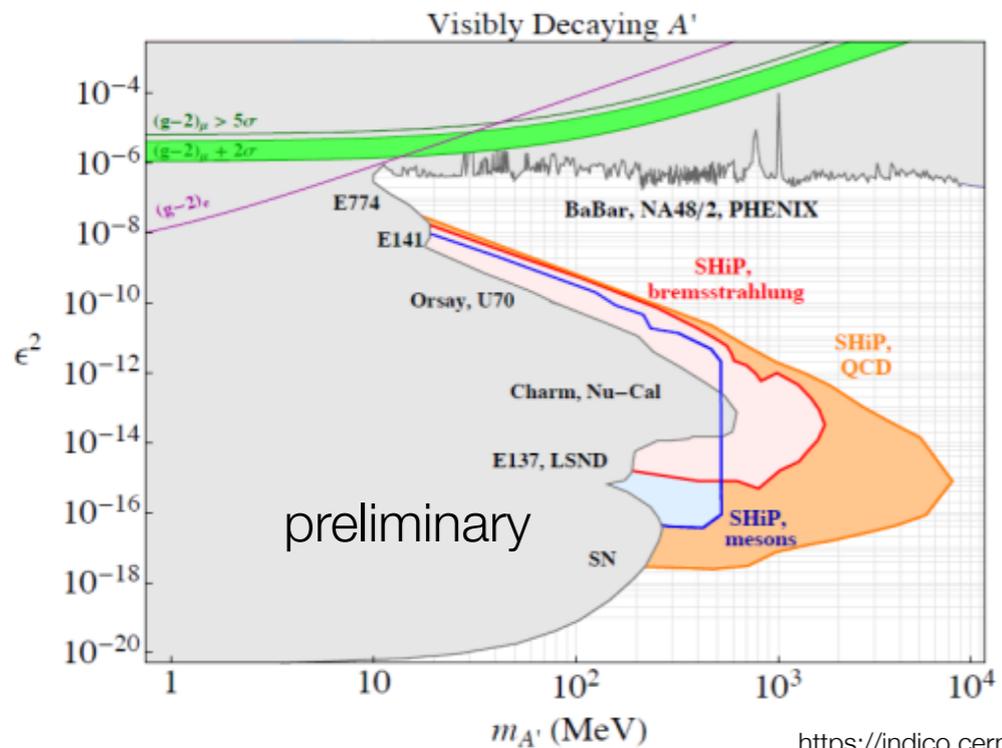
Altri esperimenti CSN1 per FO: SHiP

Esperimento polivalente:

- (anti) neutrino τ
- portali per SO (scalari, vettori e assioni)
- particelle supersimmetriche leggere
- Heavy Neutral Lepton
- neutrino right-handed



Assumendo $2 \cdot 10^{20}$ POT da 400 GeV



diffusione MO su calorimetro in fondo al rivelatore

Conclusioni

- Il Fotone Oscuro (FO) è predetto in una classe di modelli fisici relativamente giovani e generali che stanno velocemente guadagnando interesse nella comunità MO
- PADME è un esperimento ospitato al LNF che cercherà (primariamente) un FO che decade in “invisibile”, collezionando 10^{13} e^+ su bersaglio entro la fine del 2018, testando in modo model-independent un A' con $\varepsilon \gtrsim 10^{-3}$ e con massa fino a 23.7 MeV ($E_{\text{fascio}} = 550$ MeV)
- Oltre a PADME in CSN1 esistono altri gruppi che si occupano della ricerca del FO con esperimenti di base al CERN che sfruttano fasci adronici: NA62 (in presa dati) e SHiP (a partire dal 2026)
- All'interno dell'INFN sono presenti ulteriori esperimenti (non menzionati) dedicati alla ricerca del FO, afferenti al CSN3: BDX (proposta) e HPS (in presa dati)

Backup

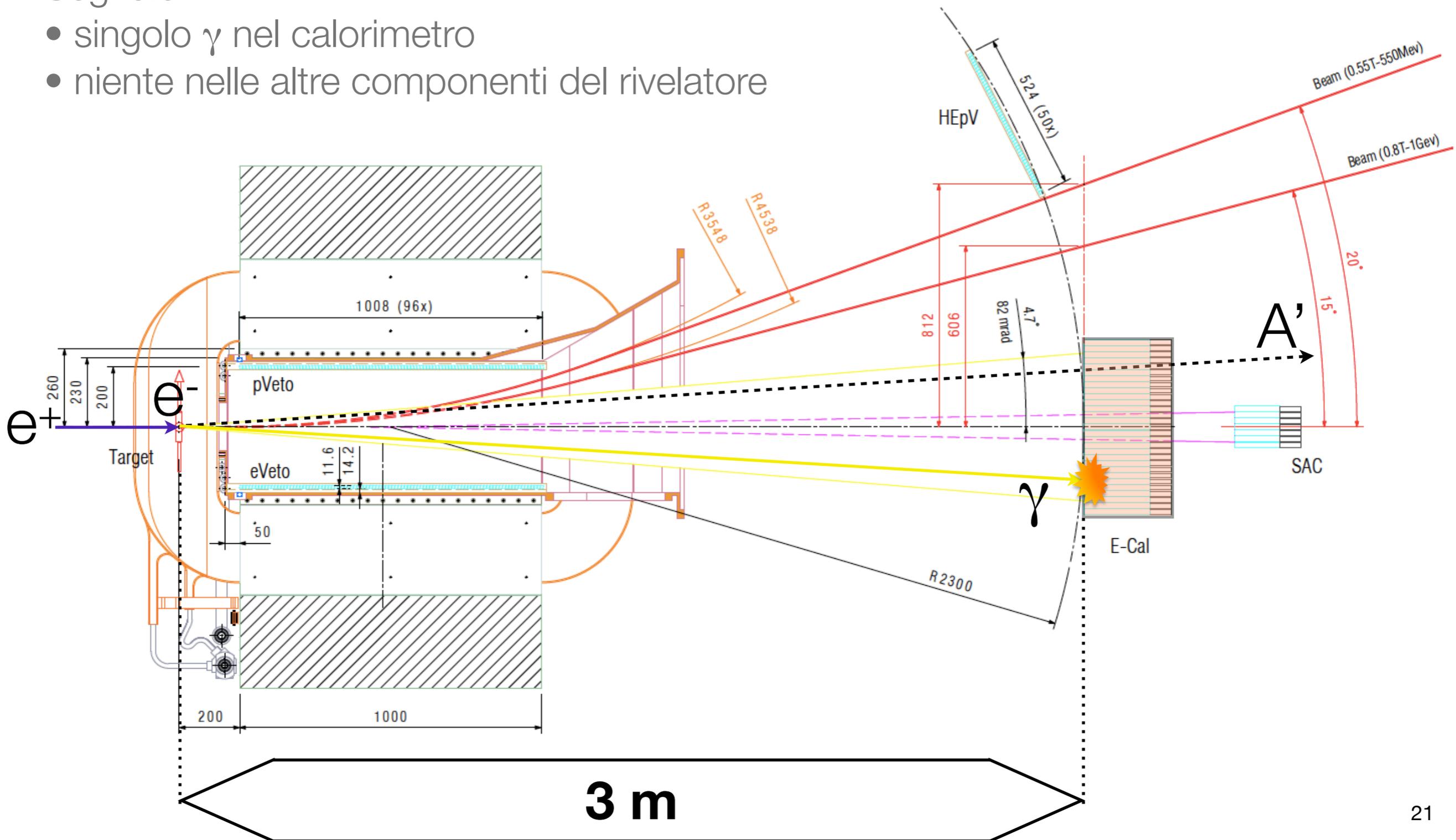
Ricerche del Fotone Oscuro



Vista del rivelatore dall'alto (con segnale)

