

DAMA/LIBRA - L'apparato e le misure

Tutor: A.Incicchitti, F.Cappella



Autore: Andrea Balzoni

Corso di Fisica Nucleare e Subnucleare II

19 Giugno 2012

1 Modello Standard Cosmologico

- Composizione dell'Universo
- Prime evidenze DM

2 DAMA/LIBRA

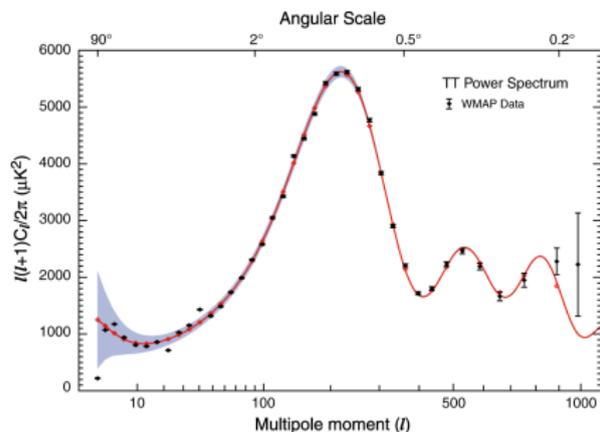
- Approccio Model Independent
- L'apparato sperimentale
- I risultati

3 Conclusioni

- Il parametro Ω_0 rappresenta il valore attuale della densità di massa-energia dell'Universo, ρ_0 , espresso in unità di densità critica ρ_c .

Parametro di densità-energia, Ω_0

- Il parametro Ω_0 rappresenta il valore attuale della densità di massa-energia dell'Universo, ρ_0 , espresso in unità di densità critica ρ_c .



$$\Rightarrow \Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_c} \simeq 1$$

Questo valore di Ω_0 ci dice che l'Universo è essenzialmente piatto (soluzione $k = 0$ della metrica di FRW).

Parametro di densità-energia, Ω_0

- Il parametro Ω_0 rappresenta il valore attuale della densità di massa-energia dell'Universo, ρ_0 , espresso in unità di densità critica ρ_c . $\Omega_0 \simeq 1$
- Da ulteriori osservazioni si deduce che la sola materia barionica ($\Omega_b \ll 1$) non è sufficientemente abbondante da giustificare l'universo piatto che oggi osserviamo.

Parametro di densità-energia, Ω_0

- Il parametro Ω_0 rappresenta il valore attuale della densità di massa-energia dell'Universo, ρ_0 , espresso in unità di densità critica ρ_c . $\Omega_0 \simeq 1$
- Da ulteriori osservazioni si deduce che la sola materia barionica ($\Omega_b \ll 1$) non è sufficientemente abbondante da giustificare l'universo piatto che oggi osserviamo.
- Per spiegare i risultati sperimentali ottenuti si suppone che parte del contributo ad Ω_0 sia dovuto alla presenza nell'Universo di un tipo di materia diverso da quello ordinario.

Parametro di densità-energia, Ω_0

- Il parametro Ω_0 rappresenta il valore attuale della densità di massa-energia dell'Universo, ρ_0 , espresso in unità di densità critica ρ_c . $\Omega_0 \simeq 1$
- Da ulteriori osservazioni si deduce che la sola materia barionica ($\Omega_b \ll 1$) non è sufficientemente abbondante da giustificare l'universo piatto che oggi osserviamo.
- Per spiegare i risultati sperimentali ottenuti si suppone che parte del contributo ad Ω_0 sia dovuto alla presenza nell'Universo di un tipo di materia diverso da quello ordinario.

$M_{barionica} \ll M_{gravitazionale} \implies$ circa il 90% della massa è **oscura**, non barionica e di tipo freddo (CDM).

Parametro di densità-energia, Ω_0

- Il parametro Ω_0 rappresenta il valore attuale della densità di massa-energia dell'Universo, ρ_0 , espresso in unità di densità critica ρ_c . $\Omega_0 \simeq 1$
- Da ulteriori osservazioni si deduce che la sola materia barionica ($\Omega_b \ll 1$) non è sufficientemente abbondante da giustificare l'universo piatto che oggi osserviamo.
- Per spiegare i risultati sperimentali ottenuti si suppone che parte del contributo ad Ω_0 sia dovuto alla presenza nell'Universo di un tipo di materia diverso da quello ordinario.

$M_{\text{barionica}} \ll M_{\text{gravitazionale}} \implies$ circa il 90% della massa è **oscura**, non barionica e di tipo freddo (CDM).

Candidati

- WIMPs
- axions
- neutrino
- heavy neutrino of 4th family
- sterile neutrino
- Kaluza-Klein particles
- SUSY particles
- ...

Vari fenomeni noti da tempo possono essere spiegati correttamente assumendo che esista la materia oscura:

- Velocità di rotazione nelle galassie a spirale (Curva di rotazione).
- Moto delle galassie negli ammassi.
- Formazione di strutture.
- Effetti di gravitational lensing.

In tutti questi fenomeni, tra loro indipendenti, la materia oscura interagisce solamente in modo gravitazionale con la materia ordinaria.

Tutto ciò suggerisce l'esistenza di particelle non previste da SM, tali che abbiano delle caratteristiche peculiari:

Vari fenomeni noti da tempo possono essere spiegati correttamente assumendo che esista la materia oscura:

- Velocità di rotazione nelle galassie a spirale (Curva di rotazione).
- Moto delle galassie negli ammassi.
- Formazione di strutture.
- Effetti di gravitational lensing.

In tutti questi fenomeni, tra loro indipendenti, la materia oscura interagisce solamente in modo gravitazionale con la materia ordinaria.

