

# Astrofisica e particelle elementari

aa 2007-08

Lezione 15

Bruno Borgia

# Esperimenti per la ricerca diretta di materia oscura

# RIVELAZIONE DIRETTA

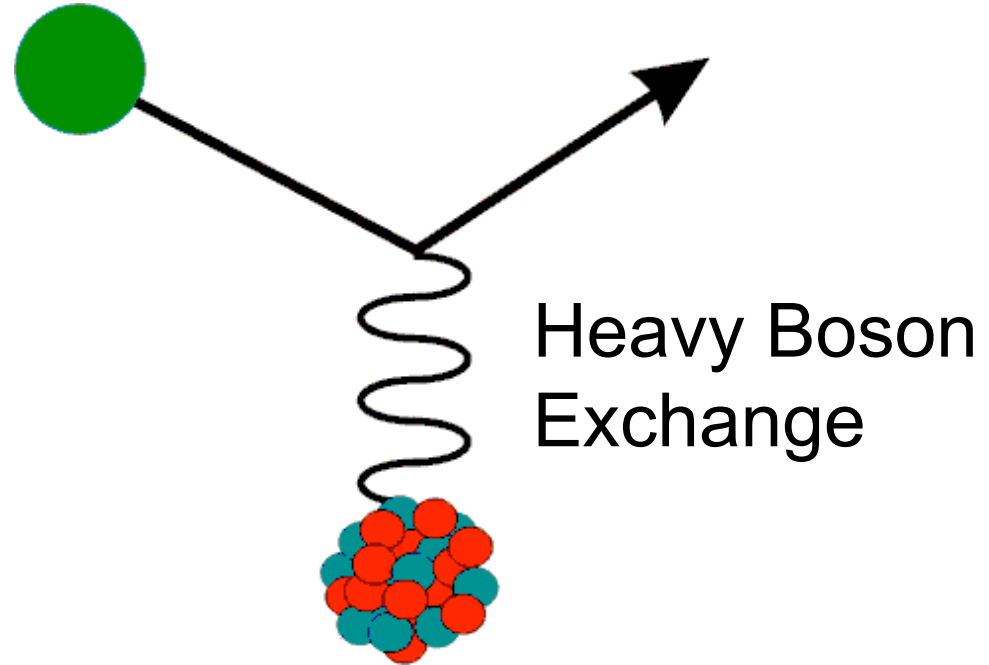
## WIMP

$$30 < M_W \text{ [GeV]} < 1000$$

$$46 < \lambda_W \text{ [fm]} < 1.4$$

$$v_{\text{rms}} \sim 270 \text{ km/s}$$

$$\rho_{\text{CDM}} \sim 0.3 \text{ GeV}/c^2 \text{ cm}^{-3}$$



$$E_R = E_0 \cdot \frac{4M_W M_N}{(M_W + M_N)} \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos \theta^*) \approx 0.4 \text{ keV} \cdot \frac{M_W}{\text{GeV}}$$

Direct detection via WIMP scattering by nuclei:  $E_R \sim$  tens of keV

# Strategia degli esperimenti per la rivelazione diretta

- **Soglia in energia nella regione del keV**, limitata in basso solo dal fondo.
- **Soppressione del fondo eccellente.** Uso di materiali a bassa radioattività, schermaggio efficiente in luoghi sotterranei, schermi attivi e passivi, discriminazione dei segnali elettrone/nucleo.
- **Grandi masse del bersaglio.**
- **Operatività stabile a lungo termine.**

# Carattere del segnale

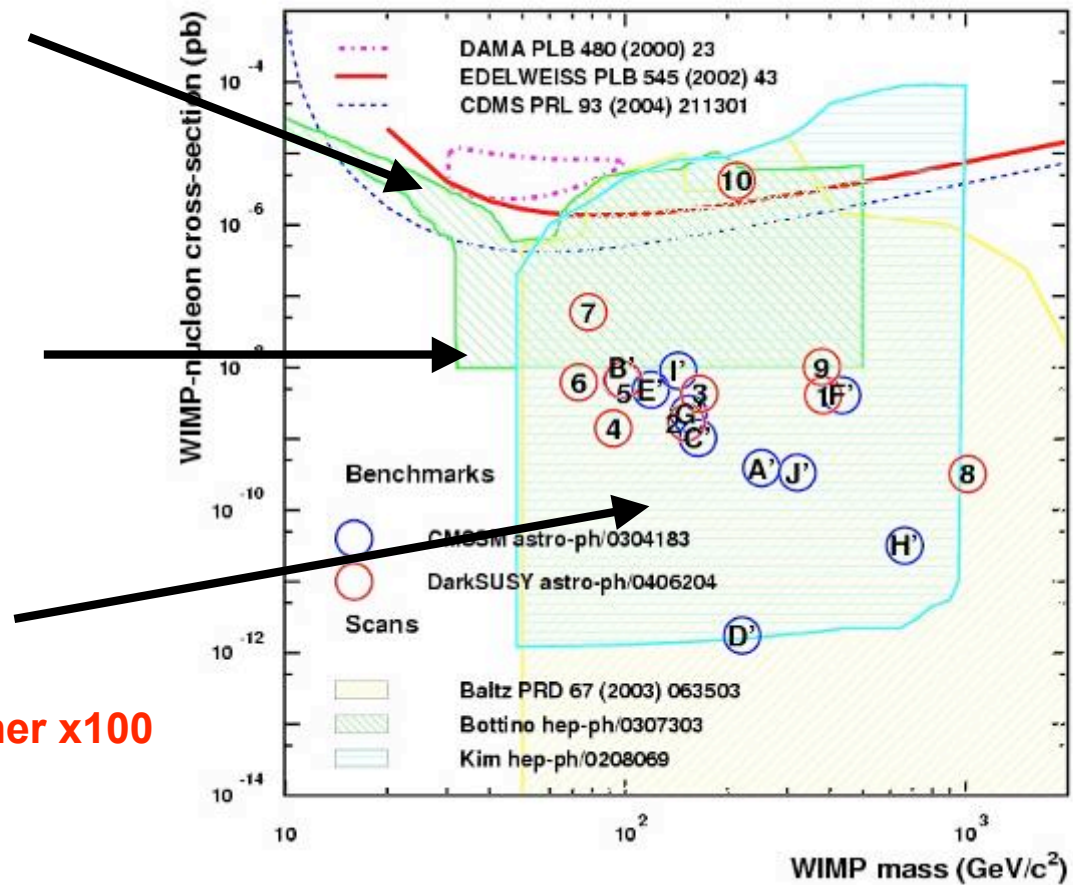
- Modulazione annuale del segnale. cambiamento della velocità dei WIMP rispetto al rivelatore dovuto al moto della terra attorno al Sole e del Sole rispetto al centro della Galassia.
- Direzionalità. Distinzione del segnale rispetto al fondo terrestre con asimmetria avanti/indietro. Richiede un rivelatore capace di misurare la direzione del rinculo del nucleo, ovvero un rivelatore gassoso.
- Dipendenza dal bersaglio. Dipendenza dell'interazione del WIMP da diversi nuclei in frequenza e diversa forma dello spettro dell'energia di rinculo.

# ESPERIMENTI - PREDIZIONE MSSM

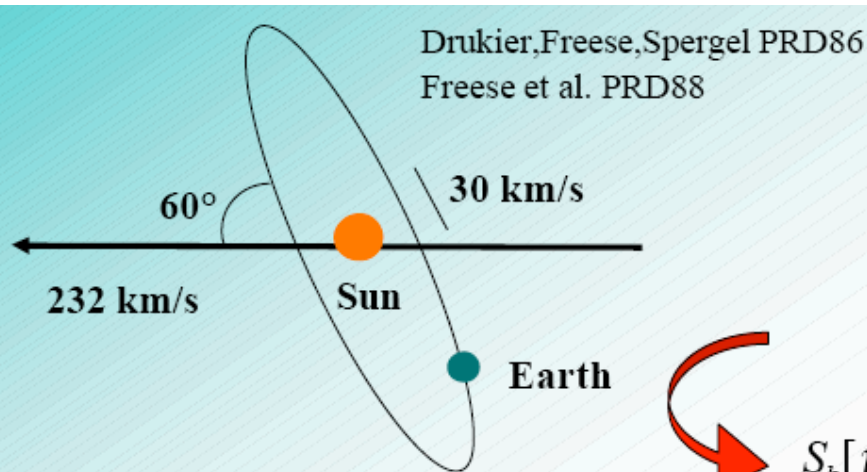
$\sigma = 10^{-6}$  pb:  
 ~1 event/kg/day  
 ~0.1 now reached

$\sigma = 10^{-8}$  pb:  
 ~1 event/kg/year  
 Aims of phase II experiments

$\sigma = 10^{-10}$  pb:  
 ~1 event/ton/year  
 Next generation requires further x100 improvement!



# MODULAZIONE ANNUALE DEI CONTEGGI



- $v_{\text{sun}} = 232 \text{ km/s}$  (Sun velocity in the halo)
- $v_{\text{orb}} = 30 \text{ km/s}$  (Earth velocity around the Sun)
- $\gamma = \pi/3$
- $\omega = 2\pi/T$       $T = 1 \text{ year}$
- $t_0 = 2^{\text{nd}} \text{ June}$  (when  $v_{\oplus}$  is maximum)

$$v_{\oplus}(t) = v_{\text{sun}} + v_{\text{orb}} \cos\gamma \cos[\omega(t-t_0)]$$

