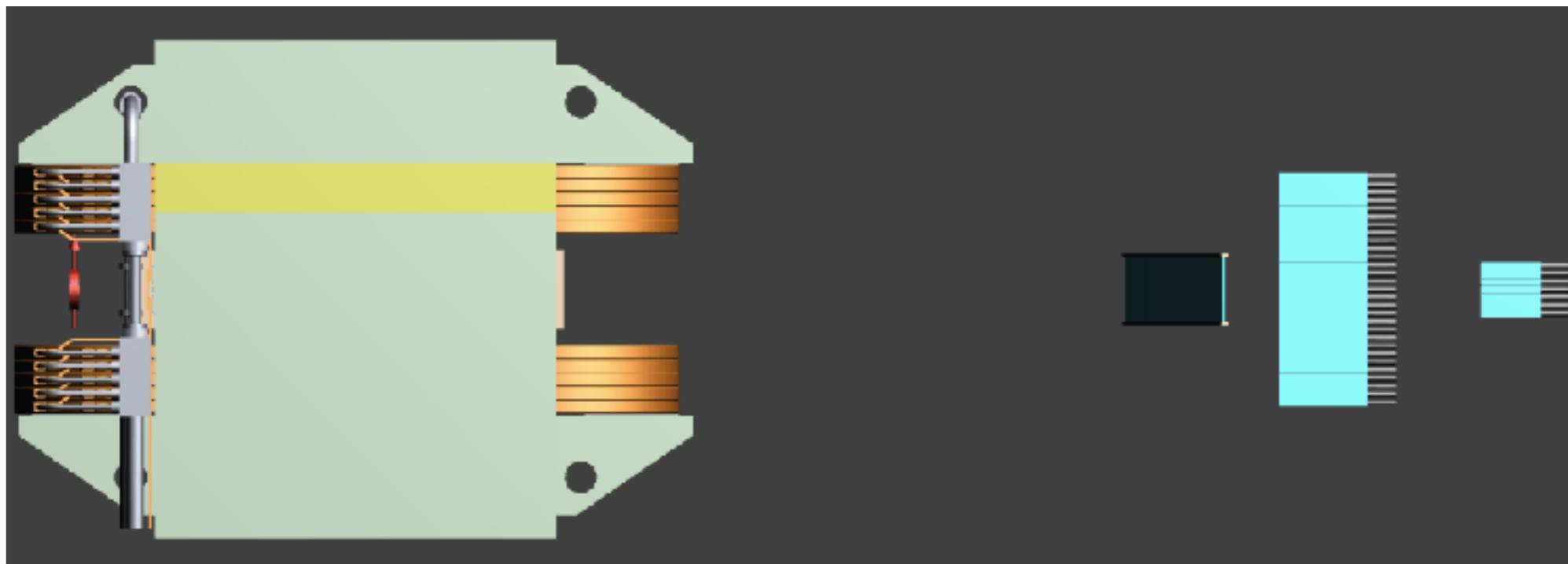




# L'esperimento PADME

Gabriele Piperno per la collaborazione PADME

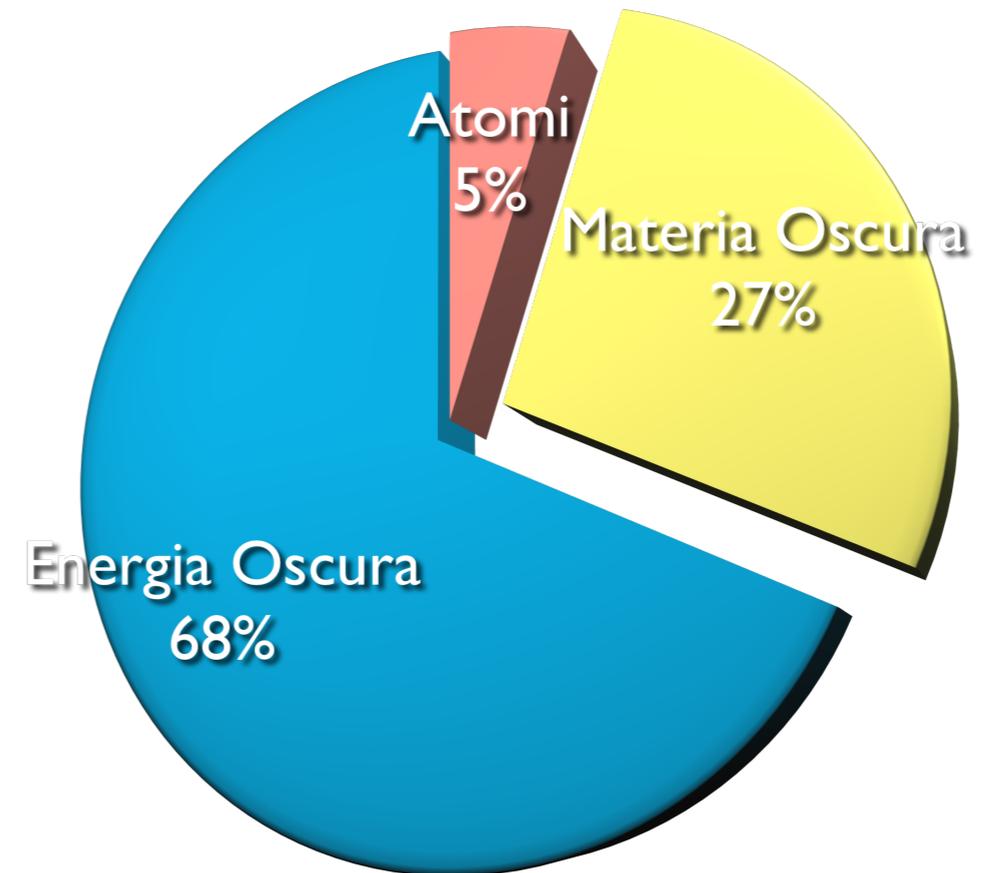
---



# 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".

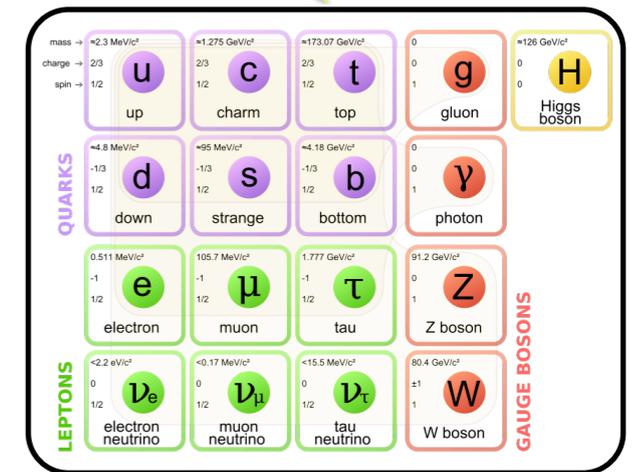
Modello più semplice aggiunge una simmetria U(1) di gauge e il suo bosone: il Fotone Oscuro (FO)  $A'$



- particelle MS neutre sotto questa simmetria
- il nuovo campo si accoppia al MS con carica effettiva  $\epsilon q$

## Settore Oscuro

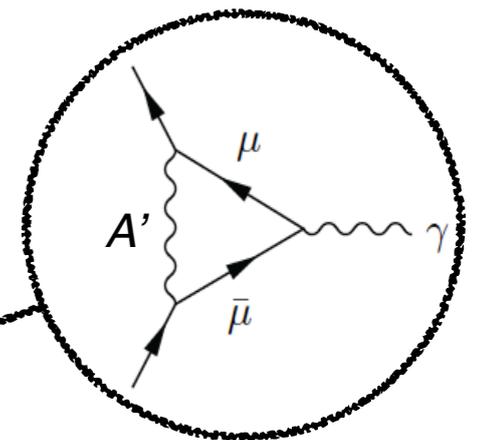
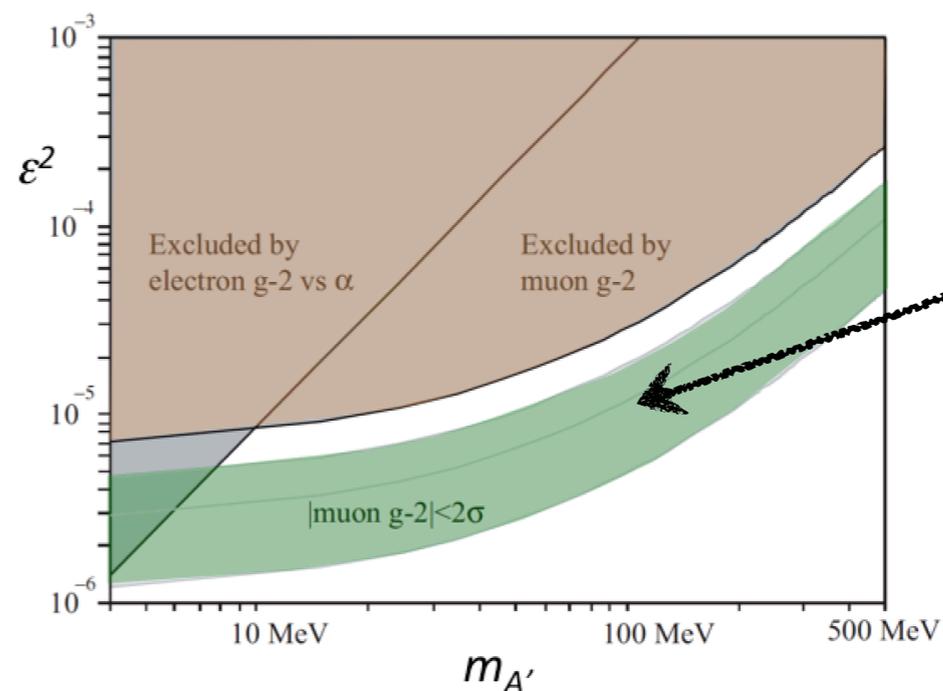
Portale ( $A'$ )



