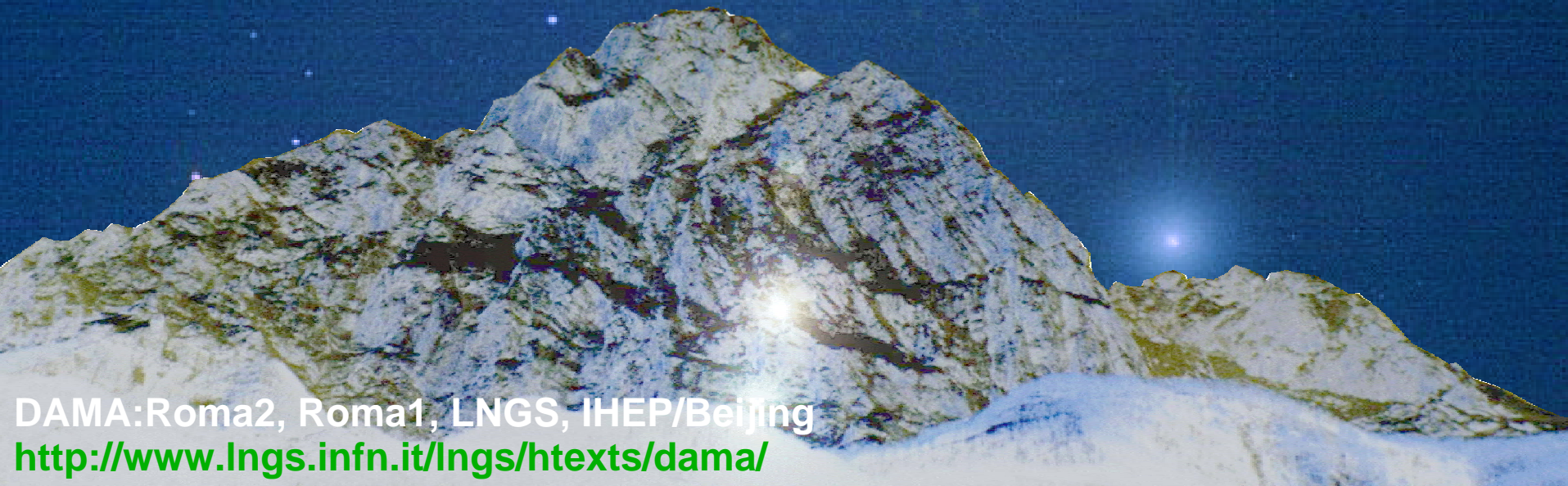


DAMA: alla ricerca della Materia Oscura

Claudio Giganti

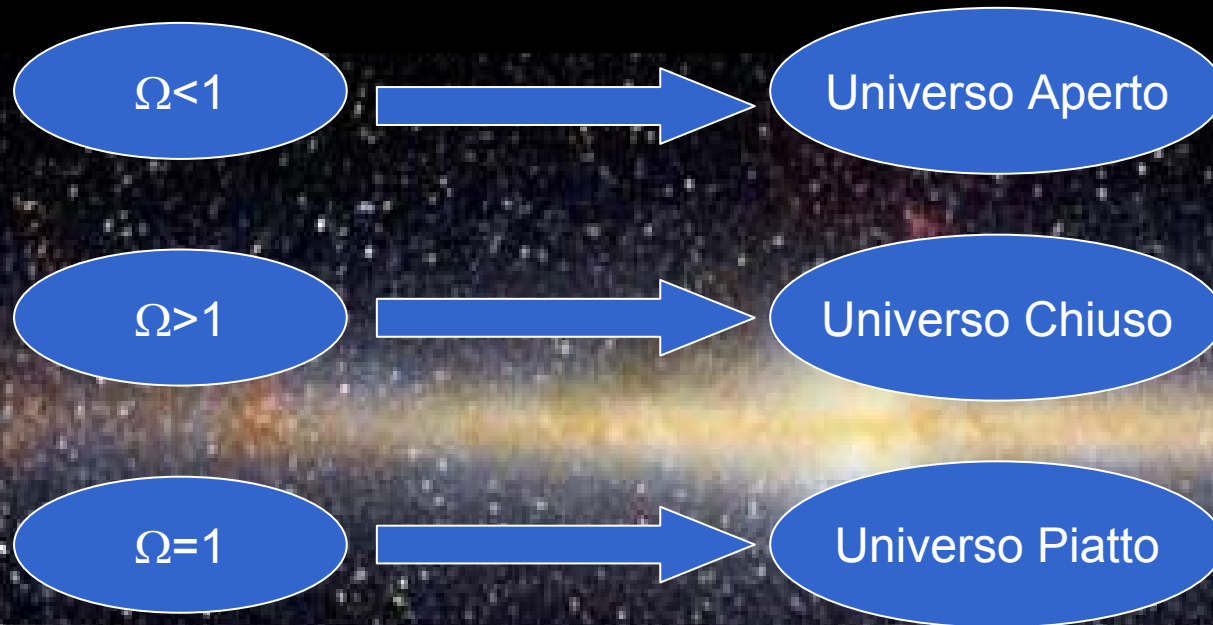


DAMA:Roma2, Roma1, LNGS, IHEP/Beijing
<http://www.lngs.infn.it/lngs/htexts/dama/>

L'evoluzione dinamica dell'Universo dipende dalla quantità di massa e di energia presenti.

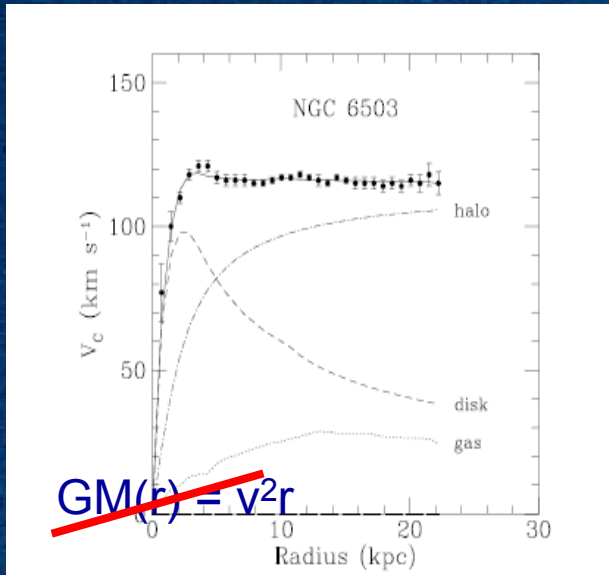
Il raggio di curvatura e quindi la sua evoluzione futura è legato al parametro