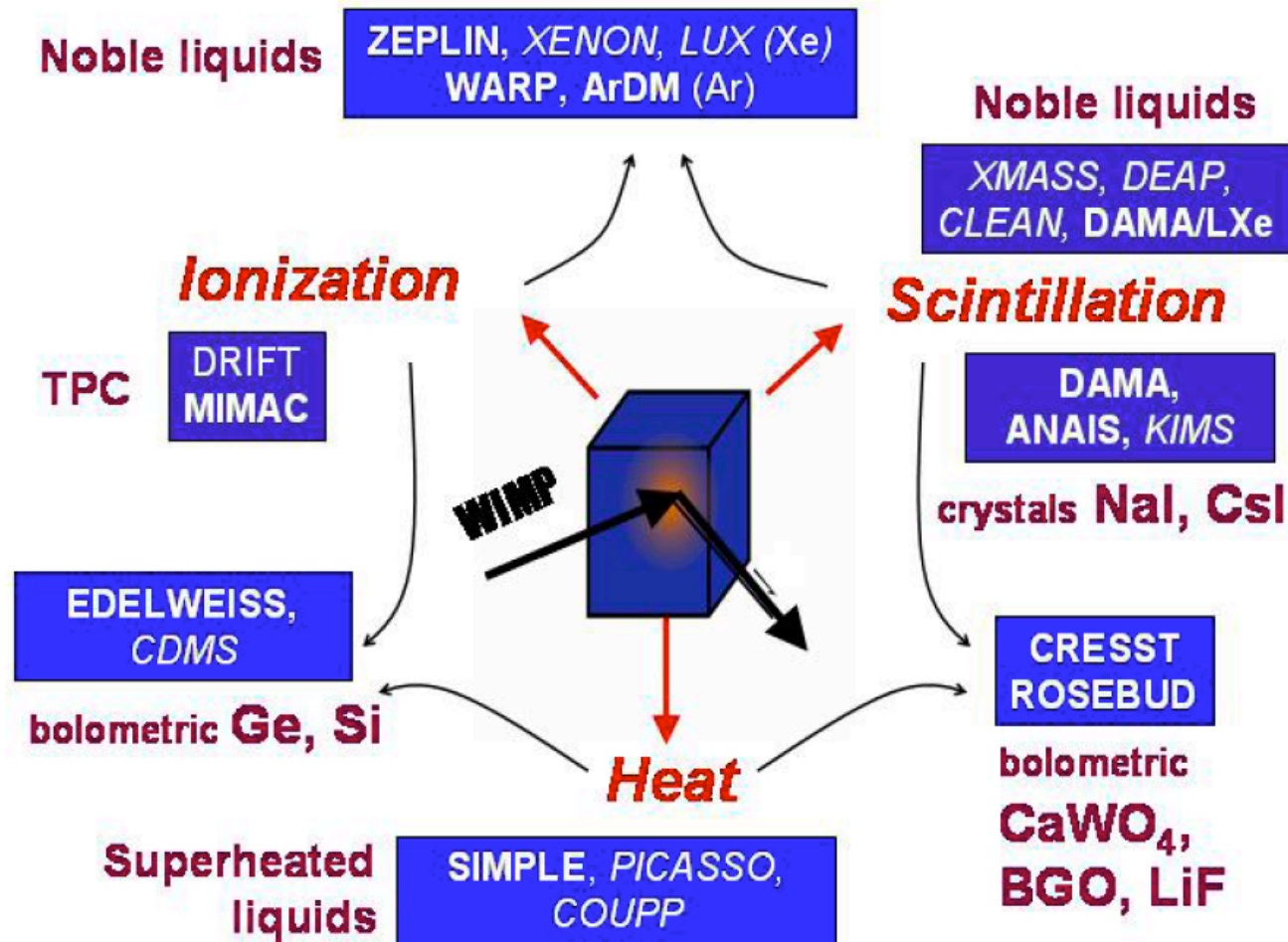
$$S_k[\eta(t)] = \int_{\Delta E_k} \frac{dR}{dE_R} dE_R \cong S_{0,k} + S_{m,k} \cos[\omega(t-t_0)]$$

Expected rate in given energy bin changes because the annual motion of the Earth around the Sun moving in the Galaxy

## *Requirements of the annual modulation*

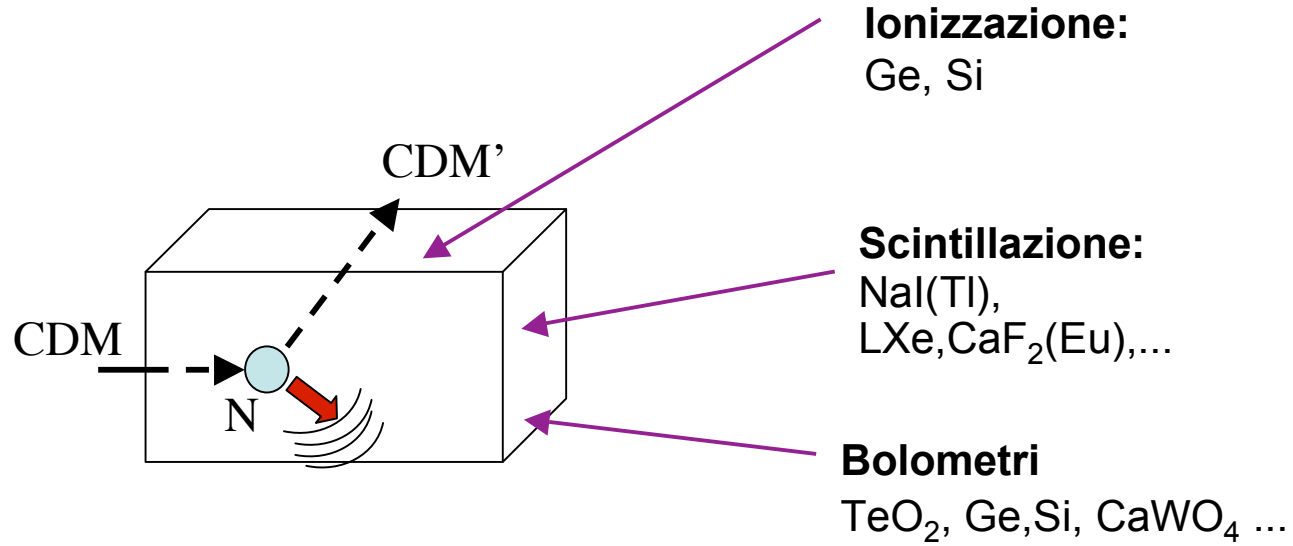
- 1) Modulated rate according cosine
- 2) In a definite low energy range
- 3) With a proper period (1 year)
- 4) With proper phase (about 2 June)
- 5) For single hit in a multi-detector set-up
- 6) With modulated amplitude in the region of maximal sensitivity  $< 7\%$

# Metodi sperimentali per la ricerca diretta





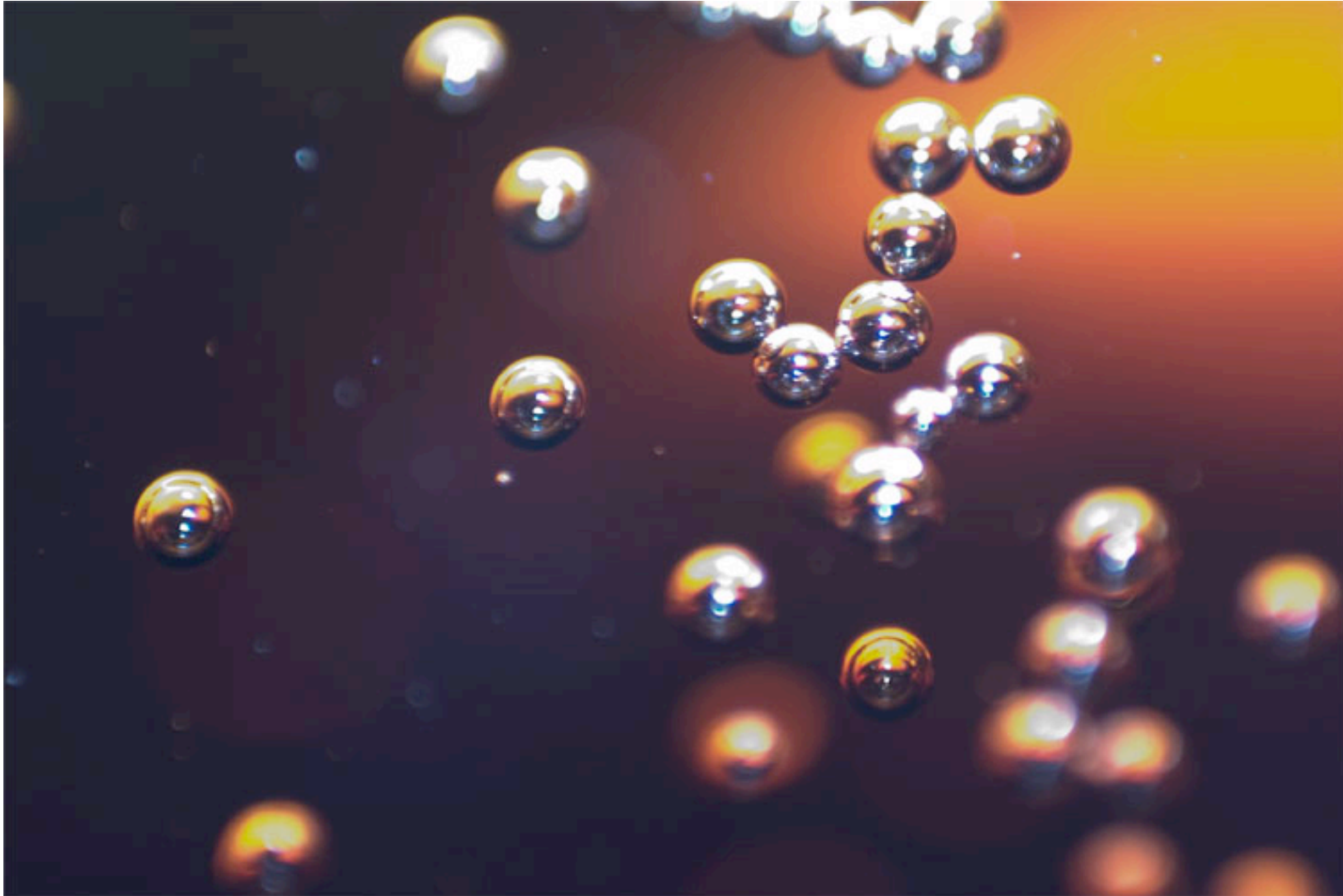
# RIVELAZIONE DIRETTA



# Metodi sperimentali

- **Rivelatori bolometrici.**  $T \approx 10\text{-}20$  mK, aumento della temperatura per effetto dell'interazione
  - CRESST (G. Sasso): 3Kg  $\text{CaWO}_4$ , fononi e luce
  - EDELWEISS (Frejus): 9 Kg Ge, fononi e ionizzazione
  - CDMS (Soudan): 250 g Si, fononi e ionizzazione
- **Rivelatori Xe/Ar.** Rivelazione della scintillazione e della ionizzazione in gas nobili liquefatti.
  - Xenon10 (G.Sasso): 10 Kg Xe
  - ZEPLIN (Boulby): 10 Kg Xe
  - WARP (G.Sasso) Ar
- **Rivelatori NaI.** Scintillazione dai cristalli di NaI.
  - DAMA (G.Sasso) 100 Kg NaI  $\Rightarrow$  250 Kg  $\Rightarrow$  1 tonnellata
- **Rivelatori a liquido sovrarisaldato.** Gocce sovrarisaldate disperse in gel subiscono nucleazione (cambiamento di fase in bolle gassose) per effetto del rinculo di un nucleo.
  - SIMPLE:  $\text{C}_2\text{ClF}_5$
  - PICASSO:  $\text{C}_4\text{F}_{10}$