In aggiunta  $A'$  con

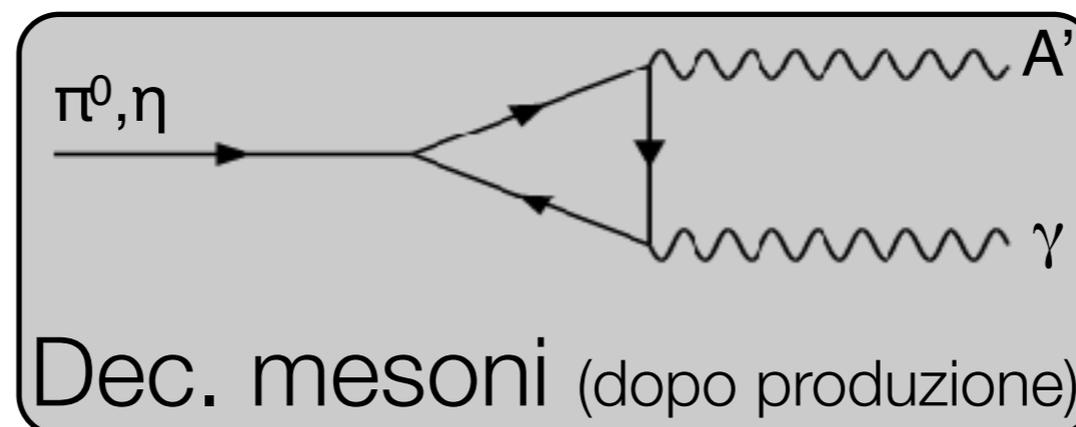
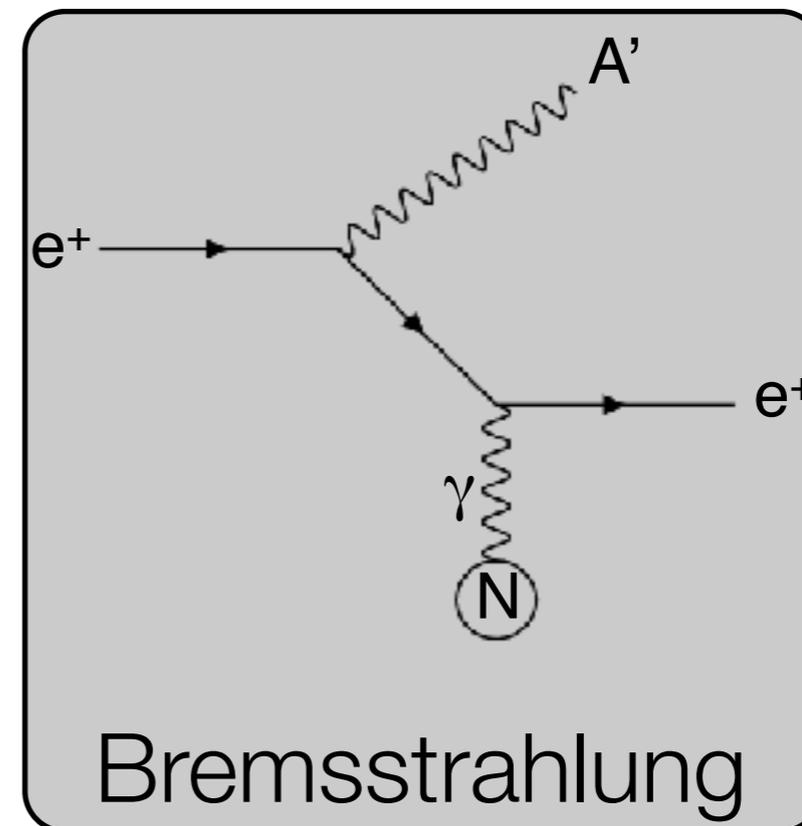
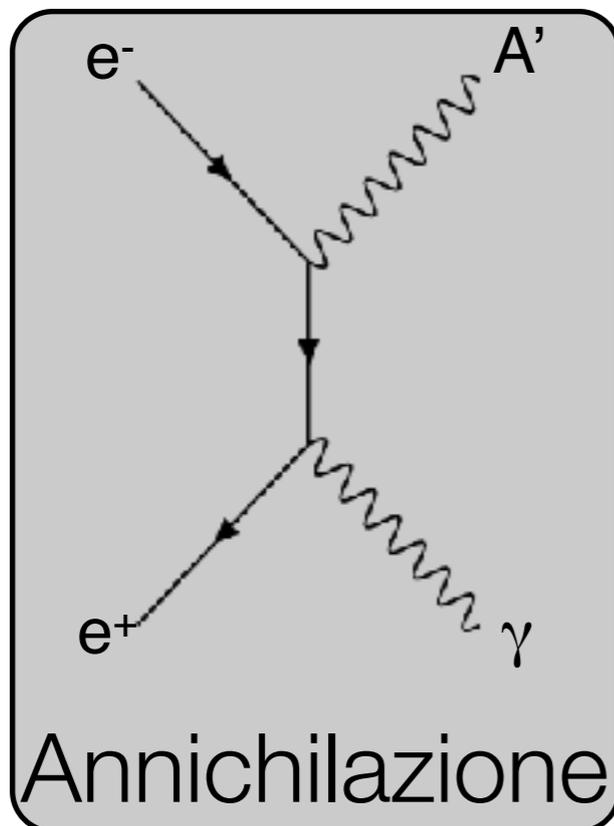
- $1 \text{ MeV} < m_{A'} < 1 \text{ GeV}$
- $\epsilon \gtrsim 10^{-3}$

potrebbe spiegare la discrepanza tra teoria e misura su  $(g-2)_\mu$



# Produzione del Fotone Oscuro

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



# 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:  
 $1/(\alpha \varepsilon^2 m_{A'})$

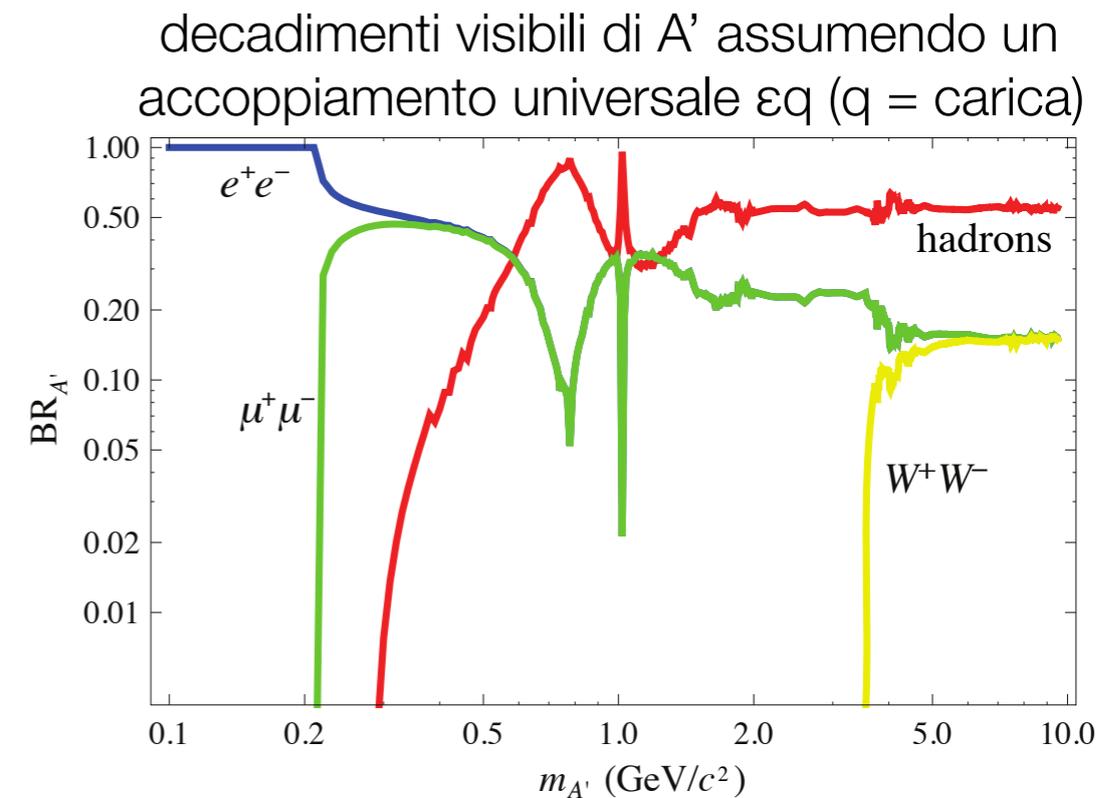
## Decadimenti invisibili

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

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

Vita media  $A'$  proporzionale a:  
 $1/(\alpha_D m_{A'})$

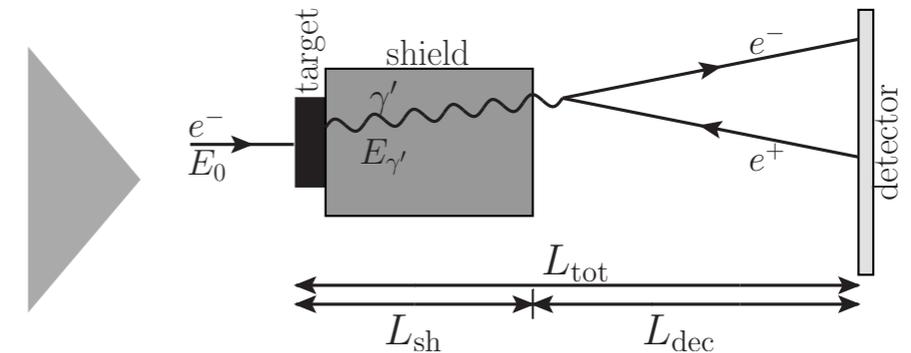
$\alpha_D$ : costante di accoppiamento di  $A'$  al Settore Oscuro



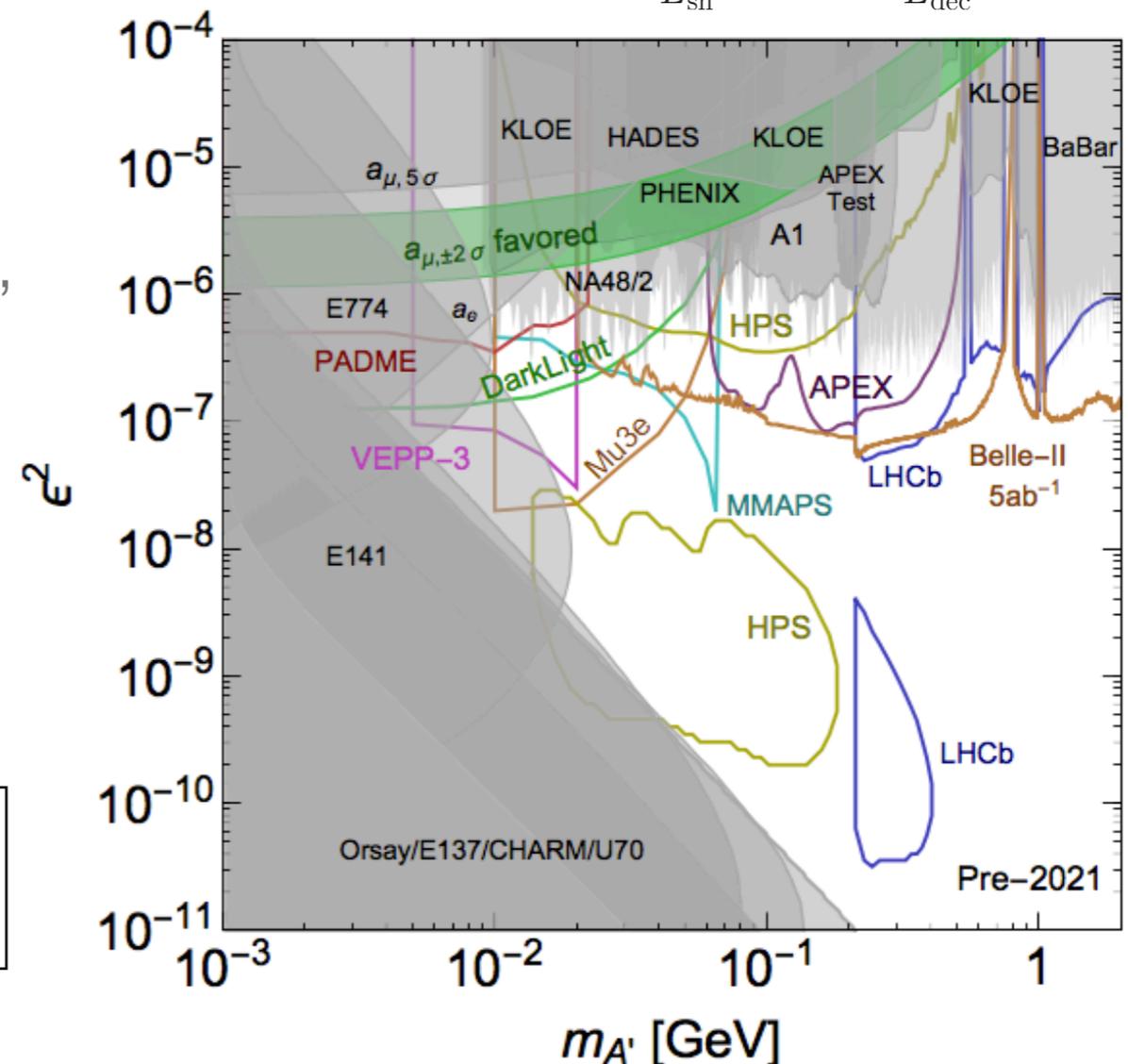
# Status della ricerca nel visibile

## 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



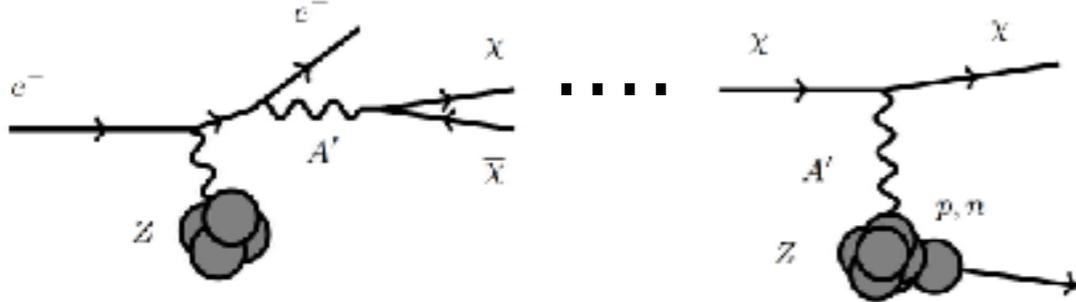
$(g-2)_\mu$  escluso (modello più semplice), ma ancora interesse per questo tipo di ricerca