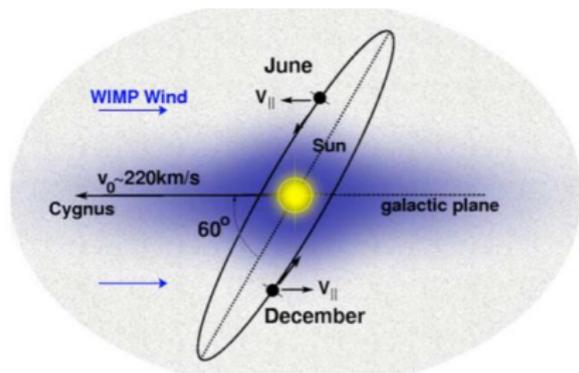
Tutto ciò suggerisce l'esistenza di particelle non previste da SM, tali che abbiano delle caratteristiche peculiari:

- Stabili o con tempi di vita media comparabili con l'età dell'Universo
- Nessuna carica elettrica o di colore
- Sezione d'urto con materia ordinaria molto bassa
- Ampio range di masse (dagli eV fino ai TeV)

La misura effettuata da DAMA/LIBRA si basa su un approccio *model independent* di *rivelazione diretta*. Il flusso di particelle DM viene modulato dal moto della Terra attorno al Sole.

Rivelazione Diretta

La misura effettuata da DAMA/LIBRA si basa su un approccio *model independent* di *rivelazione diretta*. Il flusso di particelle DM viene modulato dal moto della Terra attorno al Sole.

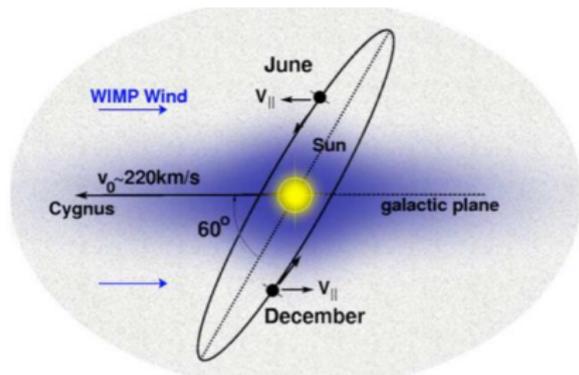


- v_s , velocità del Sole nell'alone galattico.
- $v_e = 30 \text{ km/s}$, velocità della Terra nel sistema solare.
- $\omega = 2\pi/T$, dove $T = 1 \text{ y}$ è il periodo di rivoluzione.
- $\gamma = \pi/3$, è l'inclinazione dell'orbita rispetto al piano galattico.
- $t_0 = 152.5 \text{ d}$, è la fase per cui $v_e^{(g)}$ è max.

$$v_e^{(g)} = v_s + v_e \cos \gamma \cos \omega (t - t_0)$$

Rivelazione Diretta

La misura effettuata da DAMA/LIBRA si basa su un approccio *model independent* di *rivelazione diretta*. Il flusso di particelle DM viene modulato dal moto della Terra attorno al Sole.



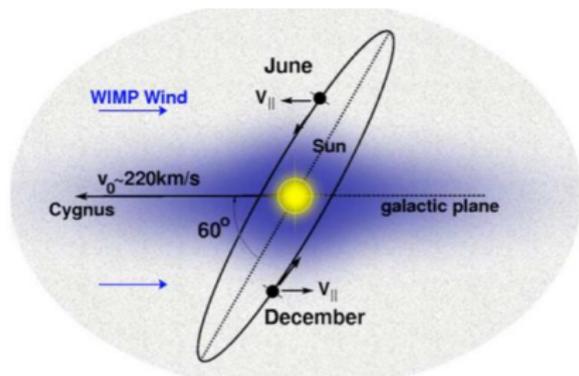
$$S_k(\eta(t)) = S_{0,k} + S_{m,k} \cos \omega (t - t_0)$$

Rivelazione Diretta

- scattering elastico (rinculo nucleare)
- scattering anelastico (diseccitazione nucleare)
- radiazione e.m. indotta da DM

Rivelazione Diretta

La misura effettuata da DAMA/LIBRA si basa su un approccio *model independent* di *rivelazione diretta*. Il flusso di particelle DM viene modulato dal moto della Terra attorno al Sole.



$$S_k(\eta(t)) = S_{0,k} + S_{m,k} \cos \omega (t - t_0)$$

Rivelazione Diretta

- scattering elastico (rinculo nucleare)
- scattering anelastico (diseccitazione nucleare)
- radiazione e.m. indotta da DM

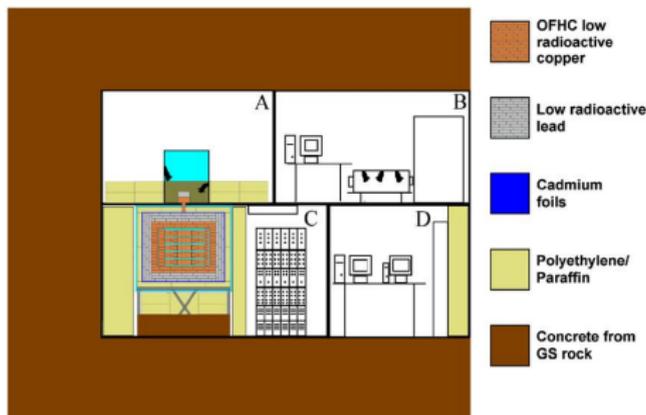
Segnatura

- Modulazione con funzione coseno
- ... con periodo $T = 1$ anno
- ... con fase t_0 intorno al 2 Giugno
- ... presente solo nella regione a basse E
- ... solo per eventi di single-hit
- ... con ampiezza $\leq 7\%$ della parte costante

L'apparato: installazione e passive shield

Le parti principali:

- installazione
- scudo passivo a 3 livelli di sigillazione vs Rn
- 25 detector radiopuri di NaI(Tl)
- glove-box
- catena elettronica e DAQ



Passive Shield

- 1 Strato di Supronyl
- 2 Paraffina + plexiglass box
- 3 Cu/Pb/Cd box

Box di Cu e plexiglass continuamente flussati con HP N_2 . Temperatura controllata tramite due sistemi di condizionamento indipendenti e dall'enorme capacità termica dello scudo passivo ($\approx 10^6 \text{ cal/C}$).

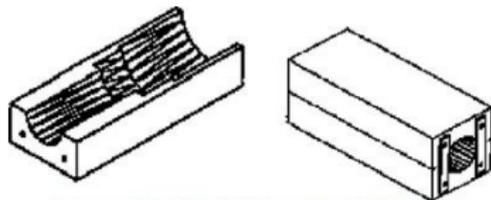
Tutti i materiali utilizzati vengono scelti e trattati per soddisfare stringenti necessità di radiopurezza. Le procedure comprendono prelavaggi, lavaggi e risciacqui dei materiali in acqua e HCl ad altissima purezza.

