

La materia oscura (parte 2)

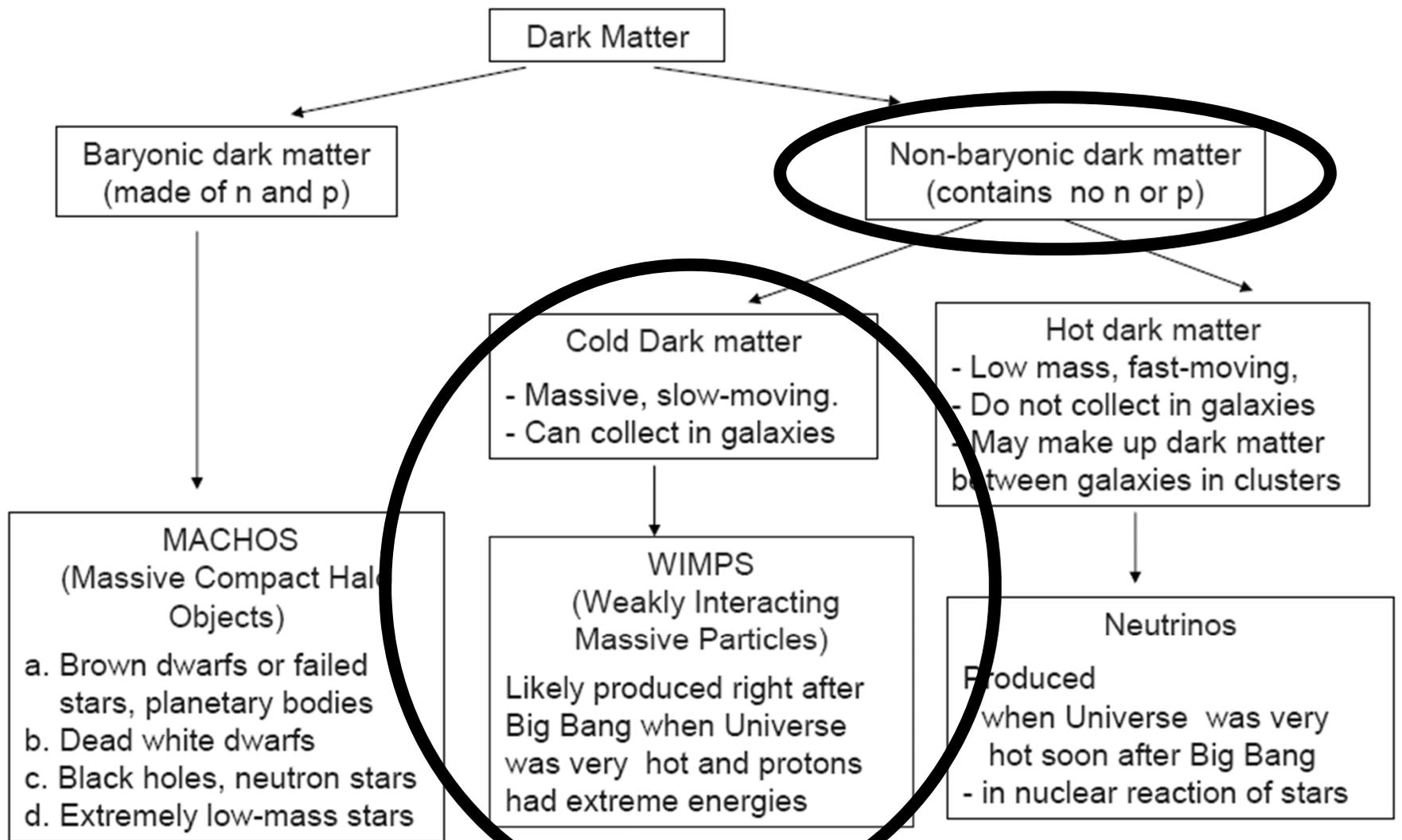
Corso di Introduzione all'astrofisica

Anno accademico 2019-2020

Barbara Caccianiga

Riassumendo

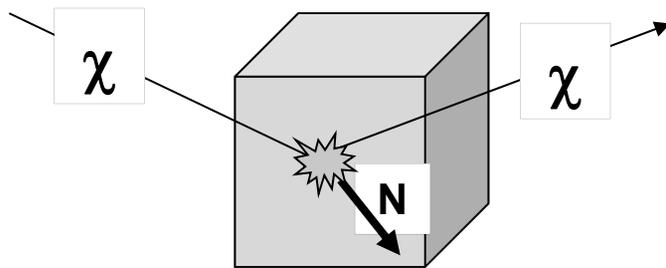
- 1. La materia “convenzionale” (barionica, cioè composta da protoni e neutroni) costituisce solo il 4% della densità di energia totale dell’universo; solo una piccola parte di questa materia è “visibile”; la rimanente è oscura (dark matter barionica);**
- 2. Il 23% della densità di energia dell’universo è costituito da materia oscura “non convenzionale” di natura e caratteristiche ignote (dark-matter non barionica);**
- 3. Il rimanente 73% dell’energia dell’universo è una energia “oscura” di origine e natura ignota, che ha come effetto quello di fare accelerare l’universo e di renderlo “piatto”.**



Leading candidate = Cold dark matter = WIMPS

Metodi diretti di rivelazione di WIMPs

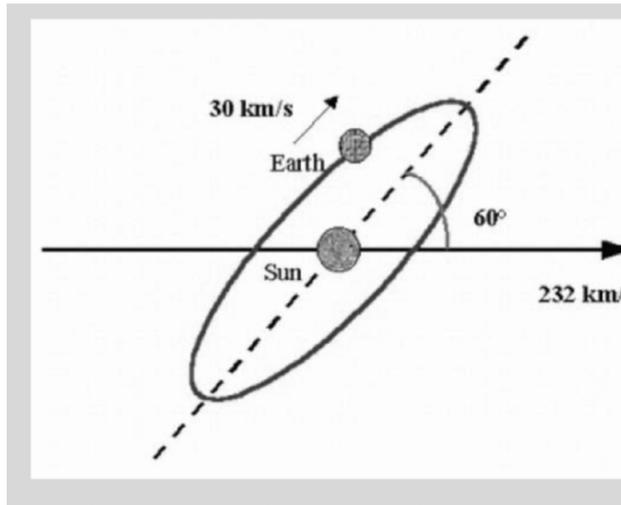
- La reazione che viene studiata in tutti gli esperimenti che descrivero' e' quella di scattering su nucleo;
- Quello che si va a vedere e' il rinculo del nucleo colpito;



- Per le masse di Wimps ipotizzate (fra 10 GeV – 1 TeV), l'energia cinetica di rinculo e' tipicamente molto piccola ~ decine di keV;
 - **DIFFICILE DA DISTINGUERE DAL FONDO!**
- Le sezioni d'urto di interazione degli WIMPs non e' nota: a seconda dei modelli che si considerano $\sigma = 10^{-48} - 10^{-41} \text{ cm}^2$; non e' chiaro se dipenda dallo spin del nucleone o meno;
 - $\rho_{\text{Wimp}} = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$;
 - $v_{\text{media}} \sim 270 \text{ Km/s}$ (con velocita' massima uguale alla velocita' di fuga dalla galassia $v \sim 650 \text{ Km/s}$)
 - Dati i flussi di WIMPs previsti e la sezioni d'urto di interazione piccolissime ci si aspetta un tasso di interazione molto basso;
 - **Rate ~ da 1 a 10^{-5} eventi/Kg/giorno;**

Possibili segnature del segnale di WIMP

- **Modulazione annuale:** il flusso di WIMPs osservato deve avere una piccola (~qualche %) variazione annuale a causa della variazione della velocità relativa degli WIMPs dovuta al moto della terra intorno al sole;



- In giugno la velocità della terra si somma a quella del sole nella galassia;
- In dicembre si sottrae;

- **Dipendenza da A:** la modalità di interazione (sezione d'urto, e spettro di rinculo) degli WIMPs dipende dal tipo di nucleo bersaglio; sarebbe utile quindi che all'interno di uno stesso esperimento si usassero bersagli con A diversi;
- **Direzione del rinculo del nucleo:** se fosse possibile misurare la direzione del rinculo del nucleo si potrebbe avere una prova della provenienza "cosmica" degli WIMPs ed eliminare fondi di origine "terrestre";

Problemi sperimentali nella rivelazione di WIMPs

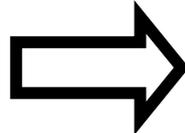
- All'incirca si possono ripetere le considerazioni già fatte per i neutrini solari:

Eventi **ESTREMAMENTE** rari!



Rivelatori molto grandi;

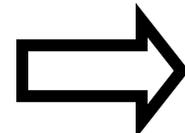
Necessita' di ridurre il fondo



• Laboratori sotterranei;
• Strategia di schermaggio;
• Radiopurezza dei materiali;

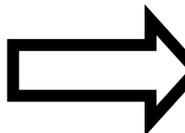
- Con qualche aggravante:

Sezione d'urto e flusso di WIMPs non nota precisamente



• Incertezza sui rate attesi (ben maggiore del fattore 2 o 3 dei neutrini solari!);

L'energia da misurare piccola (~10 keV)



• Necessita' di utilizzare rivelatori con alta risoluzione energetica

Senza contare che non siamo nemmeno sicuri che gli WIMPs esistano!

Il problema del fondo

Quali sono i tipi di fondo piu' comune con cui si devono fare i conti?

1. Raggi cosmici (p , n , π , e , μ ...);

- per ovviare a questo tipo di fondo che risulterebbe totalmente dominante sul segnale, TUTTI gli esperimenti sono situati in laboratori sotterranei;

2. Radioattivit  dei materiali in prossimit  del rivelatore (α , β , γ , n):

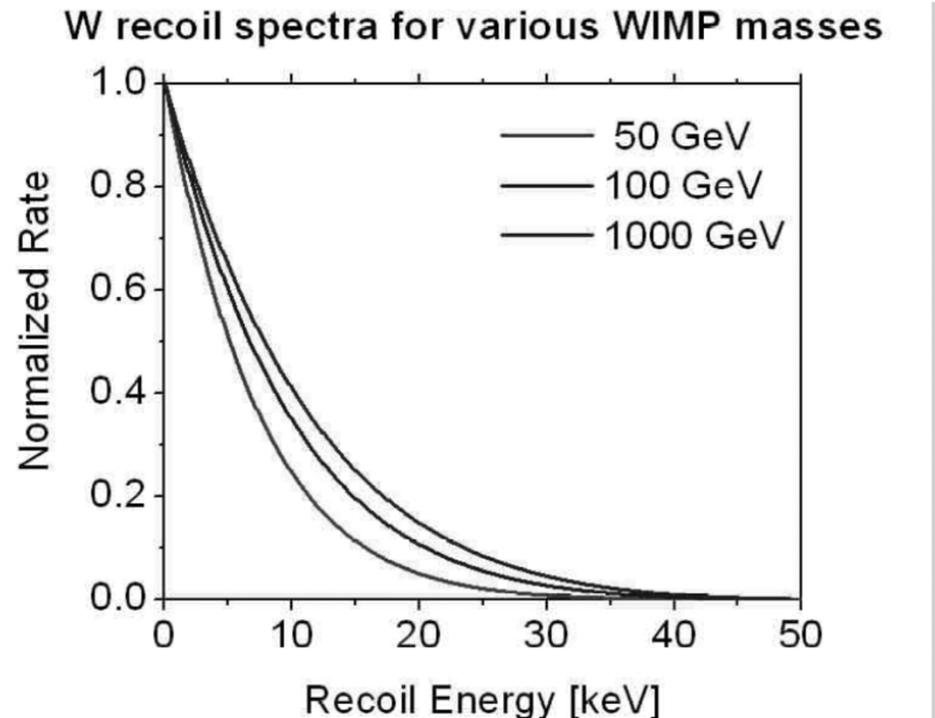
- e' necessario schermare molto bene il rivelatore;
- si noti che particelle α e β vengono schermate facilmente; e' piu' difficile schermare γ e n ;
- si noti inoltre che i neutroni costituiscono un fondo particolarmente fastidioso in quanto sono di fatto indistinguibili dai nuclei che rinchiodano;

3. Radioattivit  del rivelatore stesso (interna e superficiale α , β , γ):

- Utilizzo di materiale molto puro;
- Tecniche per discriminare il segnale dovuto ad α , β , γ da quello dovuto a un nucleo sfruttando le diverse modalit  di perdita di energia;