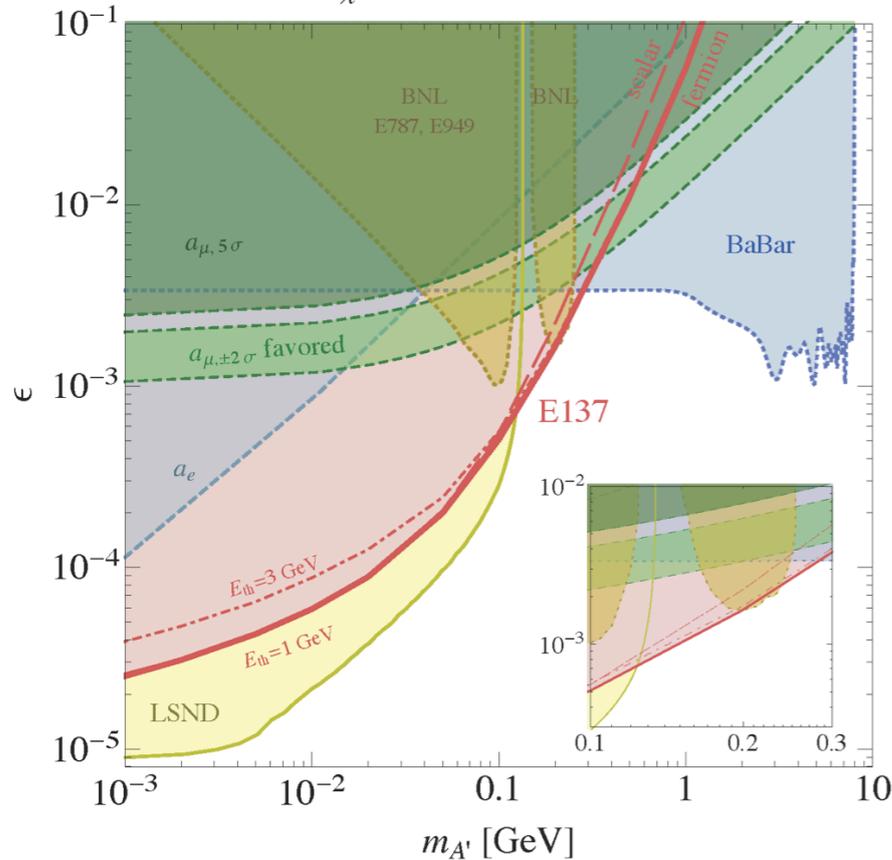
# Stato della ricerca nell'invisibile

## Tecniche:

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



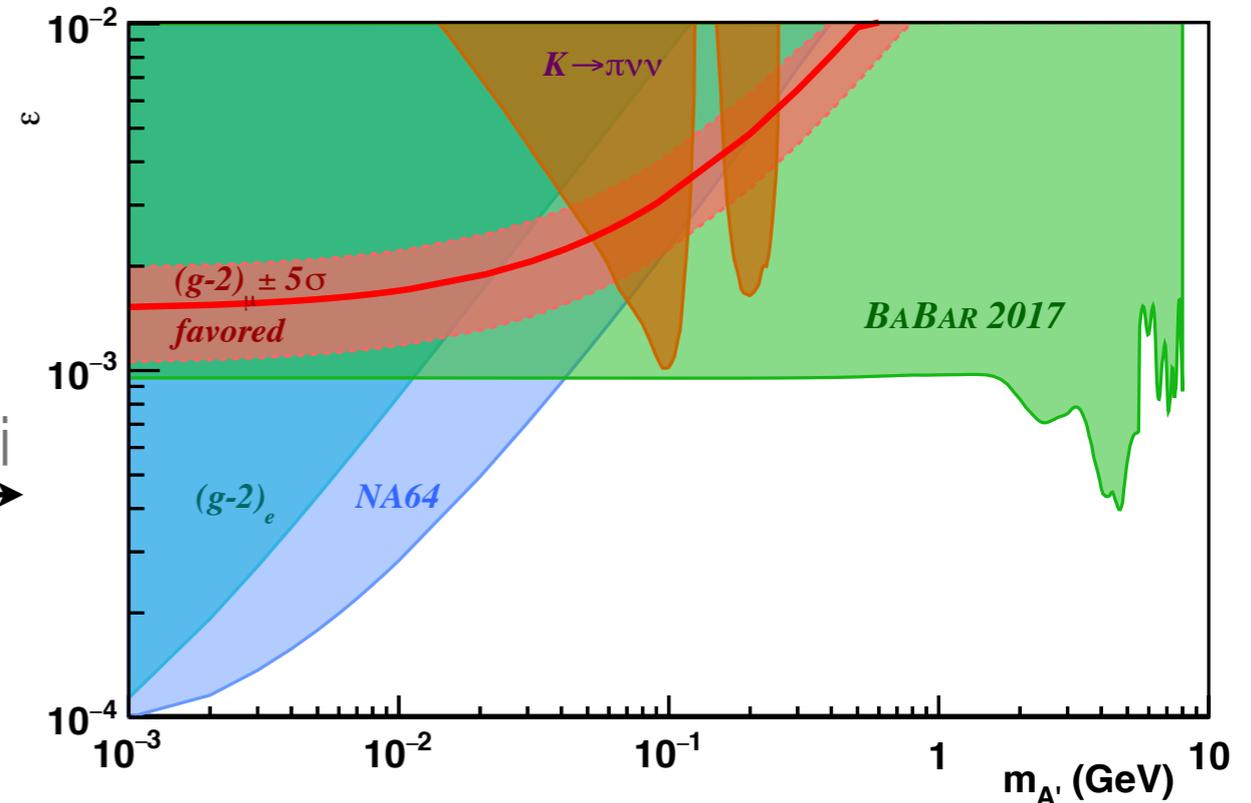
$m_\chi < 0.5 \text{ MeV}, \alpha_D = 0.1$



Non comparabili  
direttamente

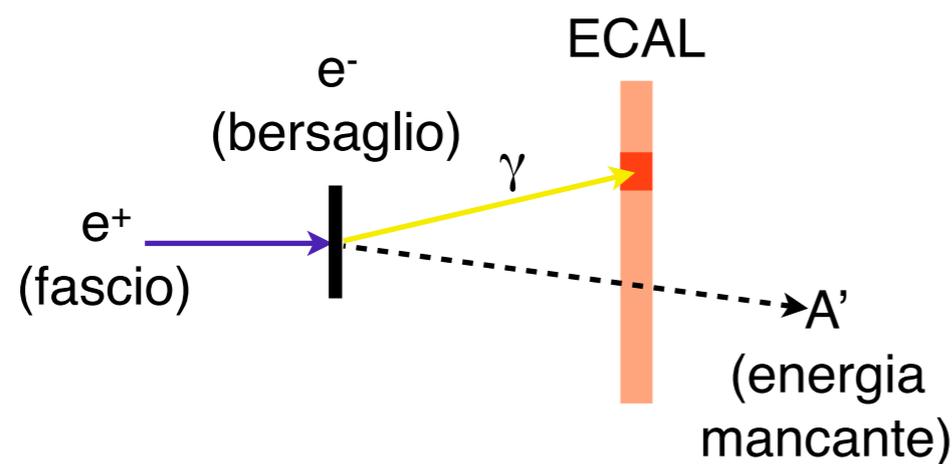
- ricerca massa mancante (annichilazione)

- processo cinematicamente vincolato
- no assunzioni su catena di dec. di  $A'$



# La tecnica PADME

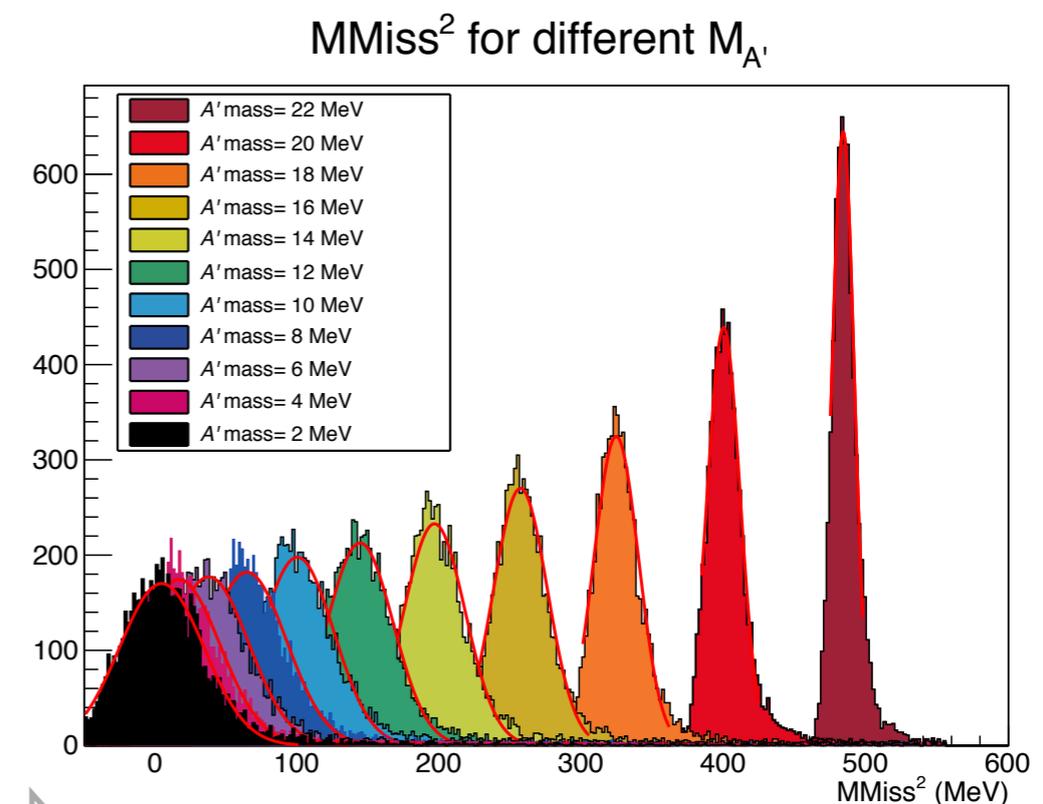
Ricerca di  $A'$  in annichilazioni  $e^+e^-$  cercando massa mancante (decadimento invisibile) in condizioni cinematicamente vincolate



- energia e posizione fascio note
- energia e posizione fotone misurate

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

- minime assunzioni dipendenti da modello:  $A'$  si accoppia ai leptoni
- accoppiamento di qualsiasi nuova particella leggera da annichilazioni  $e^+e^-$  può essere limitato: **Fotone Oscuro, Axion Like Particles, Dark Higgs**



# Il rivelatore

bersaglio attivo

- diamante (basso z)
- spessore 100  $\mu\text{m}$
- info su tempo, dim. spot fascio, numero  $e^+$

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

- barre scint. plastico

calorimetro di piccolo angolo

- 49  $\text{PbF}_2$
- $2 \times 2 \times 20 \text{ cm}^3$
- 0-20 mrad cop. ang.