L'apparato: il detector e i cristalli di NaI(Tl)

Il detector di DAMA/LIBRA è composto da 5×5 cristalli di NaI(Tl) ($m = 9.70 \text{ kg}$, $V = 10.2 \times 10.2 \times 25.4 \text{ cm}^3$) per un totale di $\simeq 250 \text{ kg}$.

La scelta di NaI(Tl) è dovuta ai vari vantaggi che questo materiale offre:

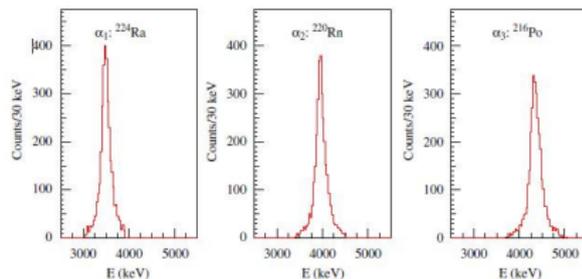
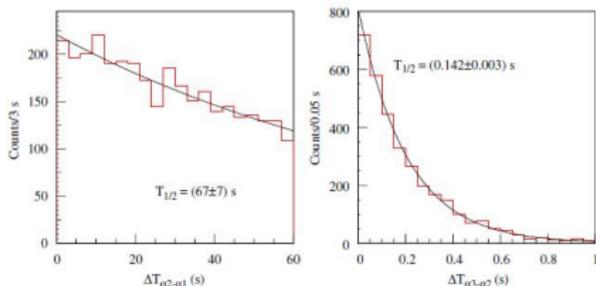
- Assenza di *microphonic noise*
- Radiopurezza intrinseca
- Granularità del set-up
- Ampia sensibilità a molti candidati DM
- Elevata resa in luce (5.5 – 7.5 ph.e/KeV)



Ogni cristallo è collegato a 2 PMT che lavorano in coincidenza a soglia del singolo ph.e (q.e. $\sim 30\%$). Ad ogni PMT sono collegate delle guide di luce al quarzo racchiuse in contenitori di rame.

Un esempio di radiopurezza: ^{232}Th

- Si determina la presenza di ^{232}Th tramite il metodo del *time-amplitude* analizzando la sottocatena:
 $^{228}\text{Th} \rightarrow ^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$.
- Si ricercano 3 picchi α in rapida successione tra loro in precise finestre energetiche e temporali.



Il numero di triple coincidenze ritardate ottenute è 3310 per un'esposizione di 8100 $\text{kg} \times \text{day}$.

L'attività del ^{228}Th in tutti i cristalli è pari a $2 - 30 \mu\text{Bq/kg}$.

⇒ Se l'intera catena è all'equilibrio si ottiene una presenza di ^{232}Th pari a 0.5 – 7.5 ppt.

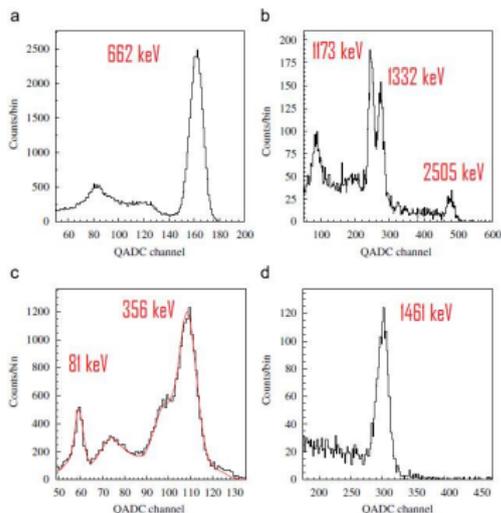
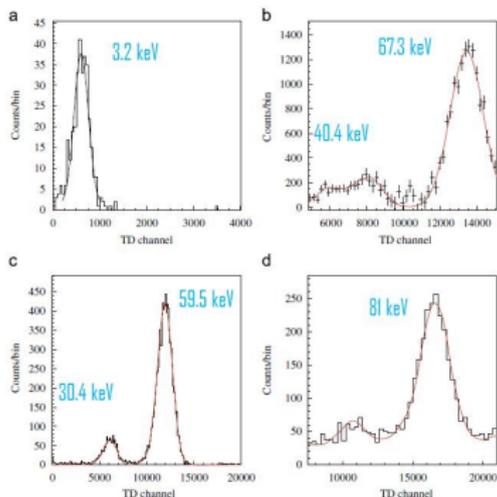
Si indaga inoltre la presenza di altri contaminanti tra i quali: ^{238}U , ^{nat}K , ^{125}I , ^{129}I , ^{210}Pb .

Nonostante i cristalli vengano cresciuti con gli stessi protocolli e processi di purificazione, le differenti concentrazioni da cristallo a cristallo sono comprensibili e probabilmente dovute a polluzioni casuali durante i processi di crescita e trattamento.

La calibrazione viene effettuata in due regioni di energia: fino a ~ 100 keV e oltre ~ 100 keV. Vengono utilizzate varie sorgenti, sia interne che esterne.

Low Energy: si utilizzano ^{241}Am e ^{133}Ba come sorgenti esterne e ^{40}K , ^{125}I , ^{129}I come sorgenti interne.

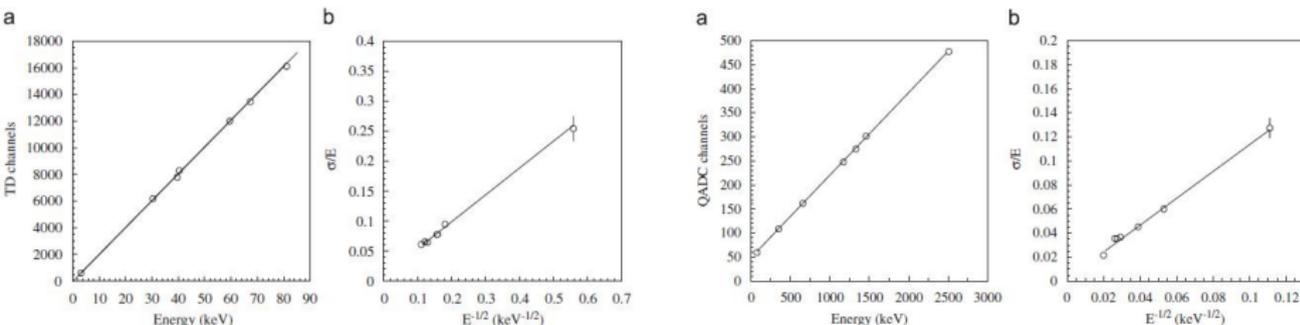
High Energy: si utilizzano ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{133}Ba come sorgenti esterne e ^{40}K come sorgente gamma dai detector adiacenti.