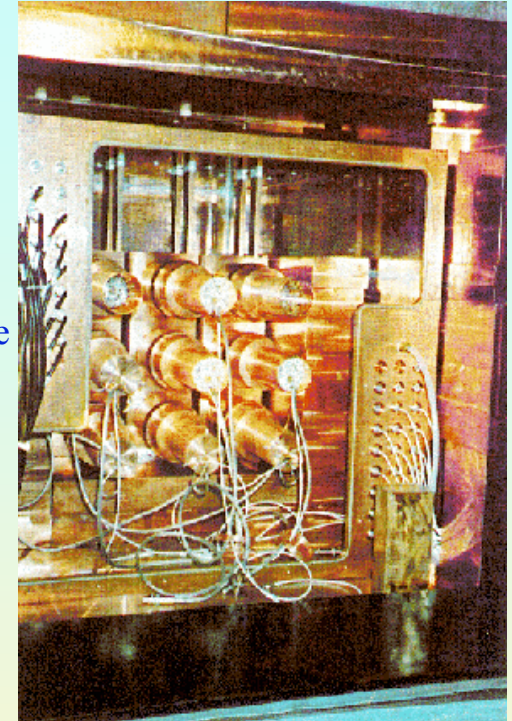
# Nucleazione di bolle di soda per effetto della diminuzione della pressione esterna



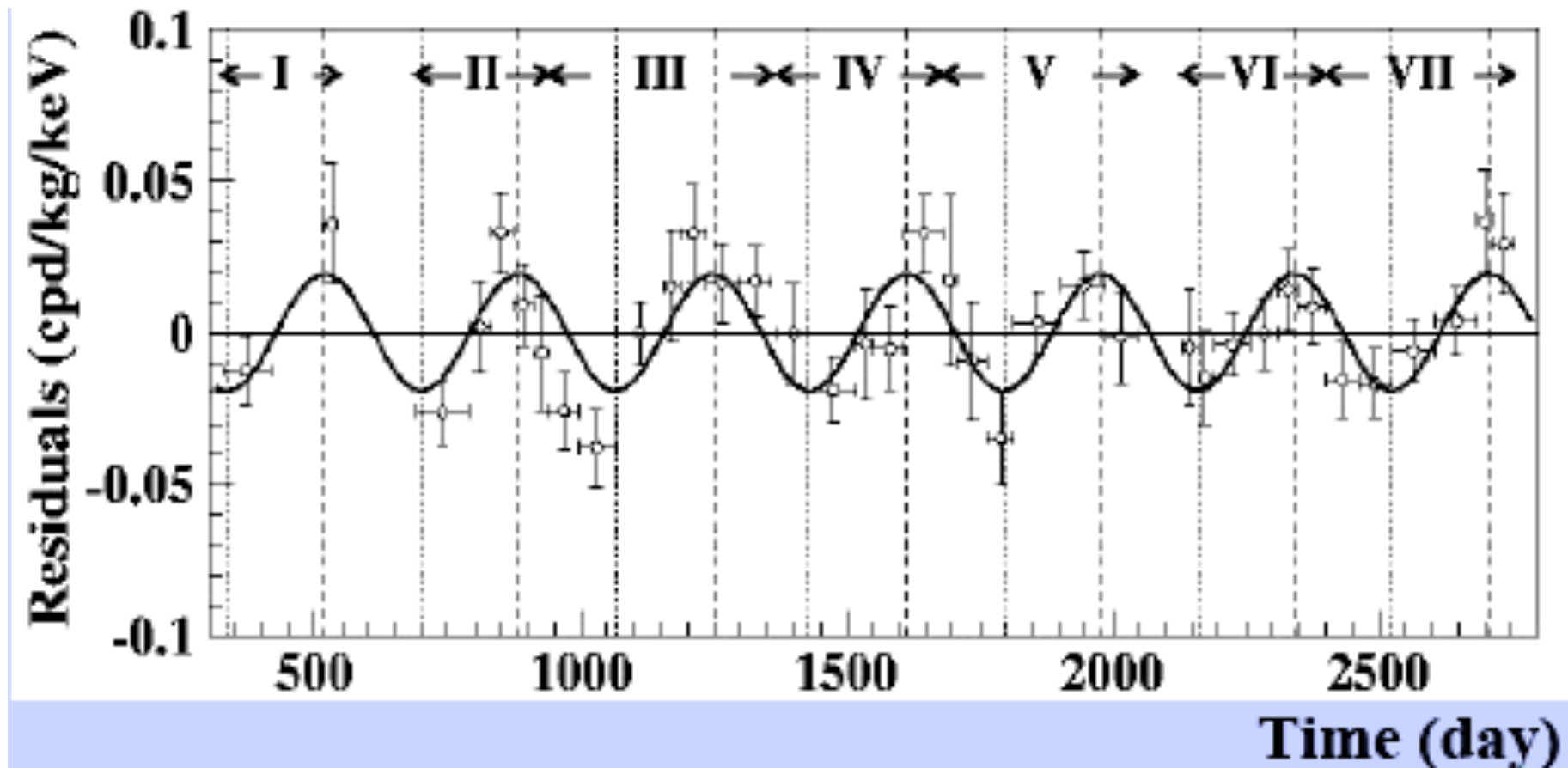
# Main Features of DAMARE

(Il Nuovo Cim. A112 (1999) 545-575,  
EPJ C18(2000)283, Riv. N. Cim.  
26 n.1 (2003)1-73,  
IJMPD13(2004)2127)

- Reduced standard contaminants (e.g. U/Th of order of some ppt) by material selection and growth/handling protocols.
- Each crystal coupled - through 10cm long tetrasil-B light guides acting as optical windows - to 2 low background EMI9265B53/FL (special development) 3" diameter PMTs working in coincidence.
- Detectors inside a sealed Cu box maintained in HP Nitrogen atmosphere in slight overpressure
- **Very low radioactive shields: 10 cm of copper, 15 cm of lead + shield from neutrons: Cd foils + 10/40 cm polyethylene/paraffin + ~ 1 m concrete moderator largely surrounding the set-up**
- A plexiglas box encloses the whole shield and is also maintained in HP Nitrogen atmosphere in slight overpressure
- Installation in air conditioning + huge heat capacity of shield
- Walls, floor, etc. of inner installation sealed by Supronyl ( $2 \times 10^{-11}$  cm<sup>2</sup>/s permeability).
- Calibration using the upper glove-box (equipped with compensation chamber) in HP Nitrogen atmosphere in slight overpressure calibration → in the same running conditions as the production runs.
- Each PMT works at single photoelectron level. Energy threshold: 2 keV (from X-ray and Compton electron calibrations in the keV range and from the features of the noise rejection and efficiencies)
- Pulse shape recorded by Transient Digitizers.
- Monitoring and alarm system continuously operating by self-controlled computer processes.
- Data collected from low energy up to MeV region, despite the hardware optimization was done for the low energy.
- Several operational parameters acquired and recorded with the production data for quantitative analyses  
+ **electronics and DAQ fully renewed in summer 2000**
- data taking of each annual cycle starts from autumn/winter (when  $\cos\omega(t-t_0) \approx 0$ ) toward summer (maximum expected).
- routine calibrations for energy scale determination, for acceptance windows efficiencies by means of radioactive sources each ~ 10 days collecting typically  $\sim 10^5$  evts/keV/detector + intrinsic calibration from <sup>210</sup>Pb (~ 7 days periods) + periodical Compton calibrations, etc.
- continuous on-line monitoring of all the running parameters with automatic alarm to operator if any out of allowed range.



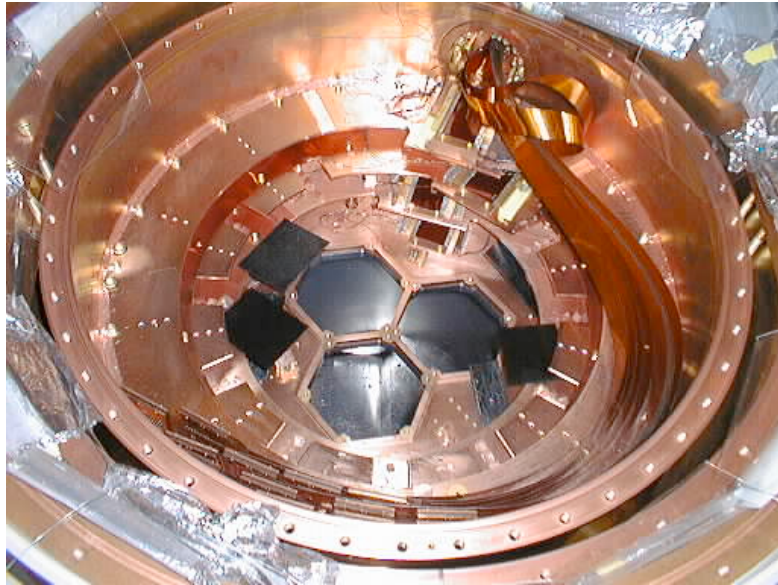
# DAMA



Modulazione annuale del segnale  
Fit:  $T = (1.00 \pm 0.01)$  anno  $6.3 \sigma$  C.L.