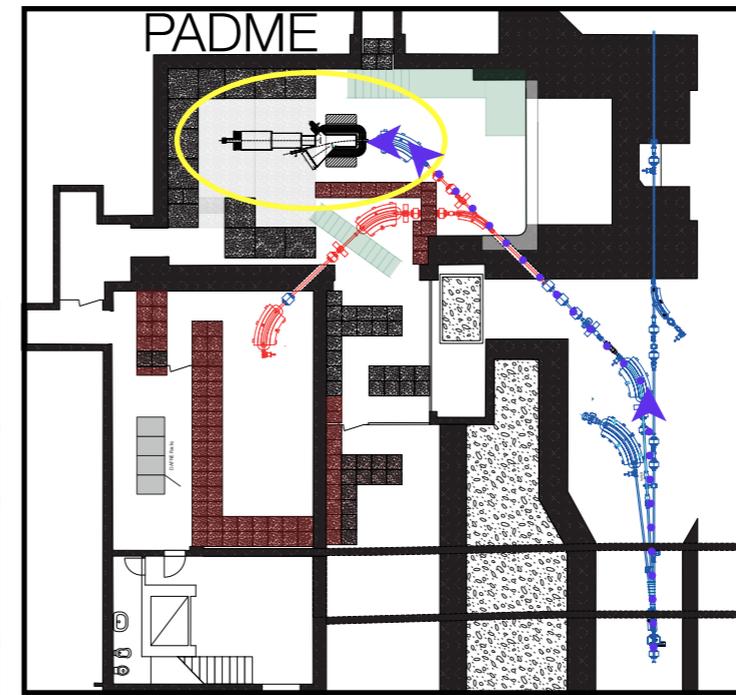
Segnale:

- singolo γ nel calorimetro
- niente nelle altre componenti del rivelatore



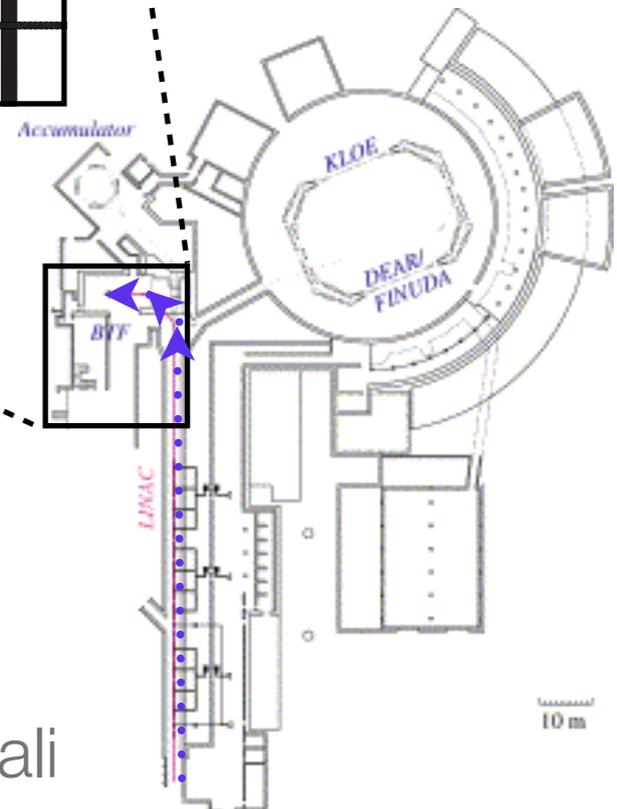
La Beam Test Facility dei LNF

PADME sarà posizionato nella Beam Test Facility dei Laboratori Nazionali di Frascati



< 5.5 m in lunghezza
< 3 m in larghezza

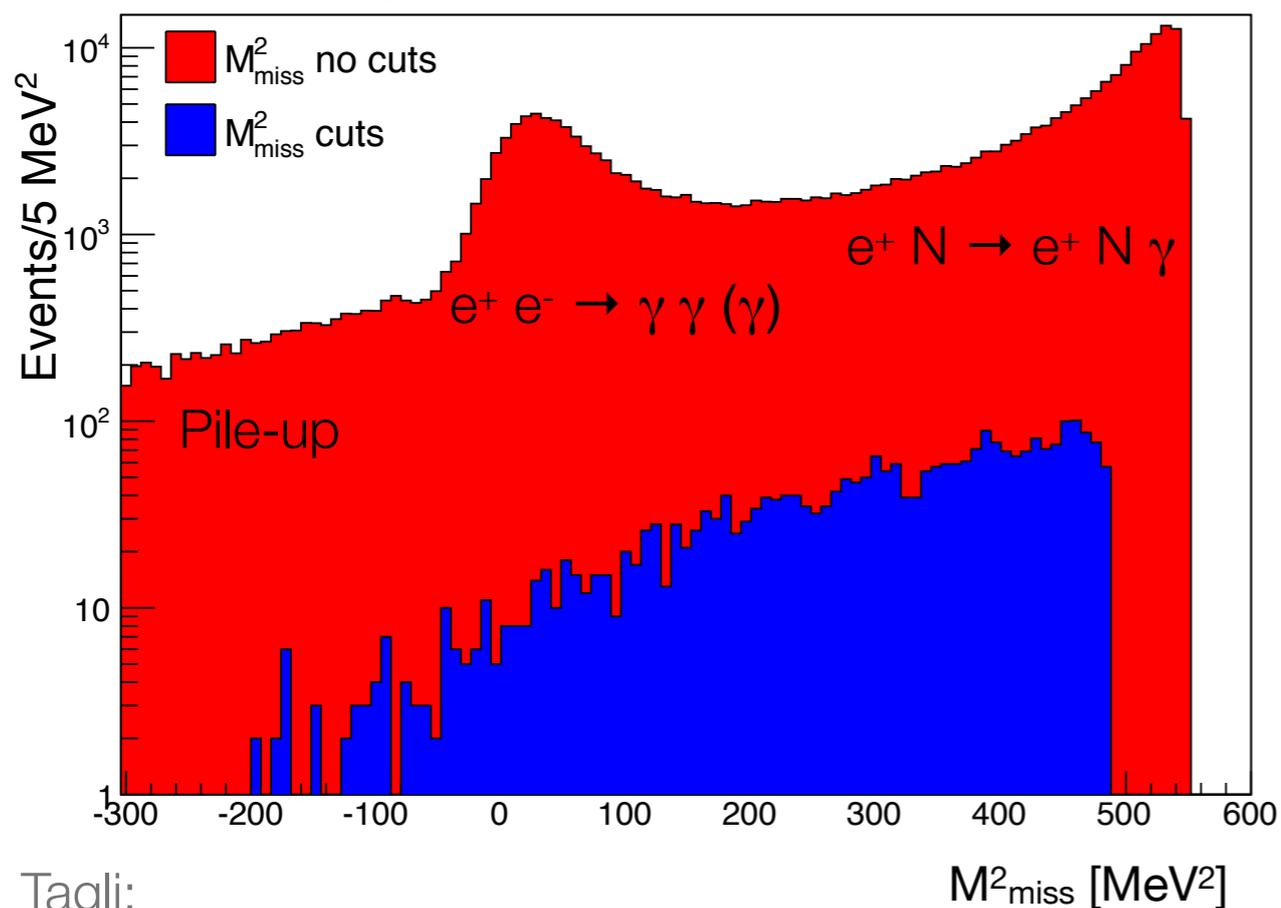
	Modalità parassitica (DAΦNE in opera)		Modalità dedicata	
	Bersaglio	No bersaglio	Bersaglio	No bersaglio
Tipologia particelle	e ⁺ /e ⁻ selezionabile dall'utente	e ⁺ /e ⁻ dip. dalla modalità di DAΦNE	e ⁺ /e ⁻ selezionabile dall'utente	
Energia [MeV]	25-500	510	25-700 (e ⁺) 25-700 (e ⁻)	250-730 (e ⁺) 250-530 (e ⁻)
Spread energetico	1% @ 500 MeV	0.5%	0.5%	
Ripetizione [Hz]	10-49 dipendente dalla modalità di DAΦNE		1-49 selezionabile dall'utente	
Impulso [ns]	10		1.5-40 selezionabile dall'utente	
Intensità [particelle/bunch]	1-10 ⁵ dipendente dall'energia	10 ⁷ -1.5 · 10 ¹⁰	1-10 ⁵ dipendente dall'energia	10 ³ -3 · 10 ¹⁰
Flusso medio max	3.125 · 10 ¹⁰ particelle/s			
Dim. spot [mm]	0.5-25 (y) × 0.6-55 (x)			
Divergenza [mrad]	1-1.5			