Calibrazioni di routine nella regione a bassa energie vengono effettuate ogni 10 giorni utilizzando ^{241}Am .

Calibrazioni (2)

Fittando i punti con delle rette si ottengono dei regimi perfettamente lineari sia ad alte che a basse energie sia nel caso della risoluzione energetica che della *pulse area* in funzione dell'energia.



Il fit sulla risoluzione da due risultati diversi per basse e alte energie:

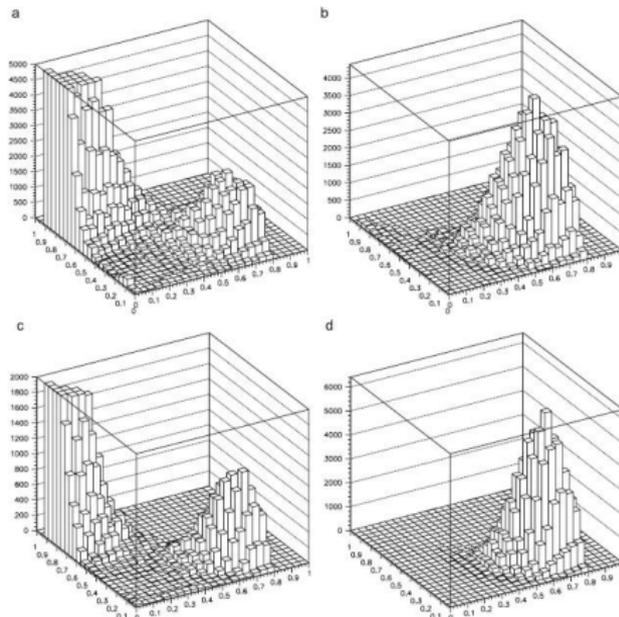
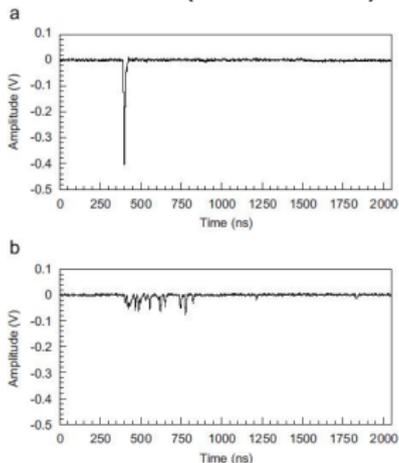
$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\alpha}{\sqrt{E(\text{keV})}} + \beta \rightarrow \begin{cases} \alpha_{LE} = 0.448 \pm 0.035 & \beta_{LE} = (9.1 \pm 2.1) \cdot 10^{-3} \\ \alpha_{HE} = 1.12 \pm 0.06 & \beta_{HE} = (17 \pm 23) \cdot 10^{-3} \end{cases}$$

Un altro metodo usato per studiare la linearità consiste nell'utilizzare doppie coincidenze quando due detector (A e B) vengono investiti da γ di energia nota provenienti, ad esempio, da ^{137}Cs posto tra i due cristalli. Il principio si basa su *Compton back-scattering* del fotone in A per poi essere assorbito totalmente in B.

Tattamento del rumore vicino alla soglia

L'unica operazione effettuata sui dati è la rimozione del rumore del singolo PMT.

La reiezione del rumore sfrutta la differenza dei tempi caratteristici di decadimento di eventi di scintillazione (≈ 240 ns) rispetto ad eventi di rumore dovuti a singoli fotoelettroni veloci (decine di ns).



Per analizzare al meglio i due contributi (rumore e segnale) si costruiscono due variabili X_1 e X_2 .

$$X_1 = \frac{\text{Area}(100 - 600\text{ns})}{\text{Area}(0 - 600\text{ns})}$$

$$X_2 = \frac{\text{Area}(0 - 50\text{ns})}{\text{Area}(0 - 600\text{ns})}$$

I rate residui (parte modulata del segnale) vengono estratti dai rate misurati degli eventi di *single-hit* sottraendo la parte costante del segnale $\langle r_{ijk} - flat_{jk} \rangle_{jk}$, dove:

- r_{ijk} è il segnale misurato nell' i -esimo intervallo di tempo, j -esimo detector, k -esimo bin di energia
- $flat_{jk}$ è r_{ijk} mediato sui cicli annuali

I rate residui (parte modulata del segnale) vengono estratti dai rate misurati degli eventi di *single-hit* sottraendo la parte costante del segnale $\langle r_{ijk} - flat_{jk} \rangle_{jk}$, dove:

- r_{ijk} è il segnale misurato nell' i -esimo intervallo di tempo, j -esimo detector, k -esimo bin di energia
- $flat_{jk}$ è r_{ijk} mediato sui cicli annuali