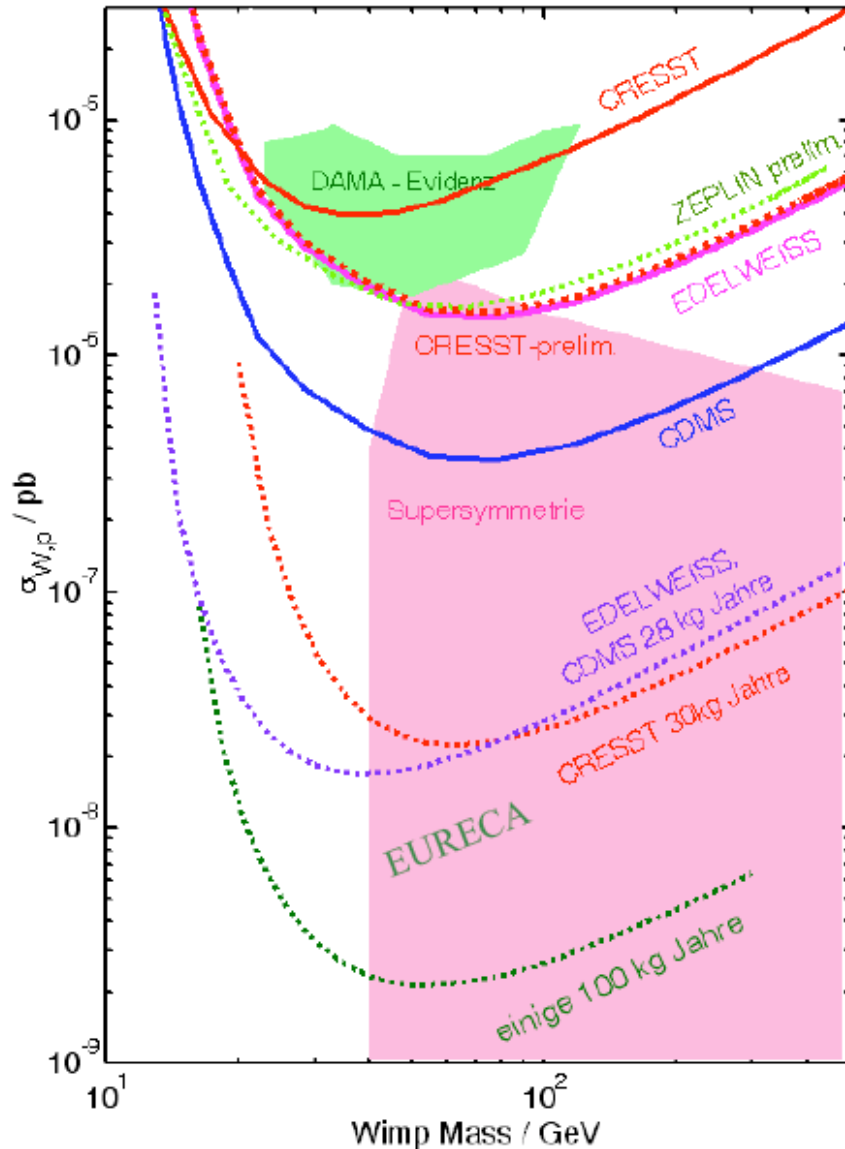
# CDMS II



\* A view of the inner layers of the cryostat. The hexagonal holes are the mounting points for the detector assembly and sits at 10 mK during operation. The surrounding layers are higher temperature stages of the cryostat. The cryostat is one-of-a-kind and was designed and built by the LBNL-UCB team. It is constructed entirely of radiopure copper to provide a low-radioactivity environment for the extremely sensitive CDMS detectors. The grey-black layer is a shield made of lead recovered from the ballast of a 18th-century French ship; the age of this lead ensures that the radioisotopes most worrying to CDMS have decayed away. In recent weeks, a polyethylene shield has been installed inside the lead layer; this new shield will attenuate the neutron flux by  $\sim 2.5$  while allowing WIMPs to pass through. The observation of a reduced event rate after installation of this new shield will prove conclusively that CDMS detectors are seeing neutrons, not WIMPs.

\* Closeup of a ZIP detector in its mount. A detector of this kind, made of Si, was operated in the 1998 run. The photolithographically-fabricated thin film on the surface is the phonon sensor and represents a significant advance over the detectors used in the 1999 run. Silicon and germanium ZIPs, weighing 100 g and 250 g respectively, will be used in future CDMS II runs at Stanford and in the Soudan mine.

# Limiti alla sezione d'urto per WIMP



- Limite alla sezione d'urto scalare WIMP-nucleone (curva blu continua). Nessun candidato in 19.4 kg · d di esposizione effettiva di Ge. Lo spazio dei parametri al di sopra della curva è escluso al 90% C.L. Il risultato è stato ottenuto da CDMS II in Soudan.
- Il risultato di DAMA è indicato dalla regione chiusa verde.
- La curva con x è il limite ottenuto da EDELWEISS
- Le curve punteggiate sono i limiti previsti per esperimenti futuri.

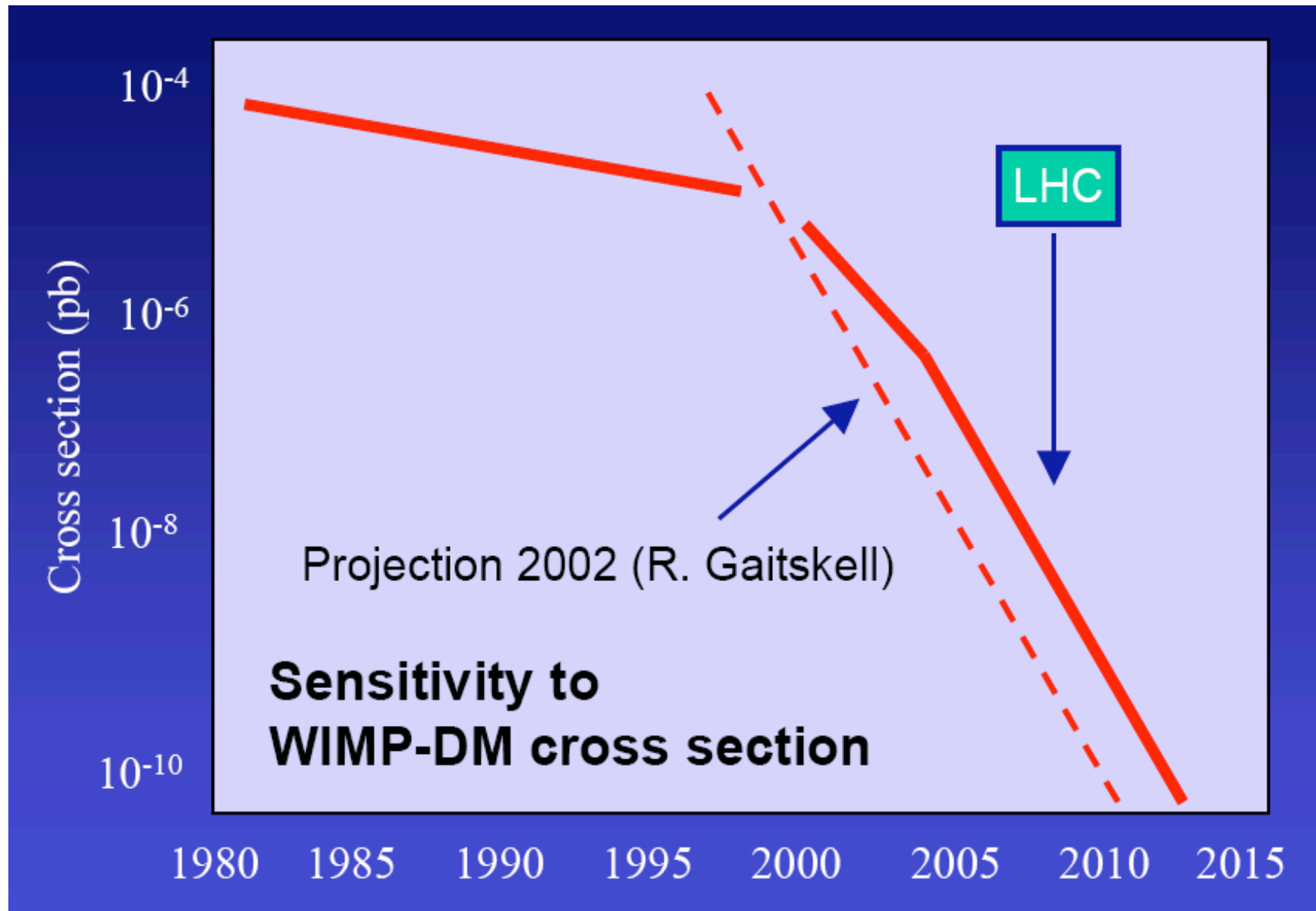
# Esperimenti in corso e in progetto

Name	Type	Status	Location	European Members	Others
DAMA/ LIBRA	NaI	running	LNGS	IT	China
ANAIS	NaI	construction	LSC	ES	-
KIMS	CsI	R&D	Korea	-	Korea
HDMS	Ge	running	LNGS	DE	RU
ROSEBUD	bolometer	R&D	LSC	ES, FR	-
DAMA-LXe	LXe scint	running	LNGS	IT	China
ZEPLIN-II	LXe	running	IUS	PT, UK	RU, US
ZEPLIN-III	LXe	installation	IUS	PT, UK	RU, US
XENON10	LXe	commissng	LNGS	DE, IT, PT	US
LUX	LXe	R&D	DUSEL	UK	US
XMASS	LXe	?	Kamioka	-	Japan
WARP	LAr	running	LNGS	IT	US
ArDM	LAr	construction	LSC	CH, ES, PO	-
DEAP	LAr	R&D	SNOLAB	-	Can, US
CLEAN	LNe	R&D	t.b.d.	-	US, Can
DRIFT	CS <sub>2</sub> gas TPC	R&D	IUS	UK	US
MIMAC	<sup>3</sup> He gas TPC	R&D	t.b.d.	FR	-
EDELWEISS	bolometer	running	LSM	FR, DE	RU
CRESST	bolometer	running	LNGS	DE, UK, IT,	-
CDMS	bolometer	running	Soudan	-	US
SIMPLE	Superheated droplet SHD	running + R&D	LSSB	PT, FR	US
PICASSO	SHD	running + R&D	SNOLAB	CZ	CA, RU, US
COUPP	SH liquid	R&D	t.b.d.	-	US

IUS - Boulby/UK  
 LNGS - Gran Sasso/Italia  
 LSM - Frejus/Francia  
 LSC - Canfranc/Spagna  
 LSSB - Bas Bruit/Francia