calorimetro elettromagnetico

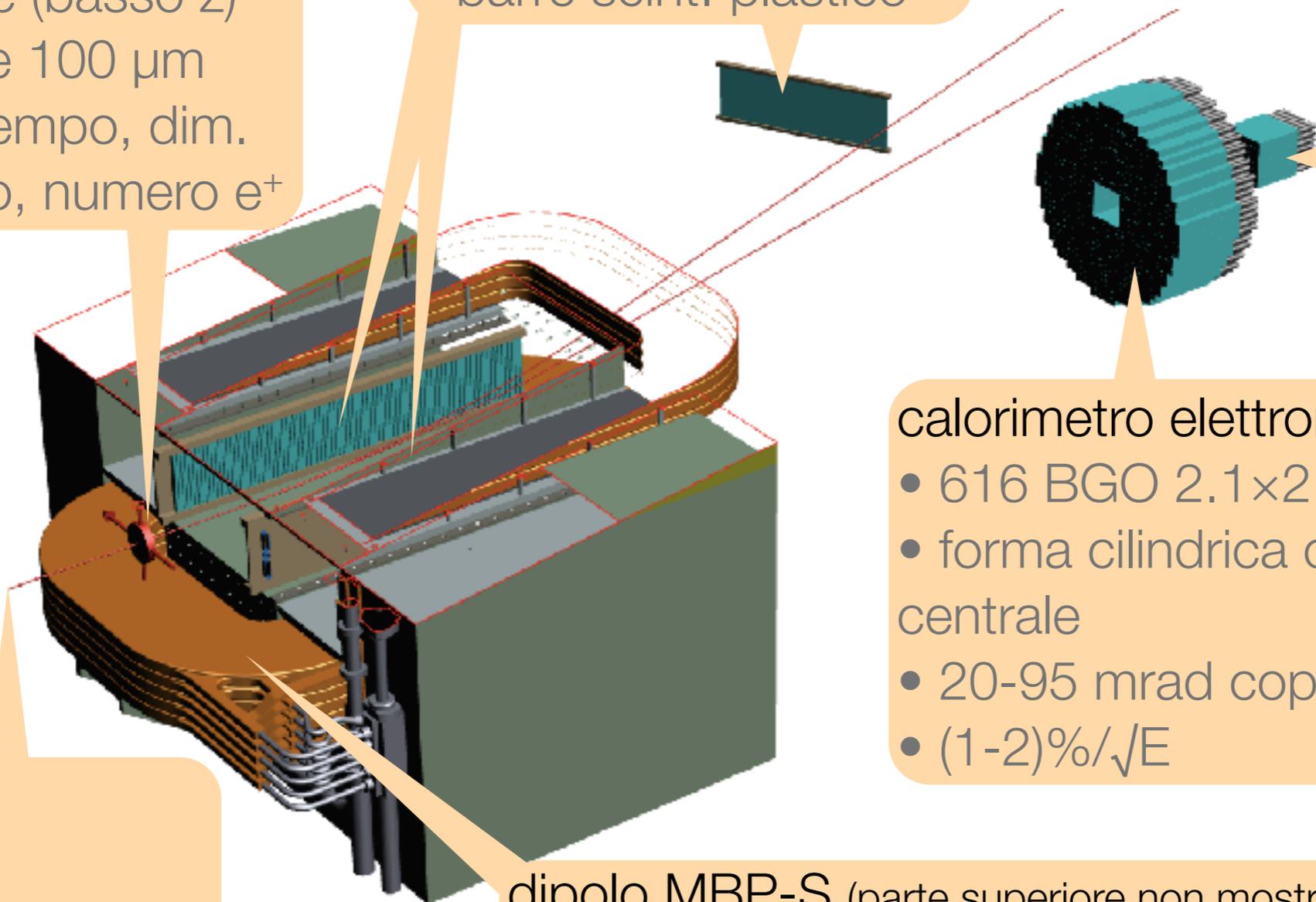
- 616 BGO  $2.1 \times 2.1 \times 23 \text{ cm}^3$
- forma cilindrica con buco centrale
- 20-95 mrad cop. ang.
- $(1-2)\%/\sqrt{E}$

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

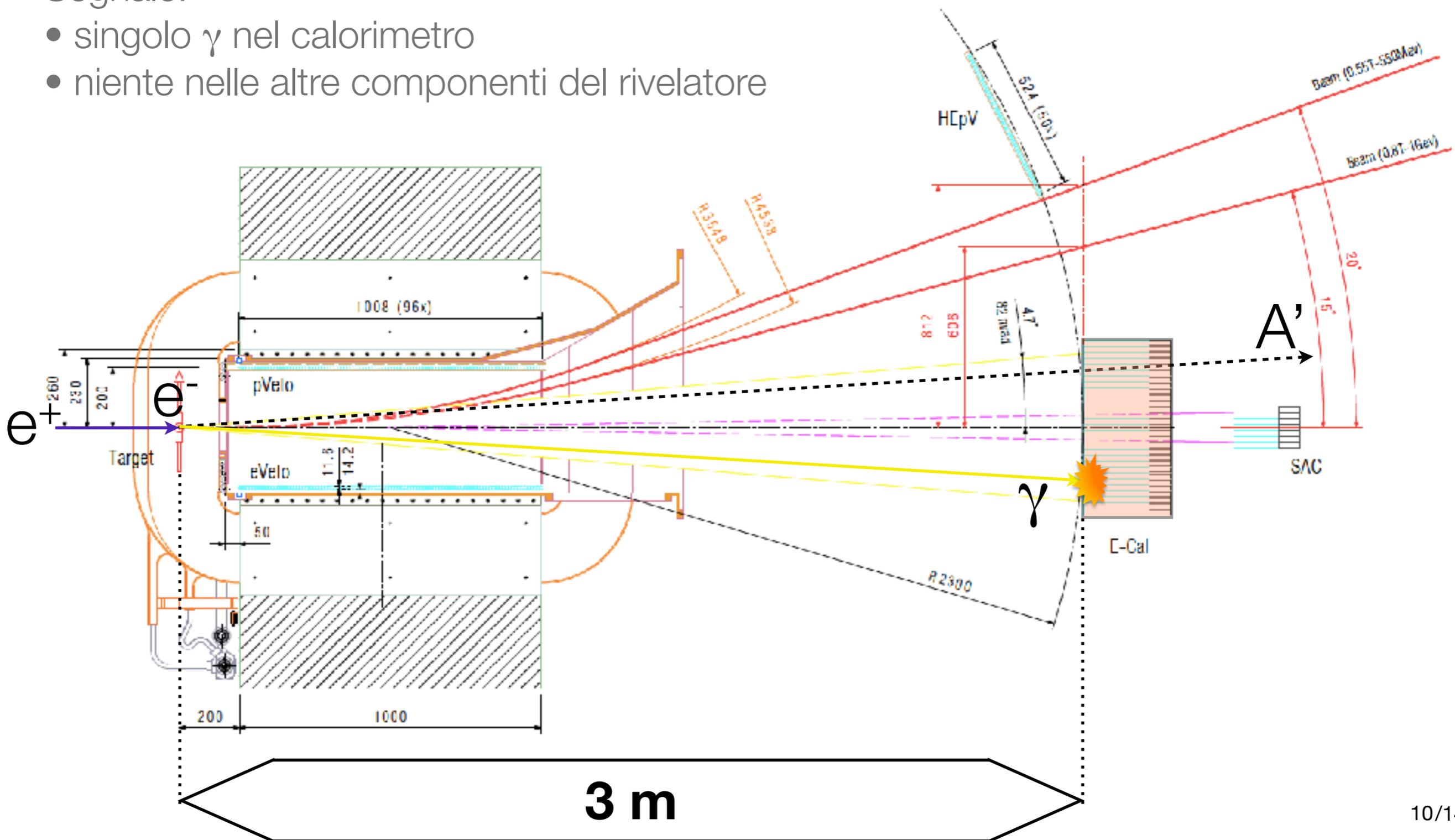


Poster su ECAL  
di Clara Taruggi

# Vista del rivelatore dall'alto (con segnale)

Segnale:

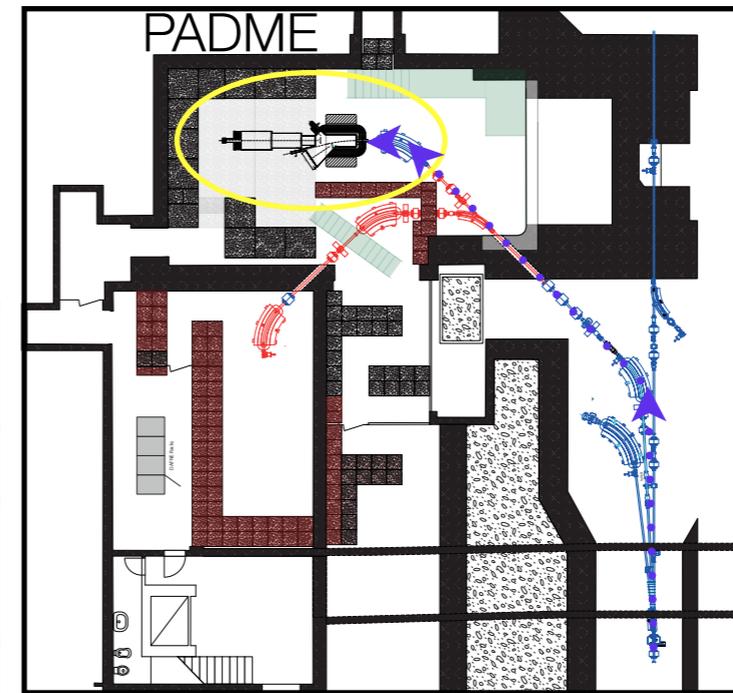
- singolo  $\gamma$  nel calorimetro
- niente nelle altre componenti del rivelatore



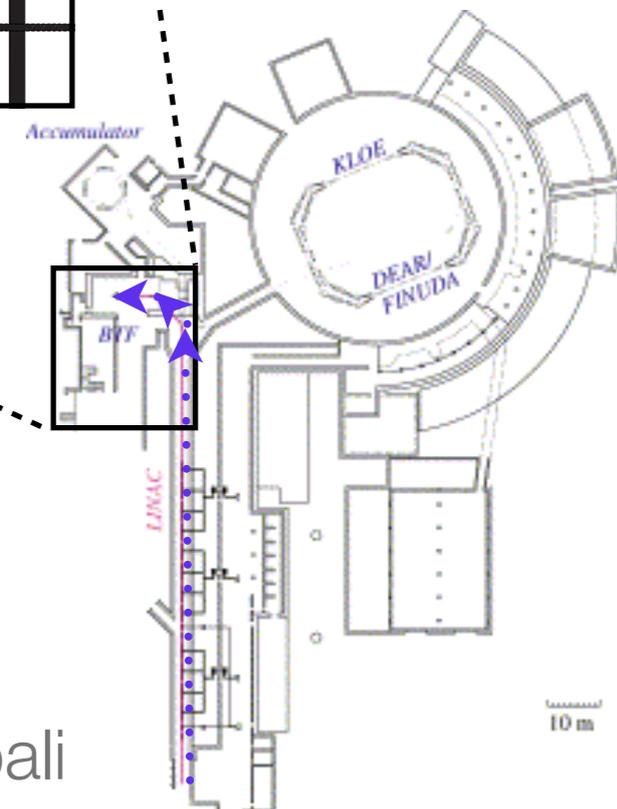
# La Beam Test Facility dei LNF

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

	Modalità parassitica (DAΦNE in opera)		Modalità dedicata	
	Bersaglio	No bersaglio	Bersaglio	No bersaglio
Tipologia particelle	e <sup>+</sup> /e <sup>-</sup> selezionabile dall'utente	e <sup>+</sup> /e <sup>-</sup> dip. dalla modalità di DAΦNE	e <sup>+</sup> /e <sup>-</sup> selezionabile dall'utente	
Energia [MeV]	25-500	510	25-700 (e <sup>+</sup> ) 25-700 (e <sup>-</sup> )	250-730 (e <sup>+</sup> ) 250-530 (e <sup>-</sup> )
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 <sup>5</sup> dipendente dall'energia	10 <sup>7</sup> -1.5 · 10 <sup>10</sup>	1-10 <sup>5</sup> dipendente dall'energia	10 <sup>3</sup> -3 · 10 <sup>10</sup>
Flusso medio max	3.125 · 10 <sup>10</sup> particelle/s			
Dim. spot [mm]	0.5-25 (y) × 0.6-55 (x)			
Divergenza [mrad]	1-1.5			