Uno dei limiti principali alla sensibilità di PADME dato dal pile-up

Fondi principali:

- $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma (\gamma)$
- $e^+ N \rightarrow e^+ N \gamma$
- pile-up

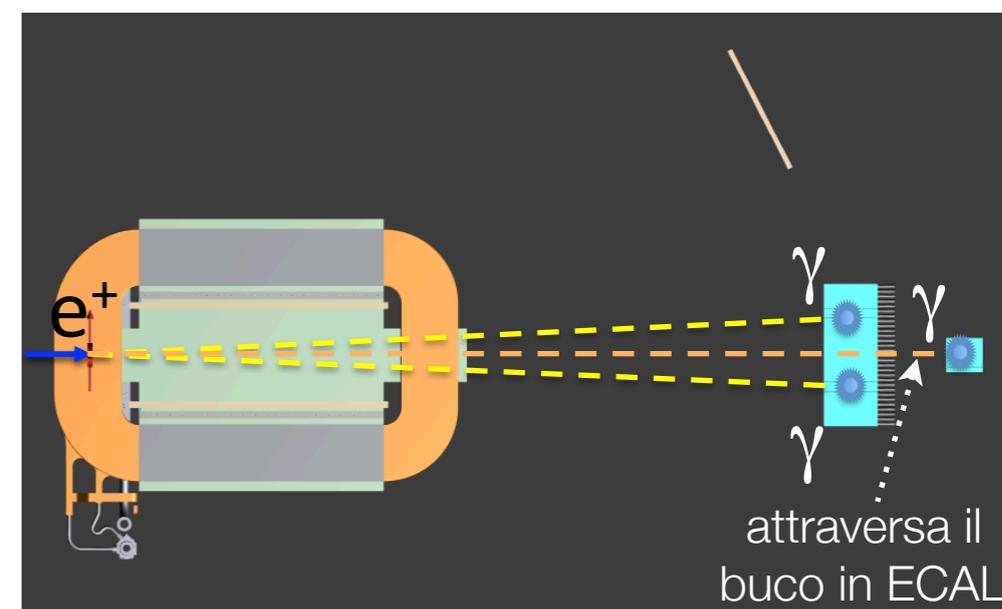


Tagli:

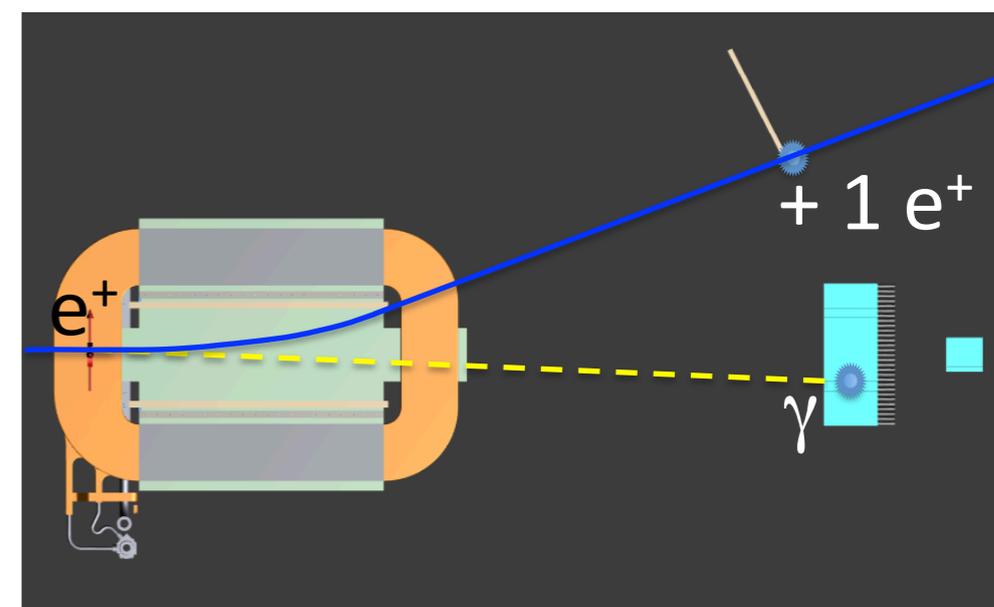
- 1 cluster nel volume fiduciale di ECAL
- no particelle nei veto
- no γ nel SAC con $E_\gamma > 50$ MeV
- $20-150 \text{ MeV} < E_\gamma < 120-350 \text{ MeV}$ (dipendente da $m_{A'}$)

Geometria dei fondi

Annichilazione (+ISR): $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma (\gamma)$