$$\Omega = \rho / \rho_c$$



Evidenze di Dark Matter

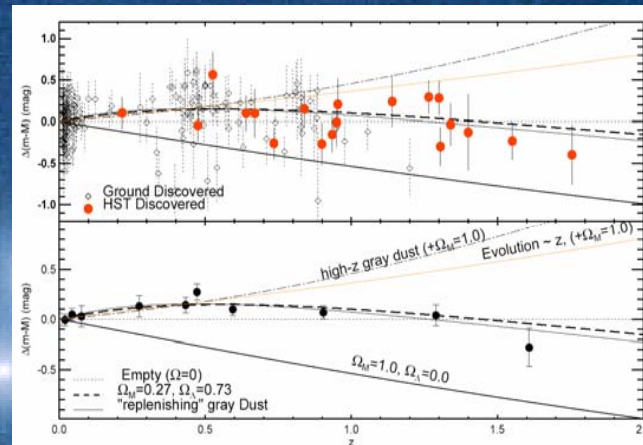
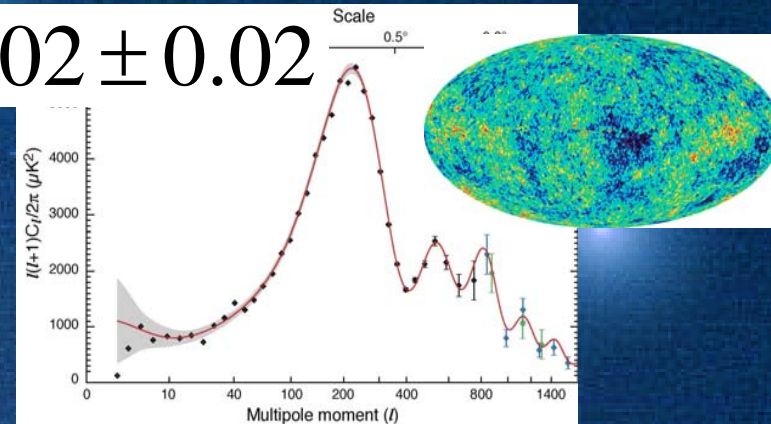
Velocità di rotazione delle galassie



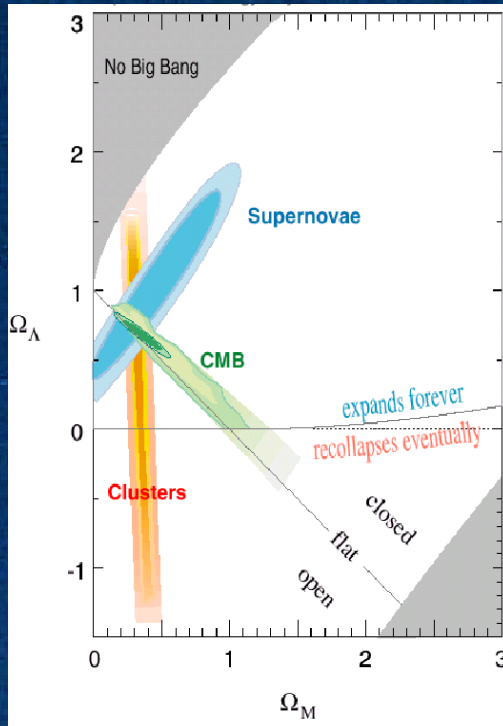
Luminosità delle Supernovae:
Universo attualmente in
espansione accelerata

Primo Picco della CMB (WMAP)

$$\Omega = 1.02 \pm 0.02$$



“Concordance Model”



$$\Omega_\Lambda \approx 0.73$$

$$\Omega_M \approx 0.27$$

Dalla BBN e dall'osservazione dell'attuale abbondanza di nuclei leggeri

$$\Omega_b \approx 4\%$$

Tutto il resto deve essere Dark Matter

- Hot Dark Matter $\Omega_{HDM} < 1\%$
- Cold Dark Matter $\Omega_{CDM} \approx 23\%$

Relic Particles dall'Universo primordiale

Candidati Leggeri

Assioni o "Axion-like"

- Cercati in esperimenti con cavità risonanti ma non osservati

Candidati Pesanti

WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)

- In equilibrio termico nell'universo primordiale
- Rate di annichilazione minore di quello di espansione dell'universo

$$\langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle \sim 10^{-26} / \Omega_{\text{WIMP}} h^2 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \rightarrow \sigma_{\text{ordinary matter}} \sim \sigma_{\text{weak}}$$

- Con un flusso atteso $\Phi \sim 10^7 \cdot (\text{GeV}/m_{\text{W}}) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($0.2 < \rho_{\text{halo}} < 1.7 \text{ GeV cm}^{-3}$)
- Formare un gas intrappolato intrappolato nel campo gravitazionale galattico
- NEUTRE - STABILI – MASSIVE – DEBOLMENTE INTERAGENTI