# Sviluppo sensibilità ricerca WIMP

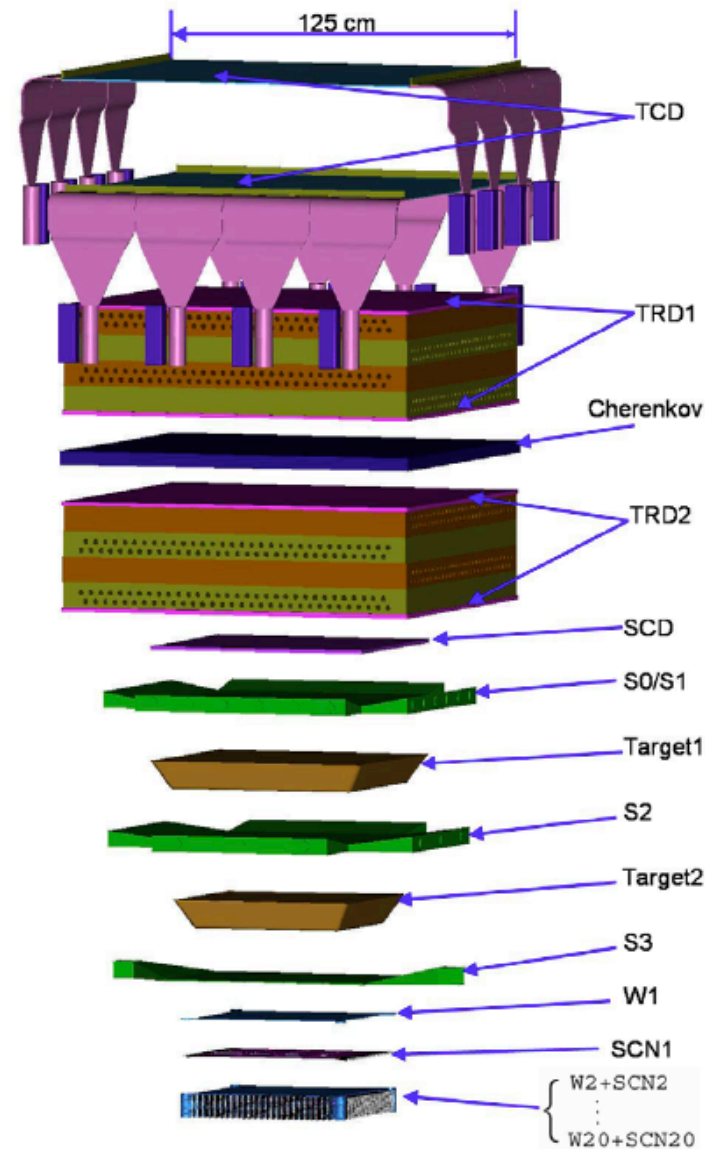


# Esperimenti per la ricerca indiretta di materia oscura

# CREAM

## Measurement Capabilities

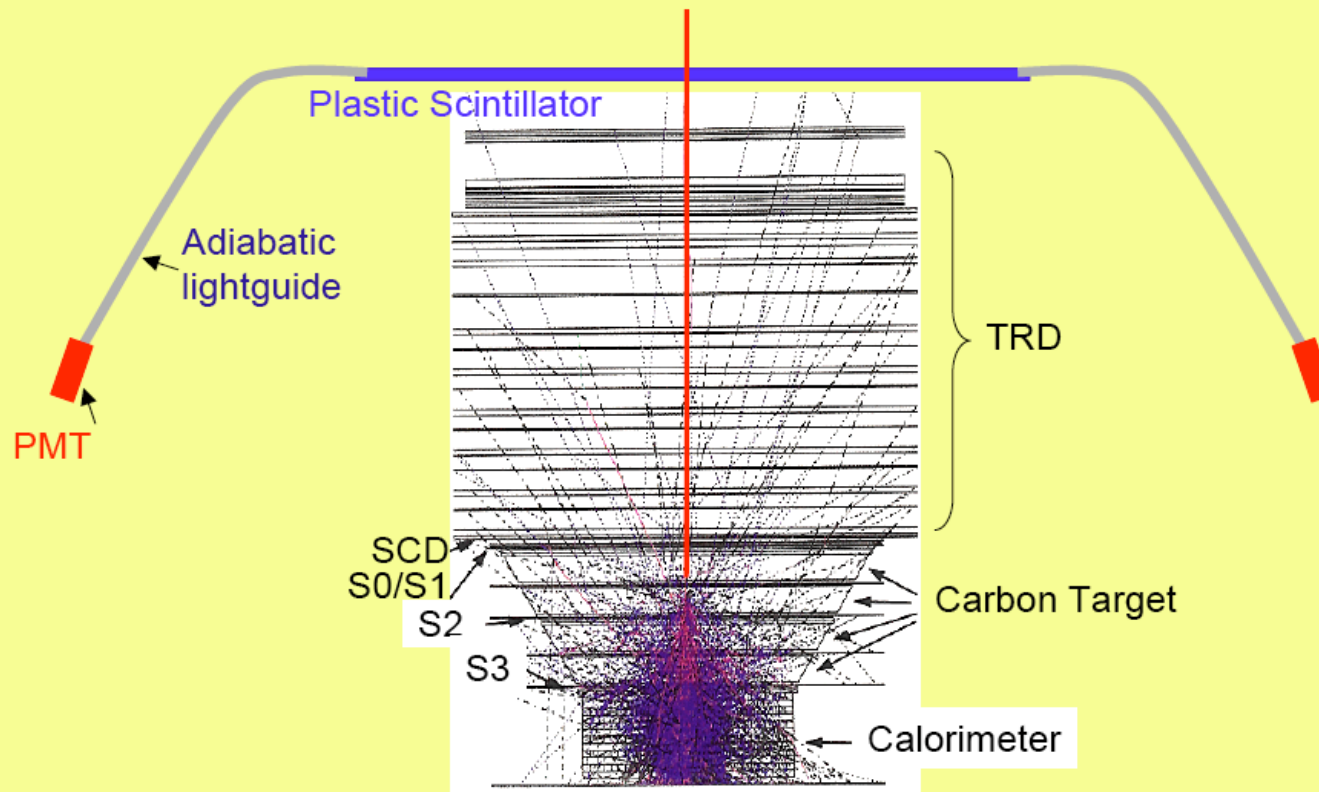
- **Element Coverage:**  
H to Ni ( $Z = 1$  through  $Z = 28$ )
- **Charge Resolution:**  
Individual elements for all  $Z$  (SCD)  
Individual elements  $Z < 15$  &  
at least element groups  $Z \geq 15$  (TCD)
- **Energy Calibration:** Better than 10%
- **Energy Resolution:** Better than 50%
- **Collecting Power:**  
0.3  $\text{m}^2\text{sr}$  for  $Z = 1$  & 2  
(considering interaction fractions in CAL)  
1.3  $\text{m}^2\text{sr}$  for  $Z \geq 3$  ( $Z \geq 8$  for TRD-lite)  
(TRD efficiency not included)