< 5.5 m in lunghezza  
< 3 m in larghezza

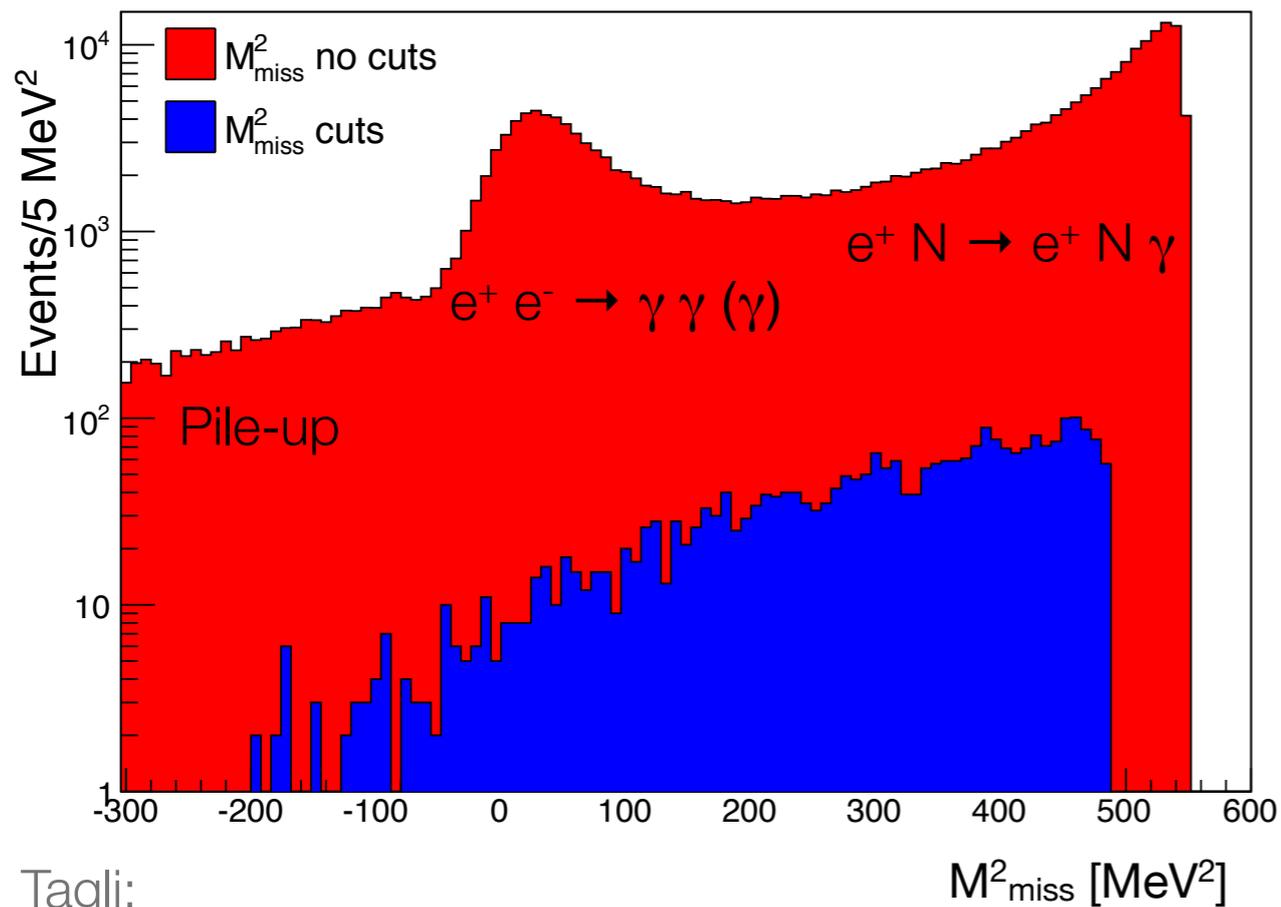


Uno dei limiti principali alla sensibilità di PADME dato dal pile-up

# Fondi

Fondi principali:

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

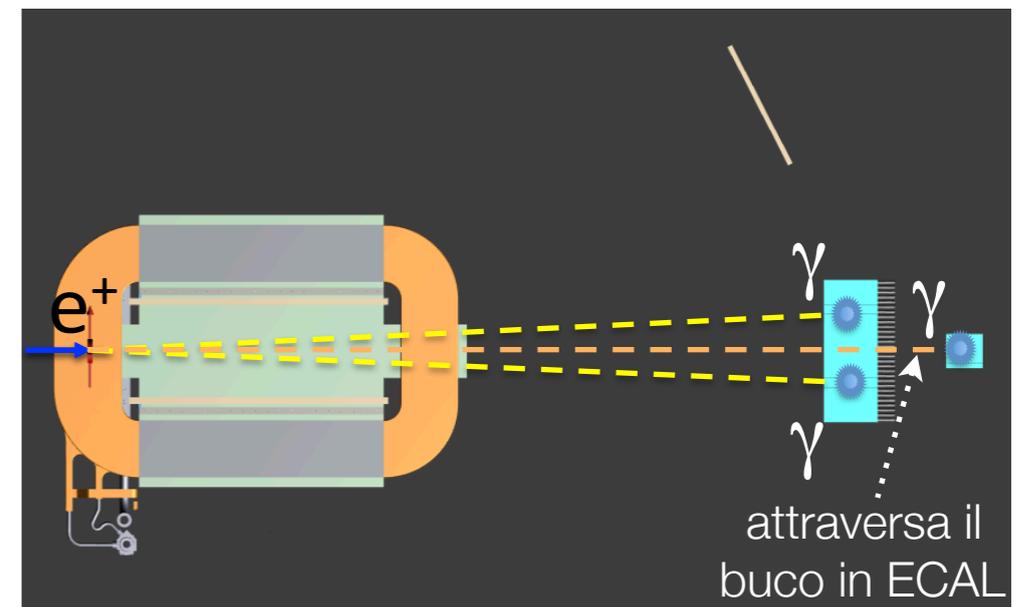


Tagli:

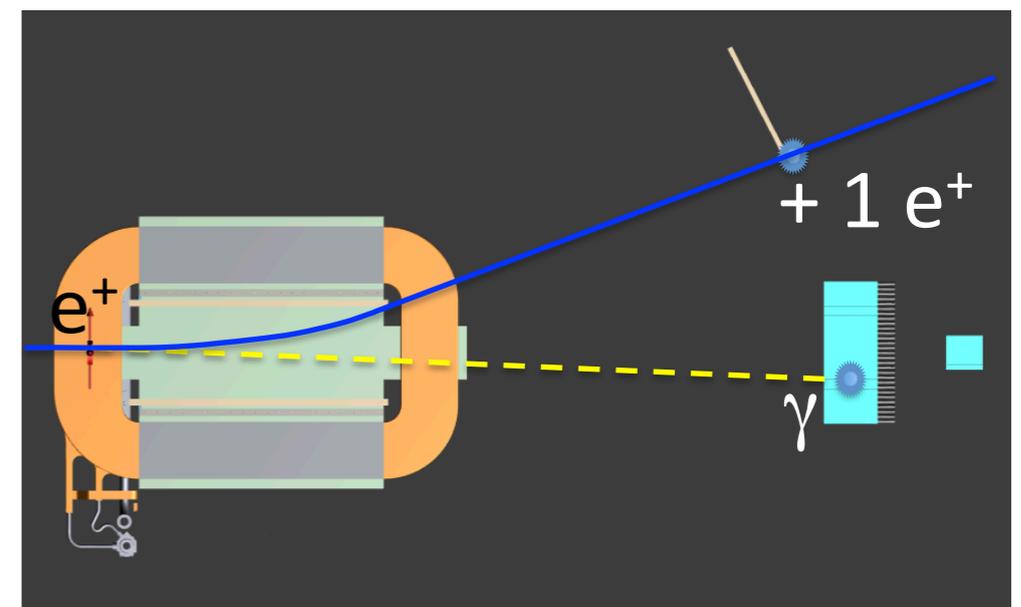
- 1 cluster nel volume fiduciale di ECAL
- no particelle nei veto
- no  $\gamma$  nel SAC con  $E_\gamma > 50$  MeV
- $20-150 \text{ MeV} < E_\gamma < 120-350 \text{ MeV}$  (dipendente da  $m_{A'}$ )

Geometria dei fondi

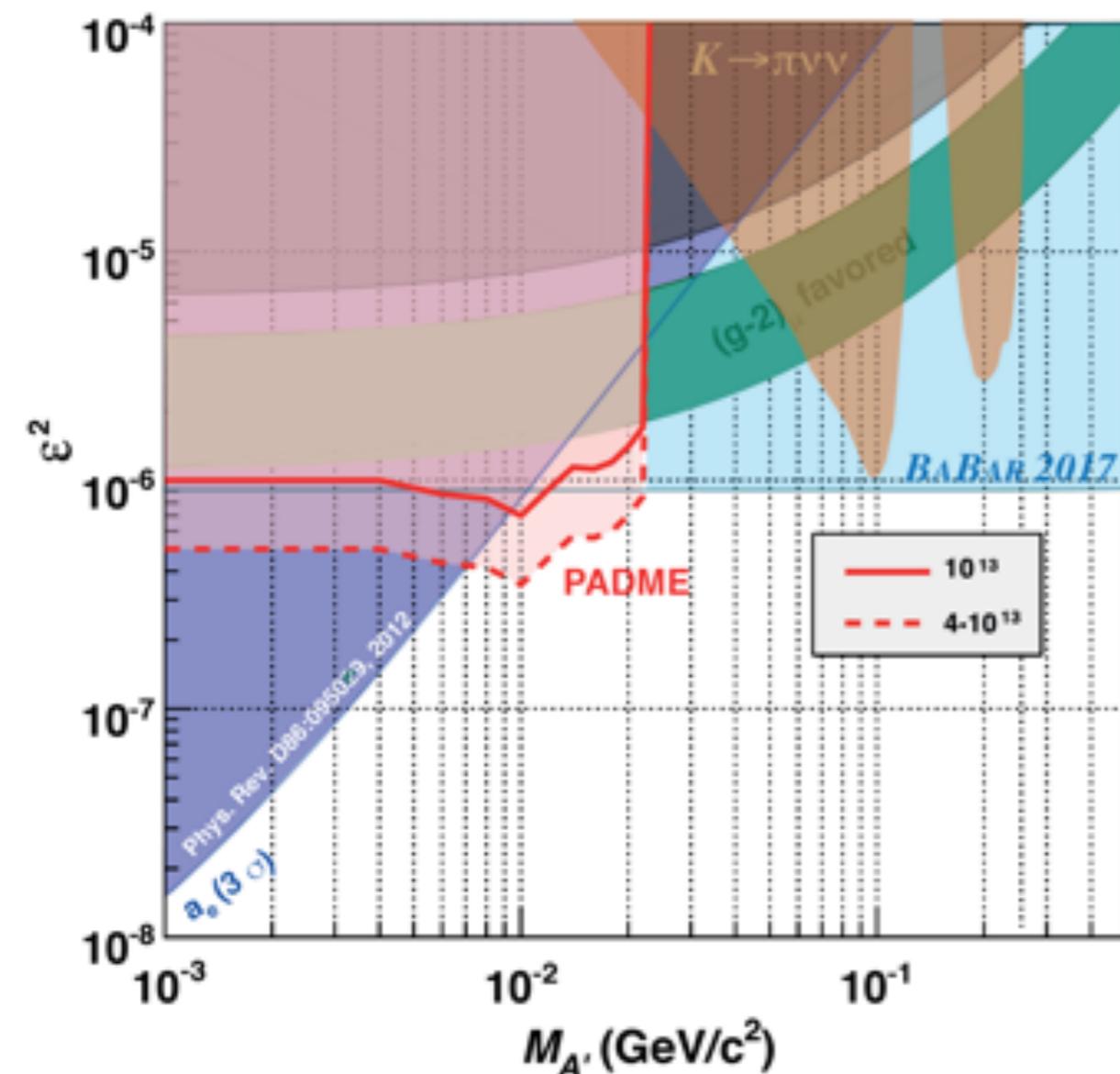
Annichilazione (+ISR):  $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma (\gamma)$



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



## Sensibilità



Basata su simulazione (GEANT4) di  $2.5 \cdot 10^{10}$  eventi da  $e^+$  di 550 MeV su bersaglio. Numero eventi di fondo estrapolato a  $10^{13}$   $e^+$  su bersaglio.

