



L'analisi dati negli esperimenti DAMA/NaI e DAMA/LIBRA

Fisica Nucleare e
Subnucleare II

Marco Bentivegna

Rate di eventi singoli vs Tempo vs Energia

- Andamento di $\langle r_{ijk} - \text{flat}_{jk} \rangle_{jk}$ in funzione del tempo, dove

- r_{ijk} = rate nell'intervallo di tempo i , per il detector j , nel bin di energia k

- flat_{jk} = r_{ijk} mediato nel tempo

- $r_{ijk} - \text{flat}_{jk}$ è mediata su tutti i detector j e su tutti i bin di energia k

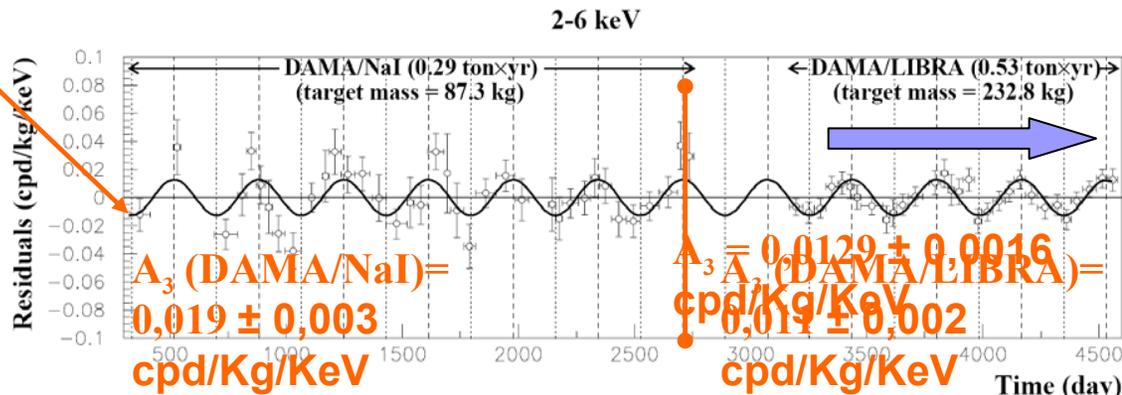
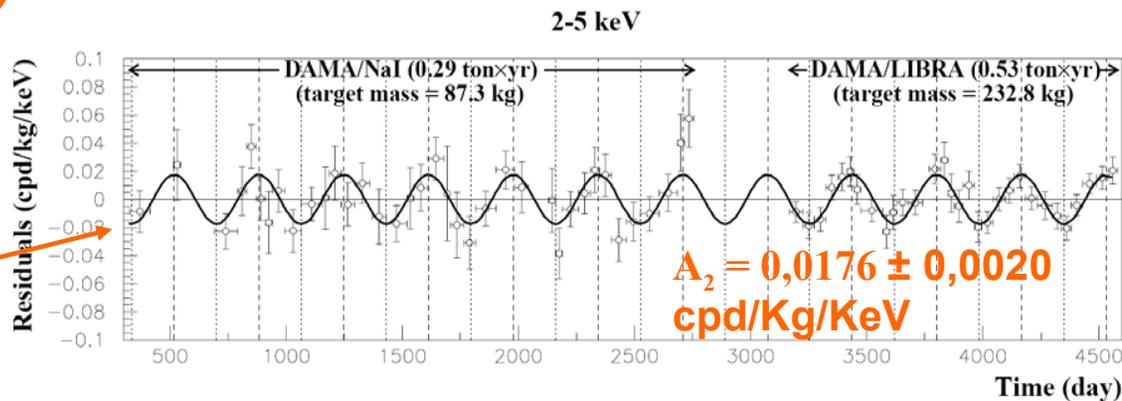
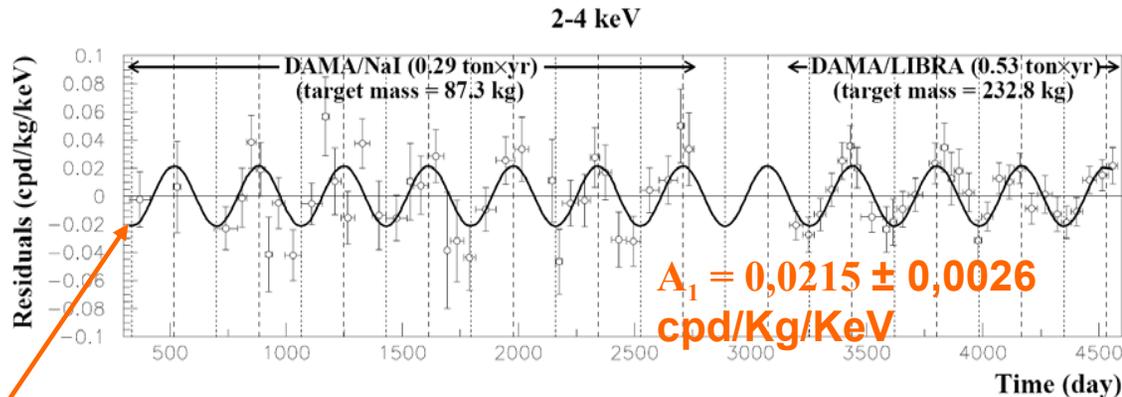
$A \cos \omega(t-t_0)$

- Dove

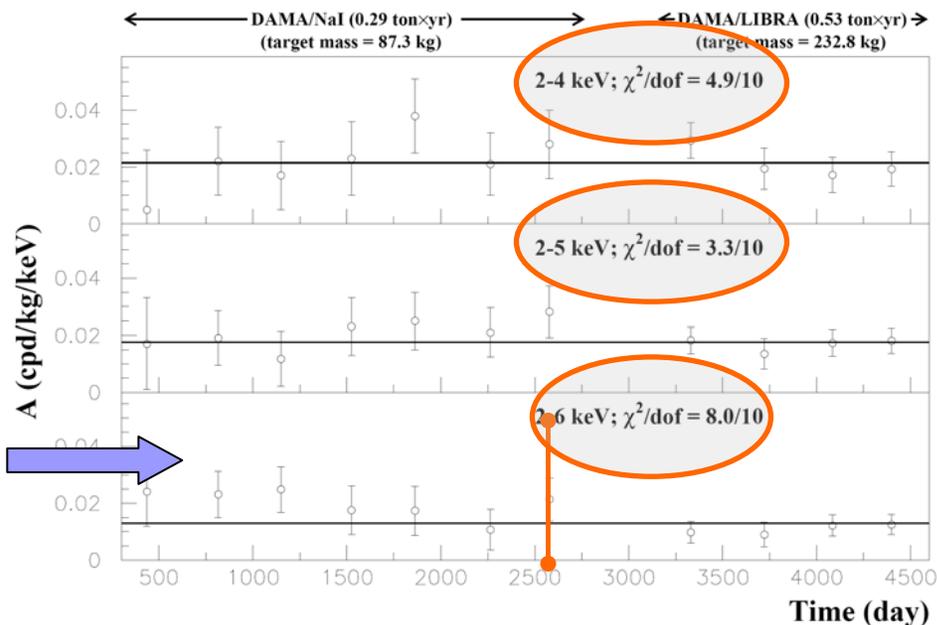
- $T = 2\pi/\omega = 1 \text{ yr}$

- $t_0 = 152.5 \text{ gg}$ (2 Giugno)

- A = parametro libero del fit



Rate di eventi singoli vs Tempo vs Energia



$$A3 \text{ (DAMA/NaI)} - A3 \text{ DAMA/LIBRA} = 0,008 \pm 0,004 \text{ cpd/Kg/KeV}$$

2 σ

Tuttavia...