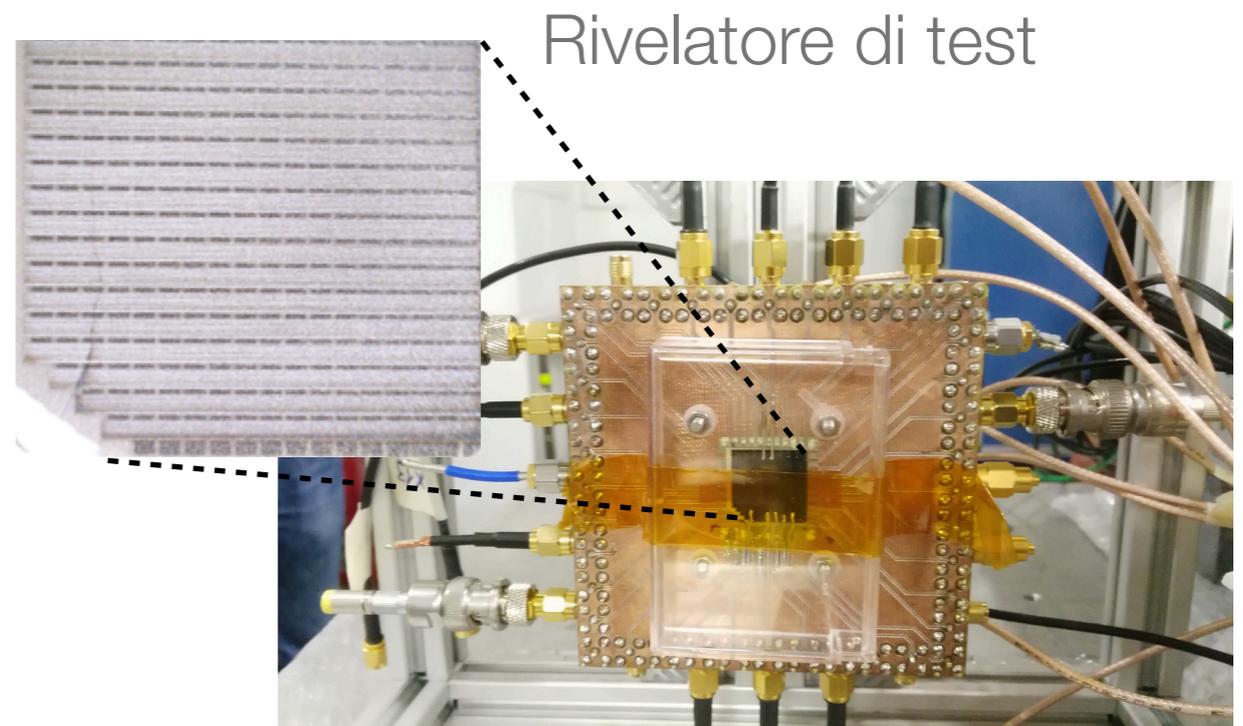
Bremsstrahlung: $e^+ N \rightarrow e^+ N \gamma$



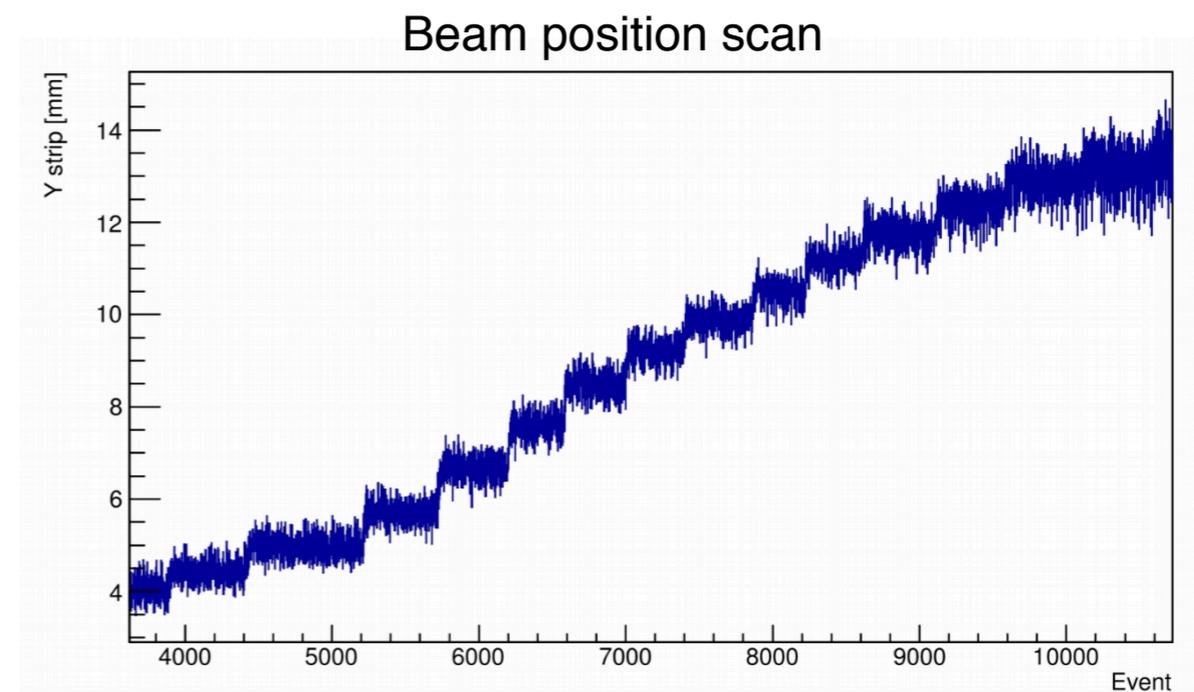
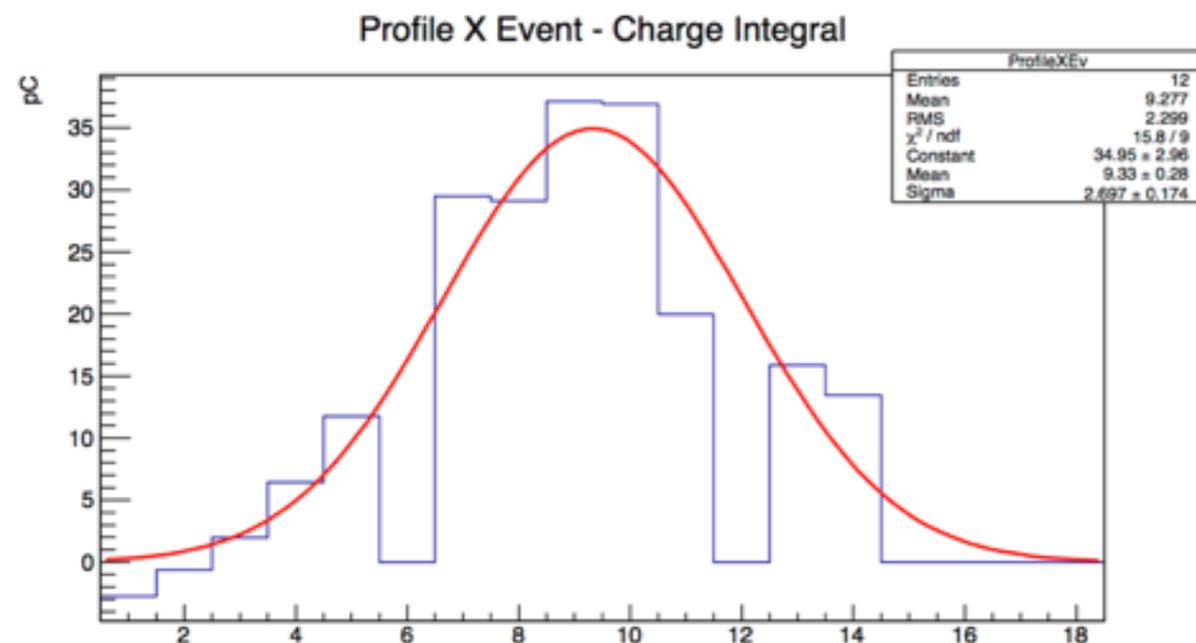
Bersaglio attivo