PADME può esplorare in modo model-independent la regione fino a  $\varepsilon \approx 10^{-3}$  con:

- $m_{A'} < 23.7$  MeV ( $E_{\text{fascio}} = 550$  MeV)
- $m_{A'} < 27.7$  MeV ( $E_{\text{fascio}} = 750$  MeV)
- $m_{A'} < 32$  MeV ( $E_{\text{fascio}} = 1$  GeV)

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

2018

# Conclusioni

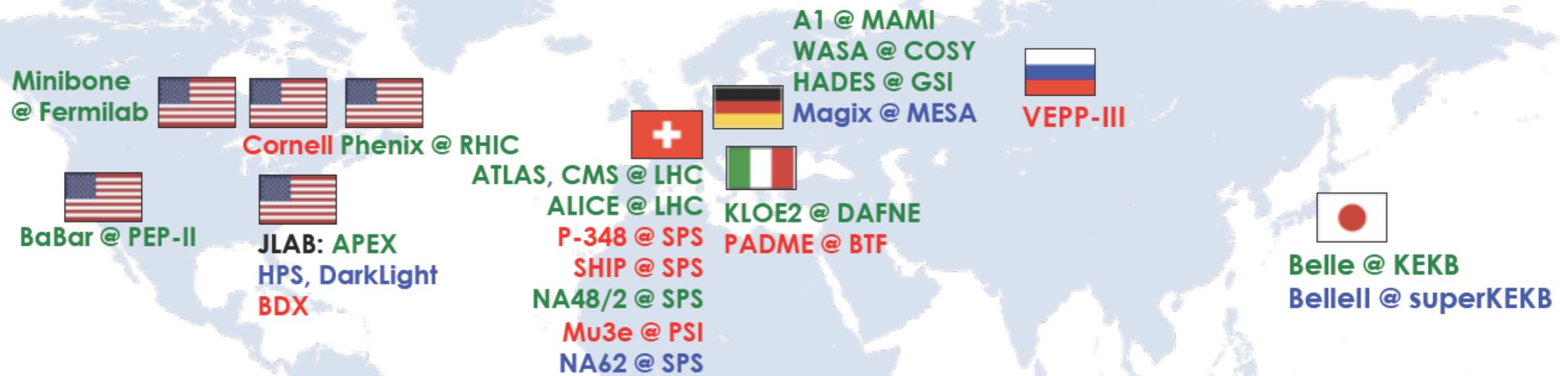
- Il Fotone Oscuro (FO) è predetto in una classe di modelli fisici relativamente giovani e generali che stanno velocemente guadagnando interesse nella comunità MO
- PADME è un esperimento che cercherà un FO che decade in “invisibile” (MO) ai Laboratori Nazionali di Frascati
- La collaborazione punta a collezionare  $10^{13}$   $e^+$  su bersaglio entro la fine del 2018, testando in modo model-independent un FO con  $\varepsilon \gtrsim 10^{-3}$  e con massa fino a 23.7 MeV ( $E_{\text{fascio}} = 550$  MeV)
- I risultati di PADME si applicheranno anche ad altre ipotetiche particelle come Axion Like Particles e Dark Higgs

# Referenze

- Fotone Oscuro
  - P. Galison and A. Manohar, Phys. Lett. B 136, 279 (1984)
  - B. Holdom, Phys. Lett. B 166, 196 (1986)
- Il Fotone Oscuro come soluzione dell'anomalia  $(g-2)_\mu$ 
  - M. Pospelov, Phys. Rev. D 80, 095002 (2009)
- Stato e prospettive nella ricerca del Fotone Oscuro
  - M. Raggi and V. Kozhuharov, Riv. Nuovo Cim. 38 , 449 (2015)
- Beam Test Facility ai Laboratori Nazionali di Frascati
  - G. Mazzitelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 515, 524 (2003)
- PADME
  - M. Raggi and V. Kozhuharov, AdHEP 2014 , 959802 (2014)
  - M. Raggi, V. Kozhuharov and P. Valente, EPJ Web Conf. 96 , 01025 (2015)

Backup

# Ricerche del Fotone Oscuro



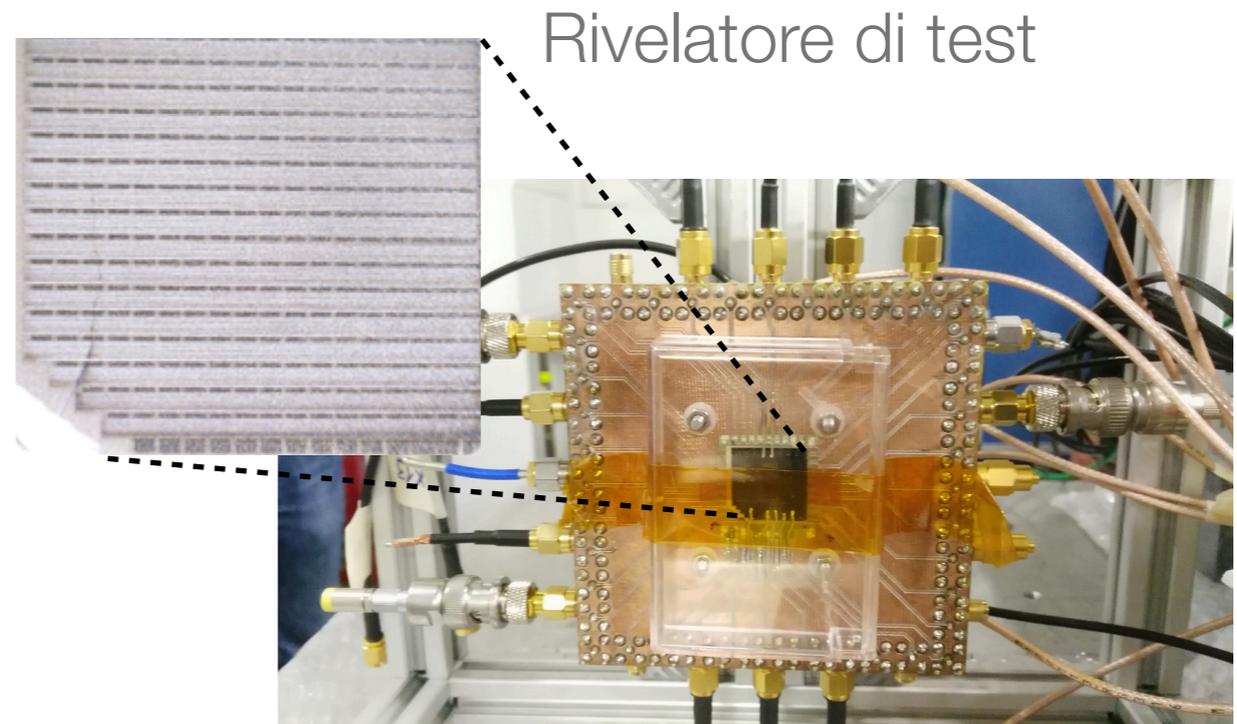
Legenda:

**Publishing**  
**Approved**  
**Proposals**

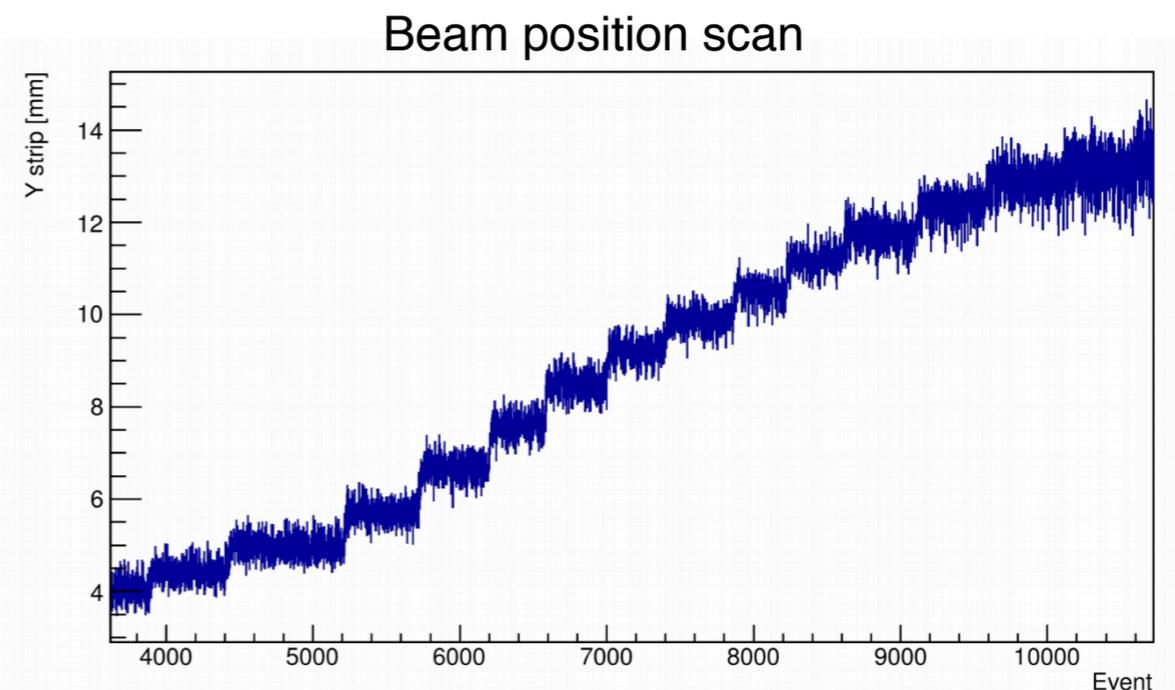
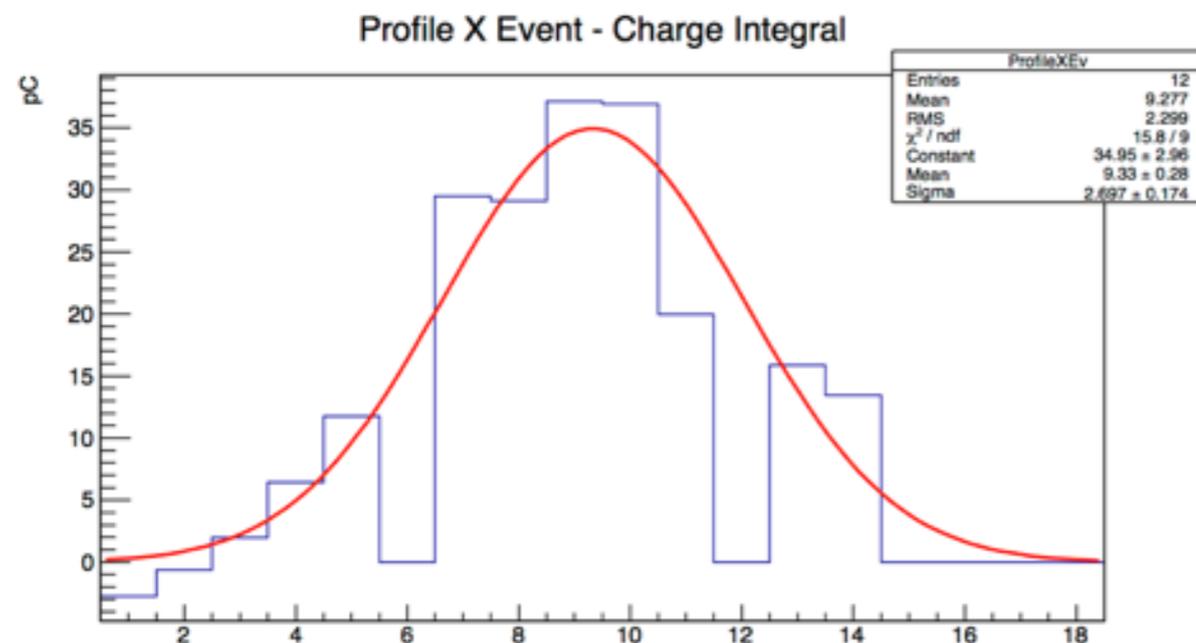
# Bersaglio attivo

Caratteristiche:

- Diamante (basso z, poca brems.)
- Dim.:  $20 \times 20 \times 0.05/0.1 \text{ mm}^3$
- 16 (oriz.) $\times$ 16 (vert.) strisce attive di grafite
- $\sigma_{x-y}$ (posizione fascio)  $< 2 \text{ mm}$
- in vuoto con sistema di movimento