Da test χ^2 , l'ipotesi di fluttuazioni statistiche attorno ai valori centrali è verificata al 90% C.L.

Fit con ω e t_0 parametri liberi

Probabilità di assenza di modulazione:

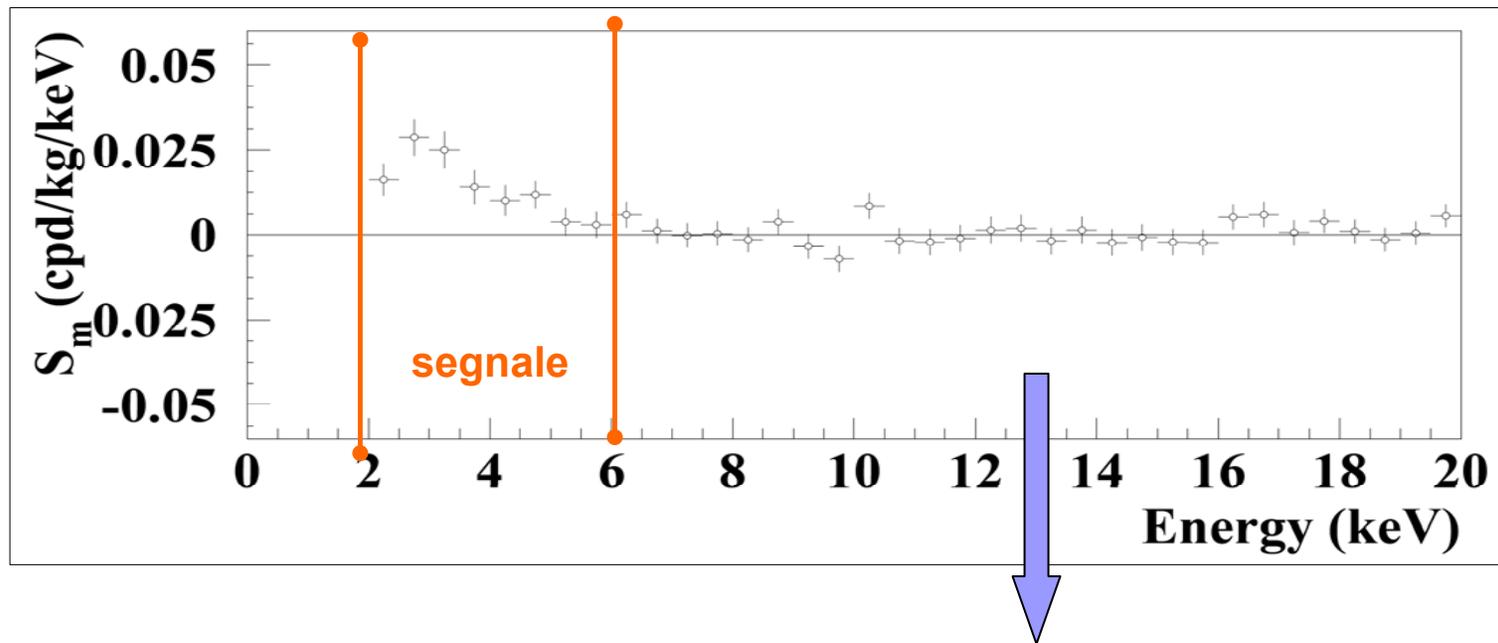
- $1,3 \times 10^{-4}$ (2-4 KeV)
- $1,9 \times 10^{-4}$ (2-5 KeV)
- $1,8 \times 10^{-4}$ (2-6 KeV)

	A (cpd/kg/keV)	T= 2 π / ω (yr)	t_0 (day)	C.L.
DAMA/NaI (7 years)				
(2÷4) keV	0.0252 \pm 0.0050	1.01 \pm 0.02	125 \pm 30	5.0 σ
(2÷5) keV	0.0215 \pm 0.0039	1.01 \pm 0.02	140 \pm 30	5.5 σ
(2÷6) keV	0.0200 \pm 0.0032	1.00 \pm 0.01	140 \pm 22	6.3 σ
DAMA/LIBRA (4 years)				
(2÷4) keV	0.0213 \pm 0.0032	0.997 \pm 0.002	139 \pm 10	6.7 σ
(2÷5) keV	0.0165 \pm 0.0024	0.998 \pm 0.002	143 \pm 9	6.9 σ
(2÷6) keV	0.0107 \pm 0.0019	0.998 \pm 0.003	144 \pm 11	5.6 σ
DAMA/NaI + DAMA/LIBRA				
(2÷4) keV	0.0223 \pm 0.0027	0.996 \pm 0.002	138 \pm 7	8.3 σ
(2÷5) keV	0.0178 \pm 0.0020	0.998 \pm 0.002	145 \pm 7	8.9 σ
(2÷6) keV	0.0131 \pm 0.0016	0.998 \pm 0.003	144 \pm 8	8.2 σ

Ampiezza di Modulazione vs Energia

$$R(t) = S_0 + S_m \cos[\omega(t - t_0)]$$

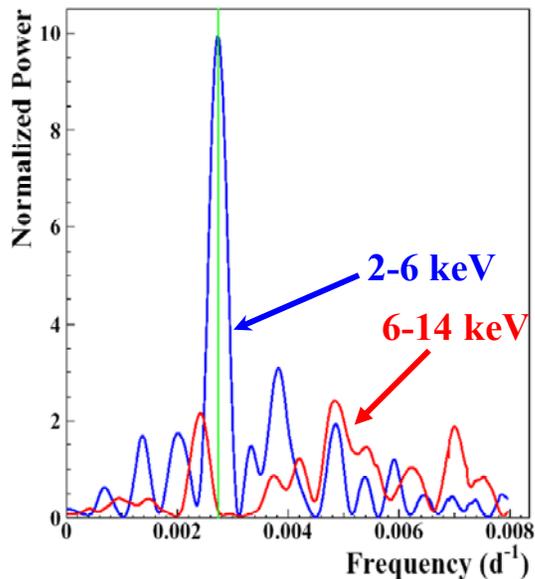
ω e t_0 fissati



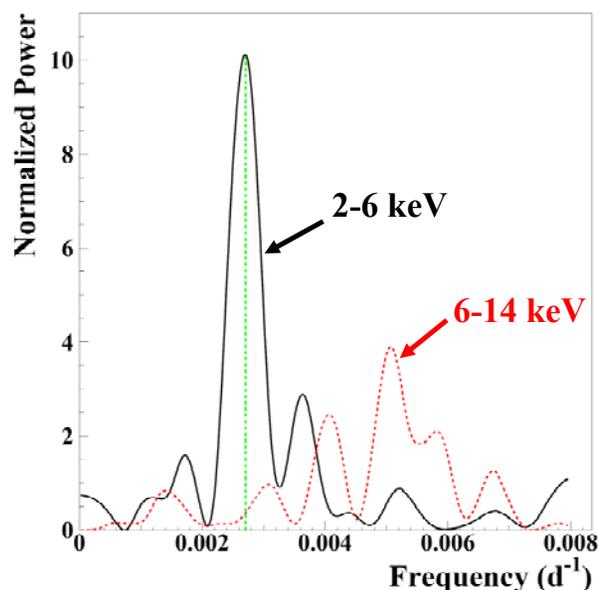
- Valori di S_m nella regione 6-20 KeV compatibili con fluttuazioni statistiche attorno allo zero ($\chi^2 = 24.4$, su 28 gradi di libertà)