Caratteristiche:

- Diamante (basso z, poca brems.)
- Dim.: 20×20×0.05/0.1 mm³
- 16 (oriz.)×16 (vert.) strisce attive di grafite
- σ_{x-y} (posizione fascio) < 2 mm
- in vuoto con sistema di movimento



Risultati rivelatore di test



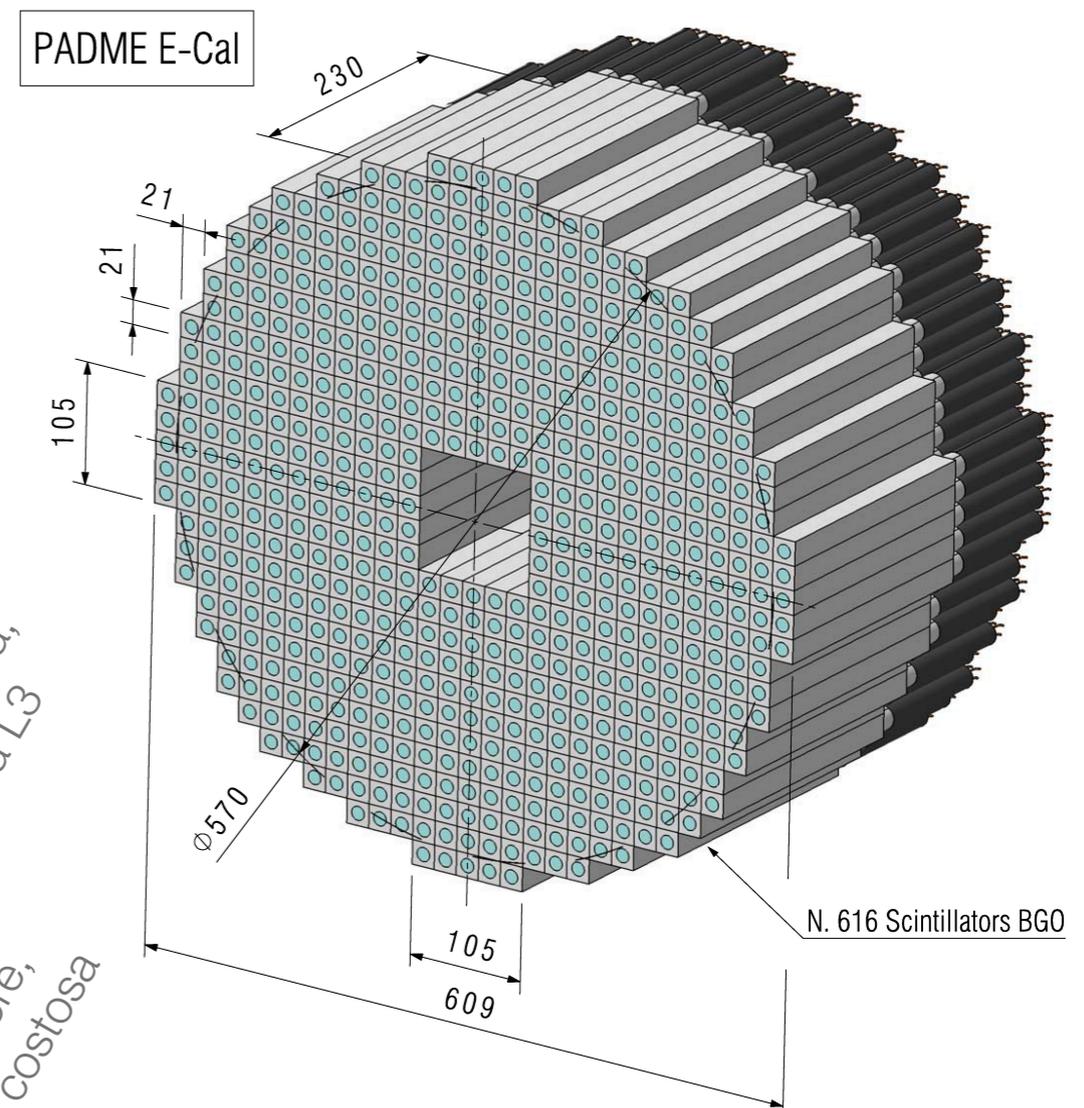
Calorimetro elettromagnetico (1)

Caratteristiche:

- $\sigma_E \approx (1-2)\%/\sqrt{E}$
 - alta statistica γ
 - contenimento
- risoluzione temporale sul cluster < 1 ns
- risoluzione angolare ≈ 1 mrad
- copertura angolare: $[20,93]$ mrad
- accettazione angolare: $[26,83]$ mrad
- buco centrale per brems. al SAC (più veloce)