Risultati rivelatore di test



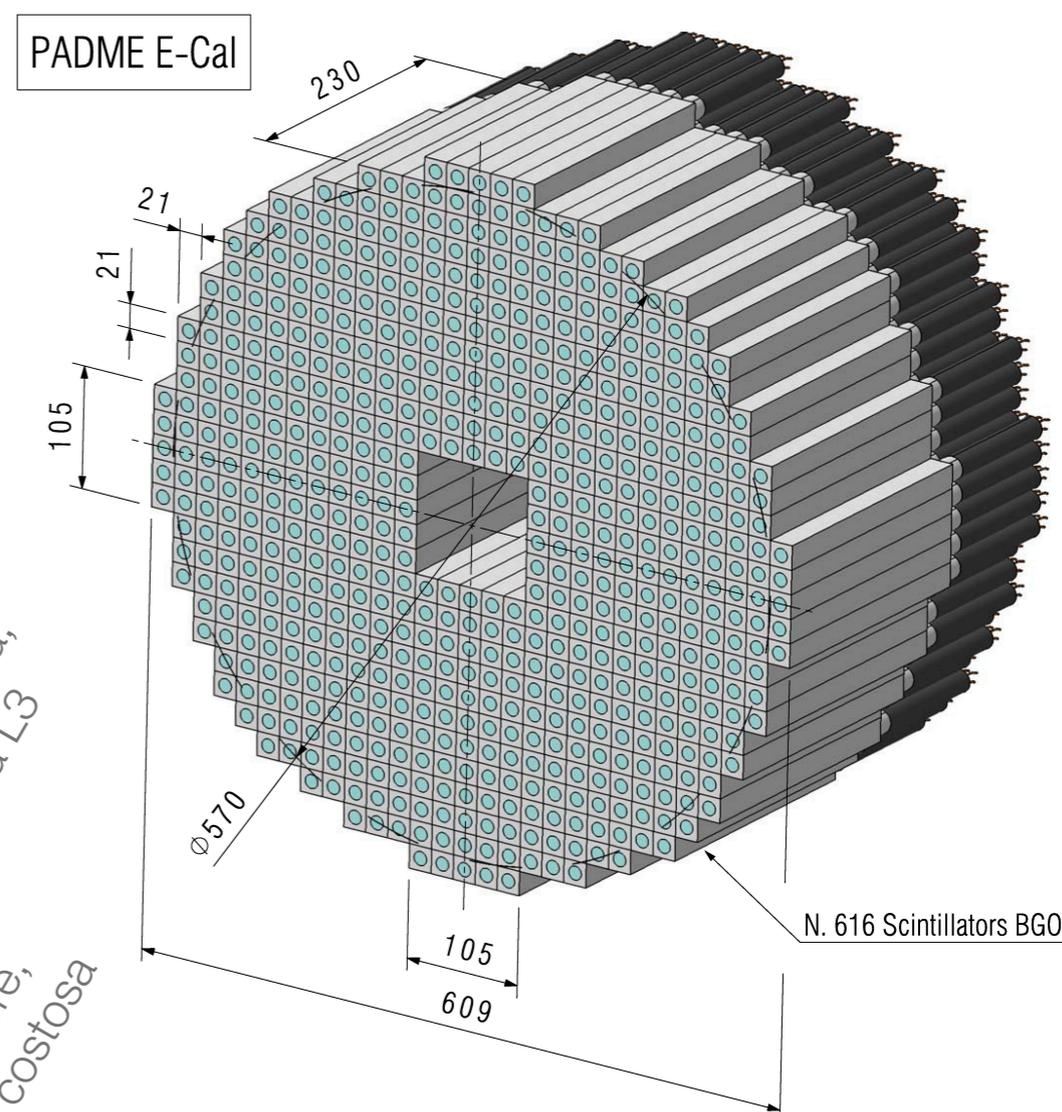
# Calorimetro elettromagnetico (1)

Caratteristiche:

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

Parameter:	$\rho$	MP	$X_0^*$	$R_M^*$	$dE^*/dx$	$\lambda_I^*$	$\tau_{decay}$	$\lambda_{max}$	$n^h$	Relative output†	Hygro-scopic?‡	$d(LY)/dT$
Units:	$g/cm^3$	$^\circ C$	cm	cm	MeV/cm	cm	ns	nm		†	‡	$\%/^\circ C^\ddagger$
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 <sub>2</sub>	4.89	1280	2.03	3.10	6.5	30.7	650 <sup>s</sup>	300 <sup>s</sup>	1.50	35 <sup>s</sup>	no	-1.9 <sup>s</sup>
							0.9 <sup>f</sup>	220 <sup>f</sup>		4.1 <sup>f</sup>		0.1 <sup>f</sup>
CaI(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 <sup>s</sup>	420 <sup>s</sup>	1.95	3.6 <sup>s</sup>	slight	-1.4
							6 <sup>f</sup>	310 <sup>f</sup>		1.1 <sup>f</sup>		
PbWO <sub>4</sub>	8.3	1123	0.89	2.00	10.1	20.7	30 <sup>s</sup>	425 <sup>s</sup>	2.20	0.3 <sup>s</sup>	no	-2.5
							10 <sup>f</sup>	420 <sup>f</sup>		0.077 <sup>f</sup>		
LSO(Ce)	7.40	2050	1.14	2.07	9.6	20.9	40	402	1.82	85	no	-0.2
LaBr <sub>3</sub> (Ce)	5.29	788	1.88	2.85	6.9	30.4	20	356	1.9	130	yes	0.2

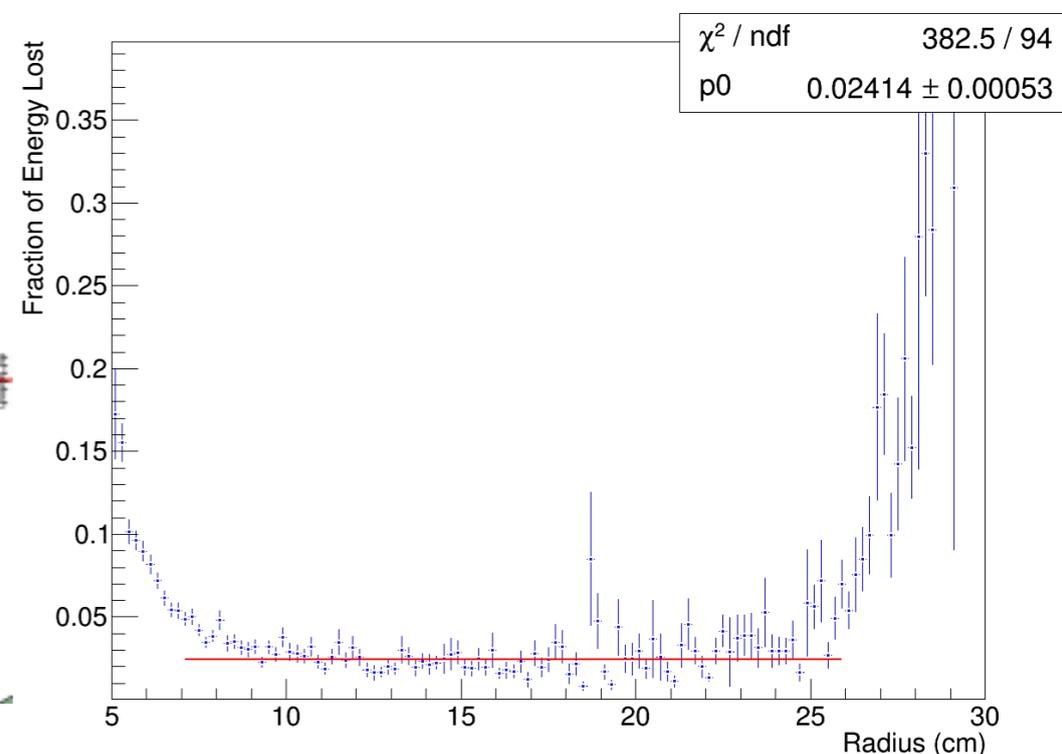
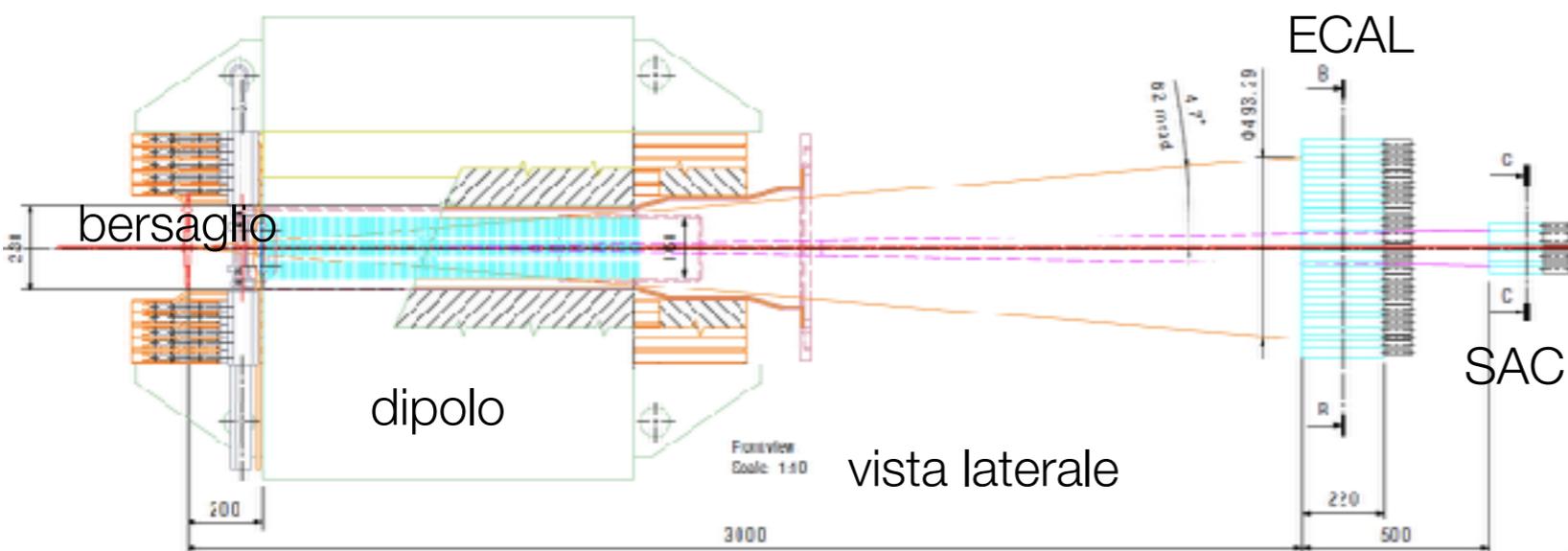
616 BGO 2.1×2.1×23 cm<sup>3</sup>  
@ 3 m dal bersaglio



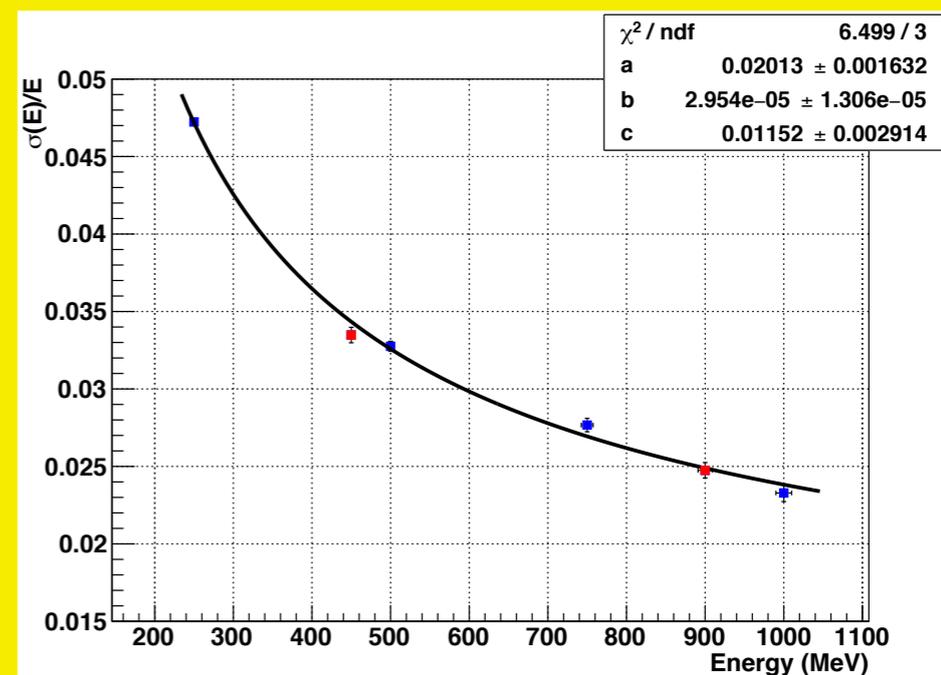
2° miglior scelta,  
gratis da L3  
scelta migliore,  
ma molto costosa