the sneutrino in the Smith
and Weiner scenario

SUSY
(R-parity conserved \rightarrow LSP is stable)
neutralino or sneutrino

a heavy ν of the 4-th family

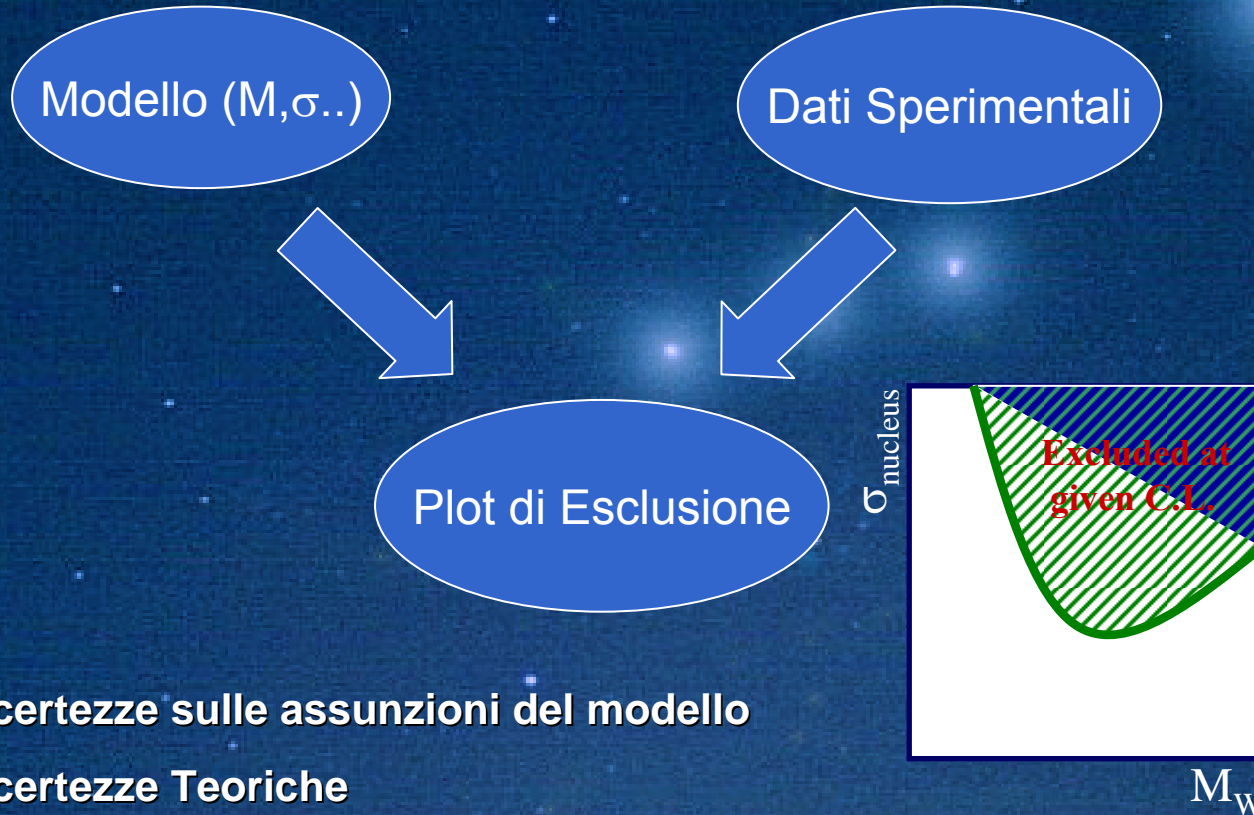
self-interacting dark matter

mirror dark matter

heavy exotic candidates, as
"4th family atoms", ...

even a suitable particle not
yet foreseen by theories

Approccio Tradizionale



- Incertezze sulle assunzioni del modello
- Incertezze Teoriche
- Incertezze Sperimentali
- Con un plot di esclusione si possono escludere dei modelli ma non si può trovare una segnatura di materia oscura

Un tale approccio non ha capacità predittive a causa della grande quantità di possibili modelli di materia oscura

La rivelazione diretta

E' necessario trovare una segnatura di Materia Oscura indipendente dal modello

Direzionale: correlazione tra la direzione del rinculo e il movimento della Terra

Molto difficile da Realizzare

Scattering Inelastico: rivelazione di γ dovuti a diseccitazione del nucleo

Tasso di conteggio molto basso

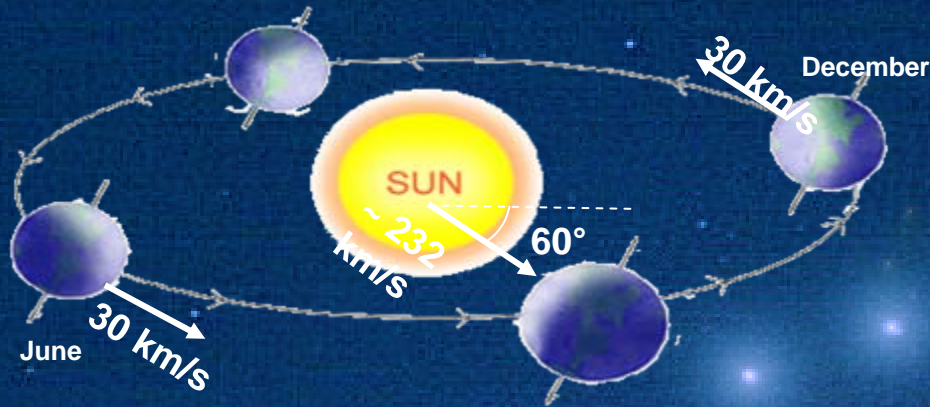
Modulazione Diurna: diverso flusso a Seconda della diversa superficie terrestre attraversata

Solo per σ piuttosto elevate

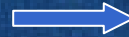
Modulazione Annuale: rate di conteggio dipendente dalla velocità della Terra rispetto al Sole

L'unica fattibile al momento

Modulazione Annuale del segnale



Rate di conteggio atteso per bin di energia a causa della rotazione della Terra intorno al Sole



- $v_{\text{sun}} \sim 232 \text{ km/s}$ (Velocità del sole nell'alone galattico)
- $v_{\text{orb}} = 30 \text{ km/s}$ (Velocità della Terra attorno al Sole)
- $\gamma = \pi/3$
- $\omega = 2\pi/T$ $T = 1 \text{ anno}$
- $t_0 = 2 \text{ Giugno}$ (quando v_{\oplus} è massima)

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

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

Un segnale compatibile con questo effetto deve avere 6 caratteristiche fondamentali:

1. Modulazione in accordo con un coseno
2. Periodo di 1 anno
3. Fase con un massimo il 2 giugno
4. Ampiezza di modulazione $< 7\%$
5. In un range di energia ben definito (2-6 keV)
6. Solo segnali di singolo hit

Qualsiasi sistemica che possa essere presa in considerazione per simulare il segnale della modulazione annuale deve rispettare tutte queste 6 caratteristiche

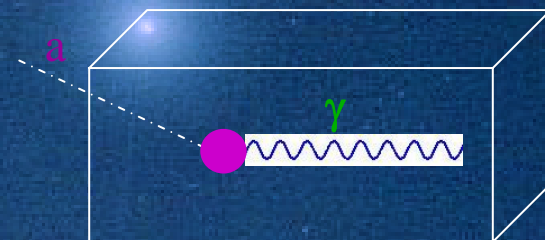
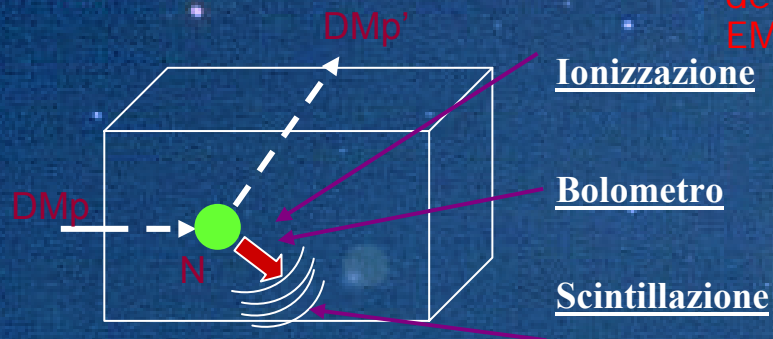
Rivelazione Diretta:

- ✓ Vari approcci e tecniche (molti ancora in fase di R&D)
- ✓ Vari diversi nuclei bersaglio
- ✓ Varie profondità per i siti sperimentali



Processi per la rivelazione diretta:

- scattering su nuclei
→ rivelazione dell'energia di rinculo del nucleo
- Eccitazione di elettroni legati nello scattering sui nuclei
→ rivelazione del rinculo dei nuclei + radiazione EM
- Conversione di particelle in radiazione EM
→ rivelazione di γ , X-rays, e^-



Caratteristiche Generali di un esperimento per la rivelazione diretta di Dark Matter

- Sito Sotterraneo
- Rimozione del fondo dovuto a radioattività ambientale con schermatura
- Riduzione del fondo dovuto agli elementi dell'apparato (attraverso selezione dei materiali, migliori tecniche di crescita...)
- Eliminazione del Radon ambientale

Fonti di fondo:

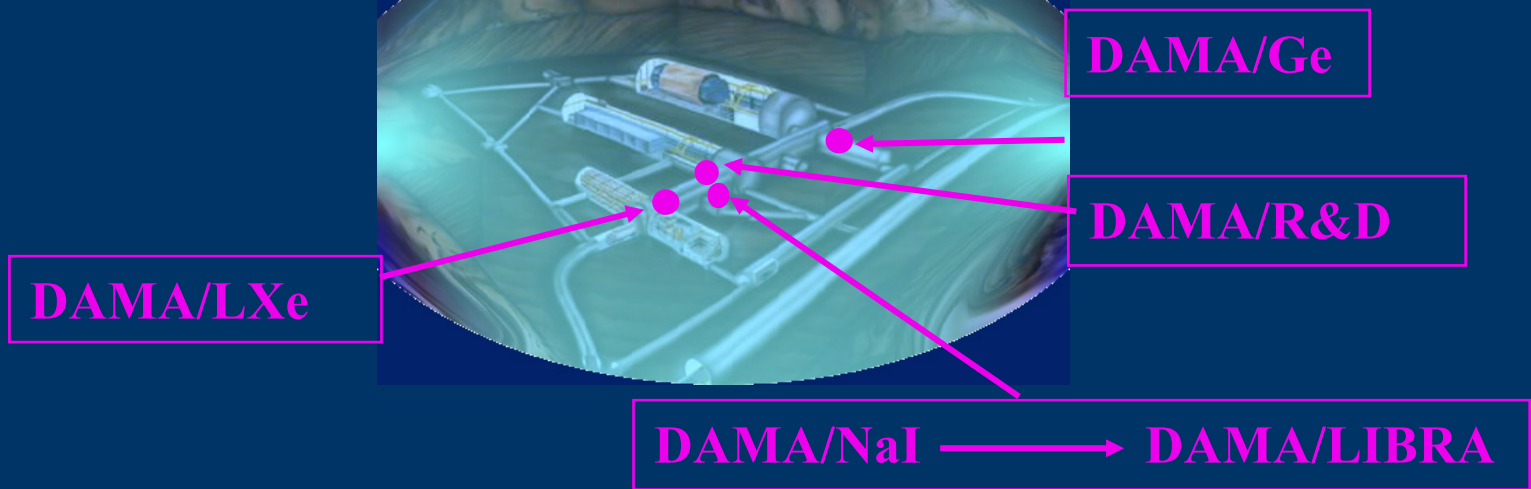
- Background dei LNGS:

muoni	→	0.6 $\mu/(m^2h)$
neutroni	→	1.08$\cdot 10^{-6}$ n/(cm²s) thermal
		1.98$\cdot 10^{-6}$ n/(cm²s) epithermal
		0.09$\cdot 10^{-6}$ n/(cm²s) fast (>2.5 MeV)
Radon	→	≈ 30 Bq/m³

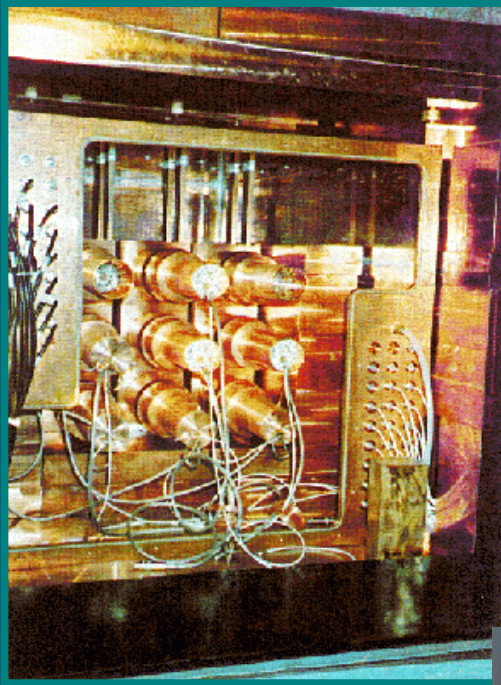
- Background Interni:

selezione di materiali (Ge, NaI, AAS, MS, ...)

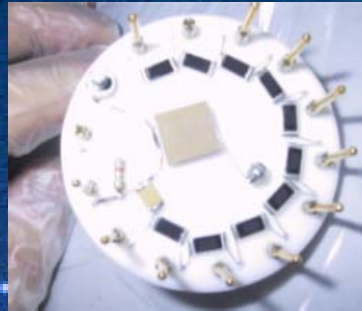
Dama: an observatory for rare processes@LNGS



DAMA/NaI(Tl)~100 kg



9 Scintillatori (in matrice 3x3) da 9,70 kg (10,2x10,2x25 cm) di NaI(Tl) accoppiati attraverso 2 guide ottiche a 2 Fotomoltiplicatori



Catena Elettronica

1. Energia rilasciata
2. Acquisiscono forme degli impulsi
3. Distinguono eventi di singolo e multiplo hit



La calibrazione degli strumenti avviene attraverso sorgenti radiative ogni 10 giorni



Perchè scintillatori di Ioduro di Sodio?

- Tecnologia molto ben conosciuta
- Possibilità di raggiungere elevata radiopurezza (R&D dedicati alla costruzione degli scintillatori) → L'abbondanza degli elementi radioattivi determina il fondo e quindi la sensibilità dell'esperimento

• Grande m

• Elevato du

• Possibilità

• Ottima risp

• Risposta l

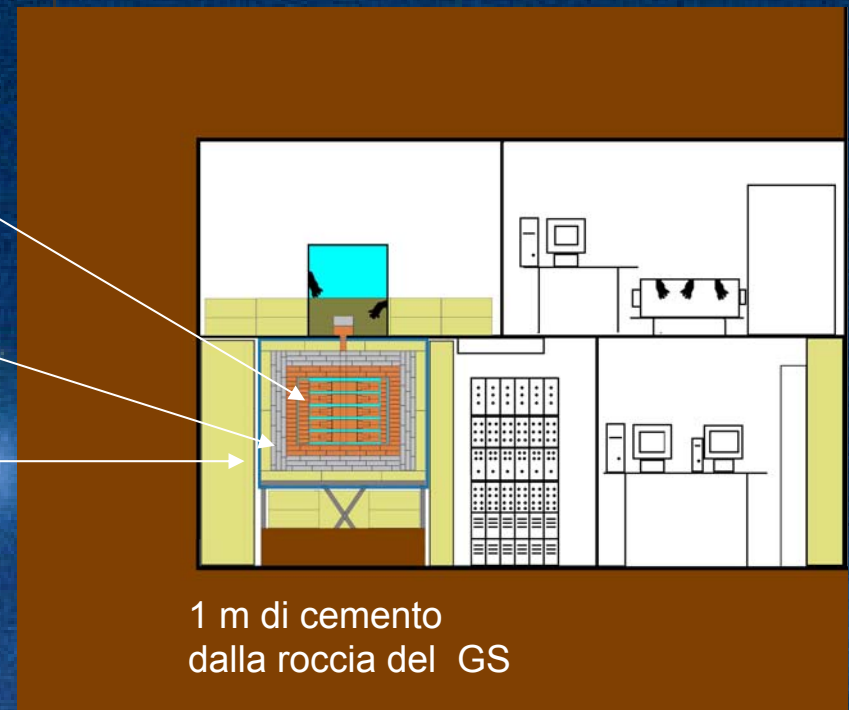
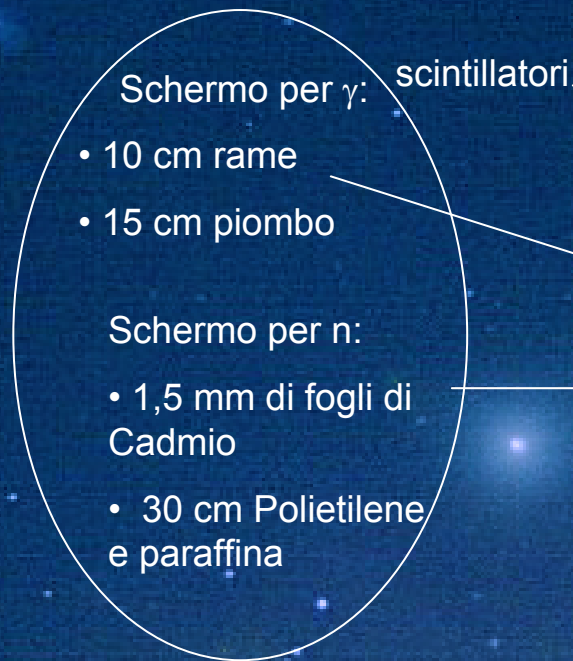
• Trasparen