Tecniche per discriminare il segnale dal fondo

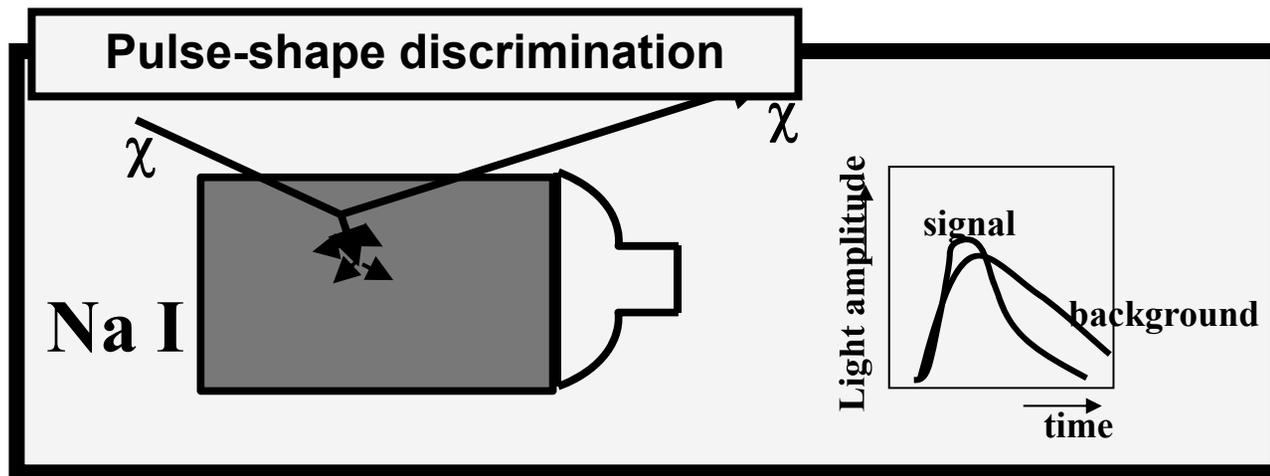
- Nonostante le precauzioni per evitare contaminazioni, rimane in tutti i casi un fondo residuo con cui fare i conti;
- Sfortunatamente lo spettro di energia del rinculo del nucleo non ha caratteristiche particolari che permettano di distinguerlo da quello del fondo;
- E' necessario adottare delle tecniche di discriminazione per separare a livello di analisi il fondo dal segnale;



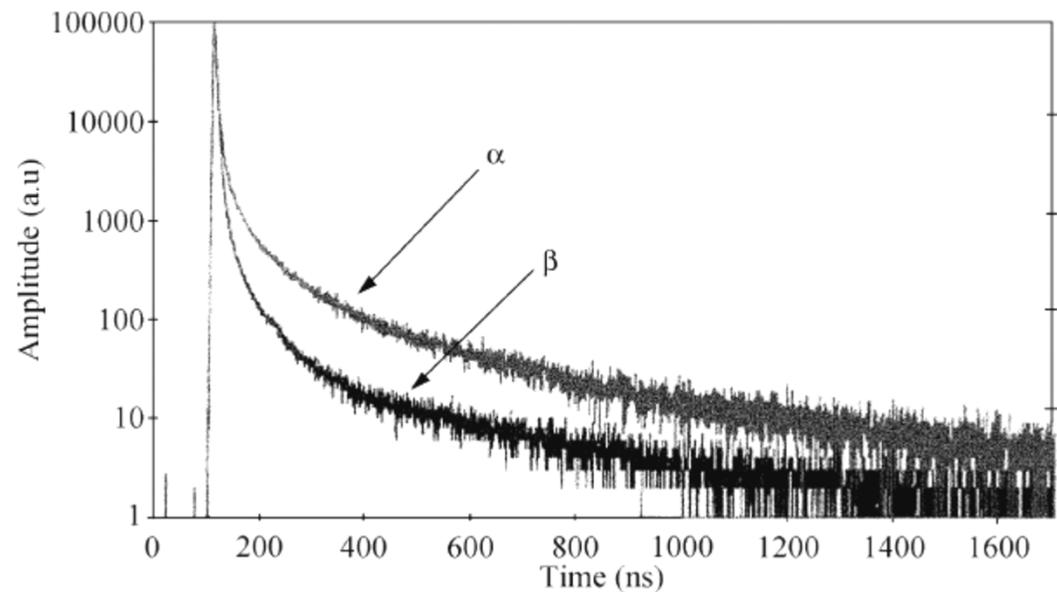
- Le tecniche adottate variano a seconda del rivelatore;
- Sfruttano in generale la diversa risposta dei rivelatori a particelle di natura diversa;
- A questo proposito i rivelatori ibridi, che sfruttano cioè lo stesso cristallo in due modalità diverse risultano particolarmente efficienti;

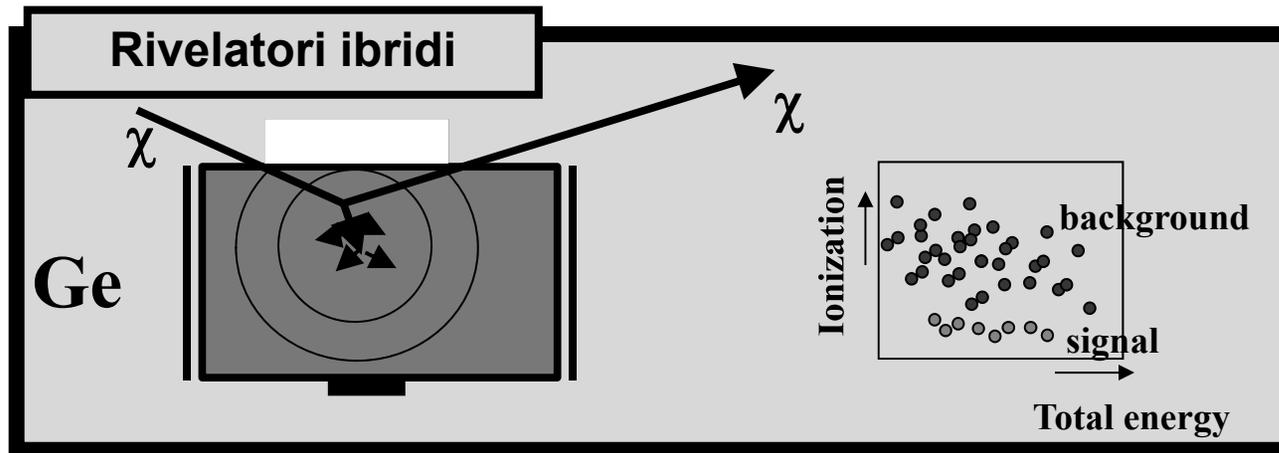
Tecniche per discriminare il segnale dal fondo

- **Le due classi di eventi che si vogliono separare sono**
 - 1. il deposito di energia dovuto ad β , γ (fondo);**
 - 2. il rinculo di nuclei (segnale);**
- **Notiamo che i neutroni pur essendo fondo rientrano nella categoria 2 perche' producono un rinculo nucleare e non possono venire separati dal segnale con queste tecniche;**



- Viene usata comunemente negli scintillatori per distinguere il segnale dovuto a particelle di diversa natura;
- In particolare sfrutta la differente forma temporale dell'impulso di luce emesso a seconda che la particella sia altamente o debolmente ionizzante;
- Purtroppo alle energie in gioco (~ 10 keV) questa tecnica e' piuttosto inefficiente;

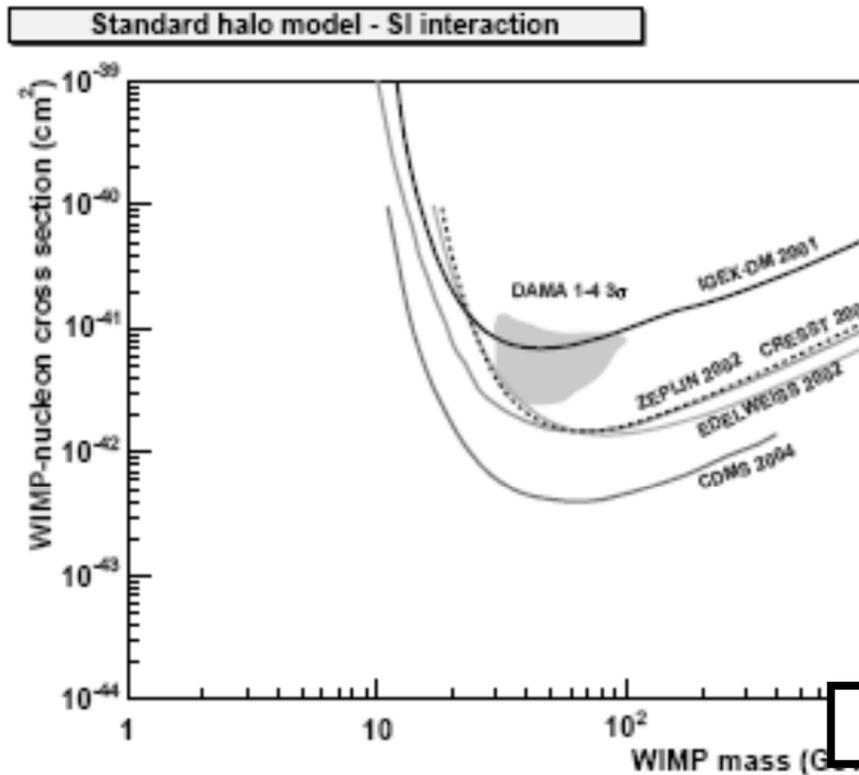




- Lo stesso cristallo viene usato simultaneamente come bolometro e come rivelatore a stato solido (o scintillatore);
- La possibilità' di discriminare segnale da fondo si basa sul fatto che (a parità' di energia) le particelle con basso dE/dx (β e γ) producono più' coppie elettrone/buca rispetto alle particelle con alto dE/dx ; (nuclei);
- In quanto bolometro il rivelatore registra tutta l'energia della particella (E_{tot});
- In quanto rivelatore a stato solido rivela solo la parte di energia persa per ionizzazione (E_{ion});
- Calcolo il rapporto $R = E_{ion} / E_{tot}$
- R sarà' maggiore per le particelle debolmente ionizzanti come β e γ ;

Grafici di “esclusione” per confrontare i risultati dei diversi esperimenti

Sezione d'urto
Wimp-nucleone



Massa dello Wimp

In realta' questo grafico e' fatto con delle assunzioni: sul modello che descrive l'alone della nostra galassia e sulle modalita' di interazione dello WIMP; in particolare si assume che la sezione d'urto non dipenda dallo spin del nucleone

Metodi sperimentali per la rivelazione di WIMPs (1)

- **Rivelatori a stato solido;**
 - Tecniche convenzionali; tipicamente rivelatori a Ge;
 - L'esperimento IGEX;
- **Rivelatori a scintillazione;**
 - Tecnica convenzionale che permette di raggiungere masse elevate;
 - Vengono tipicamente usati scintillatori inorganici;
 - L'esperimento DAMA/LIBRA (NaI);

Metodi sperimentali per la rivelazione di WIMPs (2)

- **Rivelatori criogenici (bolometri);**
 - Il vantaggio di questa tecnica e' che tutta l'energia di rinculo del nucleo viene rivelata;
 - Inoltre la risoluzione energetica e' molto buona;
 - Hanno il vantaggio di poter essere utilizzati in modalita' ibrida, cioe' come rivelatori bolometrici e allo stesso tempo come rivelatori a stato solido o a scintillazione;
 - Rivelatori bolometrici+ionizzazione:
 - Gli esperimenti EDELWEISS e CDMS;
 - Rivelatori bolometrici+scintillazione:
 - Gli esperimenti ROSEBUD e CRESST;
- **Gas nobili a doppia fase;**
 - Rivelatori che usano lo Xenon (XENON);
 - Rivelatori che usano l'Argon (Dark-Side);
 - Rivelatori a gas che cercano di misurare la direzione del rinculo del nucleo (per es. DRIFT);

Metodi sperimentali per la rivelazione di WIMPs (3)

- **Liquidi surriscaldati;**
 - Camere a bolle (COUPP);
 - Superheated Droplet Detectors: PICASSO;
 - Tecnica Geyser: il prototipo MOSCAB;

- **Tipicamente le fasi che portano alla realizzazione di un esperimento per la ricerca di materia oscura sono le seguenti:**

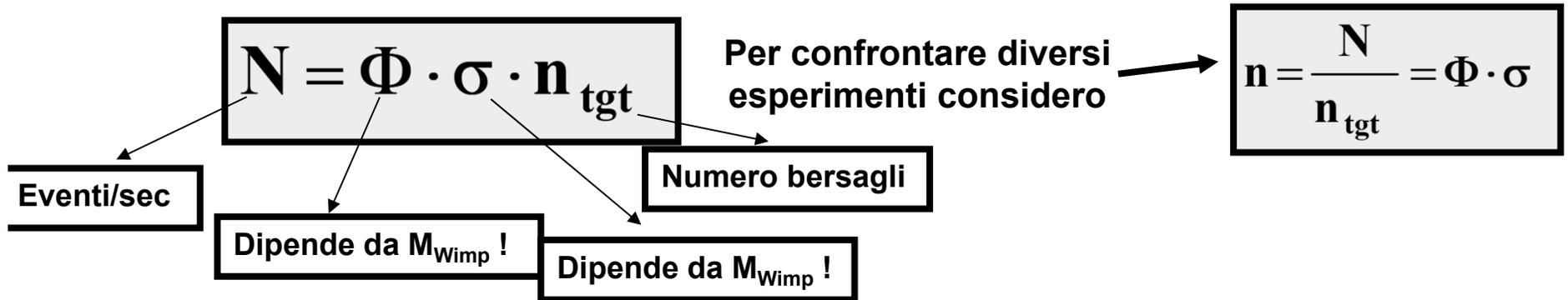
FASE I: idea di che tecnica usare (rivelatori a stato solido? Bolometri? Scintillatori?) e realizzazione di un primo prototipo su piccola scala per verificarne la fattibilita'; puo' succedere che si abbiano diverse idee per applicare la stessa tecnica e che diversi gruppi provino a realizzarle indipendentemente;