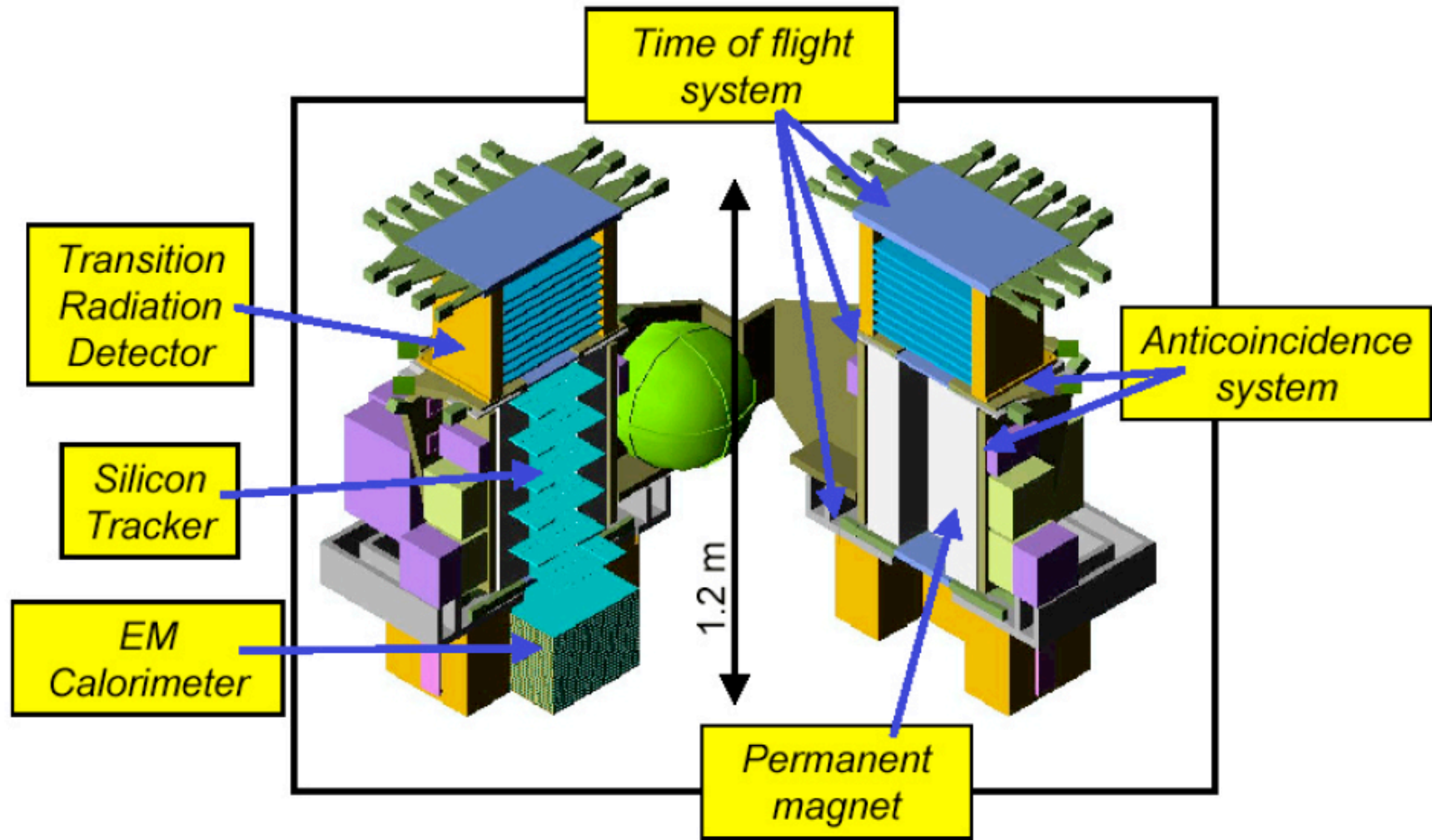
# CREAM

## CREAM Detector Concept

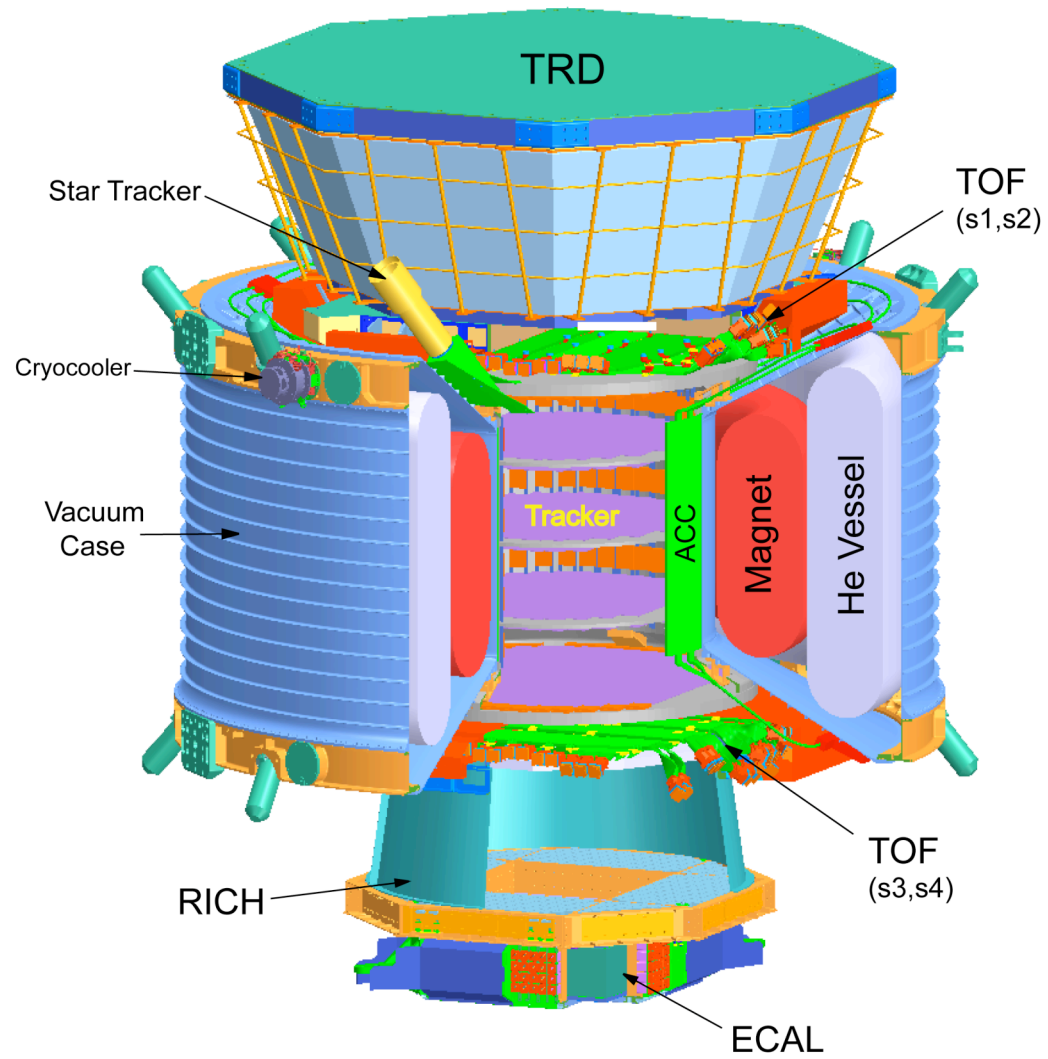
### In-flight Cross Calibration of TRD and Calorimeter



# PAMELA

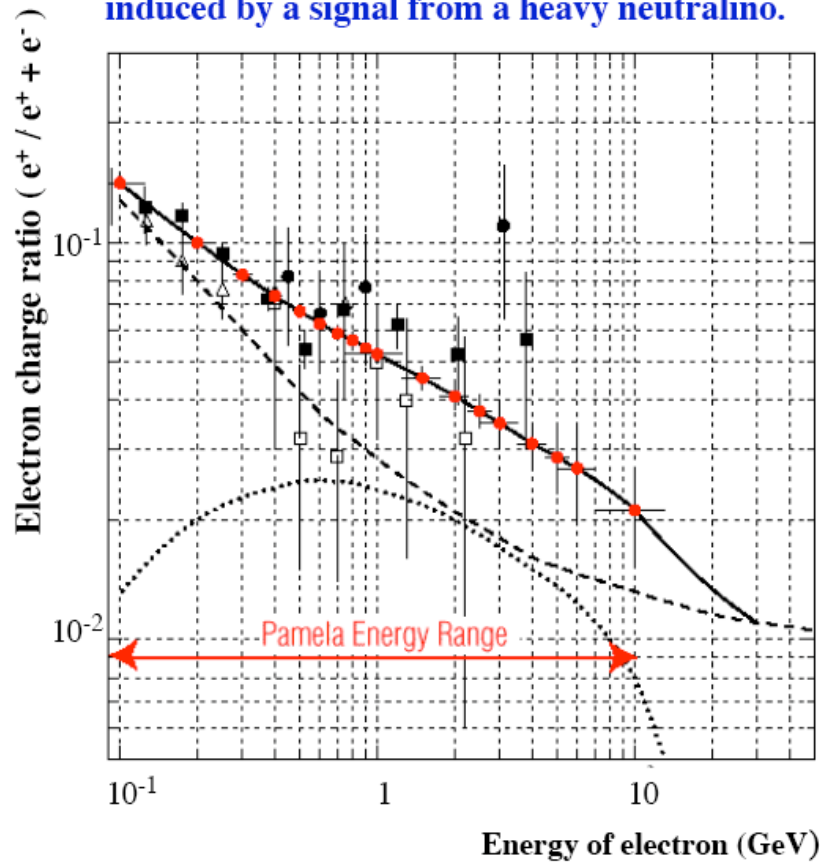


# AMS

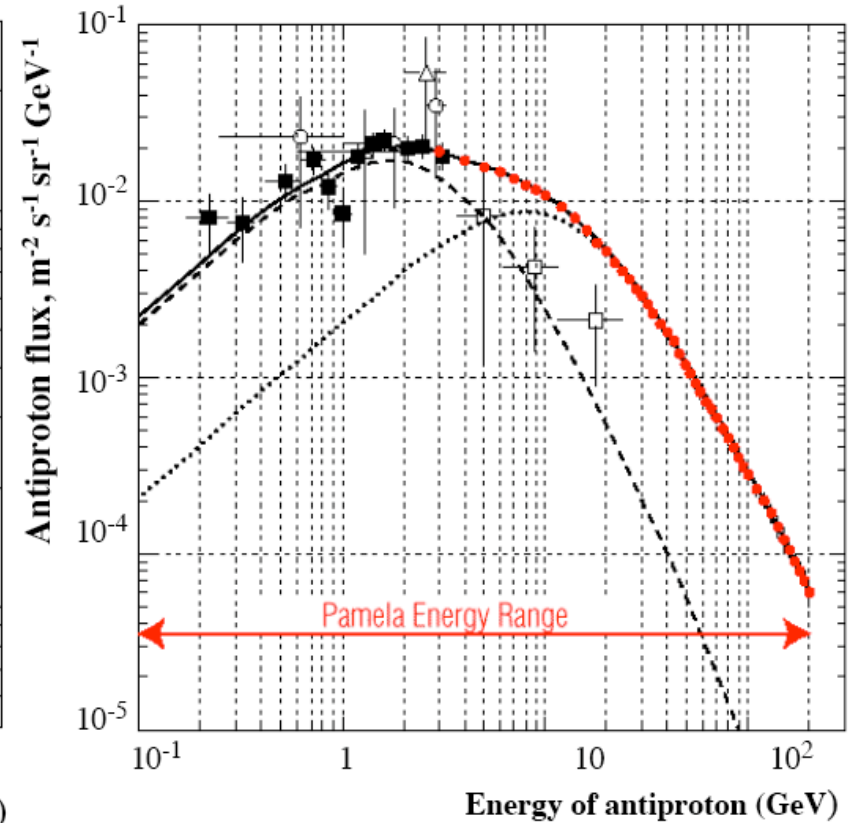


# PAMELA: $e^+$ ; $\bar{p}$

Distortion of the secondary positron fraction induced by a signal from a heavy neutralino.

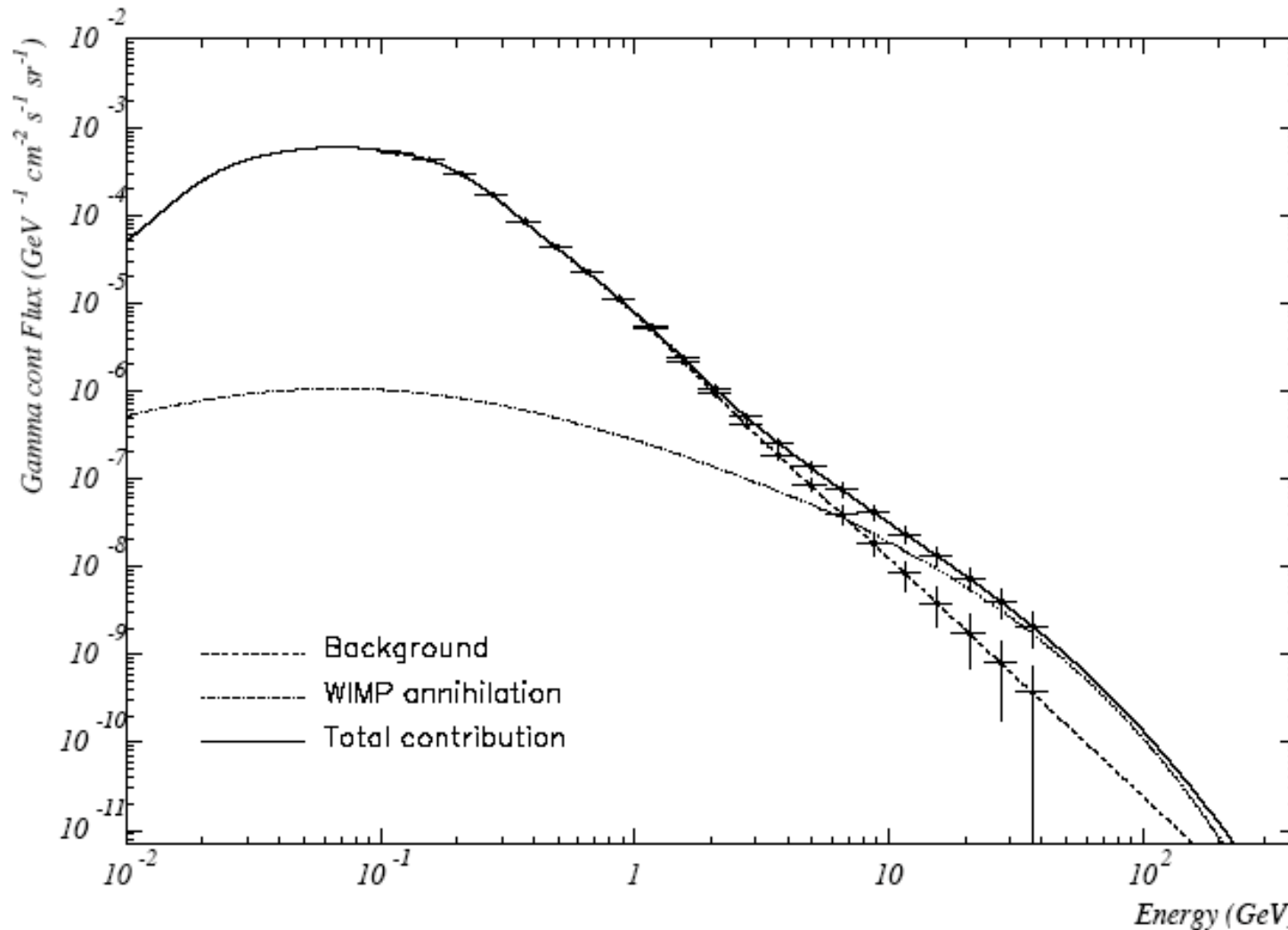


Distortion of the secondary antiproton flux induced by a signal from a heavy Higgsino-like neutralino.