Contaminante	Ge	AAS	MS	Misure in prototipi con la crescita Kyropoulos
^{238}U (ppb)	< 3	—	0.56 ± 0.04	$< 9 \cdot 10^{-3}$
^{232}Th (ppb)	< 2.3	—	0.21 ± 0.01	$< 5 \cdot 10^{-3}$
^{nat}K (ppm)	< 5.2	< 0.8	—	$< 5 \cdot 10^{-2}$
^{137}Cs (ppb)	$< 2 \cdot 10^{-9}$	—	—	—
^{60}Co (ppb)	$(1.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-10}$	—	—	—

eV)

- Possibilità di discriminare tra il segnale di scintillazione (durata \approx centinaia di ns) da fotoelettroni di rumore prodotti nel fotomoltiplicatore (\approx decine di ns)
- Sensibile a interazioni “spin-dependent”, “spin-independent” e miste
- Sensibile a candidati di grande massa (con il bersaglio di I) e di piccola massa (Na)

Riduzione del background



Inoltre per ridurre il Radon ambientale (che fa parte della catena di decadimento di Uranio e Torio) l'apparato sperimentale (all'interno dello schermo passivo) è contenuto in una scatola di plexiglass flussata con azoto iperpuro mentre gli scintillatori sono contenuti in una scatola di rame

Materiale	^{238}U (ppb)	^{232}Th (ppb)	^{nat}K (ppm)
Cu	< 0.5	< 1	< 0.6
boliden Pb	< 8	< 0.03	< 0.06
boliden2 Pb	< 3.6	< 0.027	< 0.06
polish Pb	< 7.4	< 0.042	< 0.03
polietilene	< 0.3	< 0.7	< 2
plexiglas	< 0.64	< 27.2	< 3.3

I Fotomoltiplicatori

Ogni scintillatore è accoppiato attraverso una guida di luce in Tetrasil lunga 10 cm a 2 fotomoltiplicatori

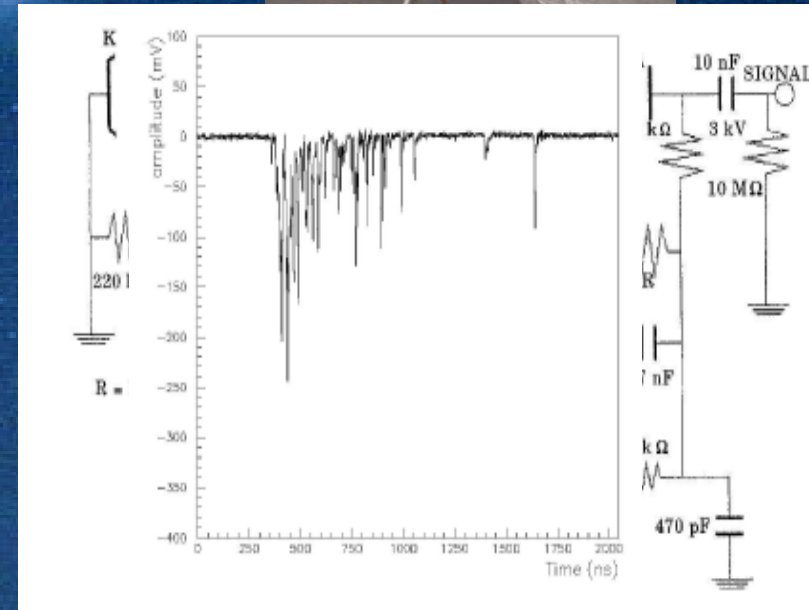
9 dinodi con foccheggiamento lineare e un'efficienza quantica circa del 30% per $\lambda=380$ nm

Sensibili al singolo fotoelettrone

Guadagno di 10^6 .

$E = 2$ keV \rightarrow $80 \gamma_{\text{scint}}$ \rightarrow 11-15 fotoelettroni \rightarrow Cascata

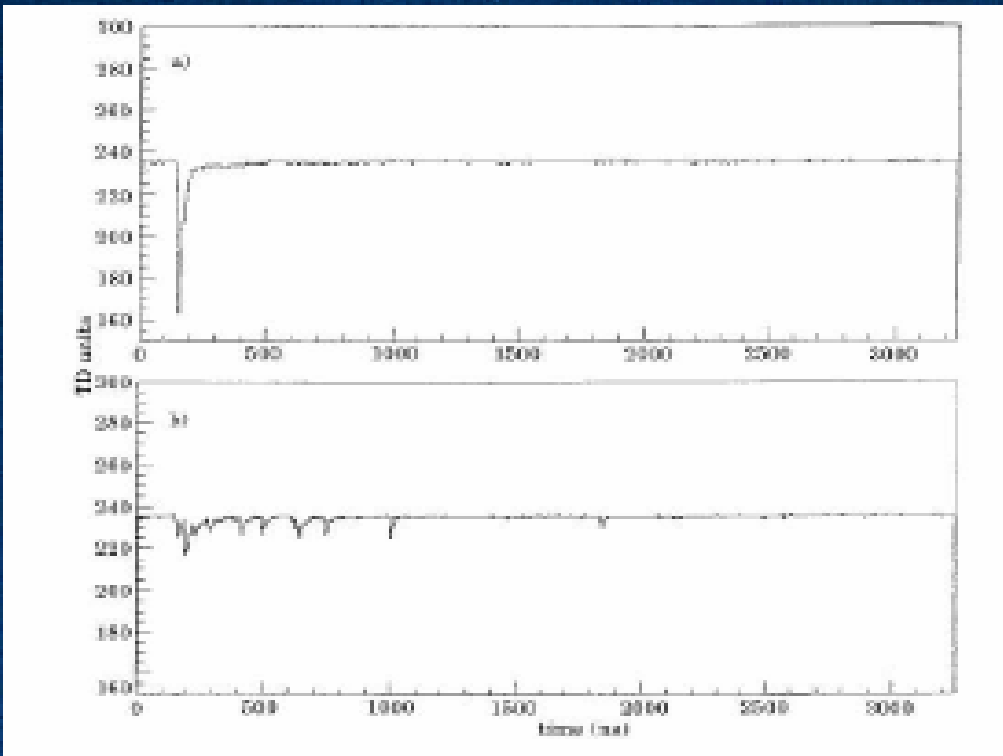
$E < 2$ keV \rightarrow pochi fotoelettroni \rightarrow rapporto segnale/rumore svantaggioso



I 2 PM lavorano in coincidenza in modo da ridurre il rumore dovuto ad impulsi di singolo fotoelettrone nei singoli PM.