FASE II: realizzazione di un esperimento su scala intermedia per vedere se i risultati ottenuti nella FASE I sono effettivamente scalabili a piu' grandi masse; e' ancora fattibile avere piu' di un esperimento che utilizzi tecniche simili;

FASE III: realizzazione dell'esperimento a piene dimensioni. In genere a questo punto si uniscono gli sforzi : lo studio di fattibilita' della FASE I o II che si e' rivelato piu' promettente viene implementato, facendo tesoro dell'esperienza acquisita;

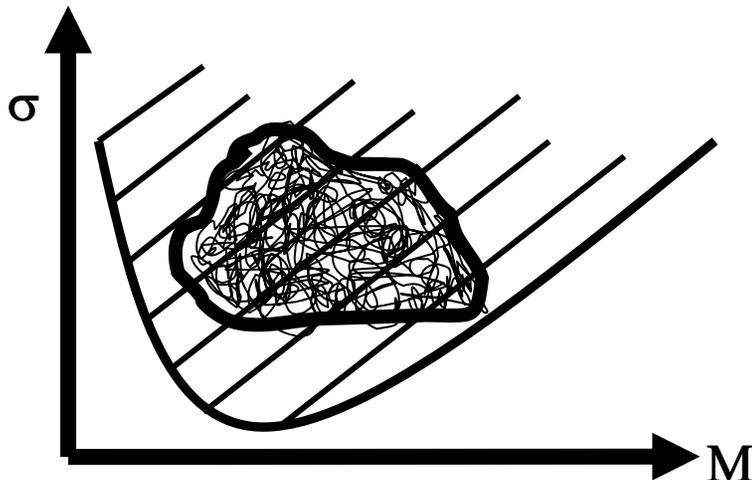
Experiment	Location	Readout (γ, ϕ, q)	T (K)	M (kg)	Target	Search Dates
NAIAD	Boulby	γ	300	50	NaI	2001–2005
DAMA/NaI	Gran Sasso	γ	300	87	NaI	1995–2002
DAMA/LIBRA	Gran Sasso	γ	300	233	NaI	2003–
ANAIS	Canfranc	γ	300	11	NaI	2000–2005
ANAIS	Canfranc	γ	300	100	NaI	2011–
KIMS	Yangyang	γ	300	35	CsI	2006–2007
KIMS	Yangyang	γ	300	104	CsI	2008–
CDMS II	Soudan	ϕ, q	< 1	1	Si	2001–2008
				3	Ge	2001–2008
SuperCDMS	Soudan	ϕ, q	< 1	12	Ge	2010–2012
SuperCDMS	SNOLAB	ϕ, q	< 1	120	Ge	2013–2016
GEODM	DUSEL	ϕ, q	< 1	1200	Ge	2017–
EDELWEISS I	Modane	ϕ, q	< 1	1	Ge	2000–2004
EDELWEISS II	Modane	ϕ, q	< 1	4	Ge	2005–
CRESST II	Gran Sasso	ϕ, γ	< 1	1	CaWO ₄	2000–
EURECA	Modane	ϕ, q	< 1	50	Ge	2012–2017
		ϕ, γ	< 1	50	CaWO ₄	2012–2017
SIMPLE	Rustrel	Threshold	300	0.2	Freon	1999–
PICASSO	Sudbury	Threshold	300	2	Freon	2001–
COUPP	Fermilab	Threshold	300	2	Freon	2004–2009
COUPP	Fermilab	Threshold	300	60	Freon	2010–
TEXONO	Kuo-Sheng	$q, \beta\beta$	77	0.02	Ge	2006–
CoGeNT	Chicago	$q, \beta\beta$	77	0.3	Ge	2005–
	Soudan	$q, \beta\beta$	77	0.3	Ge	2008–
MAJORANA	Sanford	$q, \beta\beta$	77	60	Ge	2011–
ZEPLIN III	Boulby	γ, q	150	7	LXe	2004–
LUX	Sanford	γ, q	150	100	LXe	2010–
XMASS	Kamioko	γ, q	150	3	LXe	2002–2004
XMASS	Kamioko	γ, q	150	100	LXe	2010–
XENON10	Gran Sasso	γ, q	150	5	LXe	2005–2007
XENON100	Gran Sasso	γ, q	150	50	LXe	2009–
WArP	Gran Sasso	γ, q	86	3	LAr	2005–2007
WArP	Gran Sasso	γ, q	86	140	LAr	2010–
ArDM	CERN	γ, q	86	850	LAr	2009–
DEAP-1	SNOLAB	γ	86	7	LAr	2008–
MiniCLEAN	SNOLAB	γ	86	150	LAr	2012–
DEAP-3600	SNOLAB	γ	86	1000	LAr	2013–
DRIFT-I	Boulby	Direction	300	0.17	CS ₂	2002–2005
DRIFT-2	Boulby	Direction	300	0.34	CS ₂	2005–
NEWAGE	Kamioka	Direction	300	0.01	CF ₄	2008–
MIMAC	Saclay	Direction	300	0.01	many	2006–
DMTPC	MIT	Direction	300	0.01	CF ₄	2007–

Come si costruisce il grafico di esclusione?



CASO 1: l'esperimento vede n eventi

- Siccome ne' M ne' σ sono noti, l'esperimento individua una regione permessa sul piano (σ, M_{Wimp})



CASO 2: non vede nessun evento

- L'esperimento puo' escludere una regione sul piano (σ, M_{Wimp})

N.B.: Il calcolo della regione permessa (o esclusa) deve tener conto di diversi effetti:

- Dipendenza di σ e Φ dall'energia;
- Tutti gli effetti sperimentali quali soglia, efficienza, errori..

I rivelatori “convenzionali” a Ge: l’esperimento IGEX

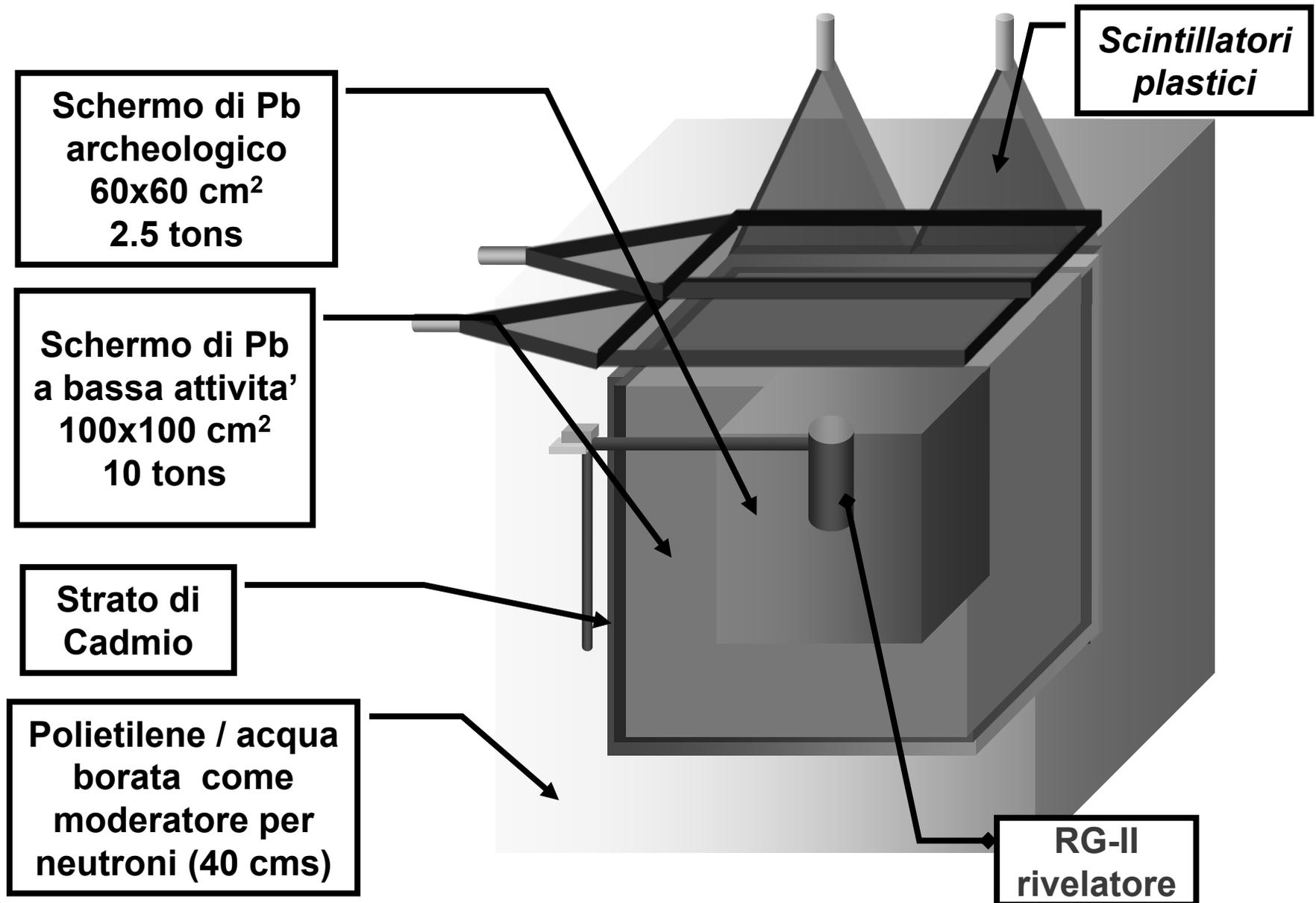
- Si e’ svolto presso il Laboratorio di Canfranc (sotto i Pirenei spagnoli);
- Rivelatori di Ge ultra-puro da 2 Kg;
- Misurano la ionizzazione provocata dal rinculo del nucleo;
- Tecnica tradizionale, quindi molto ben collaudata;
- Si e’ raggiunto un livello di fondo eccezionalmente basso;
- Grazie a questo e’ stata abbassata la soglia sperimentale a 4keV;

Livelli di fondo raggiunti

Fra 4-10 keV	0.22 c/keV/kg/giorno
Fra 10-20 keV	0.10 c/keV/kg/giorno
Fra 25-40 keV	0.04 c/keV/kg/giorno