Spettri di Potenza

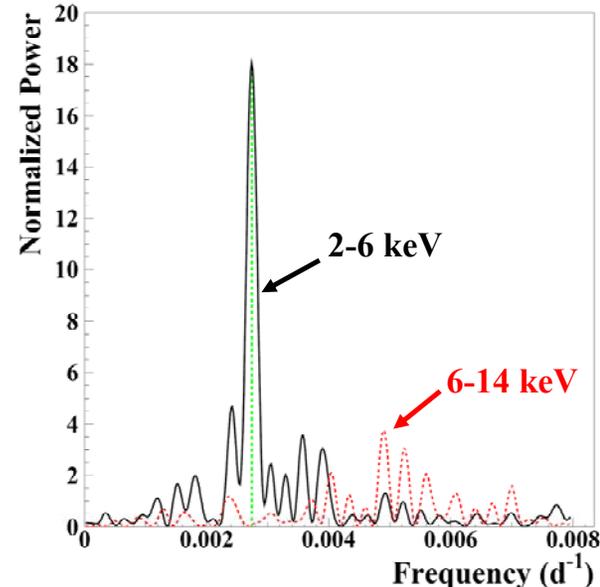
DAMA/NaI



DAMA/LIBRA



DAMA/NaI+DAMA/LIBRA



Modi Principali (2-6 KeV)

$$2,737 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$$

$$2,705 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$$

$$2,737 \times 10^{-3} \text{ d}^{-1}$$

≈ 1 anno

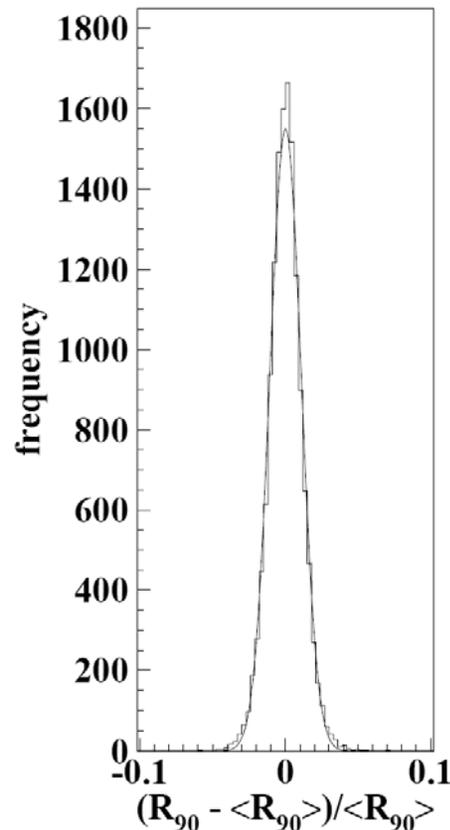
Nella regione di energia immediatamente superiore, nessuna modulazione



Mod. Ampl. (6-10 keV): cpd/kg/keV
(0.0016 ± 0.0031) DAMA/LIBRA-1
-(0.0010 ± 0.0034) DAMA/LIBRA-2
-(0.0001 ± 0.0031) DAMA/LIBRA-3
-(0.0006 ± 0.0029) DAMA/LIBRA-4

Ampiezze di Modulazione per Alte Energie

- Background nella regione di interesse generato da neutroni, muoni ed elettroni Compton, strettamente correlati con gli eventi ed energie più alte.
- Studiamo il rate integrato di eventi ad energie superiori a 90 KeV, R_{90}



- Variazioni relative $(R_{90} - \langle R_{90} \rangle) / \langle R_{90} \rangle$ compatibili con Gaussiana ($\sigma = 1\%$)

- Fittando R_{90} in funzione del tempo, otteniamo ampiezze di modulazione compatibili con zero

DAMA/LIBRA-1	$-(0.05 \pm 0.19)$ cpd/kg
DAMA/LIBRA-2	$-(0.12 \pm 0.19)$ cpd/kg
DAMA/LIBRA-3	$-(0.13 \pm 0.18)$ cpd/kg
DAMA/LIBRA-4	(0.15 ± 0.17) cpd/kg

Nessuna modulazione ad alte energie

Ampiezze di Modulazione per Eventi Multipli

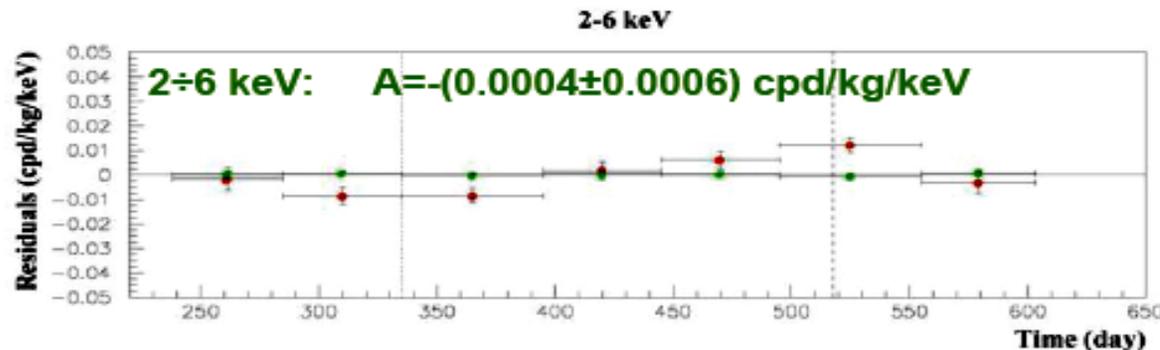
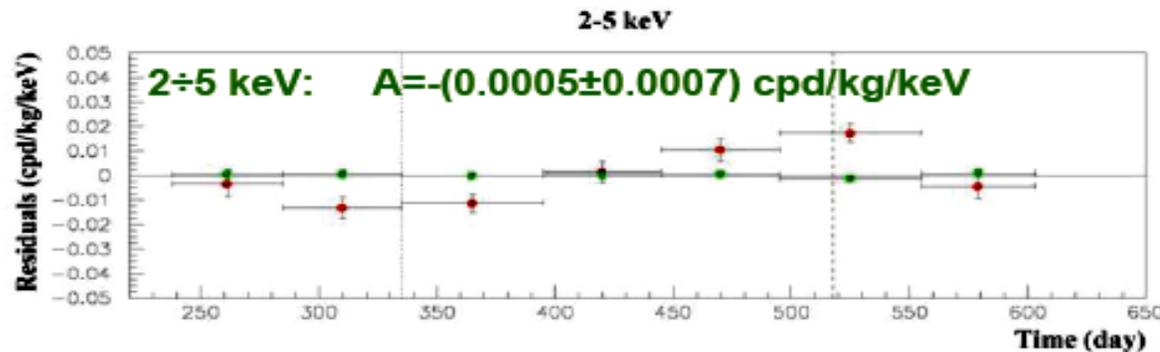
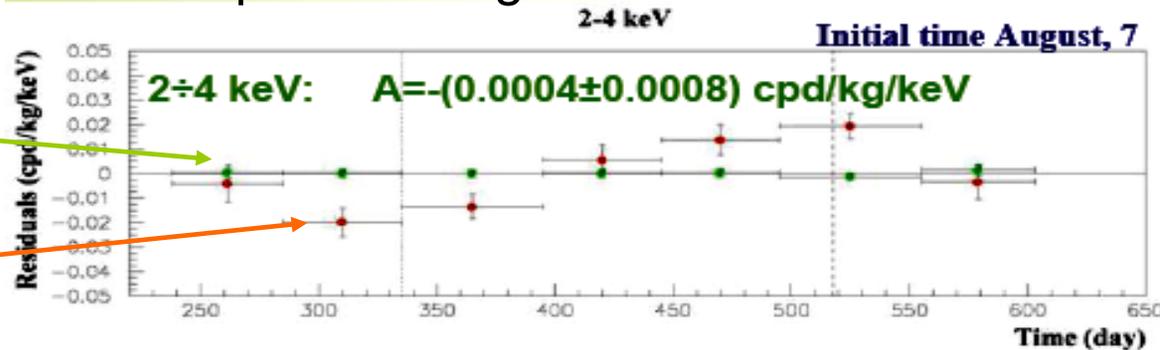
- Per DM, la probabilità di far scattare più detector è trascurabile. Studiamo il rate di interazioni multiple nella regione di interesse