Expected data from **Pamela** for one year of operation are shown in red.

# GLAST

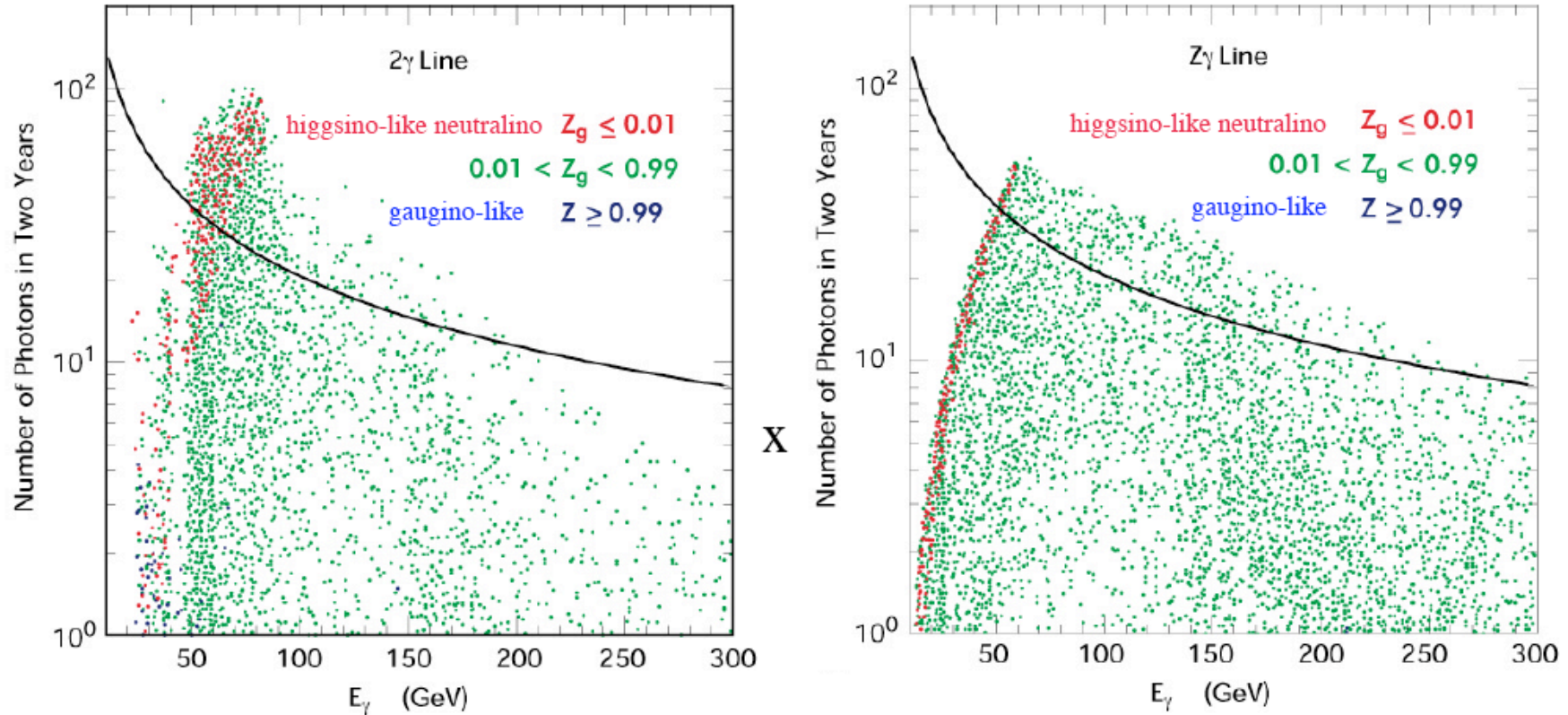


- Flusso gamma supersimmetrico, fondo galattico e somma dei due spettri.
- I punti rappresentano la simulazione delle misure di GLAST.



# GLAST

Number of photons expected in GLAST for  $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$  from a 1-sr cone near the galactic center



Bergstrom et al. astro-ph/ 9712318

Two-year scanning mode exposure.

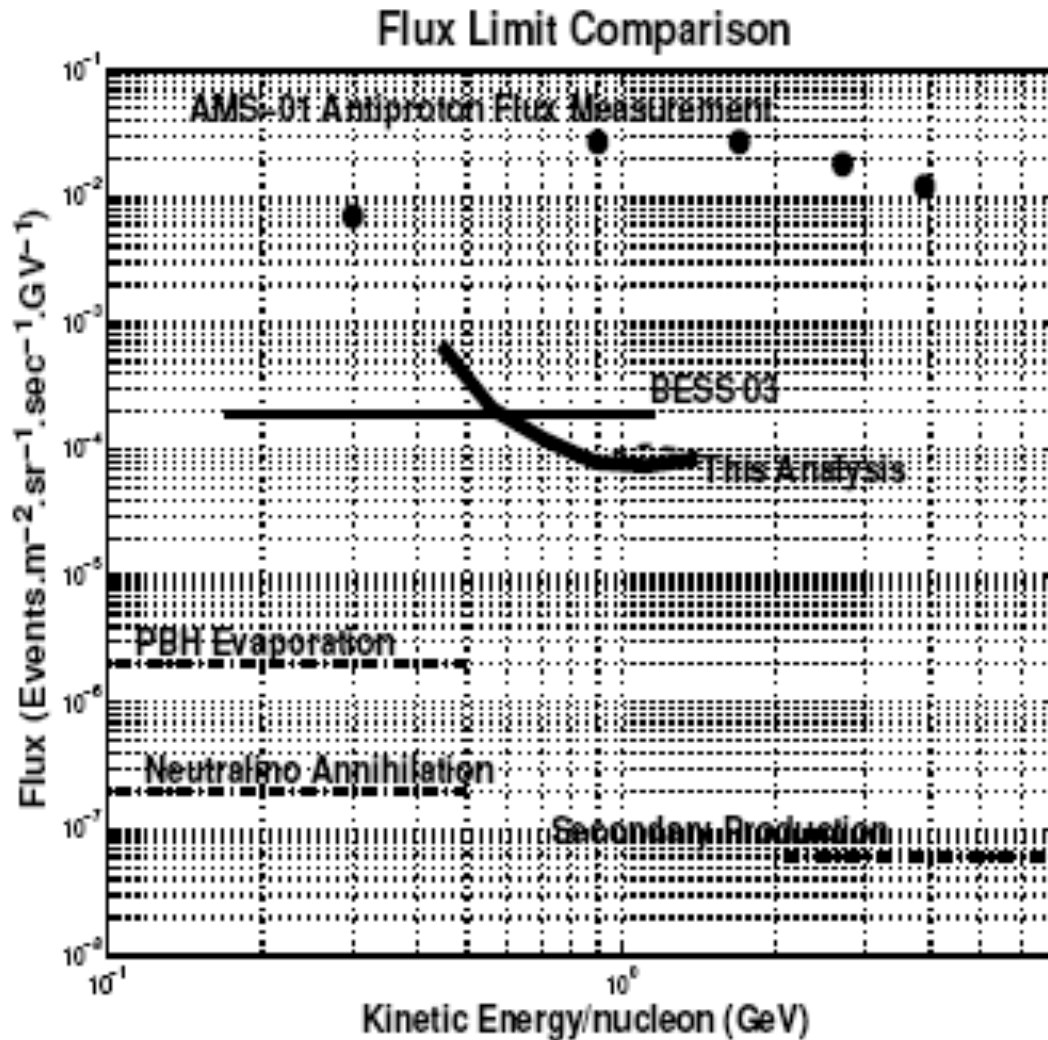
Each point is a different set of Minimal SuperSymmetric Standard Model parameters

The galaxy dark matter halo profile giving the maximal flux has been assumed.

The solid line shows the number of events needed to obtain a five-sigma detection over the galactic diffuse gamma-ray background as estimated from EGRET data.