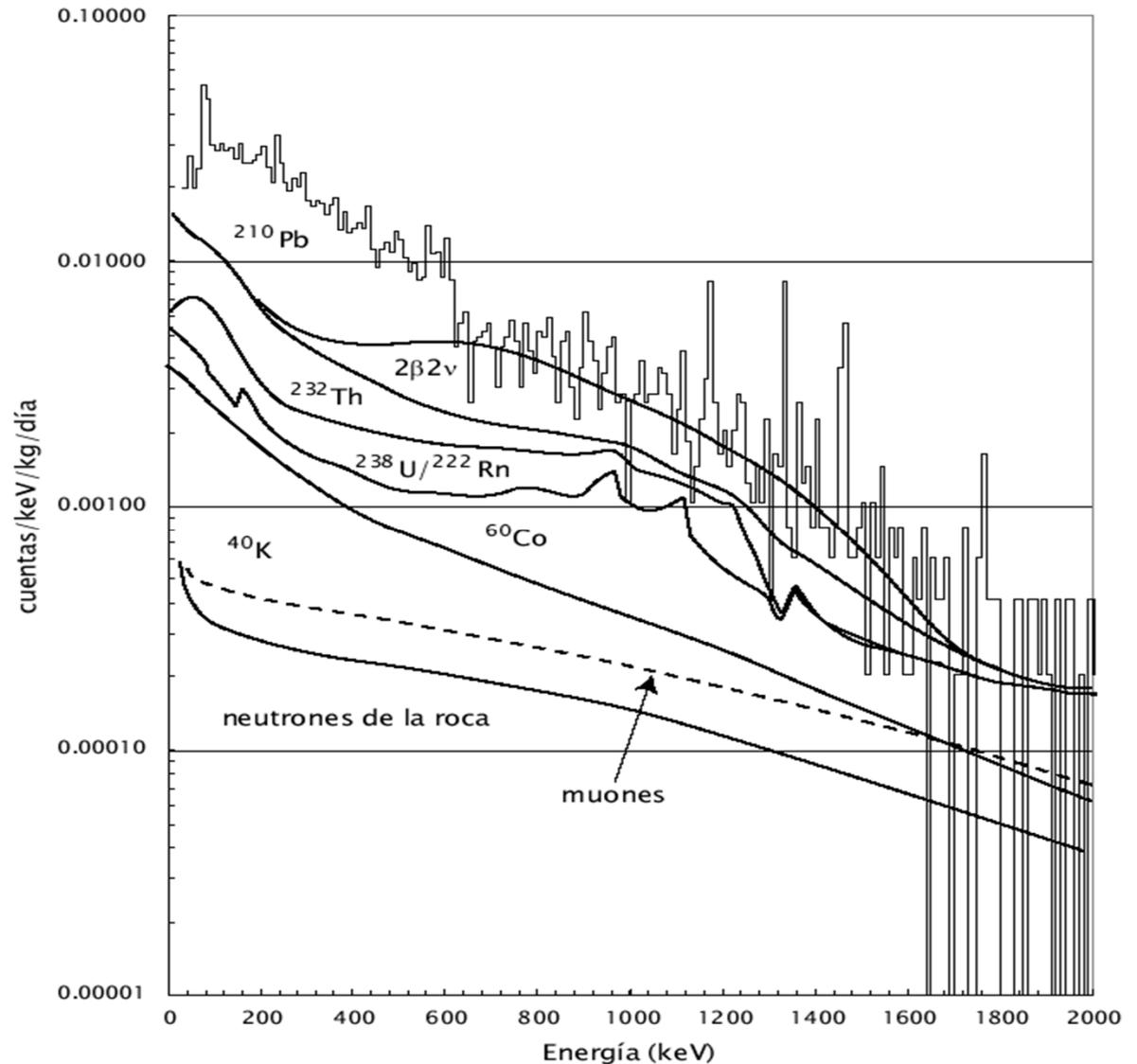
Strategia di schermo di IGEX



Individuazione dei vari contributi al fondo

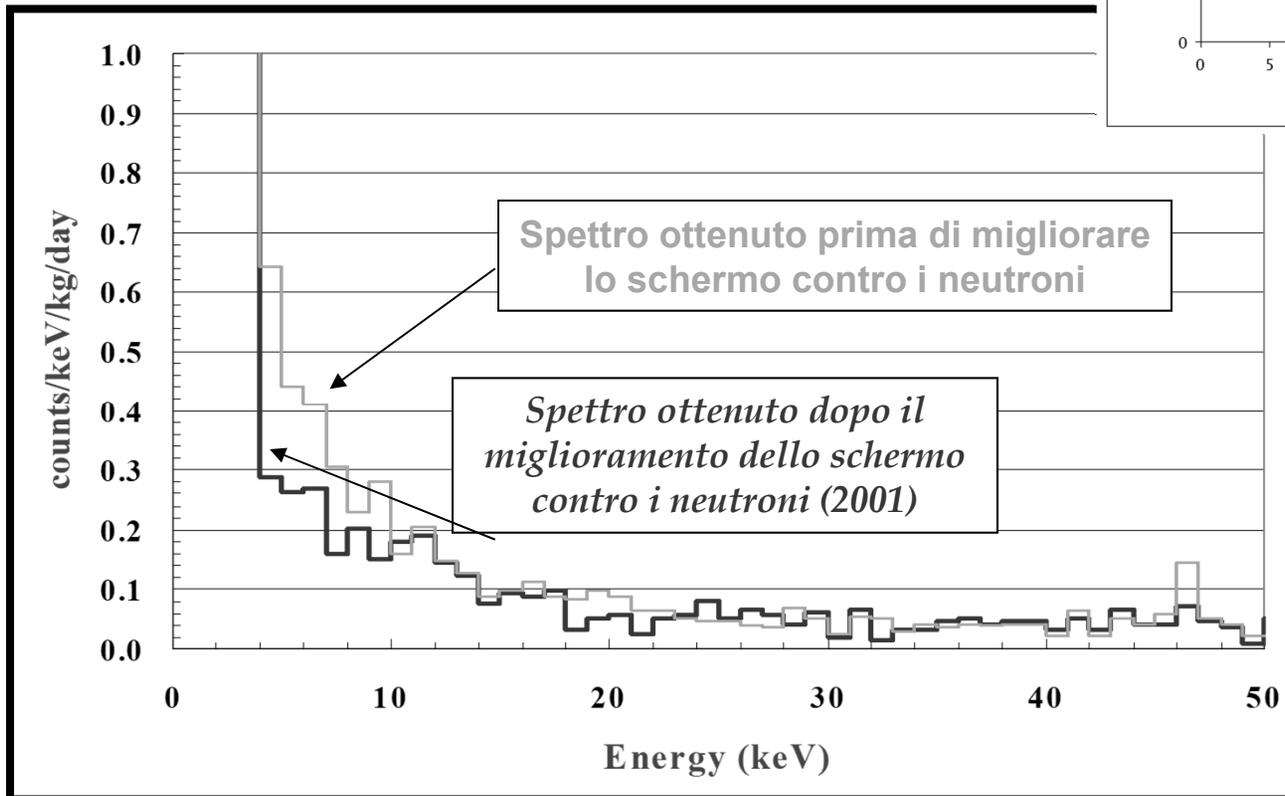
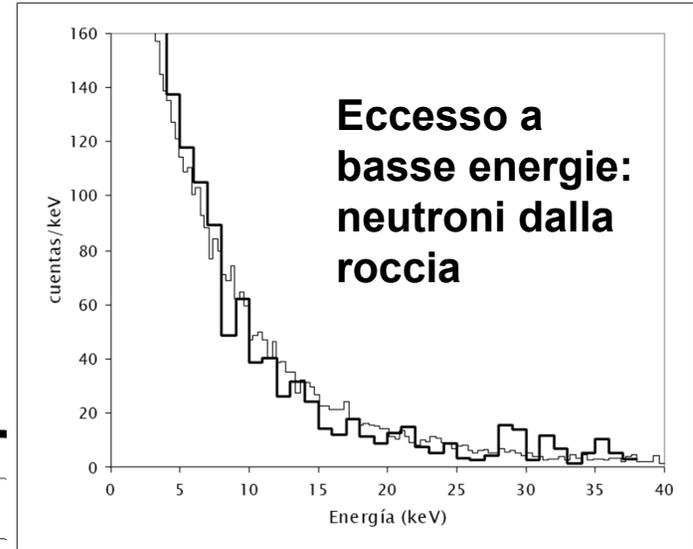
*Tramite simulazione
Montecarlo si cerca di
riprodurre lo spettro
osservato
sperimentalmente,
introducendo il
contributo di tutti i fondi*

-  ^{40}K
-  $^{238}\text{U} / ^{222}\text{Rn}$
-  ^{232}Th
-  ^{60}Co
-  ^{210}Pb
-  $2\beta 2\nu$
-  *muoni residui*



I fondi radioattivi che disturbano la misura

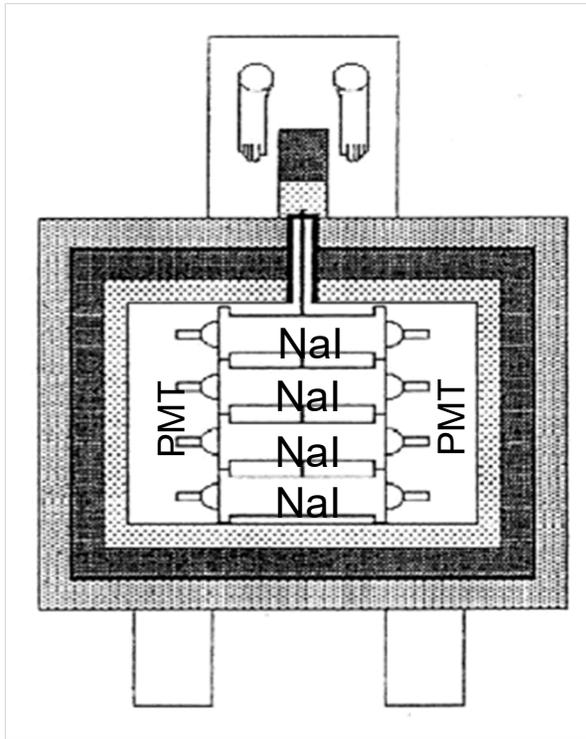
Il fondo piu' fastidioso per IGEX e' costituito dai neutroni provenienti dalla roccia che depositano la loro energia nel rivelatore;



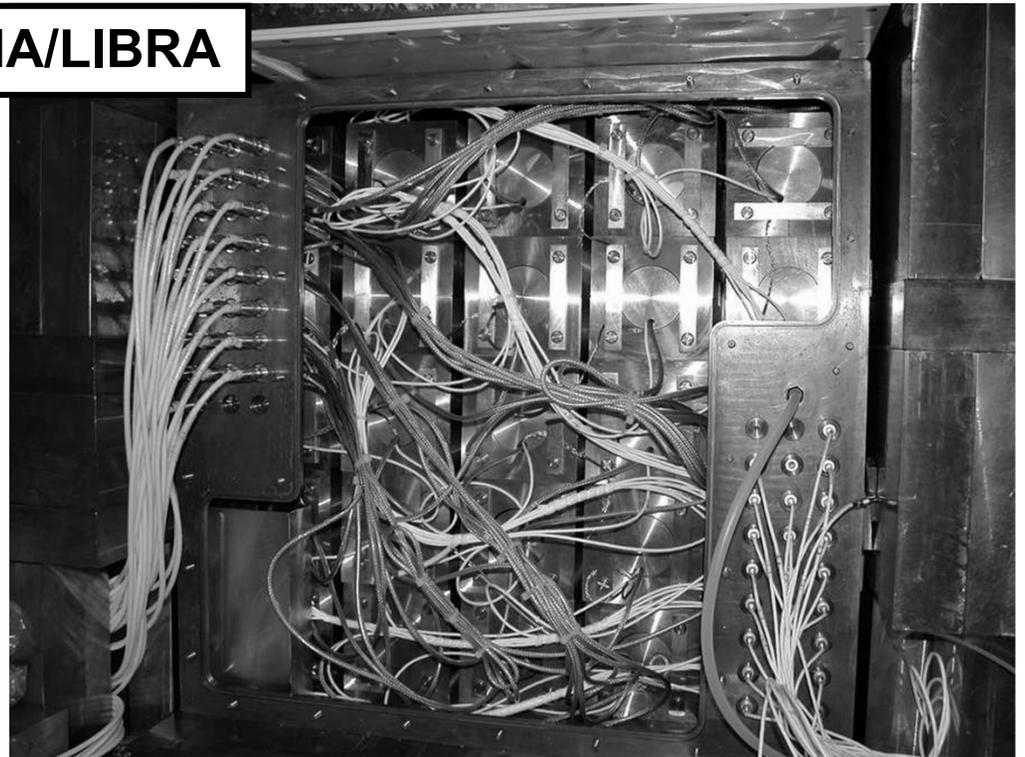
Hanno migliorato la situazione aumentando la schermatura contro i neutroni

Rivelatori a scintillazione: DAMA

- Si e' svolto ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (fino al 2002);
- Utilizza 9 cristalli di NaI (drogato con TI) del peso di 9.7 Kg l'uno;
- In totale hanno quindi una massa di $M \sim 90\text{Kg}$;
- Ha accumulato una statistica di 107731 kg giorni (e' un modo tipico di quotare la statistica raccolta da un esperimento moltiplicandone la massa per il numero di giorni effettivi di presa dati);

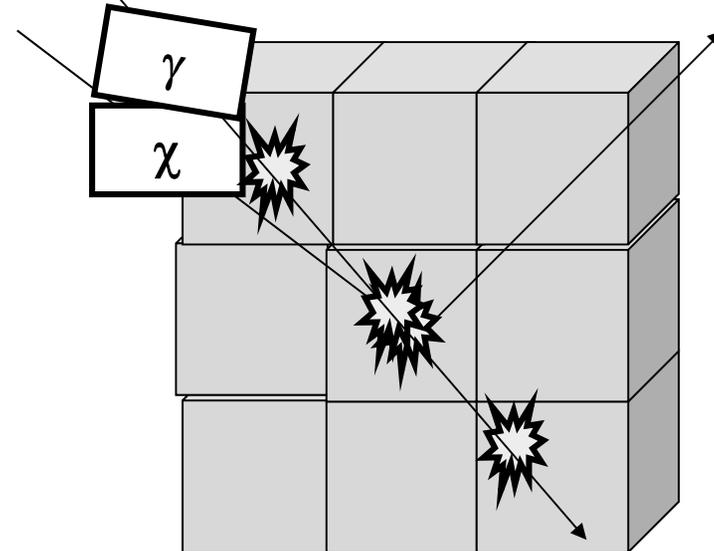


DAMA/LIBRA



Riduzione del fondo in DAMA

- Il vantaggio dei rivelatori a scintillazione e' che permettono di raggiungere masse piuttosto elevate (rispetto ai rivelatori a Ge o ai bolometri) e possono quindi accumulare maggiore statistica;
- Sono pero' in generale piu' affetti da problemi di radiopurezza intrinseca;
- Possono contare sulla tecnica di "pulse-shape" discrimination per separare il fondo radioattivo dovuto a β e γ dal segnale; questa tecnica pero' non e' molto efficiente a basse energie;
- Hanno una risoluzione energetica peggiore;
- Come gli altri esperimenti sulla ricerca di Dark Matter sfruttano lo schermo fornito dalla montagna per ridurre il fondo da raggi cosmici;
- Un aiuto ulteriore per ridurre il fondo proveniente dall'esterno e' dato dal fatto che il rivelatore e' "segmentato", cioe' composto da cristalli affiancati che danno segnale rivelato da fototubi indipendenti;
- Rigettano quegli eventi in cui piu' di un cristallo ha dato segnale