# Calorimetro elettromagnetico (2)

Gap di dipolo limita l'accettanza angolare



Risultati con una matrice 5x5 di BGO @ BTF



# PADME nel visibile

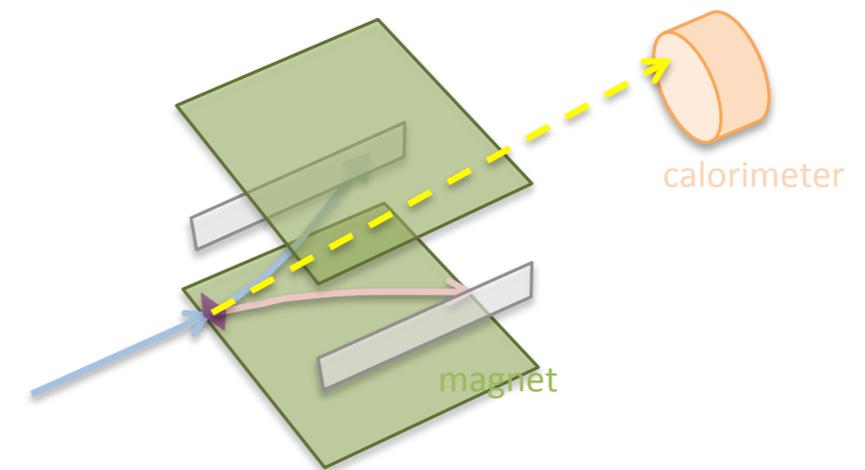
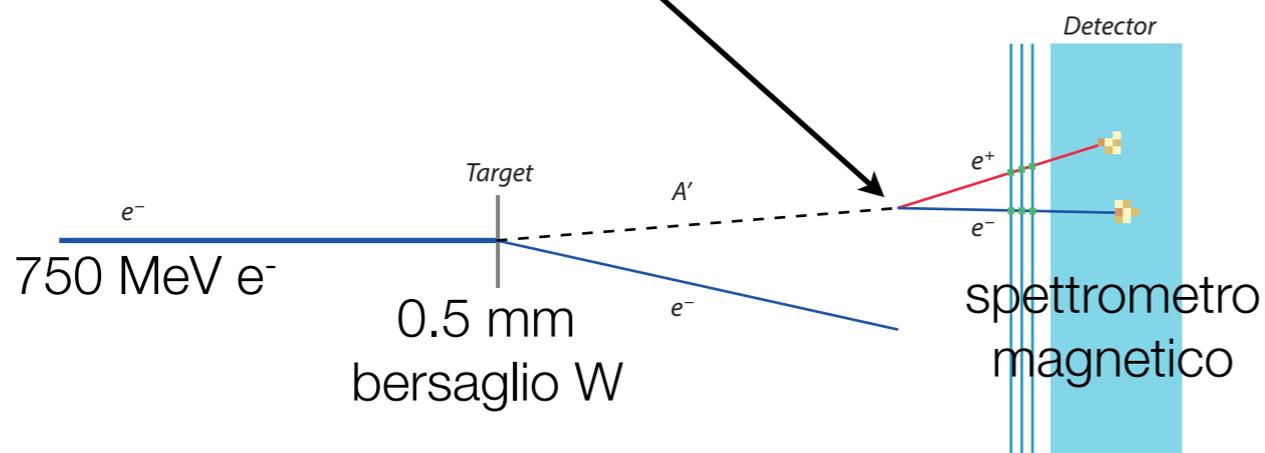
Grazie alla granularità dei veto  $e^+/e^-$  è possibile ricercare (breve vita media)  $A'$  che decadono in visibile con il setup attuale

Possibili miglioramenti futuri:

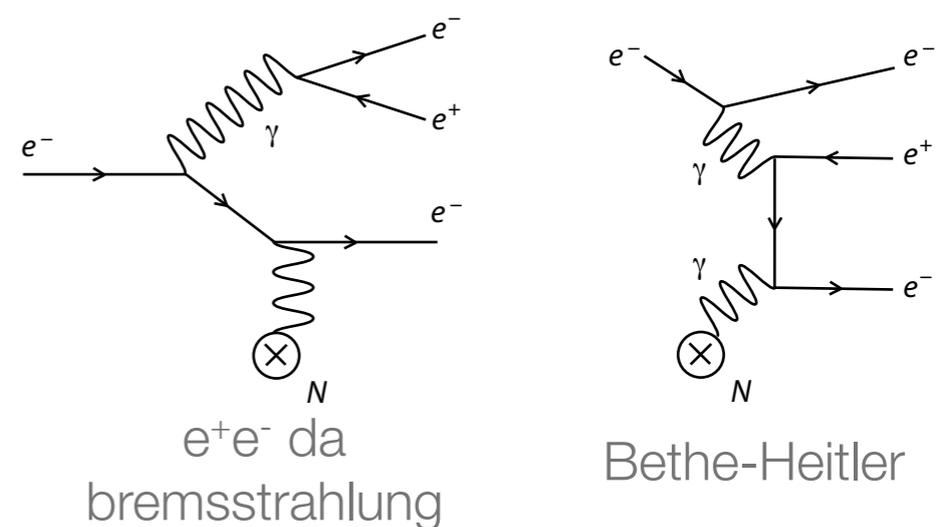
- bersaglio sottile ad alto  $z$  (più bremsstrahlung  $A'$ )

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

Solo dec. visibili sono interessanti

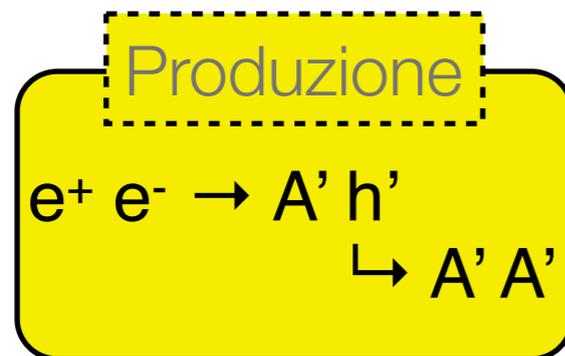


Fondi



Calcoli preliminari con  $10^{18}$  EOT danno una sensibilità su  $\epsilon^2 \sim 10^{-7}$  nella regione di bassa massa, che peggiora all'aumentare di  $m_{A'}$

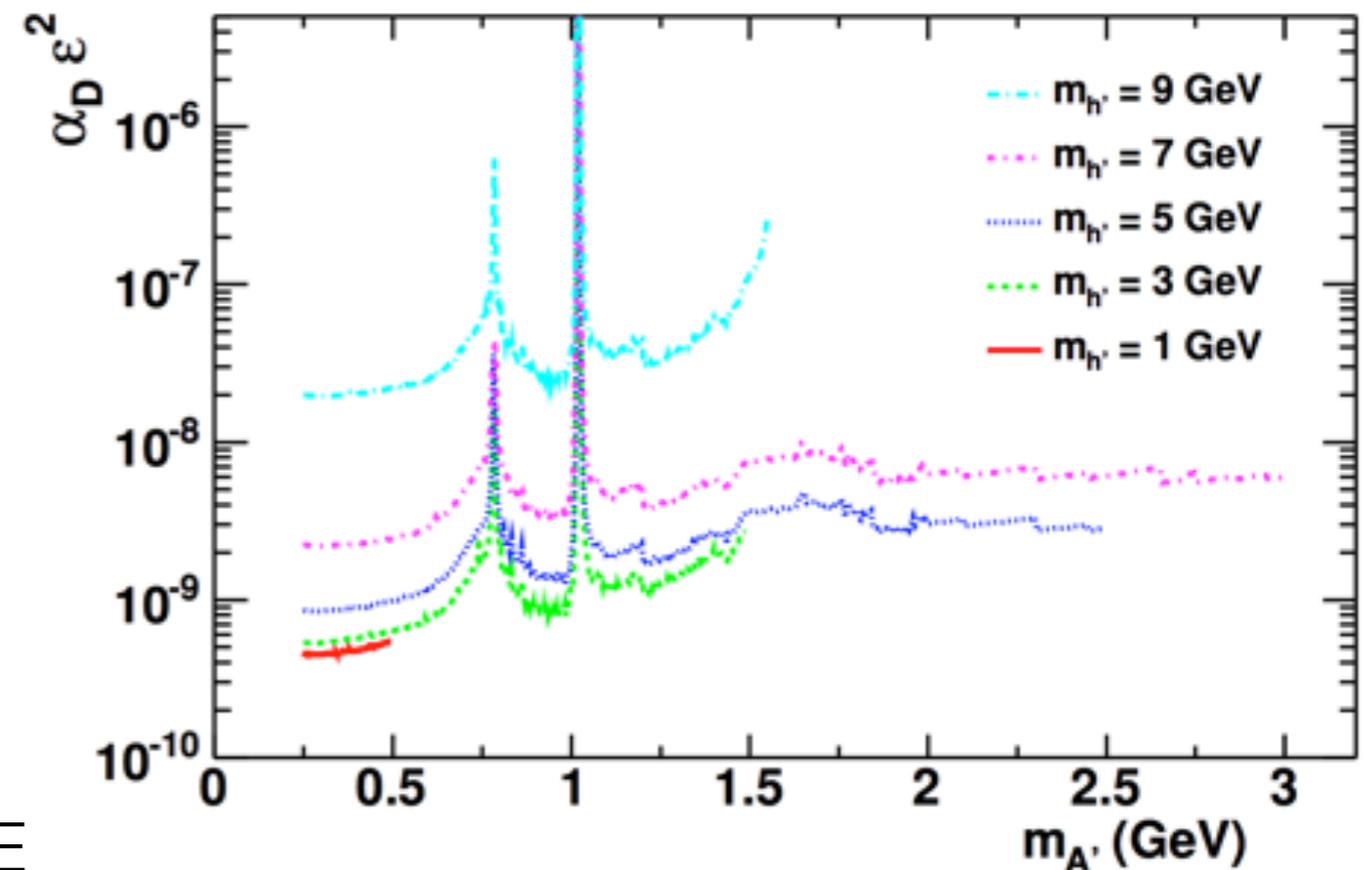
# Dark Higgs a PADME



Decadimenti interessanti per PADME (dipende da  $m_{h'}$  e  $m_{A'}$ ):

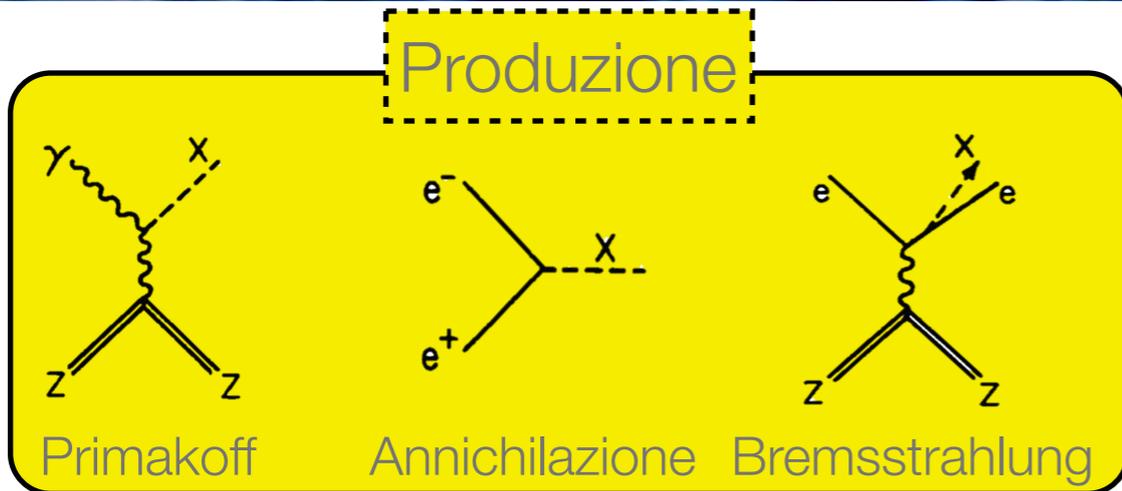
- se  $m_{A'} < m_{h'}/2$  dominante  $A' h' \rightarrow A' A' A' \rightarrow 6$  leptoni (0 carica,  $E_{\text{tot}} < E_{\text{beam}}$ )
- se  $m_{A'} > m_{h'}/2$  (o  $h'$  con lunga vita media) dominante  $A' h' \rightarrow A' \text{ inv.} \rightarrow 2$  leptoni (0 carica)

Limiti sul Dark Higgs



- • forte segnatura (no nuove componenti rivelatore necessarie)
- • spettrometro tracciante necessario

# Axion Like Particles a PADME



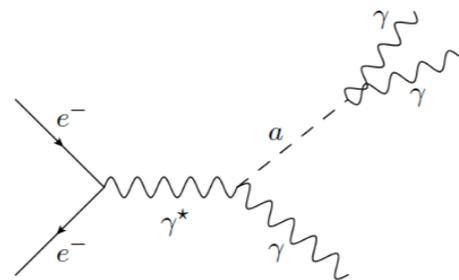
ALP che decade in invisibile o a lunga vita media in PADME ha la stessa segnatura di un FO:

- $1 \gamma$
- energia mancante nello stato finale

Nel dec. visibile  $a \rightarrow \gamma \gamma$  tutti i meccanismi 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