# anti-D



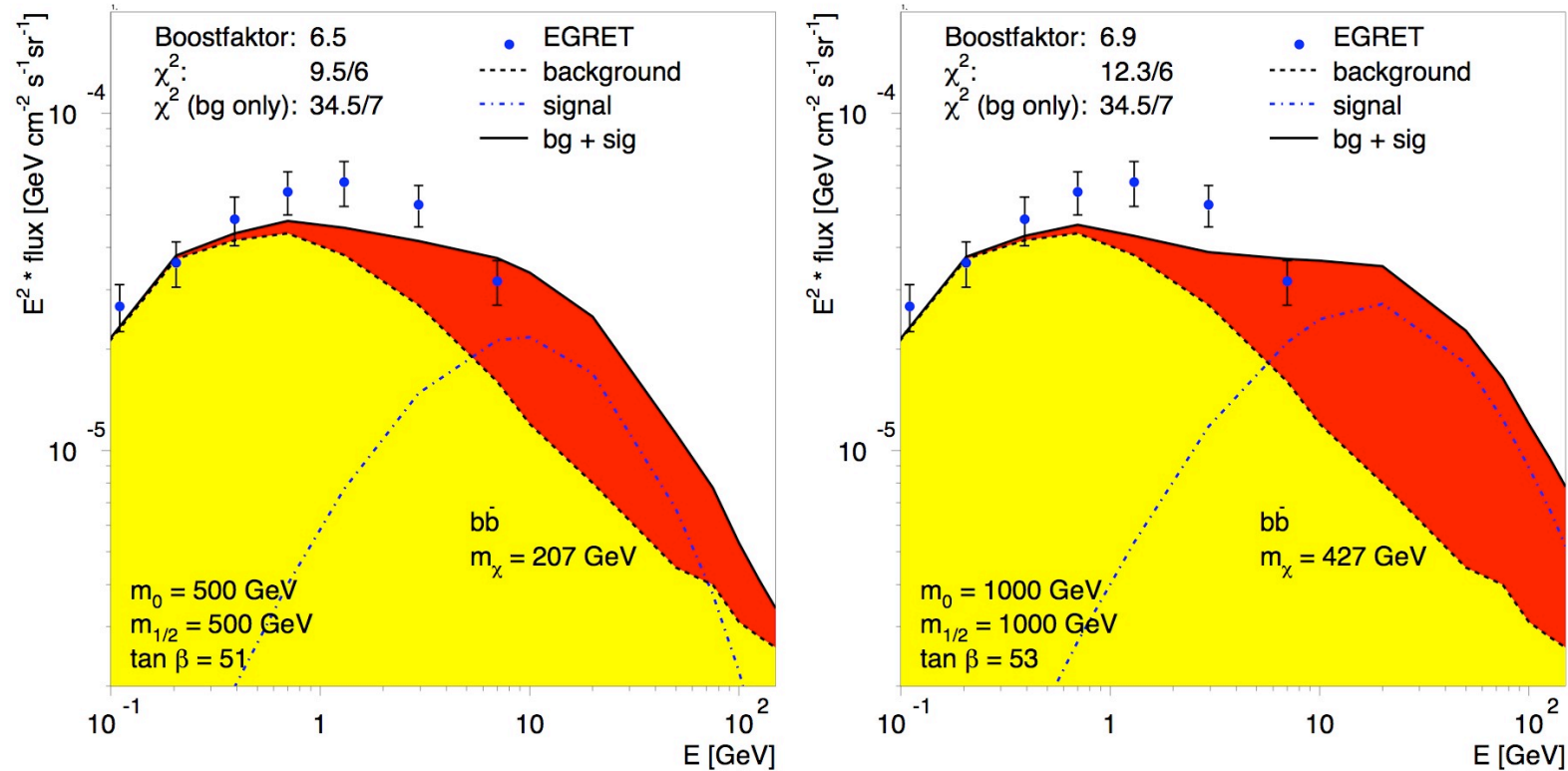
- Limiti al flusso di anti-D. La linea spessa è il limite al 95% C.L. del flusso con i tagli che escludono il candidato anti-D. I limiti di BESS e AMS01 sono confrontabili.
- Sono anche mostrati i limiti superiori al flusso di anti-D predetti dall'evaporazione Primordiale di Black Hole (PBH), dall'annichilazione di neutralini e dalla produzione secondaria di D.

# EVIDENZA DEL NEUTRALINO?

W. de Boer, M. Herold, C. Sander, V. Zhukov (hep-ph/0309029v1 3 Sept 2003) hanno speculato che i dati attualmente disponibili per i gamma, antiprotoni e positroni diano una indicazione, "Indirect evidence....." è il titolo del lavoro, dell'esistenza di WIMP con l'interpretazione del neutralino SUSY.

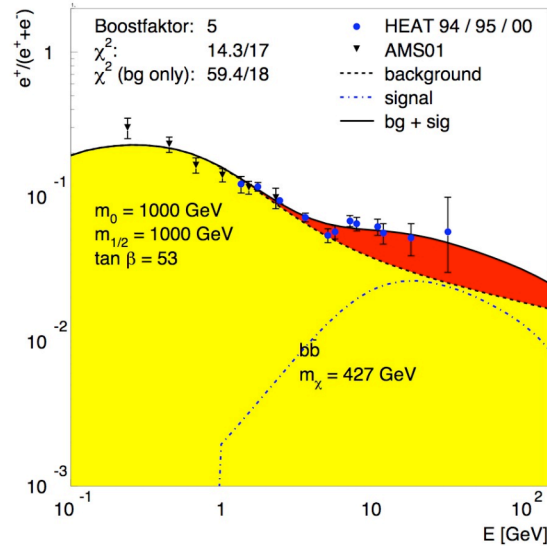
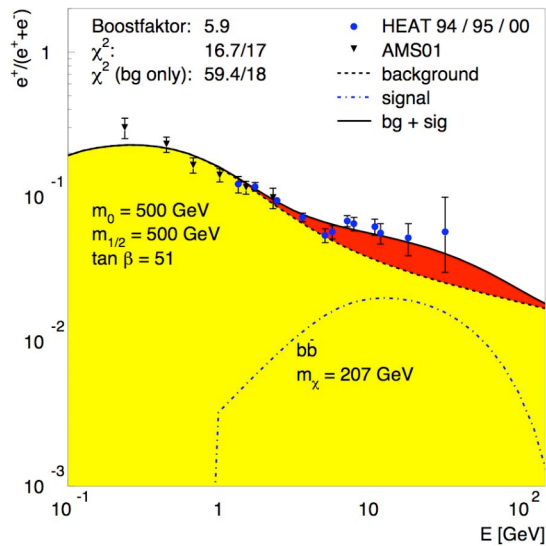
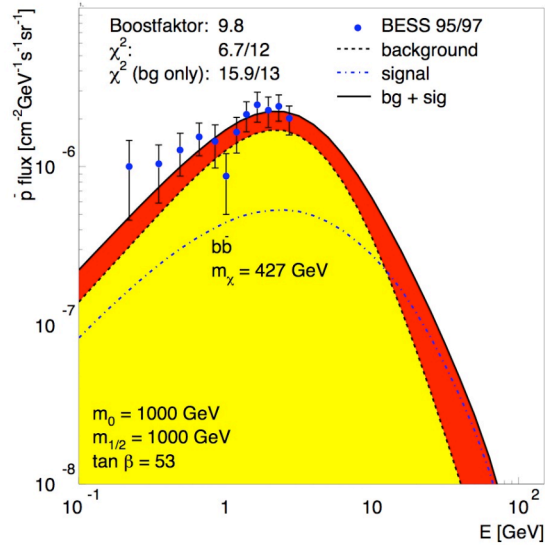
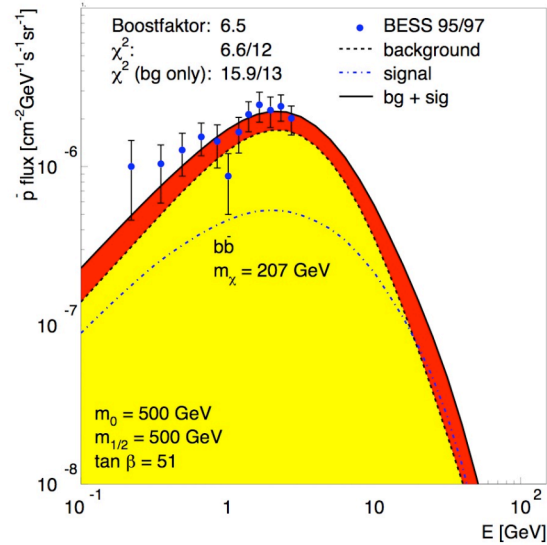
- *I modelli di calcolo dei flussi diffusi dei raggi cosmici da sorgenti convenzionali predicono un numero troppo piccolo di antiprotoni, gamma e positroni.*
- *Dalla misura della densità residua eseguita da WMAP, si può determinare la sezione d'urto di annichilazione dei WIMP indipendentemente dal modello.*
- *Se il WIMP è identificato con il neutralino SUSY, allora solo una regione limitata dello spazio dei parametri è in accordo con la sezione d'urto di annichilazione.*
- *I segnali sono simulati con un solo profilo di densità dei neutralini (NFW) ed il fit simultaneo dà un unico fattore di normalizzazione per la densità.*
- *La probabilità del fit sale da  $10^{-8}$  con il solo fondo a 0.5 con il neutralino.*

# NEUTRALINO?



- Spettro dei gamma con il contributo del fondo e dell'annichilazione dei neutralini.
- I fattori di normalizzazione della densità dei neutralini sono 6.5/6.9.
- A sinistra  $m_\chi=207 \text{ GeV}$ , a destra  $m_\chi=427 \text{ GeV}$

# NEUTRALINO?

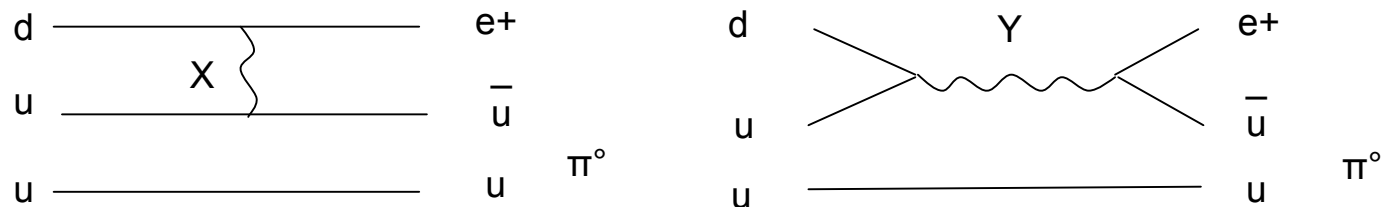


- Spettro di antiprotoni.
- I fattori di normalizzazione della densità dei neutralini sono 6.5/9.8.

- Spettro di positroni
- I fattori di normalizzazione della densità dei neutralini sono 5.9/5.

# Decadimento del protone

- Nelle teorie Grandi Unificate, SU(5), SUSY, è possibile il decadimento del protone, dovuto al raggruppamento dei quark e leptoni in una simmetria più ampia.
- In SU(5) i quark e leptoni possono trasformarsi gli uni negli altri per mezzo dello scambio di *leptoquark*, bosoni pesanti X e Y.



- Poiché il tempo di decadimento scala approssimativamente con  $\tau \approx M^4/m_p$ , dove M è la massa del leptoquark alla scala di Planck, SU(5) suggerisce una vita media di  $10^{31} - 10^{33}$  anni.
- Modelli basati sulle supersimmetrie predicono vite medie inferiori ma anche dell'ordine di  $10^{35}$  anni.



# Decadimento del protone