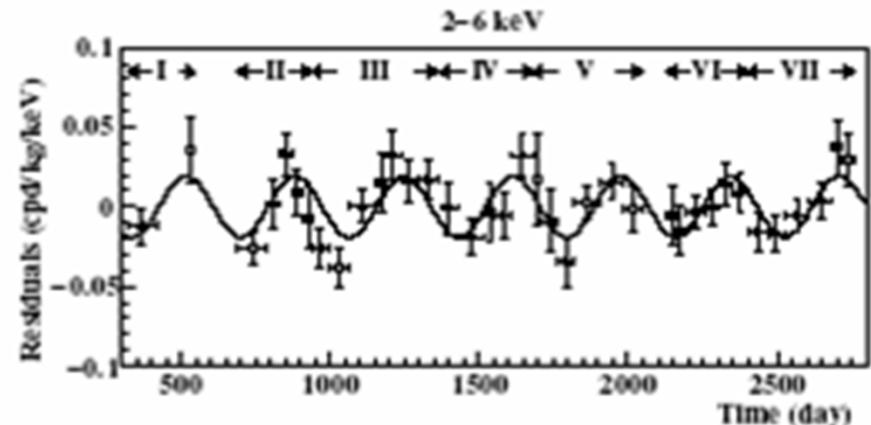
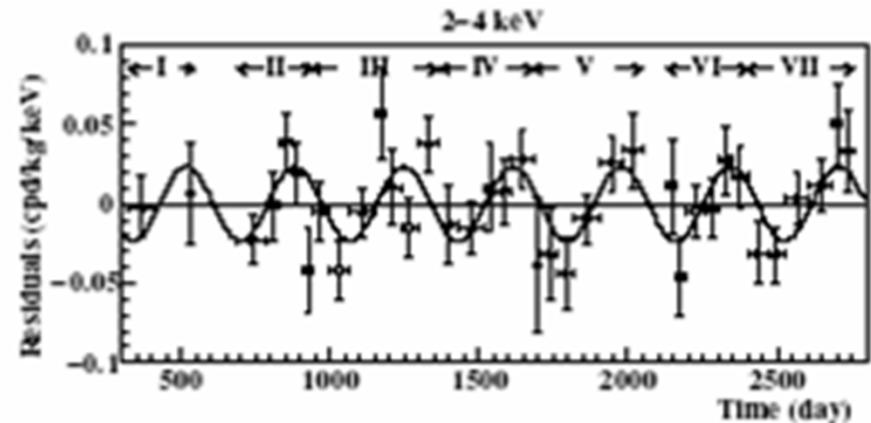
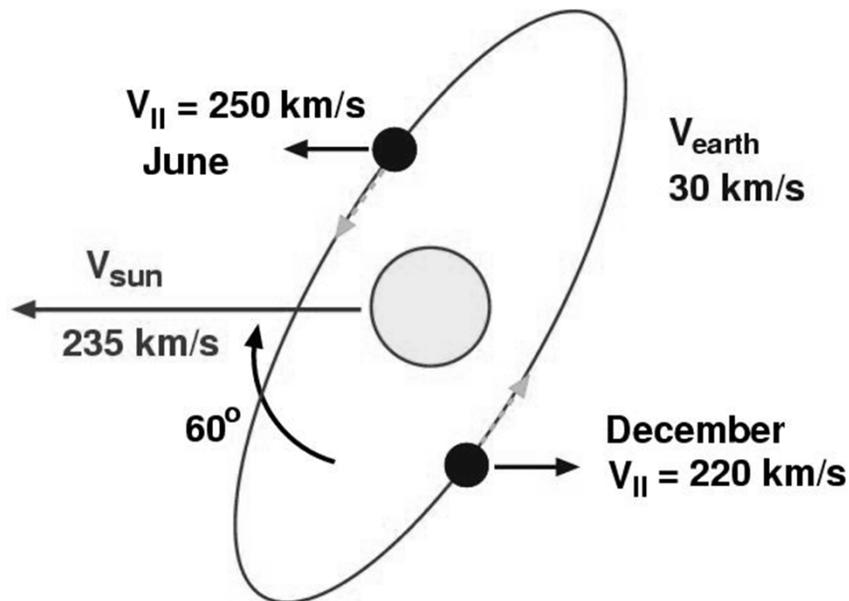
Risultati di DAMA

- La forza di DAMA e' che avendo alta massa, e' stata in grado di raccogliere una statistica alta e ha quindi potuto studiare le variazioni annuali (su 7 anni);
- Vede un'evidenza di variazione periodica a 6.3σ ;

Il segnale e' compatibile con:

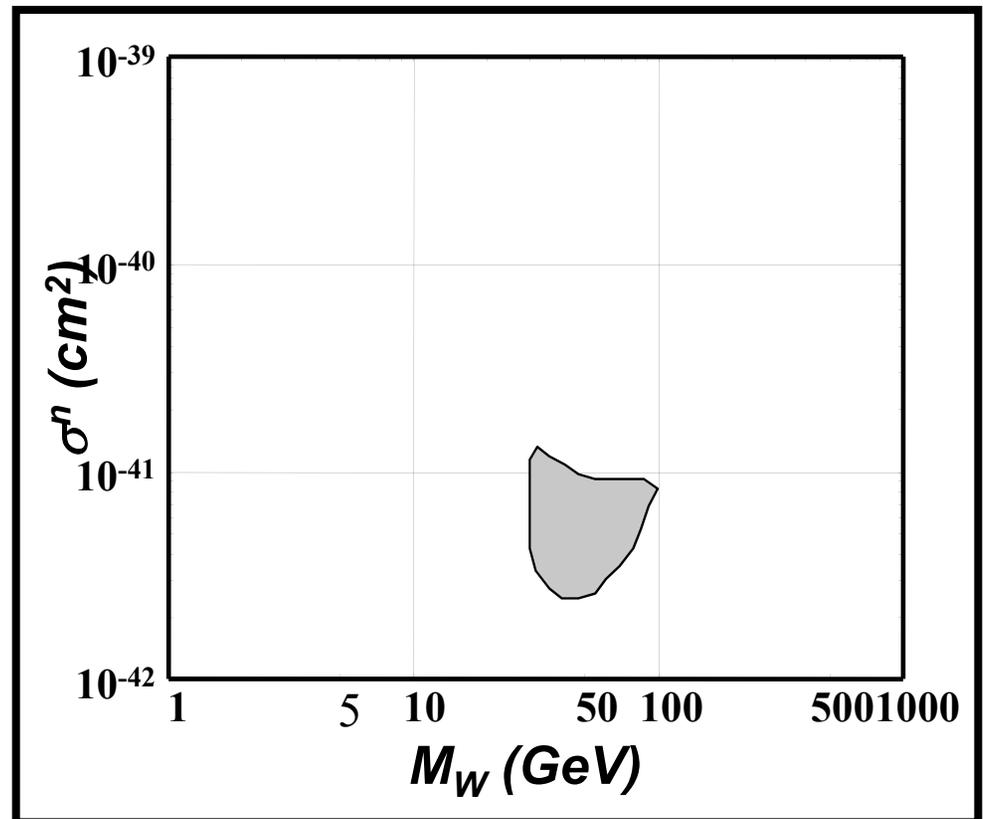
$$M_{\text{Wimp}} = 52 \text{ GeV};$$

$$\sigma = 7.2 \times 10^{-42} \text{ cm}^2;$$



Risultati di DAMA/ LIBRA

- Tenendo conto delle incertezze sperimentali i risultati di DAMA si traducono in una regione permessa nello spazio ($\sigma - M_{Wimp}$);
- In realta' i risultati di DAMA sono molto controversi;
- Vedremo infatti che non vengono confermati da altri esperimenti (come CDMS ed EDELWEISS);
- A partire dal 2003, e' cominciato un nuovo esperimento, LIBRA, che e' la continuazione di DAMA, con massa piu' grande (250 Kg);



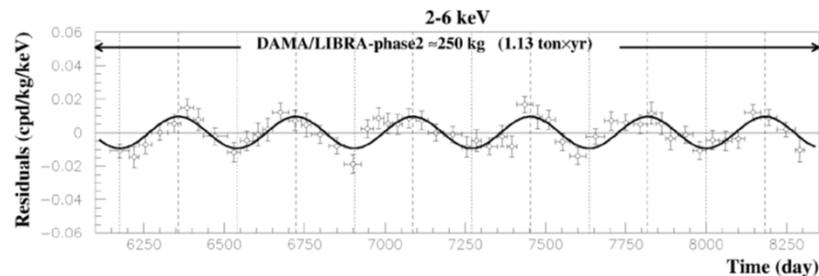
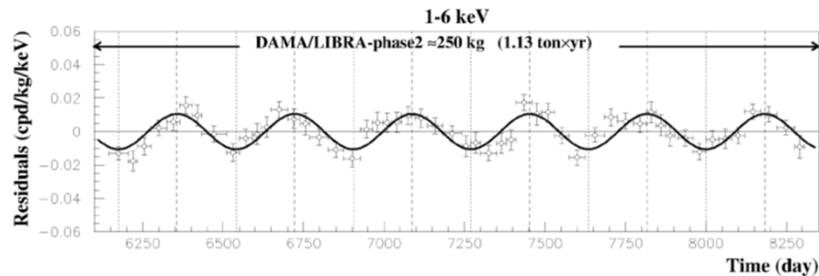
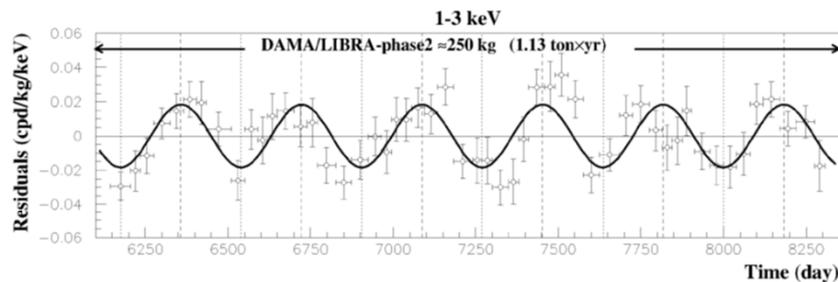
- Grazie alla maggior massa e alla maggior radiopurezza dei cristalli LIBRA e' nato con l'idea di confermare (o smentire) in maniera definitiva il risultato di DAMA

Lo conferma!

DM Model Independent Annual Modulation Result

experimental residuals of the single-hit scintillation events rate vs time and energy

DAMA/LIBRA-phase2 (1.13 ton × yr)



Absence of modulation? No

- 1-3 keV: $\chi^2/\text{dof}=127/52 \Rightarrow P(A=0) = 3 \times 10^{-8}$
- 1-6 keV: $\chi^2/\text{dof}=150/52 \Rightarrow P(A=0) = 2 \times 10^{-11}$
- 2-6 keV: $\chi^2/\text{dof}=116/52 \Rightarrow P(A=0) = 8 \times 10^{-7}$

Fit on DAMA/LIBRA-phase2

$\text{Acos}[\omega(t-t_0)]$;
continuous lines: $t_0 = 152.5 \text{ d}$, $T = 1.00 \text{ y}$

1-3 keV

$A=(0.0184 \pm 0.0023) \text{ cpd/kg/keV}$
 $\chi^2/\text{dof} = 61.3/51$ **8.0 σ C.L.**

1-6 keV

$A=(0.0105 \pm 0.0011) \text{ cpd/kg/keV}$
 $\chi^2/\text{dof} = 50.0/51$ **9.5 σ C.L.**

2-6 keV

$A=(0.0095 \pm 0.0011) \text{ cpd/kg/keV}$
 $\chi^2/\text{dof} = 42.5/51$ **8.6 σ C.L.**

The data of DAMA/LIBRA-phase2 favor the presence of a modulated behavior with proper features at 9.5 σ C.L.

Lo conferma!