Multiple rate

Single rate

- Procedure hardware e software identiche nei due casi

Nessuna modulazione negli eventi multipli



Analisi Statistica delle Ampiezze di Modulazione

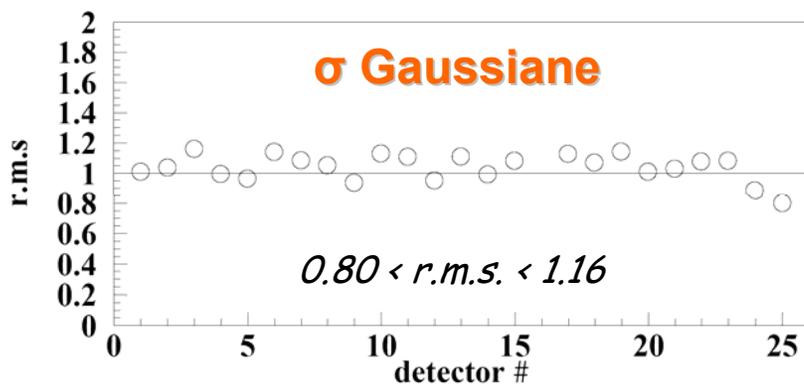
- Distribuzione di

$$x = (S_{ijk} - \langle S_{jk} \rangle) / \sigma$$

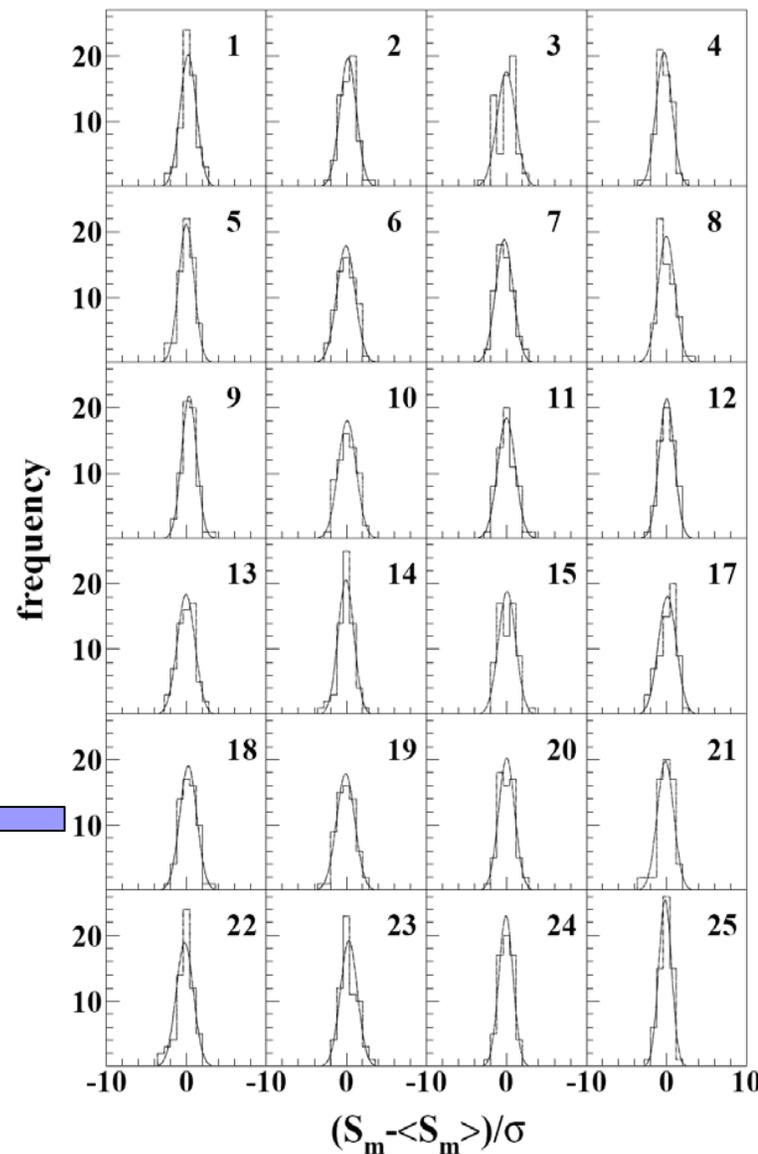
Nella regione (2-6 KeV), dove:

S_{ijk} = A. M. per i-esimo detector, j-esimo ciclo annuale e k-esimo bin di energia