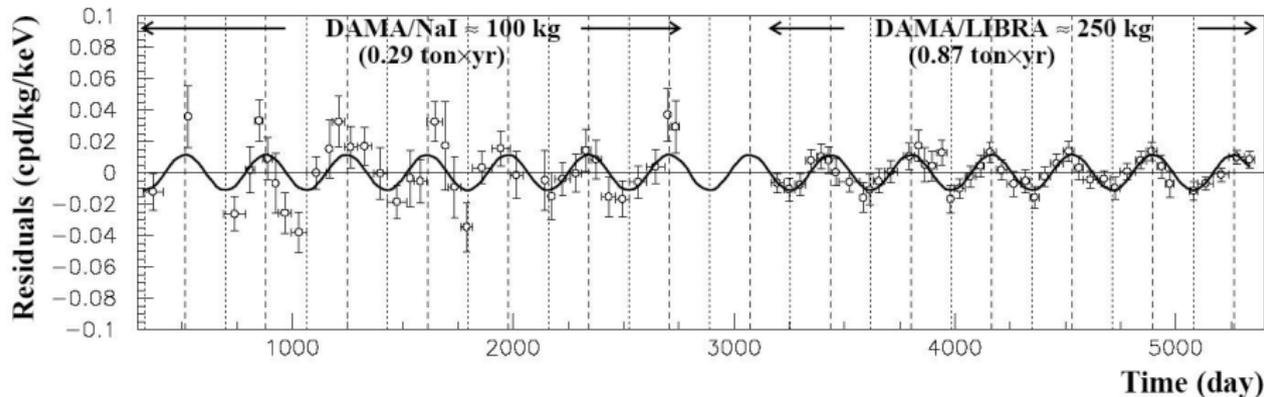
⇒ mediando su j e k e fittando con una funzione del tipo $A \cos \omega(t - t_0)$ si ottiene:

I risultati - Modulazione annua

I rate residui (parte modulata del segnale) vengono estratti dai rate misurati degli eventi di *single-hit* sottraendo la parte costante del segnale $\langle r_{ijk} - flat_{jk} \rangle_{jk}$, dove:

- r_{ijk} è il segnale misurato nell' i -esimo intervallo di tempo, j -esimo detector, k -esimo bin di energia
- $flat_{jk}$ è r_{ijk} mediato sui cicli annuali

⇒ mediando su j e k e fittando con una funzione del tipo $A \cos \omega(t - t_0)$ si ottiene:

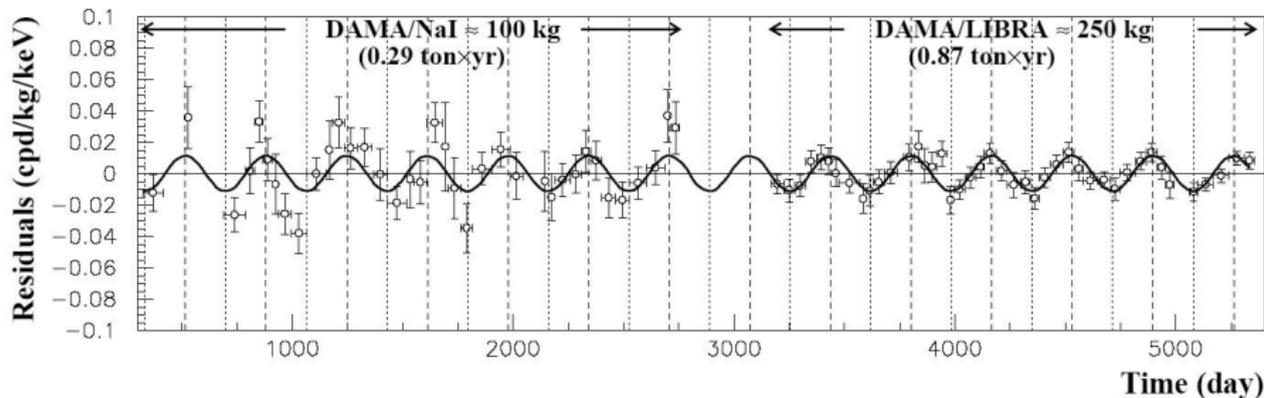


I risultati - Modulazione annua

La rate residui (parte modulata del segnale) vengono estratti dai rate misurati degli eventi di *single-hit* sottraendo la parte costante del segnale $\langle r_{ijk} - flat_{jk} \rangle_{jk}$, dove:

- r_{ijk} è il segnale misurato nell' i -esimo intervallo di tempo, j -esimo detector, k -esimo bin di energia
- $flat_{jk}$ è r_{ijk} mediato sui cicli annuali

⇒ mediando su j e k e fittando con una funzione del tipo $A \cos \omega(t - t_0)$ si ottiene:



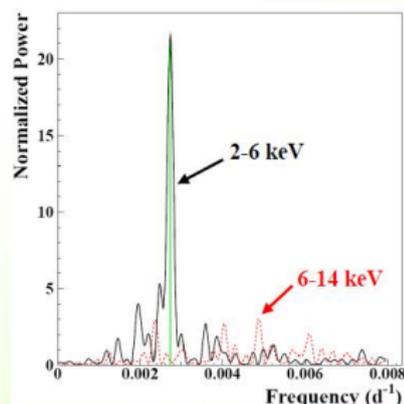
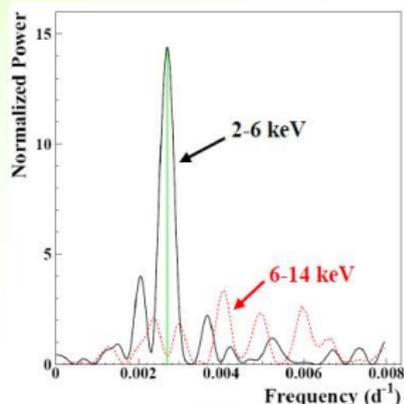
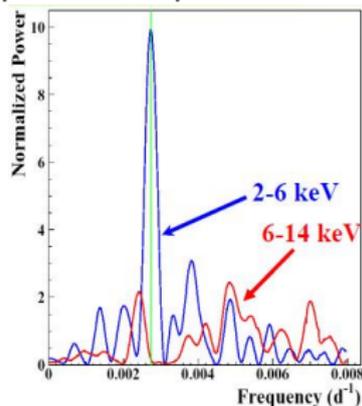
Il miglior fit ottenuto fissando $T = 1$ y e $t_0 = 152.5$ d (valori teorici) è $A = (0.0114 \pm 0.0013)$ cpd/kg/keV con **8.8 σ di C.L.** ($\chi^2/\text{d.o.f.} = 64.7/79$) per un'esposizione cumulativa di $1.17 \text{ ton} \times \text{yr}$.