- Anche gli ultimi risultati di DAMA/LIBRA (pubblicati a marzo 2018) confermano la presenza di questo segnale;
- Grazie a fototubi piu' performanti e meno radioattivi confermano il segnale anche ad energie piu' basse di prima (fra 1 e 3 keV)
- Verificano inoltre che ad alte energie (dove il segnale di DM non e' presente) NON c'e' modulazione annuale;
- Studiano inoltre che la modulazione non e' presente quando si vanno a vedere eventi in cui il segnale e' depositato in piu' cristalli;
- Studiano inoltre eventuali variazioni stagionali di tutti i parametri dell'esperimento (T, livello di Radon, flusso di N2, Pressione) per vedere se c'e' una qualche correlazione con la modulazione dei dati: non trovano niente di significativo;

Sembra proprio che vedano qualcosa. Ma e' Dark Matter?

5 Conclusions

The model independent results achieved by the second generation DAMA/LIBRA set-up in operation at the Gran Sasso National Laboratory confirms evidence of Dark Matter particles in the galactic halo with high confidence level; a cumulative C.L. of 8.2σ is reached when considering the data of the former DAMA/NaI experiment and the present ones of DAMA/LIBRA all together. In particular, deep quantitative analyses exclude any effect either from systematics or from side processes (temperature, noise, hardware or software procedures, background of whatever nature including also radon, neutrons and cosmic rays). We note that no experiment exists whose result can be directly compared with those presented here.

The wide sensitivity of the used target-detector material to many of the possible DM candidates and of the possible astrophysical, nuclear and particle Physics scenarios, the reached intrinsic radiopurity, the used approach, the specific performances and operating conditions, the large collected exposures of the former DAMA/NaI and of the present DAMA/LIBRA set-ups, have offered an unique possibility of an effective model independent investigation.

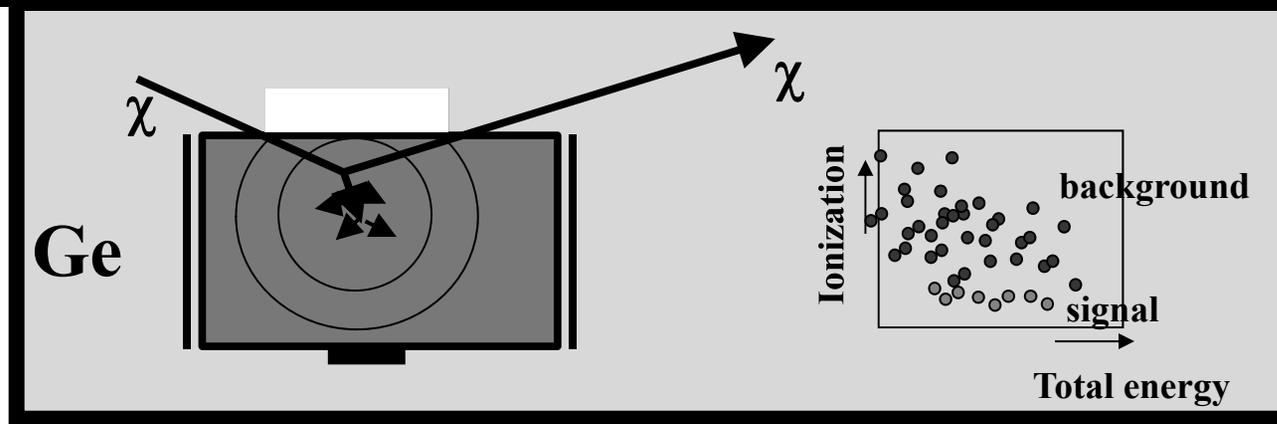
<http://arxiv.org/>

arXiv:0804.2741v1 [astro-ph]

Riassumendo

- **Fino ad ora ho considerato rivelatori piuttosto convenzionali: Ge e scintillatori inorganici che hanno il vantaggio di essere tecniche molto ben conosciute;**
- **I margini di miglioramento per esplorare zone sempre piu' ampie dello spazio dei parametri ($\sigma - M_{Wimp}$) con queste tecniche convenzionali sono due:**
 - Aumento della massa di rivelatore;
 - Aumento della radiopurezza;
- **Queste strade vanno sicuramente perseguite;**
- **LIBRA per esempio va in questa direzione;**
- **I rivelatori che offrono un margine piu' ampio di miglioramento sono pero' probabilmente quelli che sfruttano tecniche meno convenzionali, come quella bolometrica;**
- **In particolare, se vengono usati in modalita' "ibrida" , cioe' sia come bolometri che come rivelatori a ionizzazione;**

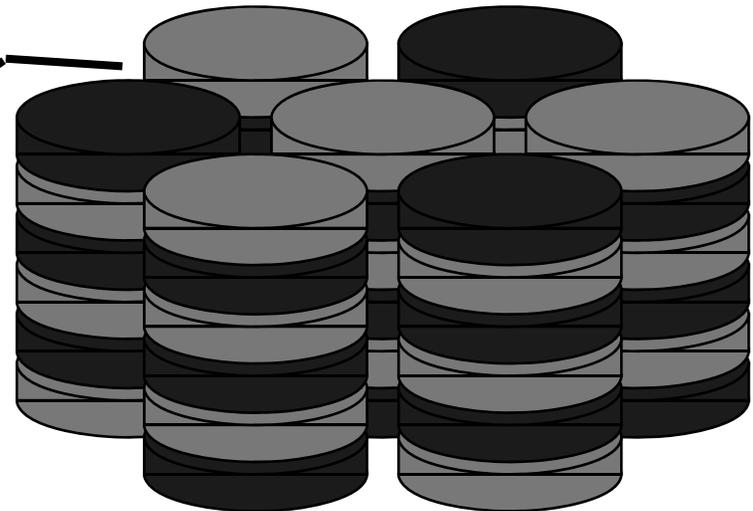
Rivelatori ibridi



- Lo stesso cristallo viene usato simultaneamente come bolometro e come rivelatore a stato solido (o scintillatore);
- La possibilità di discriminare segnale da fondo si basa sul fatto che (a parità di energia) le particelle a bassa densità di ionizzazione come β e γ producono più coppie elettrone/buca rispetto alle particelle ad alta densità di ionizzazione (nuclei);
- In quanto bolometro il rivelatore registra tutta l'energia della particella (E_{tot});
- In quanto rivelatore a stato solido rivela solo la parte di energia che va in produzione di coppie elettrone/buca (E_{ion});
- Calcolo il rapporto $R = E_{ion} / E_{tot}$
- R sarà maggiore per le particelle a bassa densità di ionizzazione;

Rivelatori ibridi: bolometri + stato solido CDMS-II (Cryogenic Dark Matter Search)

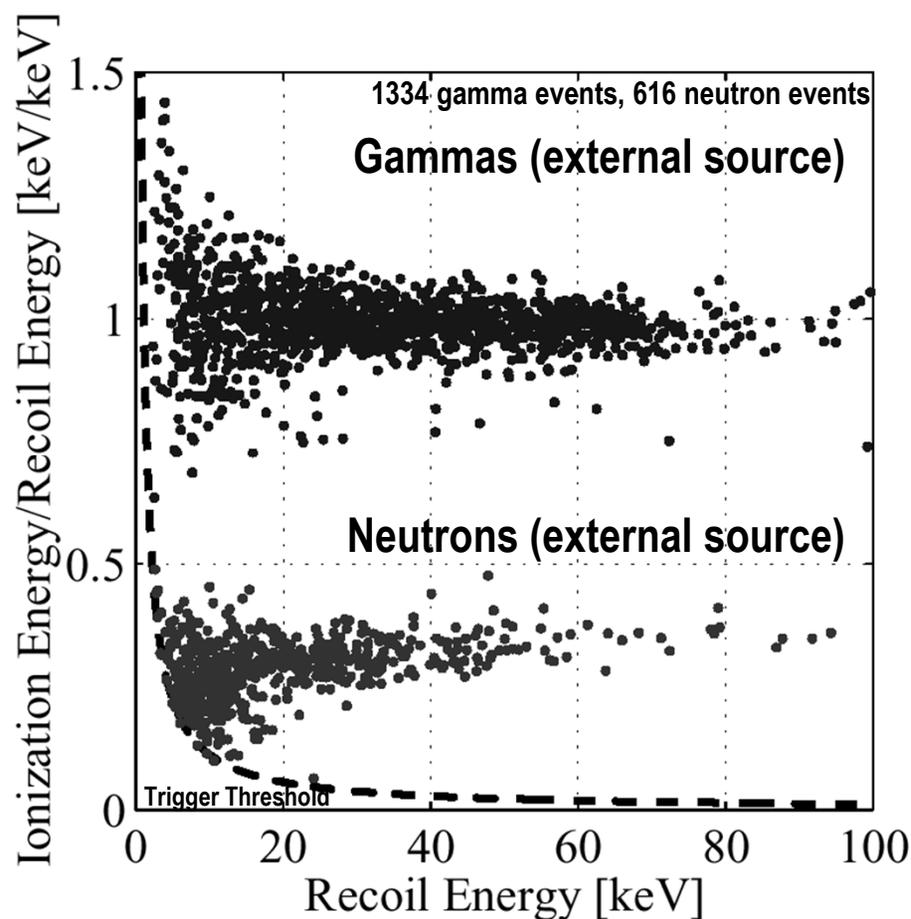
- Situato nella miniera di Soudan in Minnesota a 780m di profondita';
- Utilizza sia rivelatori a Silicio sia rivelatori a Germanio (ma quelli a Germanio sono piu' sensibili alle interazioni spin-independent di Wimps e quindi sono preferiti);
- Usano in totale 30 rivelatori (19 Ge + 11 Si);
- Sia i rivelatori di Si, sia i rivelatori di Ge sono usati in modalita' di bolometri e in modalita' di rivelatore a stato solido allo stesso tempo;
- Questo significa che rivelano sia i fononi, sia le coppie elettrone-buca prodotte dal rinculo del nucleo in seguito a interazione con Wimp



Rimozione del fondo in CDMS-II

La strategia di identificazione del fondo si basa sul fatto che ciascun Ge (e Si) funziona da bolometro e da rivelatore a stato solido;

- Come bolometro e' in grado di misurare tutta l'energia delle particelle;
- Come rivelatore a stato-solido rivela solo l'energia persa per ionizzazione;
- La frazione di energia che va in produzione di coppie e-buca e' maggiore per particelle β o γ che per un nucleo;
- Questo permette di identificare se un dato evento e' dovuto a rinculo di nucleo o a passaggio di elettrone/ γ ;

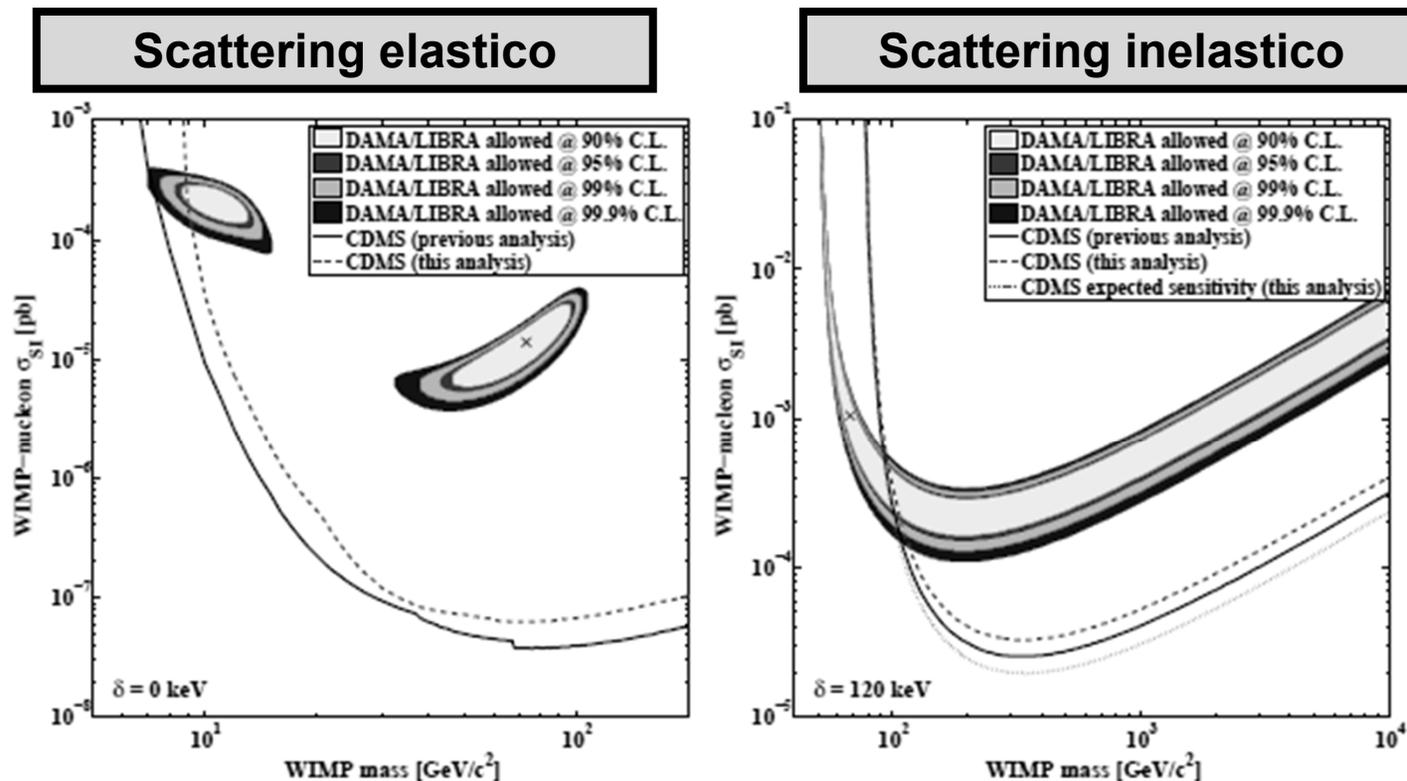


Risultati di CDMS-II (2011)