616 BGO $2.1 \times 2.1 \times 23$ cm³
@ 3 m dal bersaglio

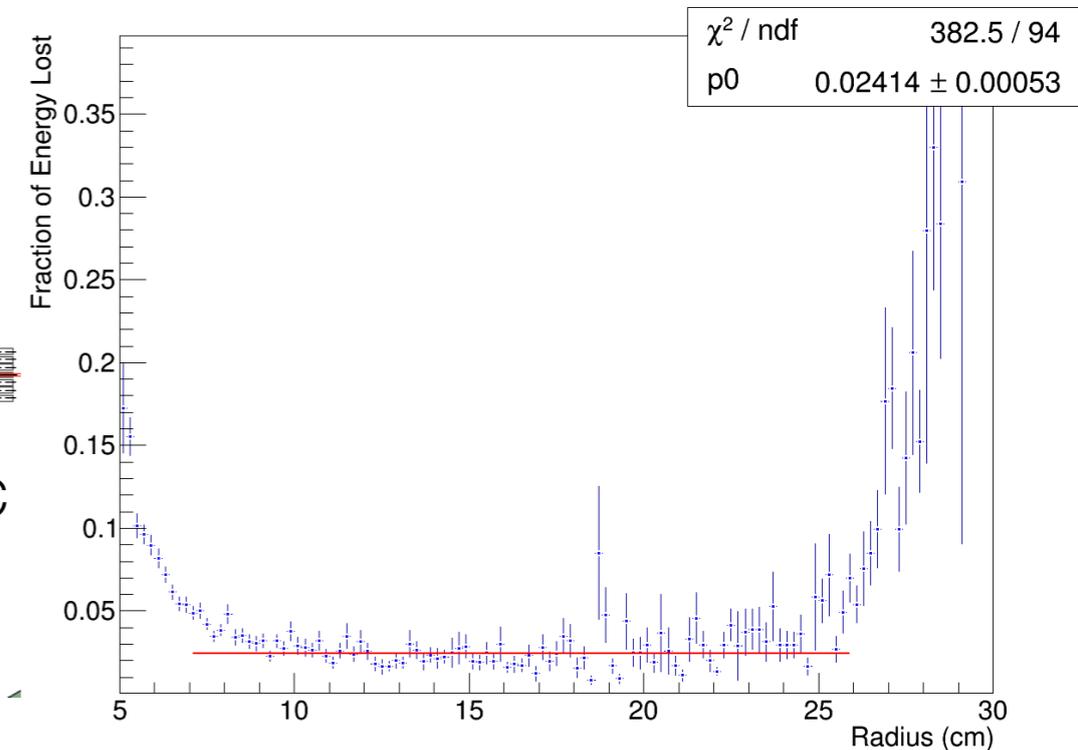
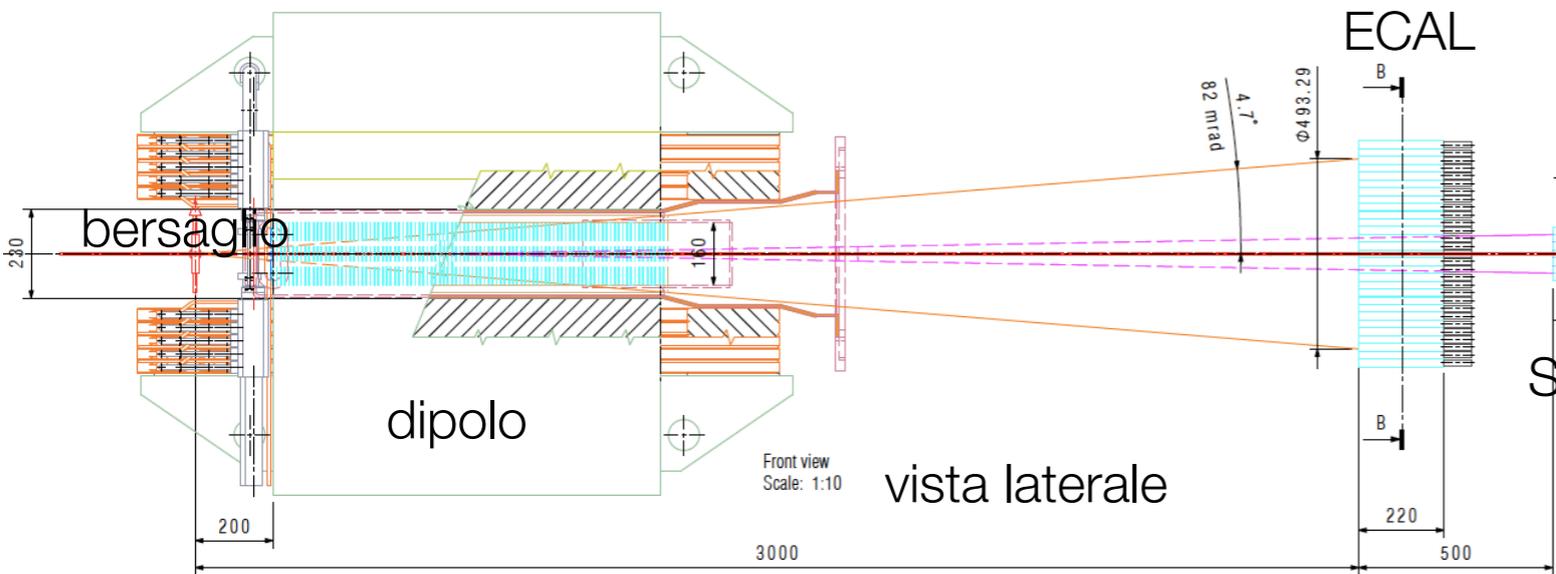
Parameter:	ρ	MP	X_0^*	R_M^*	dE^*/dx	λ_I^*	τ_{decay}	λ_{max}	n^{\ddagger}	Relative output [†]	Hygro-scopic?	$d(LY)/dT$
Units:	g/cm ³	°C	cm	cm	MeV/cm	cm	ns	nm				%/°C [‡]
NaI(Tl)	3.67	651	2.59	4.13	4.8	42.9	245	410	1.85	100	yes	-0.2
BGO	7.13	1050	1.12	2.23	9.0	22.8	300	480	2.15	21	no	-0.9
BaF ₂	4.89	1280	2.03	3.10	6.5	30.7	650 ^s 0.9 ^f	300 ^s 220 ^f	1.50	36 ^s 4.1 ^f	no	-1.9 ^s 0.1 ^f
CsI(Tl)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	1220	550	1.79	165	slight	0.4
CsI(pure)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	30 ^s 6 ^f	420 ^s 310 ^f	1.95	3.6 ^s 1.1 ^f	slight	-1.4
PbWO ₄	8.3	1123	0.89	2.00	10.1	20.7	30 ^s 10 ^f	425 ^s 420 ^f	2.20	0.3 ^s 0.077 ^f	no	-2.5
LSO(Ce)	7.40	2050	1.14	2.07	9.6	20.9	40	402	1.82	85	no	-0.2
LaBr ₃ (Ce)	5.29	788	1.88	2.85	6.9	30.4	20	356	1.9	130	yes	0.2



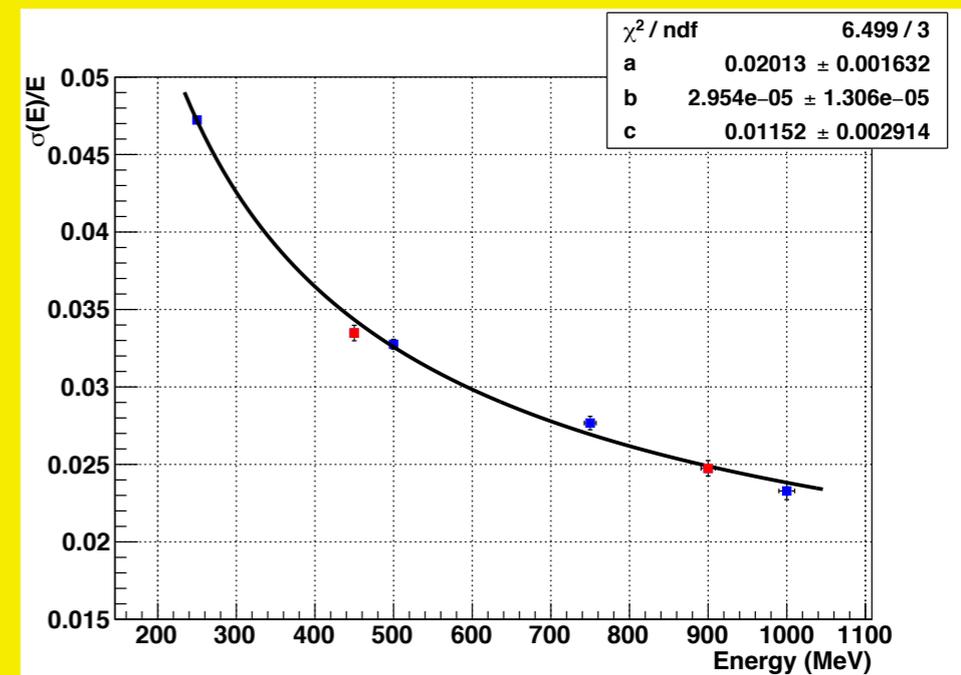
2° miglior scelta,
gratis da L3
scelta migliore,
ma molto costosa