Reiezione del rumore

Possibile grazie al numero relativamente elevato di fotoelettroni prodotti e alle diverse caratteristiche degli eventi di scintillazione e di quelli di rumore



→ Rumore del PM

$$\tau \approx 20-30 \text{ ns}$$

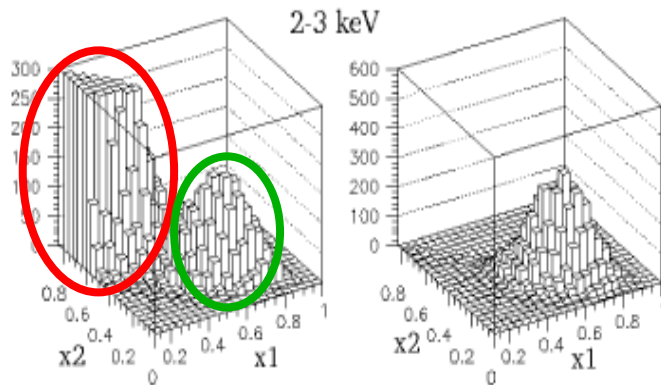
→ Segnale di scintillazione

$$\tau \approx 230 \text{ ns}$$

$$x_1 = \frac{\text{Area}[100 - 600]}{\text{Area}[0 - 600]}$$
$$x_2 = \frac{\text{Area}[0 - 50]}{\text{Area}[0 - 100]}$$

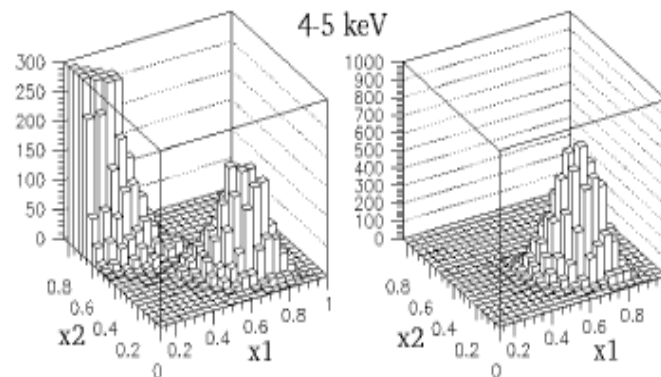
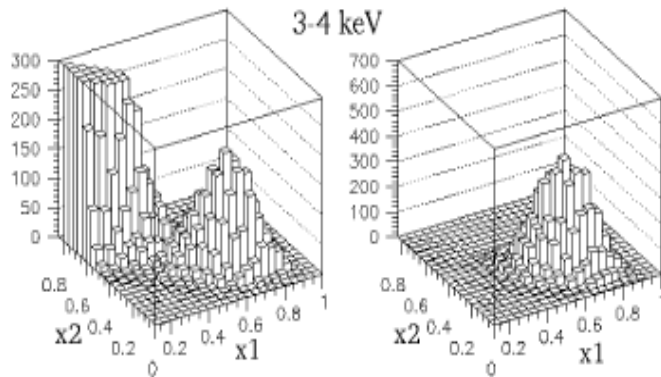
Rumore $x_1 \approx 0$ $x_2 \approx 1$

Scintillazione $x_1 \approx 0,3$ $x_2 \approx 0,5$



Rumore $x_1 \approx 0$ $x_2 \approx 1$

Scintillazione $x_1 \approx 0,3$ $x_2 \approx 0,5$



Per $E < 2\text{KeV}$ la sovrapposizione delle due distribuzioni diventa importante e la richiesta di reiezione totale del rumore comporta basse efficienze di taglio

Il residuo è il rate misurato una volta sottratta la parte costante del segnale

$$\left\langle r_{ijk} - flat_{jk} \right\rangle_{jk}$$

r_{ijk} è il rate di eventi misurato nell' i -esimo intervallo di tempo dal i -esimo rivelatore nel k -esimo bin di energia
misurato su un intero periodo nel j -esimo bin di energia

Soddisfa i primi 4 requisiti

1. Modulazione in accordo con un coseno
2. Periodo di 1 anno
3. Fase con un massimo il 2 giugno
4. Ampiezza di modulazione <7%

$$T = 1.00 \text{ anno}$$

Dal fit dei dati sperimentali (2-6 keV)
tutti i parametri liberi

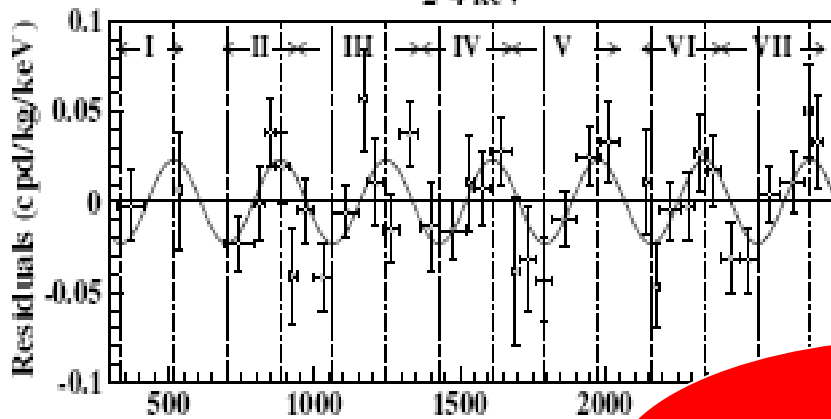
$$A = (0.0192 \pm 0.0031) \text{ cpd/kg/keV}$$