I risultati - Modulazione annua e spettro di potenza

Se invece T e t_0 venissero trattati come parametri liberi del fit si otterrebbe:

Energy interval	A (cpd/kg/keV)	$T = \frac{2\pi}{\omega}$ (yr)	t_0 (days)	C.L.
2 – 6 keV	(0.0116 ± 0.0013)	(0.999 ± 0.002)	(146 ± 7)	8.9σ

Effettuando un'analisi di Fourier sul segnale, rispettivamente per DAMA/NaI, DAMA/LIBRA e DAMA/NaI + DAMA/LIBRA, si ottengono in tutti e tre i casi dei picchi corrispondenti ad un periodo di $\simeq 1$ anno.



Posizione dei picchi

$$2.737 \cdot 10^{-3} \text{ d}^{-1}$$

$$2.697 \cdot 10^{-3} \text{ d}^{-1}$$

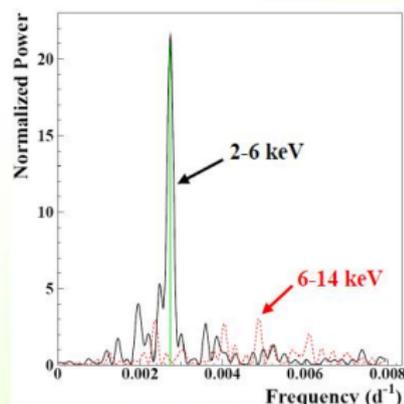
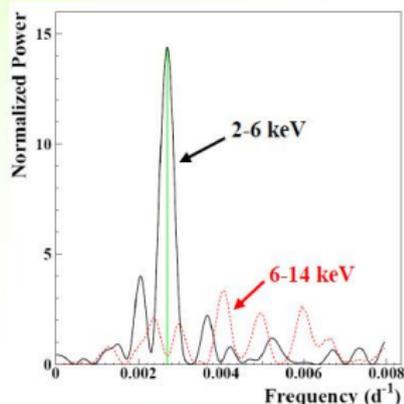
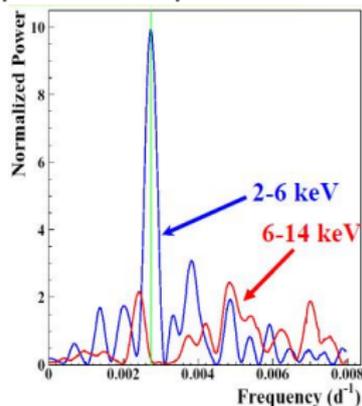
$$2.735 \cdot 10^{-3} \text{ d}^{-1}$$

I risultati - Modulazione annua e spettro di potenza

Se invece T e t_0 venissero trattati come parametri liberi del fit si otterrebbe:

Energy interval	A (cpd/kg/keV)	$T = \frac{2\pi}{\omega}$ (yr)	t_0 (days)	C.L.
2 – 6 keV	(0.0116 ± 0.0013)	(0.999 ± 0.002)	(146 ± 7)	8.9σ

Effettuando un'analisi di Fourier sul segnale, rispettivamente per DAMA/NaI, DAMA/LIBRA e DAMA/NaI + DAMA/LIBRA, si ottengono in tutti e tre i casi dei picchi corrispondenti ad un periodo di $\simeq 1$ anno.



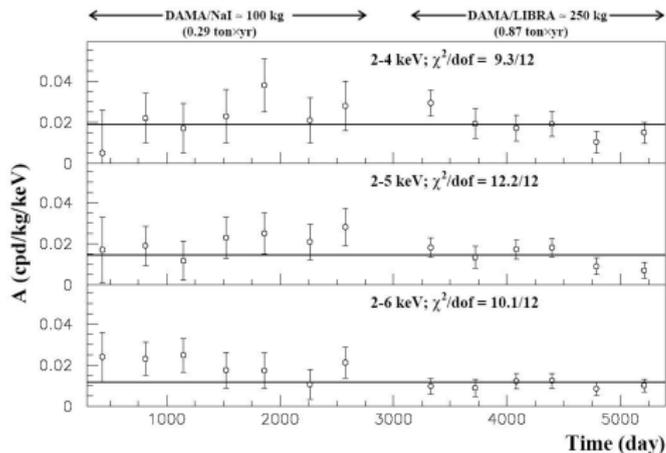
Si ottengono quindi dei picchi evidenti nella regione (2 – 6) keV, mentre nella regione (6 – 14) keV la modulazione è totalmente assente.

Compatibilità tra DAMA/NaI e DAMA/LIBRA

Tra le ampiezze di modulazione ottenute da DAMA/NaI e DAMA/LIBRA nel range (2 – 6) keV c'è una discrepanza di circa $\simeq 2\sigma$, quindi ci si chiede quanto sia giusto analizzare i risultati cumulativi di entrambi gli esperimenti.

Per verificare ciò si ricavano le ampiezze di modulazione relative ad ogni singolo ciclo annuale e vengono riportate su grafico.

Test del χ^2 e *run test* confermano l'ipotesi con un C.L. del 90% che le ampiezze di modulazione fluttuano normalmente attorno ai valori del miglior fit: i risultati di DAMA/NaI e DAMA/LIBRA sono compatibili tra loro e possono essere analizzati globalmente.



Compatibilità tra i cicli annuali e tra i due esperimenti

Assenza di modulazione dovuta a background

Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

Assenza di modulazione dovuta a background

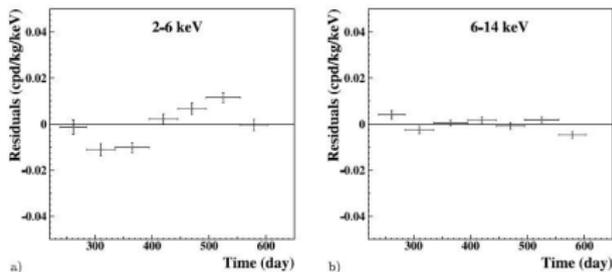
Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

- Estendere l'analisi a regioni di energia direttamente al di sopra di quella di interesse per la DM.

Assenza di modulazione dovuta a background

Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

- Estendere l'analisi a regioni di energia direttamente al di sopra di quella di interesse per la DM.



Si nota che che l'ampiezza di modulazione ottenuta per i vari cicli nella regione (6 – 14) keV è compatibile con zero, $A = (0.00007 \pm 0.000077) \text{ cpd/kg/keV}$.