Calorimetro elettromagnetico (2)

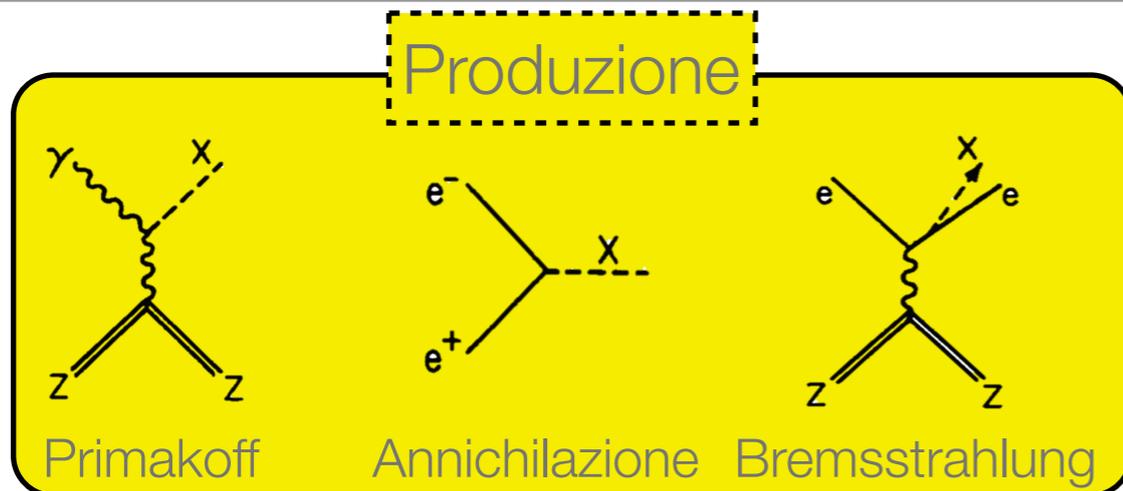
Gap di dipolo limita l'accettanza angolare



Risultati con una matrice 5x5 di BGO @ BTF



Axion Like Particles a PADME



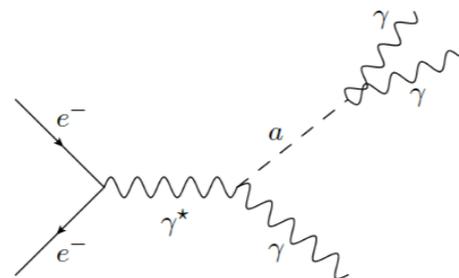
ALP che decade in invisibile o a lunga vita media in PADME ha la stessa segnatura di un FO:

- 1γ
- energia mancante nello stato finale

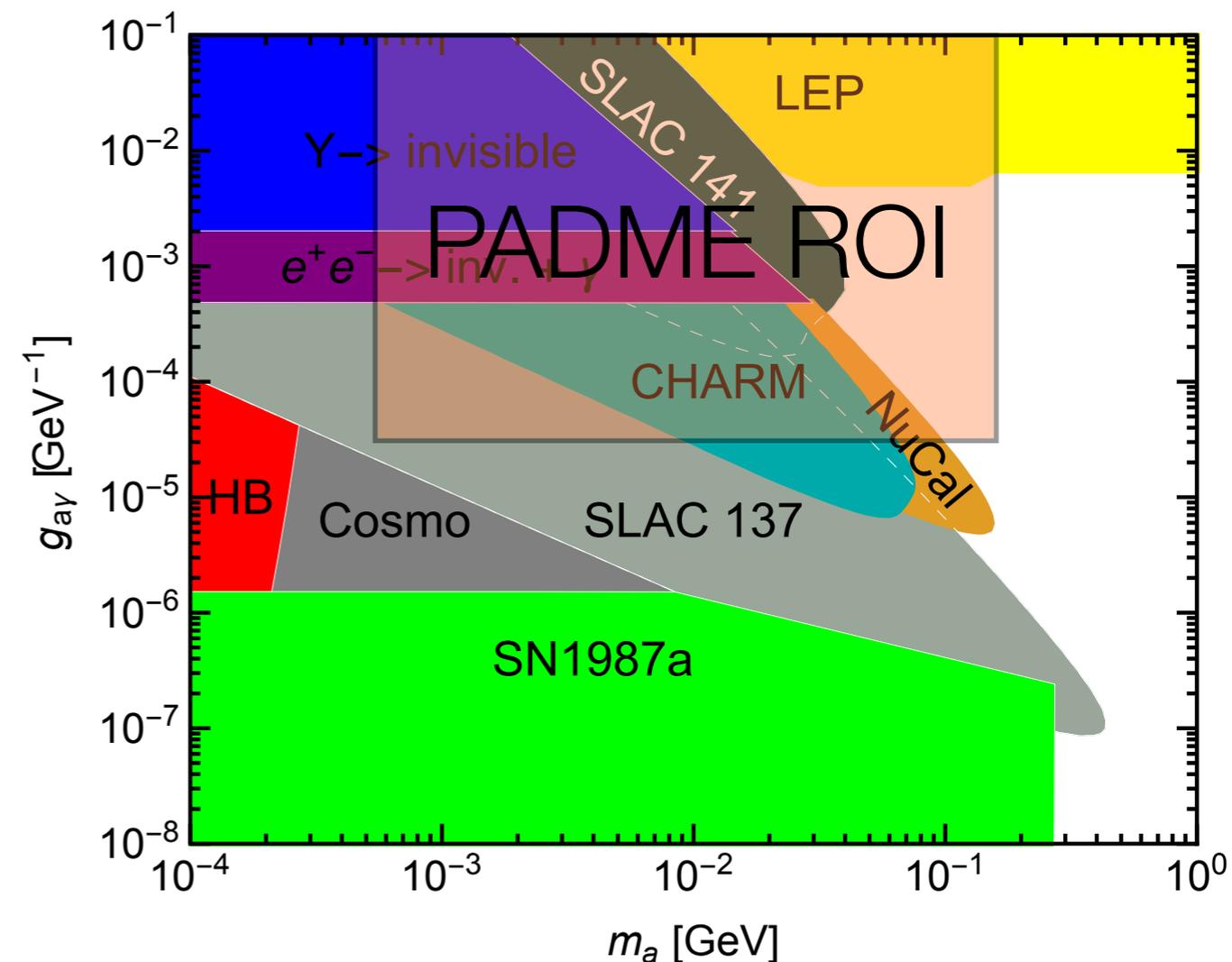
Nel dec. visibile $a \rightarrow \gamma \gamma$ tutti i modi di produzione possono essere esplorati fino a $m_{ALP} \sim 100$ MeV.