- **Il metodo descritto sopra permette di rimuovere il fondo dovuto a elettroni o gamma con una efficienza del 99.9%;**
- **Analizzano i dati in una finestra di energia fra 10-150 keV ;**
- **Solo tre eventi superano tutti i criteri di selezione;**
- **La probabilita' che questi 3 eventi siano una fluttuazione del fondo e' 11%;**
- **Di fatto con questa misura escludono quasi completamente la regione permessa dai risultati di DAMA nell'ipotesi che lo scattering Wimps-nucleone avvenga in modo elastico;**
- **Se si include la possibilita' che le modalita' di interazione dello Wimp siano diverse (per esempio interazione inelastica, o spin-dependent) la situazione puo' cambiare significativamente;**

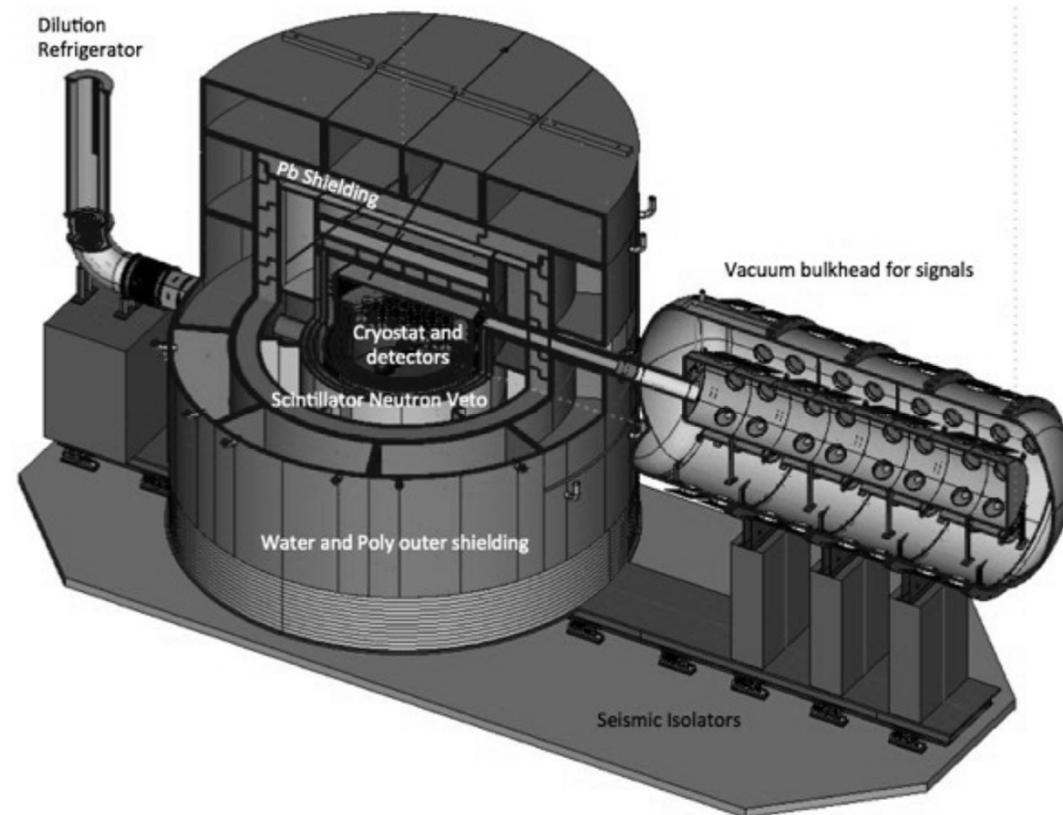
Risultati di CDMS-II (2011)

- Se si assume per esempio che lo scattering non sia elastico, ma possa avvenire solo se lo Wimp transisce a uno stato eccitato W' , con $\delta = M_{W'} - M_W$
- La regione permessa dai risultati di CDMS-II e' diversa e si confronta diversamente con i risultati di DAMA;



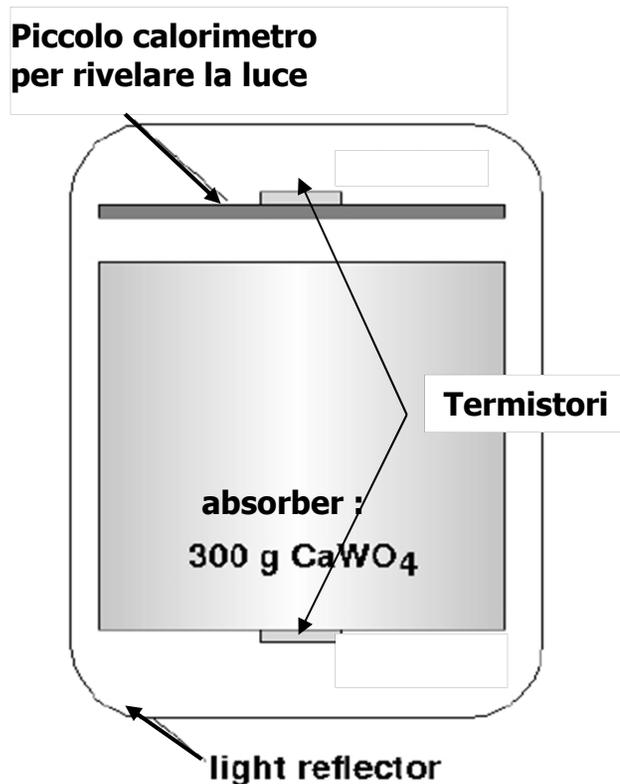
Super-CDMS a SNOLAB

- 30 rivelatori distribuiti su 5 torri;
- Esperimento approvato e in fase di realizzazione: punta ad abbassare la soglia → sensibile a Wimps di bassa massa (2 GeV)



Rivelatori ibridi: bolometri+scintillatori CRESST

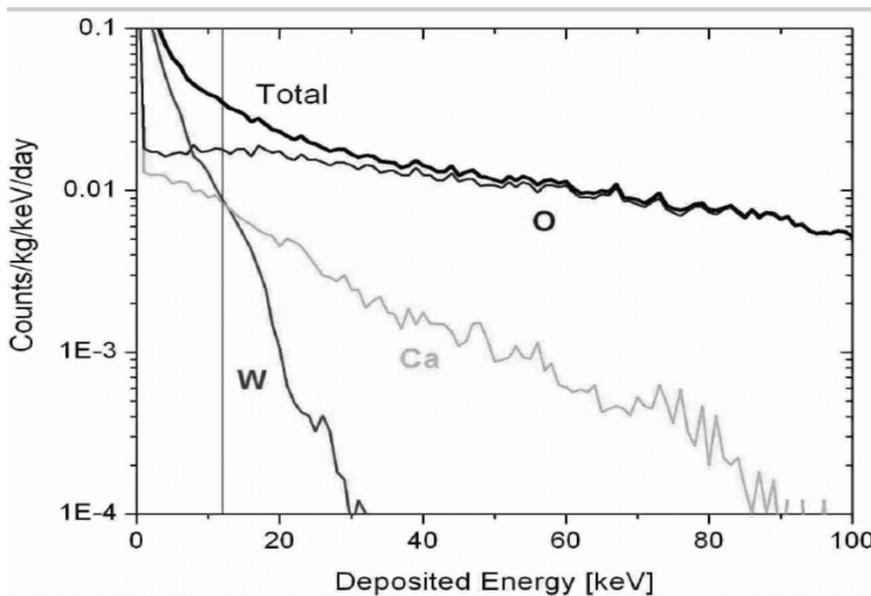
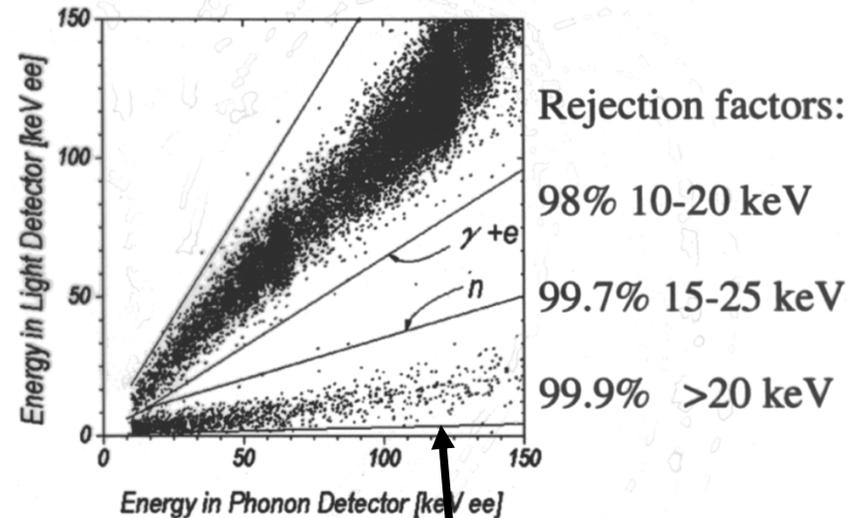
- Installato ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso;
- Cristalli di CaWO_4 da 300g l'uno operano sia come bolometri che come scintillatori;
- N.B.: la luce non viene rivelata da PMT in questo caso! Non potrebbero operare a temperature criogeniche: si usano dei fotodiodi;



- La capacita' di discriminare il fondo dal segnale in CRESST si basa sul fatto che le particelle a bassa densita' di ionizzazione come β , γ producono in proporzione piu' luce dei nuclei di rinculo;

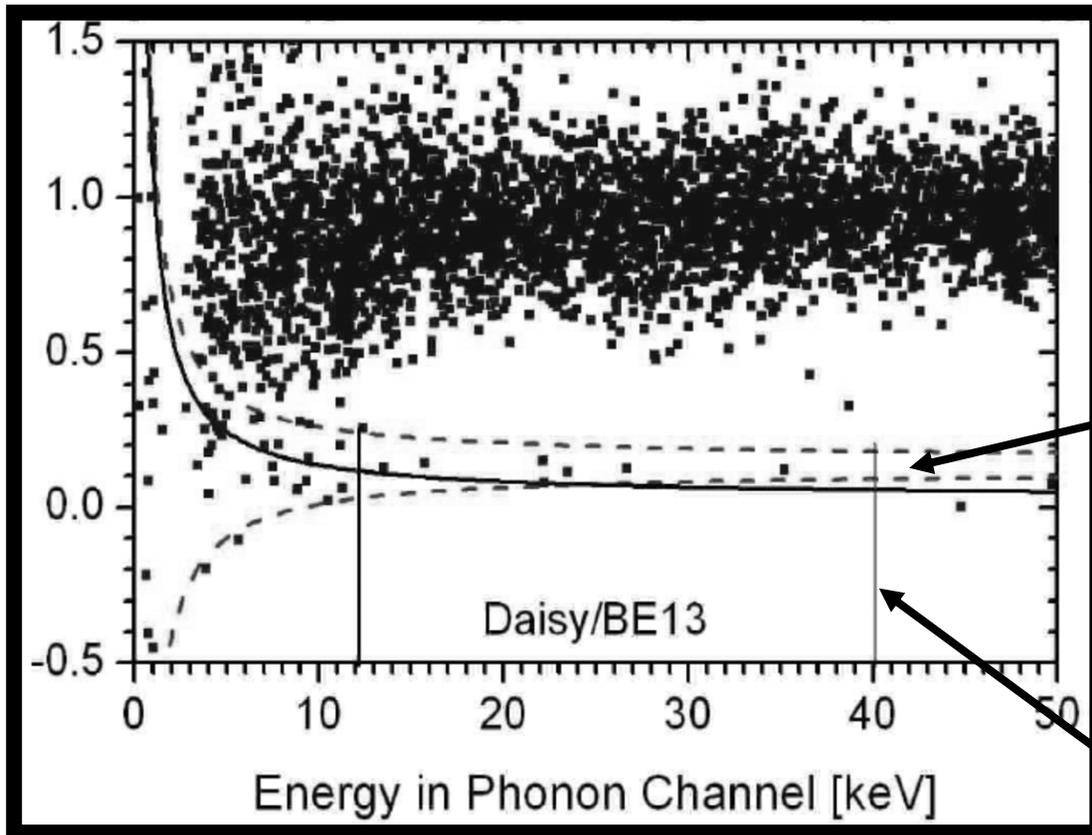
- Come al solito questo metodo non permette di distinguere fra il rinculo dei nuclei dovuto a WIMPs e quello dovuto ai neutroni;

- In realta' in CRESST si puo' sfruttare un'altra possibilita' per eliminare il contributo dovuto a neutroni, basata sul fatto che i cristalli sono composti da W, O, Ca;



- I neutroni tendono a interagire soprattutto con l'O;
- Al di sopra di 20 keV la probabilita' che interagiscano con W e' piccolissima;
- Invece gli Wimps tendono a interagire di piu' con W in quanto $\sigma \sim A^2$;
- Il rinculo su W puo' essere distinto da quello sugli altri nuclei perche' produce meno luce di scintillazione;

Risultati di CRESST-I



Regione popolata da β e γ
(fondo)

La regione fra le due curve
tratteggiate dovrebbe essere
popolata da rinculo di O, Ca
dovuto a neutroni (fondo)

La regione al di sotto della
curva nera dovrebbe essere
popolata da rinculo di W
(segnale!)