$$t_0 = (140 \pm 22) \text{ d}$$

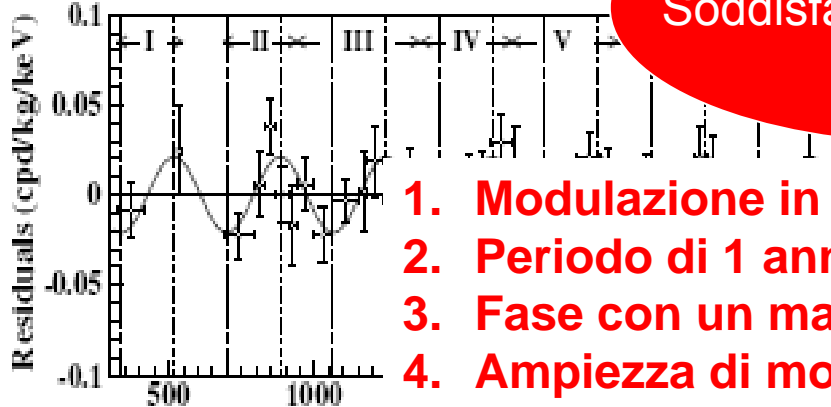
$$T = (1.00 \pm 0.01) \text{ y}$$

$$P(A=0) = 7 \cdot 10^{-4}$$

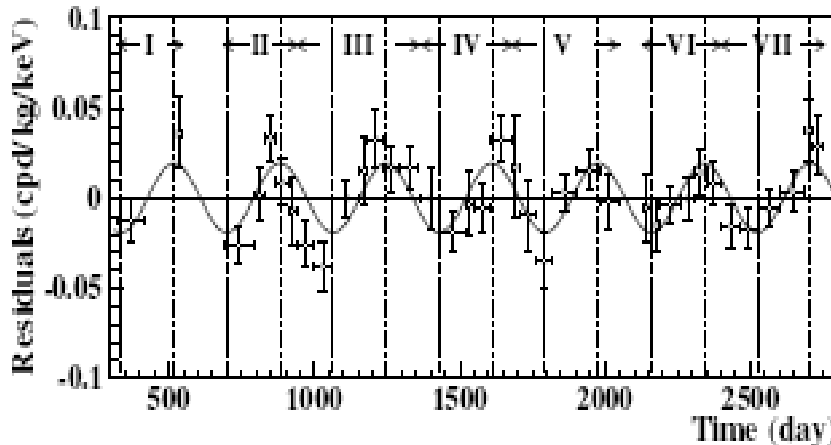
2-4 keV



2-5 keV

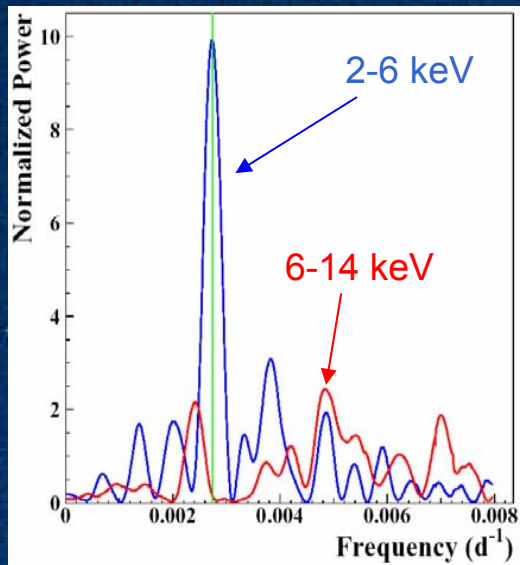


2-6 keV



5) Range di energia

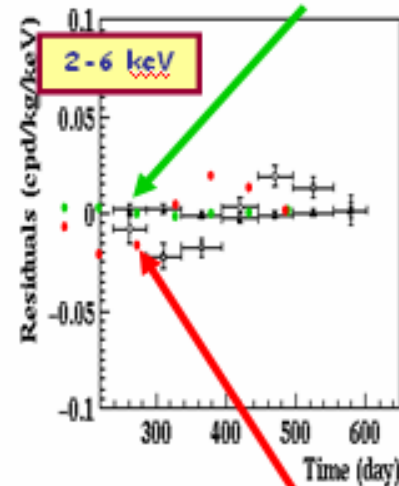
Spettro di potenza



6) Solo eventi di singolo hit

Rate degli eventi di multiplo hit nell'intervallo 2-6 keV (per DamaNaI-6 e DamaNaI-7):

$$A = -(3.9 \pm 7.9) \cdot 10^{-4} \text{ cpd/kg/keV}$$



Rate degli eventi di singolo hit nell'intervallo 2-6 keV:

$$A = (0.0195 \pm 0.0031) \text{ cpd/kg/keV}$$

Tutti e 6 i requisiti sono soddisfatti



Evidenza di Dark Matter a un livello di confidenza di $6,3 \sigma$

Riassunto dei risultati ottenuti nell'investigazione di possibili errori sistematici o "side reactions"

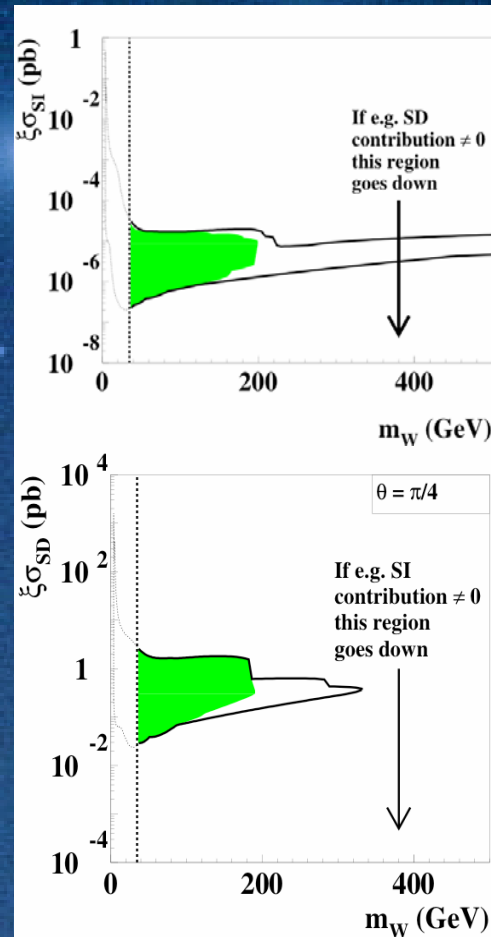
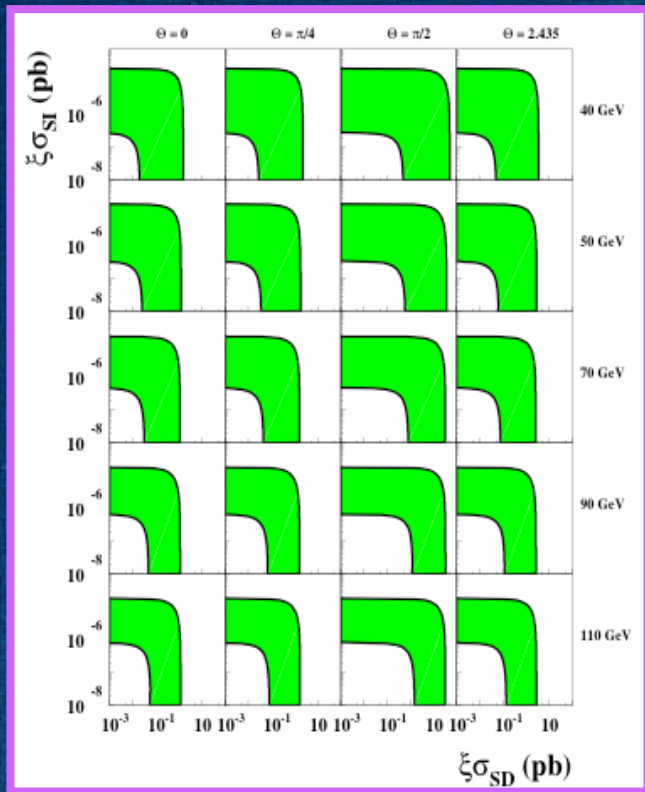
<i>Source</i>	<i>Main comment</i>	<i>Cautious upper limit (90%C.L.)</i>
RADON	Sealed Cu box in HP Nitrogen atmosphere etc.	<0.2% S_m^{obs}
TEMPERATURE	The installation is air-conditioned+ detectors in Cu housings directly in contact with multi-ton shield→ huge heat capacity + T continuously recorded	<0.5% S_m^{obs}
NOISE	Effective noise rejection	<1% S_m^{obs}
ENERGY SCALE	Periodical calibrations+ continuous monitoring of ^{210}Pb peak	<1% S_m^{obs}
EFFICIENCIES	Regularly measured by dedicated calibrations	<1% S_m^{obs}
BACKGROUND	No modulation observed above 6 keV + this limit includes possible effect of thermal and fast neutrons (+ devoted determinations)+ no modulation observed in the multiple-hits events in 2-6 keV region	<0.5% S_m^{obs}
SIDE REACTIONS	Muon flux variation measured by MACRO	<0.3% S_m^{obs}