Assenza di modulazione dovuta a background

Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

- Estendere l'analisi a regioni di energia direttamente al di sopra di quella di interesse per la DM.
- Analizzare l'eventuale modulazione del segnale ad alte energie.

Assenza di modulazione dovuta a background

Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

- Estendere l'analisi a regioni di energia direttamente al di sopra di quella di interesse per la DM.
- Analizzare l'eventuale modulazione del segnale ad alte energie.

Si analizza il rate integrato R_{90} al di sopra di 90 keV e si fitta il suo comportamento in funzione del tempo come per i rate residui.

Anno	A.M.
LIBRA-1	$-(0.05 \pm 0.19)$ cpd/kg
LIBRA-2	$-(0.12 \pm 0.19)$ cpd/kg
LIBRA-3	$-(0.13 \pm 0.18)$ cpd/kg
LIBRA-4	$+(0.15 \pm 0.17)$ cpd/kg
LIBRA-5	$+(0.20 \pm 0.18)$ cpd/kg
LIBRA-6	$-(0.20 \pm 0.16)$ cpd/kg

Assenza di modulazione dovuta a background

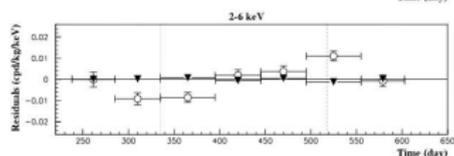
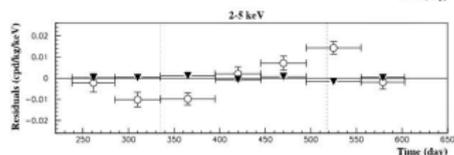
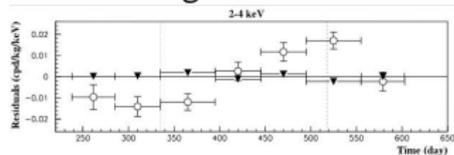
Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

- Estendere l'analisi a regioni di energia direttamente al di sopra di quella di interesse per la DM.
- Analizzare l'eventuale modulazione del segnale ad alte energie.
- Acquisire ed analizzare eventi di *multiple-hit* con le stesse procedure utilizzate per gli eventi di *single-hit*.

Assenza di modulazione dovuta a background

Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

- Estendere l'analisi a regioni di energia direttamente al di sopra di quella di interesse per la DM.
- Analizzare l'eventuale modulazione del segnale ad alte energie.
- Acquisire ed analizzare eventi di *multiple-hit* con le stesse procedure utilizzate per gli eventi di *single-hit*.



Eventi di questo tipo corrispondono ad eventi in cui il fascio di particelle DM è spento.

- (2 – 4) keV: $A = -(0.0011 \pm 0.0007)$ cpd/kg/keV
- (2 – 5) keV: $A = -(0.0008 \pm 0.0005)$ cpd/kg/keV
- (2 – 6) keV: $A = -(0.0006 \pm 0.0004)$ cpd/kg/keV

Anche in questo caso l'ampiezza di modulazione è assente.

Per verificare che la modulazione riscontrata nella regione (2 – 6) keV non possa essere provocata da nessun elemento del background che in qualche modo simuli il segnale, bisogna:

- Estendere l'analisi a regioni di energia direttamente al di sopra di quella di interesse per la DM.
- Analizzare l'eventuale modulazione del segnale ad alte energie.
- Acquisire ed analizzare eventi di *multiple-hit* con le stesse procedure utilizzate per gli eventi di *single-hit*.

Poichè:

- non c'è modulazione al di sopra di 6 keV,
- non c'è modulazione ad alte energie,
- non c'è modulazione negli eventi a multiplo hit,

si deduce dunque che la modulazione presente nella regione (2 – 6) keV non sia dovuta a nessun elemento di background finora considerato. Nessun effetto secondario sembra poter mimare il segnale che noi imputiamo a DM.

Ampiezza di modulazione vs E - Maximum likelihood

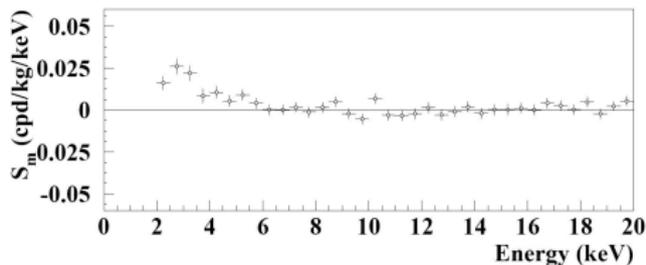
Un altro modo per mostrare la presenza di modulazione a basse energie è quello di graficare l'ampiezza in funzione dell'energia. Questo tipo di analisi è alternativa all'analisi dei residui e si basa sul metodo di massima verosimiglianza fissando periodo e fase ($T = 1$ y e $t_0 = 152.5$ d). La funzione di likelihood L_k per il k -esimo bin di energia è:

$$L_k = \prod_{ij} e^{-\mu_{ijk}} \frac{N_{ijk}^{\mu_{ijk}}}{N_{ijk}!}$$

dove:

- N_{ijk} è il numero di eventi
- $\mu_{ijk} = [b_{jk} + S_{0,k} + S_{m,k} \cos \omega(t_i - t_0)] M_j \Delta t_i \Delta E \epsilon_{jk}$ è il valore d'aspettazione.

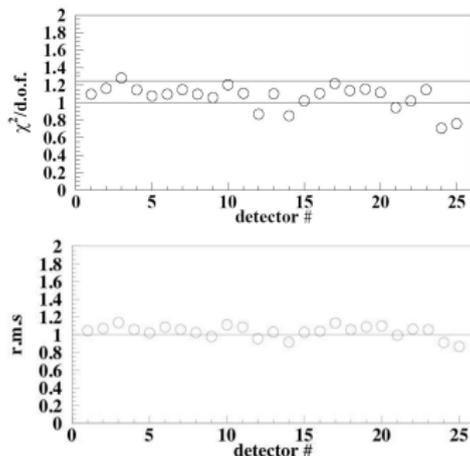
Scegliendo $\Delta E = 0.5$ keV si ottiene che l'ampiezza di modulazione $S_{m,k}$ è ben presente nella finestra (2 – 6) keV, mentre i valori seguenti fino a 20 keV rappresentano fluttuazioni casuali intorno a zero.