$\langle S_{jk} \rangle = S_{jk}$ mediato sul ciclo e sull'intervallo di energia

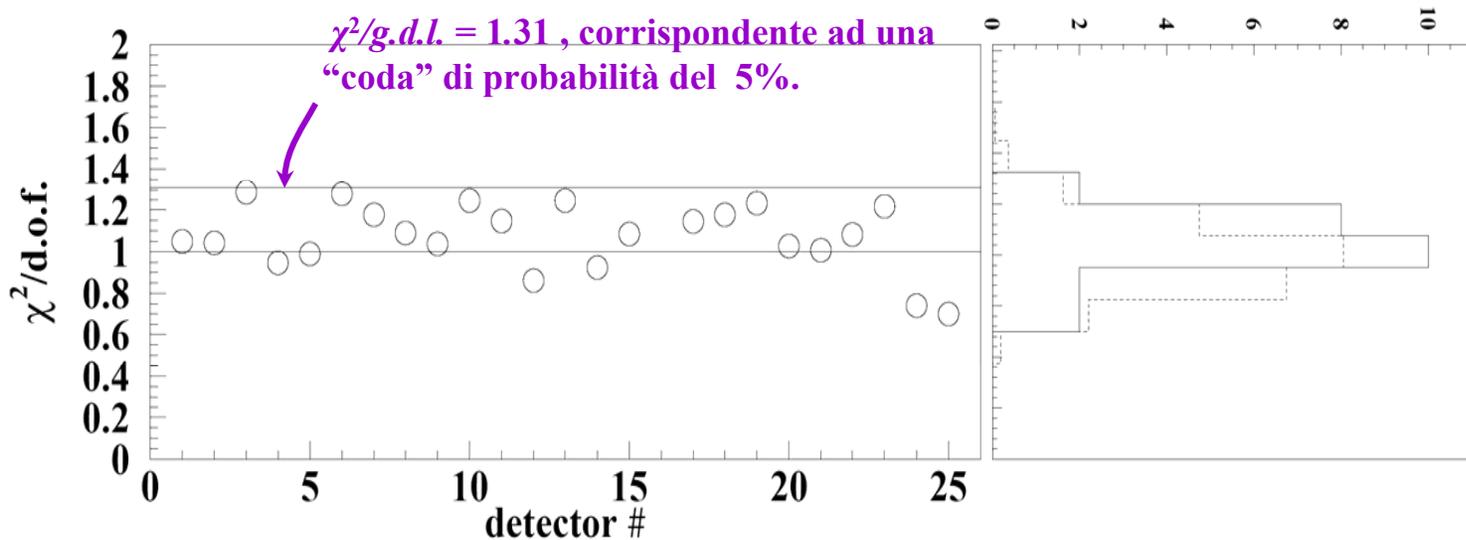


Distribuzione statistica consistente



Analisi Statistica delle Ampiezze di Modulazione

- Distribuzione di $\chi^2/\text{g.d.l.}$ per ogni detector, nella regione 2-6 KeV ($\chi^2 = \sum x^2$)



- Valor medio = 1,072 \neq 1 ; Fluttuazione statistica o errore sistematico?
- Ulteriore incertezza sulla A.M. (nella regione di interesse) di
 - $\leq 5 \times 10^{-4}$ cpd/kg/keV (quadraticamente) = $\leq 4.7\%$



Limite superiore per possibili effetti sistematici

Ampiezza cosinusoidale vs sinusoidale vs t^*

$$R(t) = S_0 + S_m \cos[\omega(t-t_0)] + Z_m \sin[\omega(t-t_0)] = S_0 + Y_m \cos[\omega(t-t^*)]$$

- E' presente un contributo sinusoidale al segnale?

$$S_m = 0,0122 \pm 0,0016 \text{ cpd/Kg/KeV}$$

$$Z_m = -0,0019 \pm 0,0017 \text{ cpd/Kg/KeV}$$

2-6 KeV

$$S_m = 0,0005 \pm 0,0010 \text{ cpd/Kg/KeV}$$

$$Z_m = 0,0011 \pm 0,0012 \text{ cpd/Kg/KeV}$$

6-12 KeV

NO

- Qual è il valore più consistente per t^* ?

$$Y_m = 0,0123 \pm 0,0016 \text{ cpd/Kg/KeV}$$

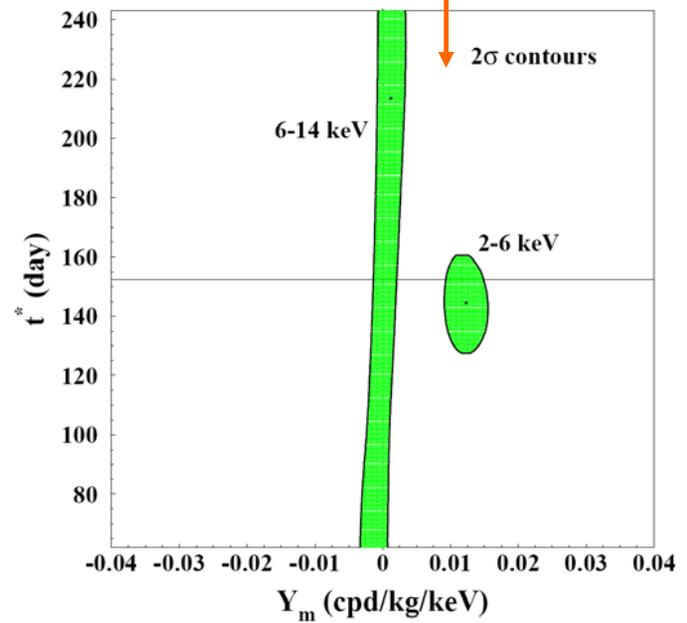
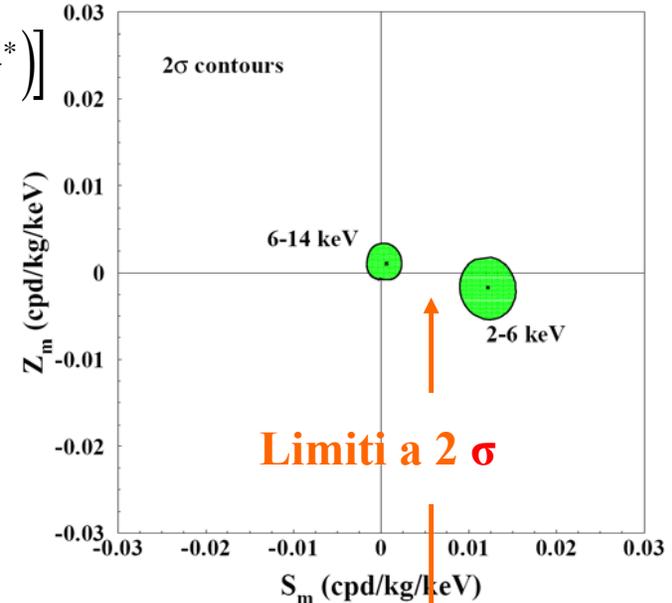
$$t^* = 144,0 \pm 7,5 \text{ gg}$$