Osservabili:

- $e^+ \gamma \gamma$
- $\gamma \gamma \gamma$



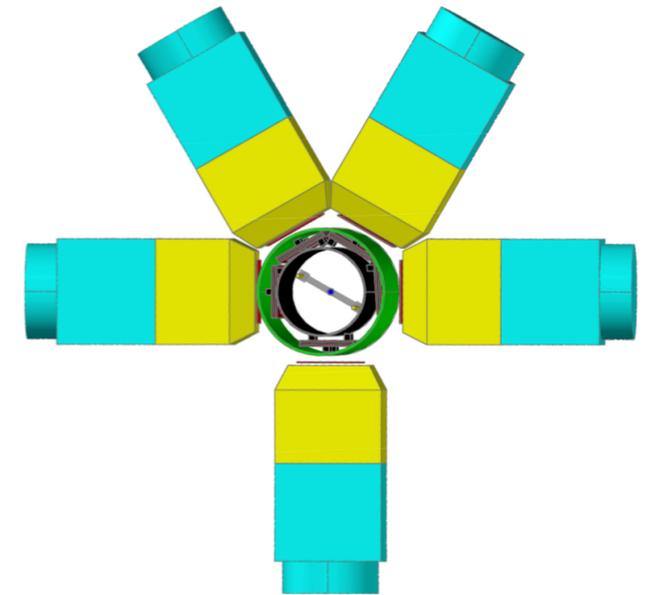
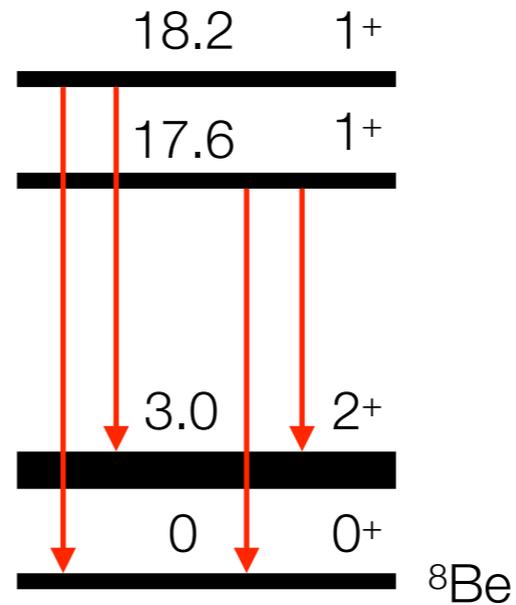
Limiti sulle ALPs che si accoppiano ai fotoni



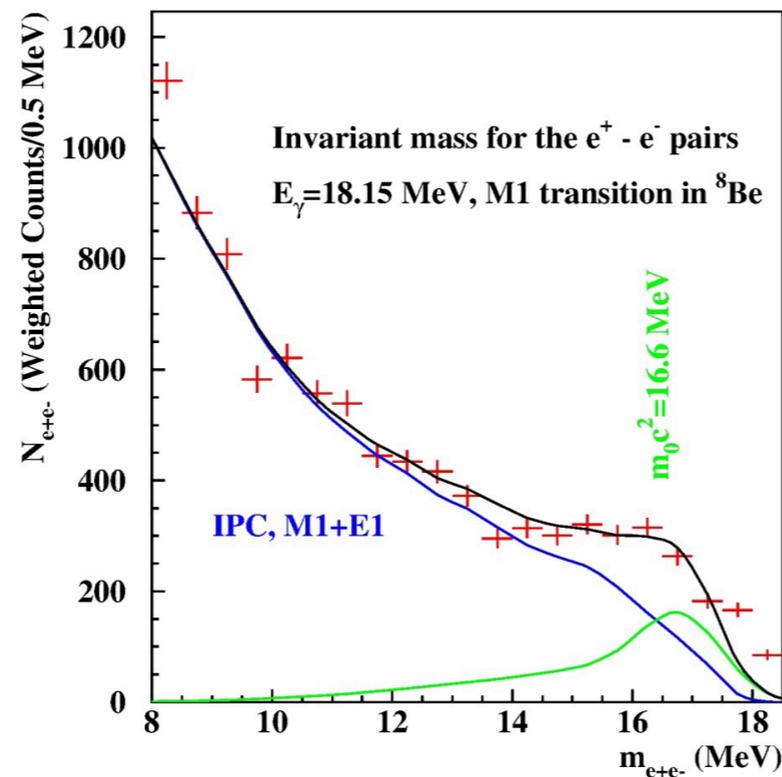
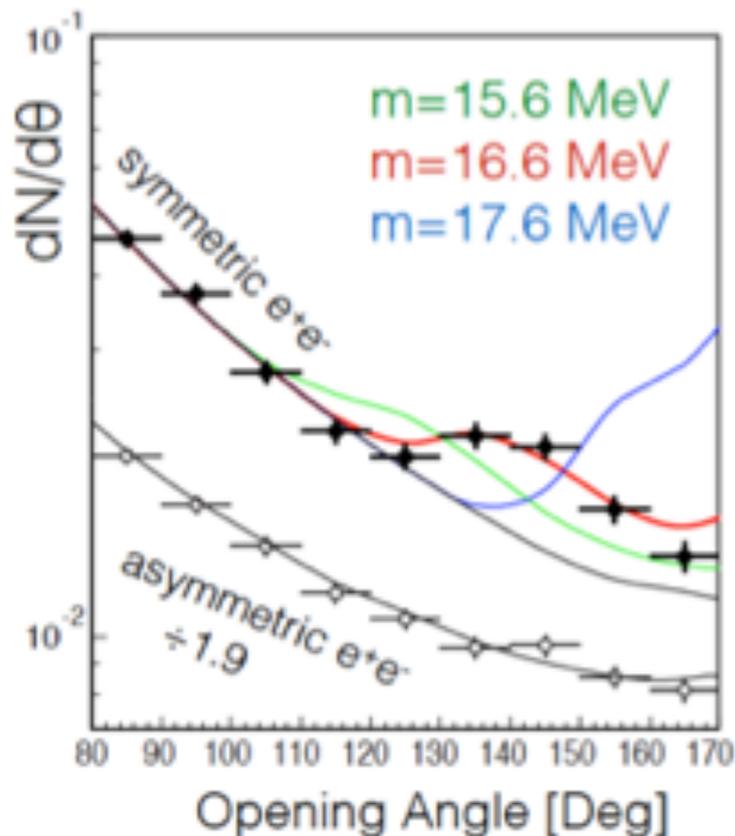
Anomalia ^8Be

Eccitazione con la reazione $^7\text{Li}(p,\gamma)^8\text{Be}$
 $\hookrightarrow e^+ e^-$

Eccesso di 6.8σ nella distribuzione
 angolare di $e^+ e^-$ con massa invariante
 $m = 16.6 \text{ MeV}$



disposizione scintillatori
 del rivelatore intorno al
 bersaglio di ^7Li



Possibile spiegazione:
 bosone (vettore, preferito)
 protofobico massivo