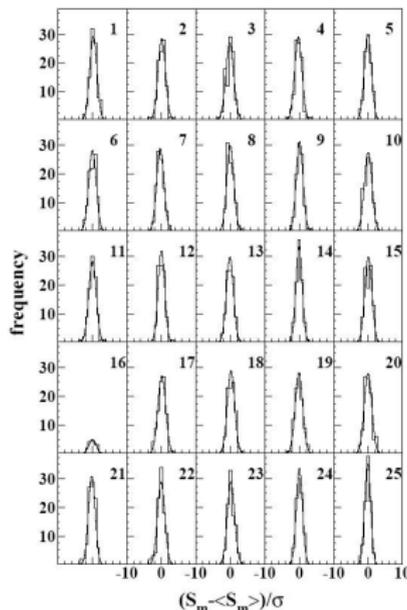
Omogeneità del segnale in tutti i detector

Il metodo appena mostrato può essere utilizzato anche per verificare che il segnale sia ben distribuito in tutti i detector e in tutti i cicli annuali.

- Si ricava S_m per ogni detector e ciclo annuale ($\Delta E = 0.25$)
- Si definisce la variabile $x = \frac{(S_m - \langle S_m \rangle)}{\sigma}$ e si studia la sua distribuzione



Dunque la modulazione annuale osservata è distribuita in modo gaussiano in tutti i detector con un C.L. del 95%.

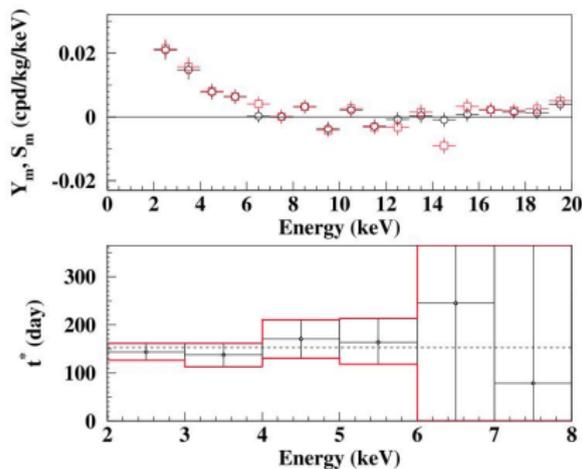


Ricerca di componente sinusoidale, $t^* \neq t_0$

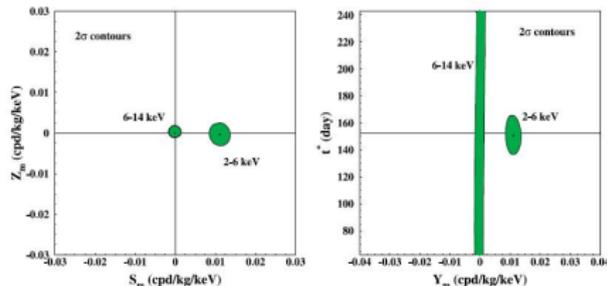
Possiamo analizzare i dati rilasciando l'ipotesi di una fase nota t_0 e aggiungendo una componente sinusoidale al segnale:

$$\begin{aligned} S_{ik} &= S_{0,k} + S_{m,k} \cos \omega(t_i - t_0) + Z_{m,k} \cos \omega(t_i - t_0) \\ &= S_{0,k} + Y_{m,k} \cos \omega(t_i - t^*) \end{aligned}$$

In questo modo il segnale risulterà modulato con una fase t^* .



Si trova che: (i) la modulazione sinusoidale Z_m fluttua intorno a zero, (ii) la fase $t^* \simeq t_0$ mentre rimane indefinita oltre i 6 keV (no modulazione, no fase), (iii) $Y_m \simeq S_m$.



Effetti sistematici e reazioni secondarie

Source	Main comment	Cautious upper limit (90%C.L.)
Radon	Sealed Cu Box in HP Nitrogen atmosphere, 3-level of sealing	$<2.5 \times 10^{-6}$ cpd/kg/keV
Temperature	Air conditioning + huge heat capacity	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
Noise	Efficient rejection	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
Energy scale	Routine + intrinsic calibrations	$<1 - 2 \times 10^{-4}$ cpd/kg/keV
Efficiencies	Regularly measured	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
Background	No modulation above 6 keV; no modulation in the (2–6) keV <i>multiple-hit</i> events; this limit includes all possible sources of background	$<10^{-4}$ cpd/kg/keV
Side reactions	From muon flux variation measured by MACRO	$<3 \times 10^{-5}$ cpd/kg/keV

In addition: no effect can mimic the signature

Nessuno di questi può soddisfare tutti i requisiti della marcatura a modulazione annua tipica della materia oscura.

Nessuno di questi effetti può essere responsabile della modulazione osservata

Conclusioni

Considerando sia DAMA/NaI che DAMA/LIBRA, dopo 13 anni di presa dati, un'esposizione totale di $1.17 \text{ ton} \times \text{yr}$ si è ottenuta la presenza di un'ampiezza di modulazione con un C.L. di circa 9σ . Dunque...

- 1 Gli eventi di *single-hit* presentano un andamento di tipo cosinusoidale.
- 2 Il periodo misurato $T = (0.999 \pm 0.002) \text{ yr}$ è ben compatibile con quello atteso.
- 3 La fase $t_0 = (146 \pm 7) \text{ d}$ con quella teorica.
- 4 La modulazione è presente solo in una finestra energetica ben precisa, $(2 - 6) \text{ keV}$, e non altrove.
- 5 Solo gli eventi di *single-hit* presentano modulazione, mentre è assente per eventi di *multiple-hit*.
- 6 La modulazione è $(0.0116 \pm 0.0013) \text{ cpd/kg/keV}$ (8.9σ C.L.).

Tutti questi punti rispettano i requisiti fissati per segnali DM, mentre eventi sistematici o di fondo non possono soddisfare simultaneamente tutti i punti dell'elenco.

Inoltre...

In futuro, grazie all'utilizzo di nuovi PMT ad efficienza quantica maggiore, potrebbe essere possibile fare uno studio più quantitativo sul tipo di candidato DM in questione abbassando la soglia software a 1 keV .