2-6 KeV

$$Y_m = 0,0012 \pm 0,0011 \text{ cpd/Kg/KeV}$$

$$t^* = \text{indeterminato}$$

6-12 KeV



Analisi delle incertezze sistematiche

- Analisi della stabilità delle condizioni di running

	DAMA/LIBRA-1	DAMA/LIBRA-2	DAMA/LIBRA-3	DAMA/LIBRA-4
Temperature	$-(0.0001 \pm 0.0061) \text{ }^\circ\text{C}$	$(0.0026 \pm 0.0086) \text{ }^\circ\text{C}$	$(0.001 \pm 0.015) \text{ }^\circ\text{C}$	$(0.0004 \pm 0.0047) \text{ }^\circ\text{C}$
Flux N ₂	$(0.13 \pm 0.22) \text{ l/h}$	$(0.10 \pm 0.25) \text{ l/h}$	$-(0.07 \pm 0.18) \text{ l/h}$	$-(0.05 \pm 0.24) \text{ l/h}$
Pressure	$(0.015 \pm 0.030) \text{ mbar}$	$-(0.013 \pm 0.025) \text{ mbar}$	$(0.022 \pm 0.027) \text{ mbar}$	$(0.0018 \pm 0.0074) \text{ mbar}$
Radon	$-(0.029 \pm 0.029) \text{ Bq/m}^3$	$-(0.030 \pm 0.027) \text{ Bq/m}^3$	$(0.015 \pm 0.029) \text{ Bq/m}^3$	$-(0.052 \pm 0.039) \text{ Bq/m}^3$
Hardware rate above single photoelectron	$-(0.20 \pm 0.18) \times 10^{-2} \text{ Hz}$	$(0.09 \pm 0.17) \times 10^{-2} \text{ Hz}$	$-(0.03 \pm 0.20) \times 10^{-2} \text{ Hz}$	$(0.15 \pm 0.15) \times 10^{-2} \text{ Hz}$

- Stabilità superiore all'1%
- Tutte le A.M. compatibili con 0
- Effetti apprezzabili già esclusi dall'analisi degli eventi ad alte energie, degli eventi multipli e della distribuzione delle A.M., infatti...

Criteri di Selezione

La segnatura del segnale da DM è prevista soddisfare i seguenti criteri:

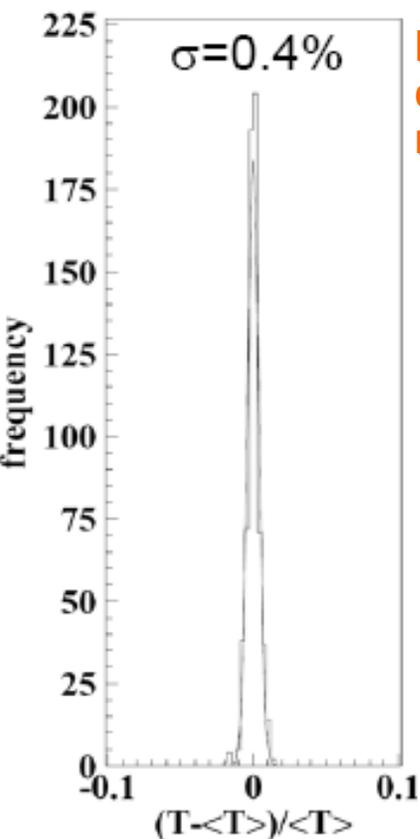
- Componente di modulazione cosinusoidale...
- ...con periodo di un anno...
- ...e fase intorno al 2 Giugno...
- ...presente solo in una finestra di energia ben definita, ...
- ...relativa unicamente agli eventi singoli...
- ...e con un'ampiezza relativa $\leq \sim 7\%$

Anche se fosse presente una modulazione nei suddetti parametri, ne risulterebbe una modulazione del segnale anche nelle zone ad alta energia e negli eventi multipli, il che non è osservato

Ciononostante...

Incertezze sistematiche: Temperatura

- PM e cristalli alloggiati in reticolo di rame, in contatto diretto con il massiccio schermo anti-radiazioni (capacità $\approx 10^6$ cal/°C)
- Mantenuta stabile da due impianti indipendenti



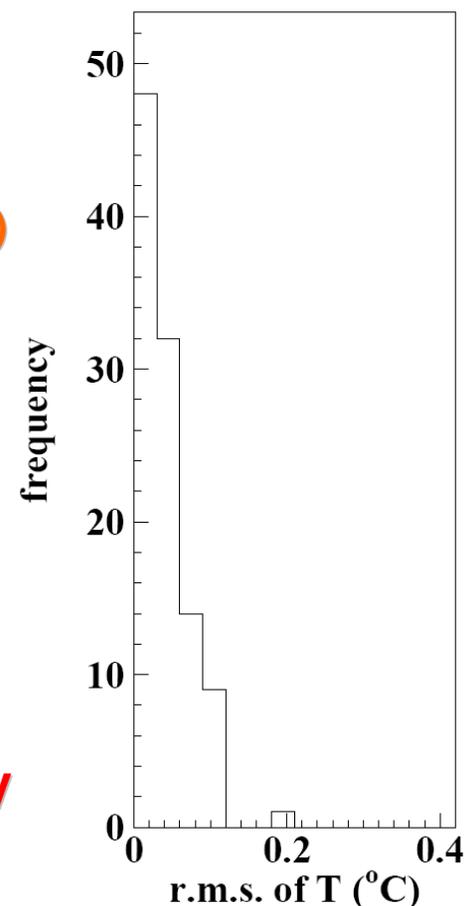
Distribuzione delle variazioni relative di T

Distribuzione delle variazioni di T all'interno di periodi con la stessa calibrazione (≈ 10 gg)

Valor medio $\approx 0,04$ °C

- Derivata della risposta dell'NaI $\approx -0,2\%$ /°C

A.M. risultante $< 10^{-4}$ cpd/Kg/KeV ($< 0,5\%$ S_m oss)

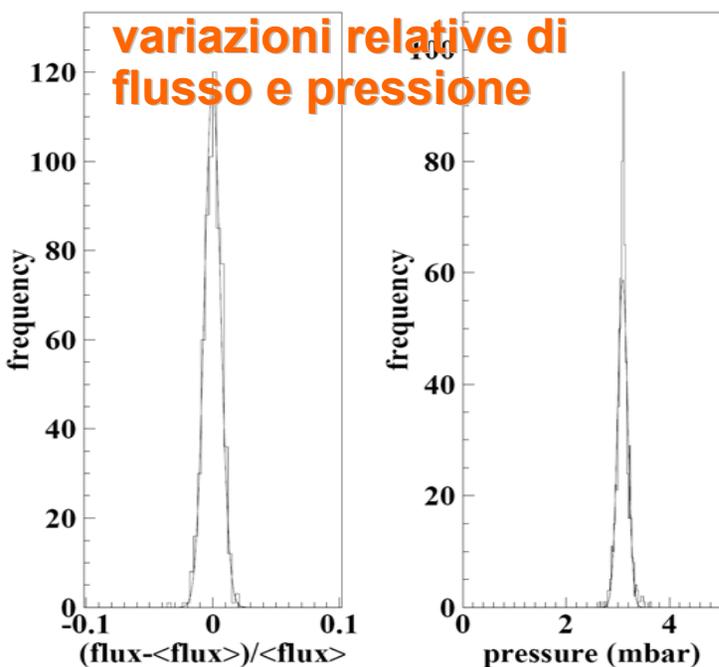
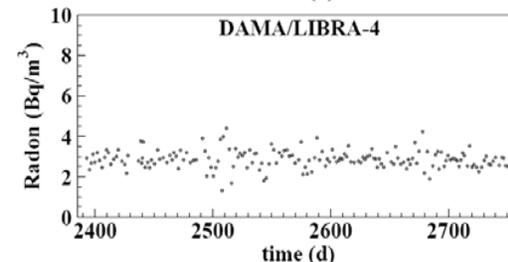
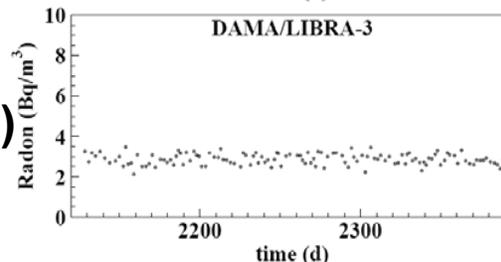
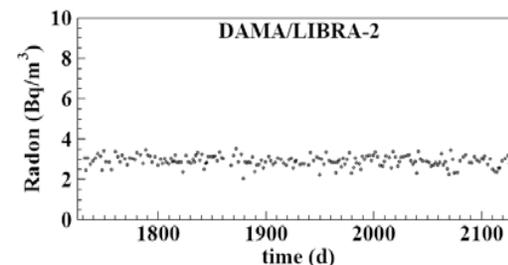
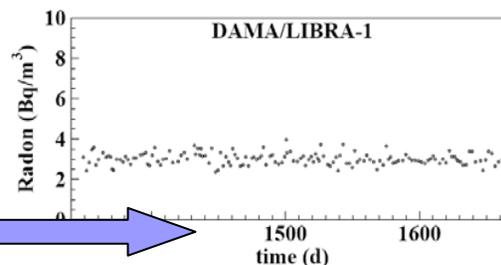