anche se fossero più grandi
non potrebbero soddisfare
tutti i sei requisiti

Quindi non possono riprodurre
l'effetto della modulazione
annuale

Analisi Dipendente dal Modello

- Modelli Astrofisici $\rightarrow \rho_{\text{dm}}$, distribuzione delle velocità...
- Tipo di interazione (σ_{SI} , σ_{SD} , mista)
- M_{WIMP}



DAMA/NaI vs altri esperimenti

DAMA/NaI

CDMS-II

Edelweiss-I Zeplin-I

Cresst-II

• Signature	annual modulation	none	none	none	none
• Targets	^{23}Na , ^{127}I	$^{\text{nat}}\text{Ge}$	$^{\text{nat}}\text{Ge}$	$^{\text{nat}}\text{Xe}$	CaWO_4
• Technique	widely known	poorly experienced (known just by Edelweiss)	poorly experienced (known just by CDMS)	liq/gas optical interface (light collected from top)	poorly experienced (known just by themselves)
• Target mass	≈ 100 kg	0.75 kg	0.32 kg	≈ 3 kg	≈ 0.6 kg
• Used exposure	~(1.1 × 10 ⁵) kg × day (RivNCim 26 n1(2003)1-73)	19.4 kg × day (astro-ph/0405033)	30.5 kg × day (NDM03)	280 kg × day (Moriond03)	20.5 kg × day (astro-ph/0408006)
• Expt. depth	1400 m	780 m	1700 m	1100 m	1400 m
• Neutron shield	~1m of concrete + 10/40 cm polyethylene/paraffin + 1.5 mm Cd	50 cm polyethylene	30 cm paraffin	---	none
• Energy threshold	2 keVee (5.5 - 7.5 p.e./keV)	10 keVee	20 keVee	2 keVee (but: $\sigma/E=100\%$ and 1 p.e./keVee!!!; IDM02) (2.5 p.e./keVee; Moriond03)	12 keVee
• Quenching factor	measured	assumed 1	assumed 1 (see also NIMA507(2003)643)	measured	assumed 1
• Measured evt rate in low energy range	~1 cpd/kg/keV	??(claimed γ than CDMS-I where ~60 cpd/kg/keV, 10 ⁵ events)	~ 10 ⁴ events total	~100 cpd/kg/keV (IDM02)	(??) 6 cpd/kg/keV above 35 keVee
• Claimed evts after rejection procedures		0 o 1	2 (claimed taken in a noisy period!)	~20-50 cpd/kg/keV after filtering (?) and ?? after PSD (Moriond03, IDM02)	16
• Evts satisfying the signature in DAMA/NaI	modulation amplitude integrated over the given exposure some 10 ³ evts	insensitive	insensitive	insensitive	insensitive
• Expected number of evts from DAMA/NaI effect		from few down to zero depending on the model frameworks (and on quenching factor)	from few down to zero depending on the model framework (and on quenching factor)	depends on the model framework, also zero	from few down to zero depending on the model framework (and on quenching factor)

Da DAMA/NaI a DAMA/LIBRA

9 Scintillatori di NaI



25 Scintillatori di NaI

R&D dedicato

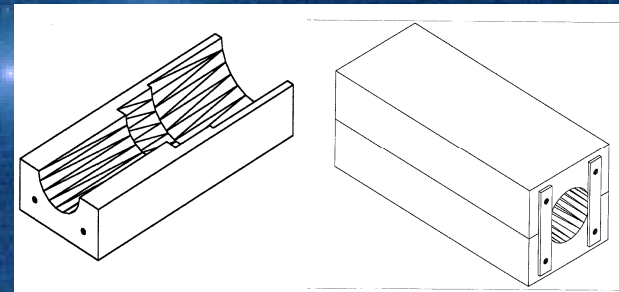
MS & AAS ISPRA	natK (ppm)	^{238}U (ppb)	^{232}Th (ppb)
NaI	<0.8	0.56 ± 0.04	0.21 ± 0.01
LIBRA	<0.1	0.02	0.02



I Fotomoltiplicatori



Rispetto a DAMA/NaI sono stati chiusi con appositi involucri di rame



Vari R&D → Fotomoltiplicatori sempre più puri

DAMA/NaI:

^{40}K : (60 ± 15) ppm
 ^{238}U : (30 ± 20) ppb
 ^{232}Th : (30 ± 10) ppb

prototype no.1:

^{40}K < 0.12 ppb
 ^{238}U : (5 ± 1) ppb
 ^{232}Th : (0.9 ± 0.2) ppb

prototype no.2:

^{40}K < 10 ppt
 ^{238}U : (20 ± 1) ppb
 ^{232}Th : (2.2 ± 0.2) ppb

Possibili miglioramenti grazie ai dati raccolti da DAMA/LIBRA

- Grazie alla maggiore massa si potrà raggiungere un C.L. molto alto in meno tempo
- Sarà possibile distinguere meglio tra i vari possibili modelli astrofisici, nucleari e di particelle

Inoltre sarà possibile investigare meglio:

- Velocità e distribuzione delle particelle di DM nell'alone galattico.
- Effetti su queste distribuzioni dovute alla presenza di galassie satellite
- Possibili effetti del campo gravitazionale solare
- Accoppiamento tra particelle e nuclei (^{23}Na e ^{127}I). Puramente SI, puramente SD, misto. Studio dei fattori di forma del nucleo
- Natura delle particelle candidate