Incertezze sistematiche: Radon

- Pareti della camera in Supronyl (permeabilità $2 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$)

Valori misurati: al livello di sensibilità degli strumenti ($\approx 3 \text{ Bq/m}^3$); AM compatibile con 0

- Scudo in plexiglas sigillato – (N)
- Box di rame sigillato – (N)



- Da ricerca di doppie coincidenze di γ (609 e 1120 KeV) da ^{214}Bi , $[\text{Rn}]_{\text{interna}} < 5.8 \times 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$ al 90% C.L.

- Meno di $2.5 \times 10^{-5} \text{ cpd/Kg/KeV}$ attesi
- Se 10% modulazione, $< 0.01\%$ S_m osservata

Background

- Nessuna modulazione per alte energie ed eventi multipli.
- Tuttavia, ulteriori analisi per eventuale background da:

- **Neutroni termici**
- **Neutroni veloci**
- **Muoni**

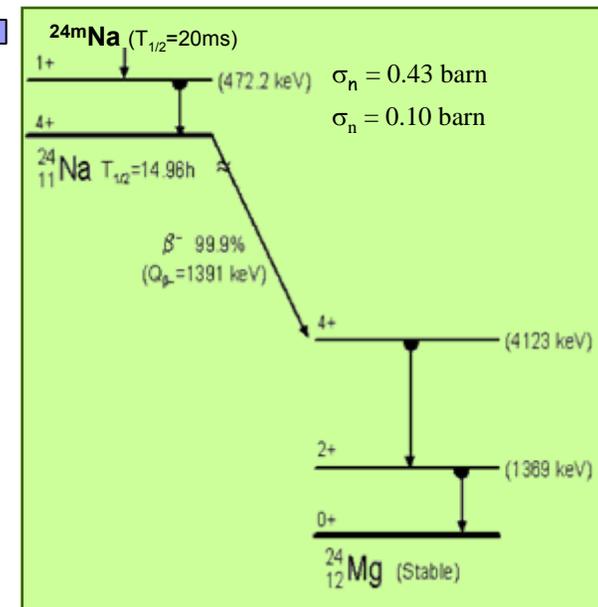
- Misura del flusso di neutroni termici:



$$\Phi_n < 1.2 \times 10^{-7} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (90\%C.L.)}$$

$$\text{Capture rate} = \Phi_n \sigma_n N_T < 0.022 \text{ captures/day/kg}$$

- **Se 10% modulazione, < 0.01% S_m osservata**



Background

Neutroni Veloci

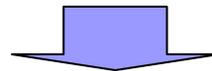


Studio della reazione



$$\Phi_{\text{FN}} < 2.2 \times 10^{-7} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1} (90\% \text{C.L.})$$

Misura diretta di Φ_{FN} ai Laboratori del
Gran Sasso = $10^{-7} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Sopra 2 KeV, Rate $\approx 10^{-3} \text{ cpd/Kg/KeV}$
(da simulazioni MonteCarlo)

Anche una modulazione del 10% di Φ_{FN} darebbe un
contributo trascurabile rispetto a S_m osservata

Background da muoni

$$\Phi_{\mu} @ \text{LNGS} \approx 20 \mu \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

- Da esperimento MACRO: andamento sinusoidale di ampiezza $\approx 2\%$ in Φ_{μ} , con $T \approx 1$ anno e massimo in estate, dovuto alle variazioni di temperatura dell'atmosfera. Ma...
- **Fase non compatibile**
- **L'effetto predominante (neutroni veloci) è stimato essere:**

$$\text{Neutron Yield @ LNGS: } Y = 1 \div 7 \cdot 10^{-4} \text{ n } / \mu / (\text{g/cm}^2)$$

$$R_n = (\text{fast n by } \mu) / (\text{time unit}) = \Phi_{\mu} Y M_{\text{eff}}$$

$$M_{\text{eff}} = 15 \text{ tons}$$

g = fattore geometrico

$$S_m^{(\mu)} = R_n g \varepsilon f_{\Delta E} f_{\text{single}} 2\% / (M_{\text{setup}} \Delta E)$$

$$\Delta E = 4 \text{ KeV}$$

$$M_{\text{setup}} = 250 \text{ Kg}$$

ε = efficienza per scattering elastico

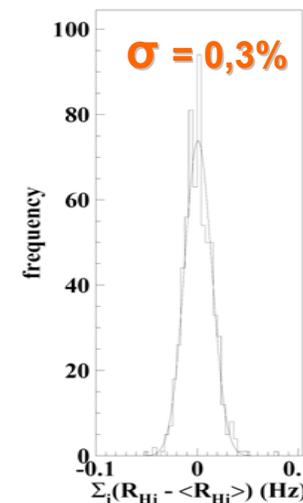
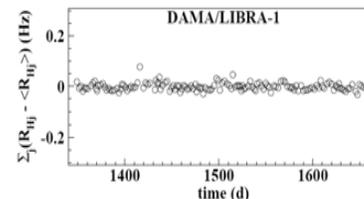
$f_{\Delta E}$ = accettazione per finestra 2-6 KeV

f_{single} = efficienza per single-hit

$$S_m^{(\mu)} < (0.4 \div 3) \times 10^{-5} \text{ cpd/kg/keV}$$

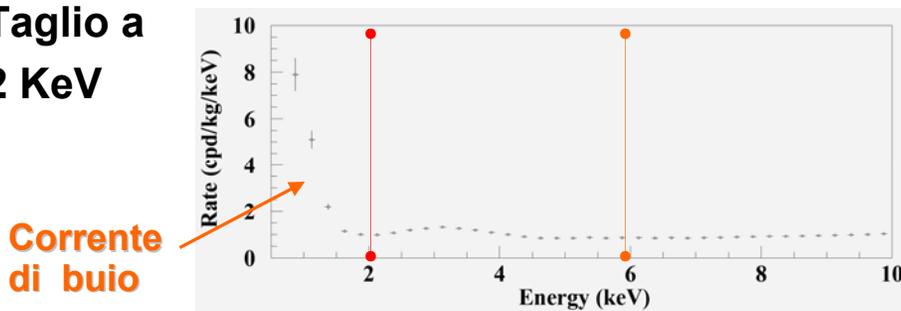
Rumore elettronico

- Studiamo l'hardware rate totale (su tutto lo spettro energetico = rumore + segnale + background) per ogni detector
- Le variazioni relative seguono distribuzione di Gauss
- A.M. $< 1.8 \times 10^{-3}$ Hz (90% C.L.)
- Noise rate da ogni detector ≈ 0.1 Hz



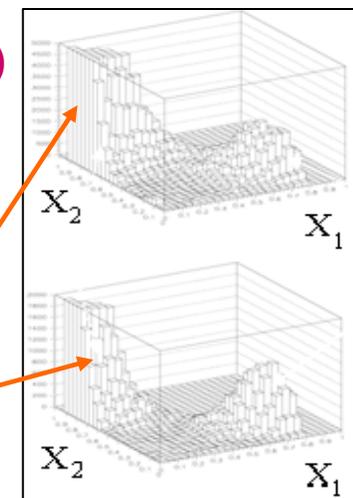
A.M. relativa del rumore $< 1.8 \times 10^{-3}$ Hz / 2.5 Hz $\approx 7.2 \times 10^{-4}$ (90%CL)

- Taglio a 2 KeV

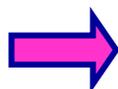


- Analisi di forma d'onda

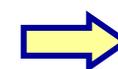
Corrente di buio



Anche in caso di 10% di rumore residuo



A.M. rel. da rumore $< 7.2 \times 10^{-5}$

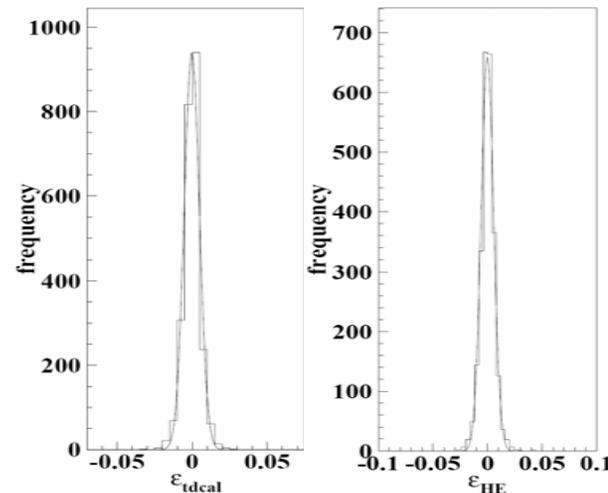


$< 10^{-4}$ cpd/kg/keV

Fattori di Calibrazione ed Efficienze

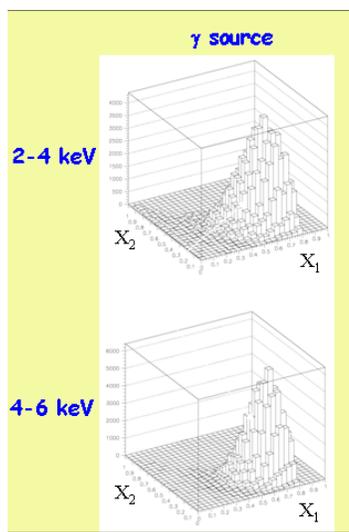
- td_{cal} = fattore di prop. fra energia ed area della forma d'onda misurata
- Analizziamo la distribuzione di $\mathcal{E}_{tdcal} = \frac{tdcal_k - tdcal_{k-1}}{tdcal_{k-1}}$ per basse ed alte energie
- Distribuzioni Gauss-like ($\sigma_{LE} = 0.5\%$; $\sigma_{HE} = 0.6\%$)
- Incertezza aggiuntiva sulle misure di energia

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{res}^2 + \sigma_{cal}^2} \approx \sigma_{res} \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{cal}}{\sigma_{res}} \right)^2 \right]; \quad \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{cal}/E}{\sigma_{res}/E} \right)^2 \leq 7.5 \cdot 10^{-4} \frac{E}{20keV}$$



massimo contributo da fluttuazioni di $td_{cal} = 1-2 \times 10^{-4}$ cpd/Kg/KeV

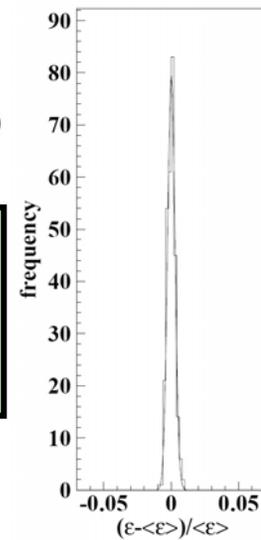
- Efficienza sul segnale dei tagli sulla forma d'onda misurati ogni ≈ 10 gg tramite sorgenti di ^{241}Am



- Variazioni relative Gauss-like ($\sigma = 0.3\%$)

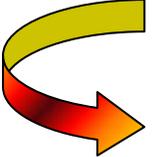
Energia	A.M.
2-4 keV	$(0.1 \pm 0.4) \times 10^{-3}$
4-6 keV	$-(0.4 \pm 0.4) \times 10^{-3}$

Compatibili con zero

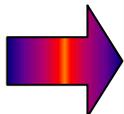


Riassunto Sistematiche

<i>Sorgente</i>	<i>Commenti</i>	<i>Limite superiore (90% C.L.)</i>
RADON	Box di rame sigillato, atmosfera d'azoto HP, 3 livelli di sigillazione, etc.	$<2.5 \times 10^{-6}$ cpd/kg/keV
TEMPERATURE	2 impianti di condizionamento+ detectors in struttura di rame in contatto diretto con schermo a.r. ad alta capacità + T monitorata costantemente	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
NOISE	Reiezione del rumore ad alta efficienza	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
ENERGY SCALE	Calibrazioni intrinseche ed esterne	$<1-2 \times 10^{-4}$ cpd/kg/keV
EFFICIENCIES	Misurata regolarmente tramite calibrazioni	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
BACKGROUND	Nessuna modulazione sopra i 6 KeV; nessuna modulazione in eventi multipli nella regione 2-6 KeV; Questo limite include tutte le possibili sorgenti di background	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
SIDE REACTIONS	A.M. del flusso di muoni (MACRO)	$<3 \times 10^{-5}$ cpd/kg/keV



+ anche se maggiori,
non soddisferebbero tutti I requisiti della
segnatura di modulazione annua



Non possono perciò
spiegare il segnale
osservato

Conclusioni

Presenza di modulazione annua in 11 cicli a livello di confidenza di 8.2σ

- **Tratti distintivi della segnatura model-independent cercata**
- **Assenza di possibili effetti sistematici, background o altri processi capaci di rendere quantitativamente conto dell'effetto osservato e soddisfare le numerose peculiarità della segnatura**

L'evidenza model-independent è compatibile con numerosi candidati di DM tipici di diversi scenari in astrofisica e fisica delle particelle

Attualmente in corso

- **Ulteriori acquisizioni (in seguito a vari upgrade dell'apparato)**
- **Analisi model-dependent sull'intero data set**