Nel 2011 hanno pubblicato una possibile evidenza di segnale poi smentita (fondo radioattivo dagli sostegni in rame del rivelatore).

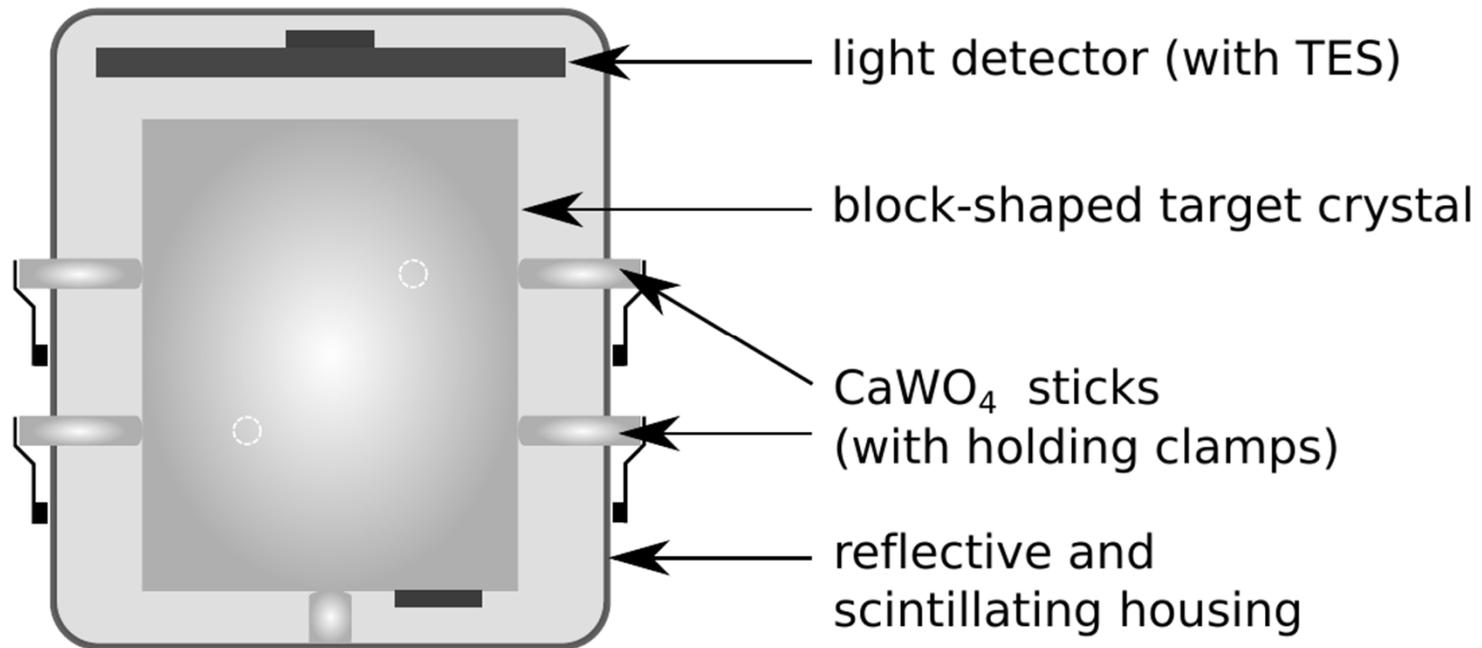
CRESST-II

•Nel 2013 CRESST e' stato significativamente migliorato per ridurre il fondo superficiale tramite diversi accorgimenti:

•18 cristalli di CaWO_4

- 12 cristalli convenzionali ma con sostegni in rame piu' puliti
- 6 cristalli con sostegni fatti di materiale scintillante

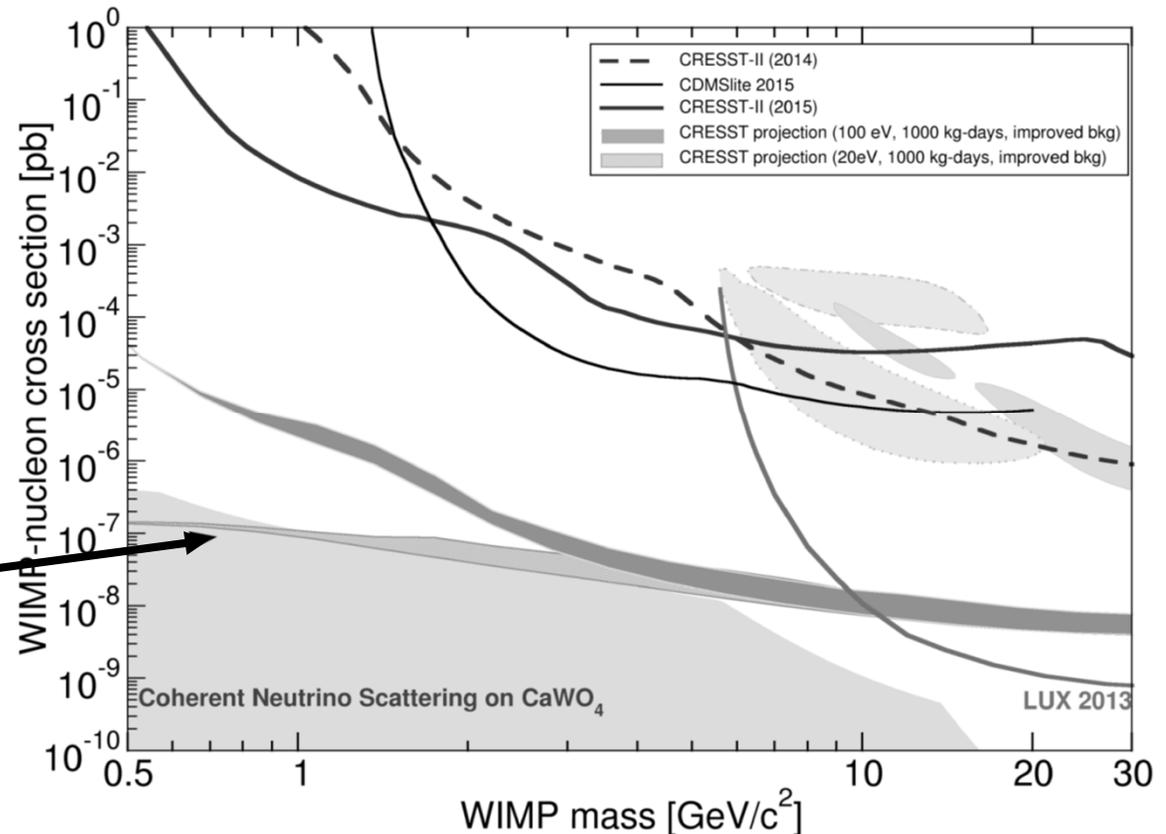
•Il "segnale" e' sparito!



CRESST-III

- Nel 2016 e' partito il primo test di cristalli piu' piccoli ($M \sim 24$ g) con una eccellente radiopurezza (rapporto segnale/rumore migliorato di un fattore 6)
- Abbassano la soglia fino a 100 eV e oltre;

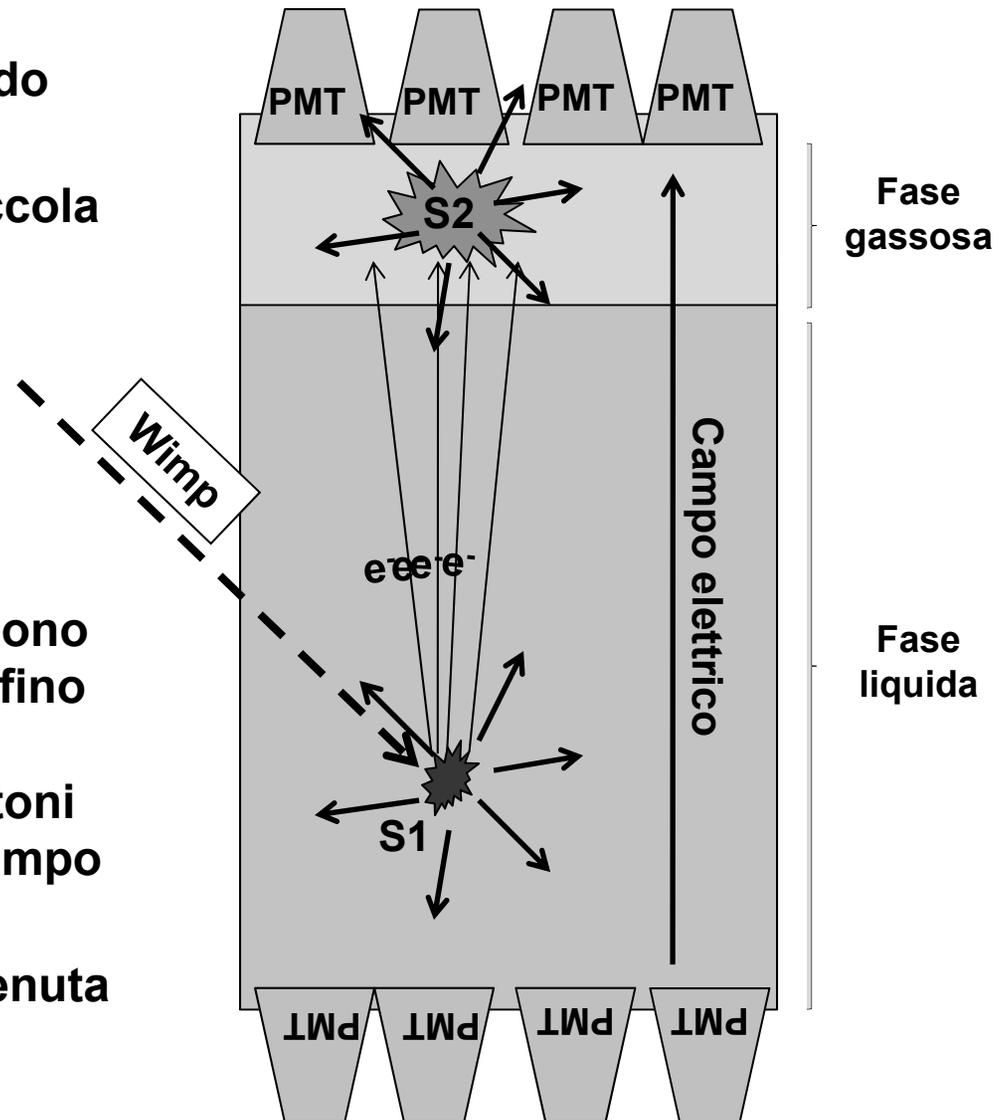
- In prospettiva, con 100 cristalli ultra-puri e una soglia di 20 eV potrebbero arrivare a vedere lo scattering di neutrini solari



Gas nobili allo stato liquido e gassoso (rivelatori a doppia-fase)

L'idea e' la seguente:

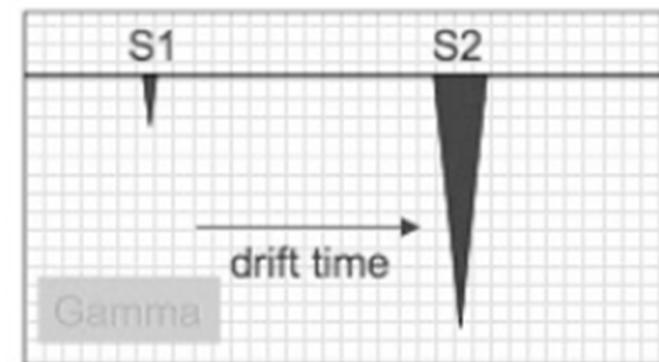
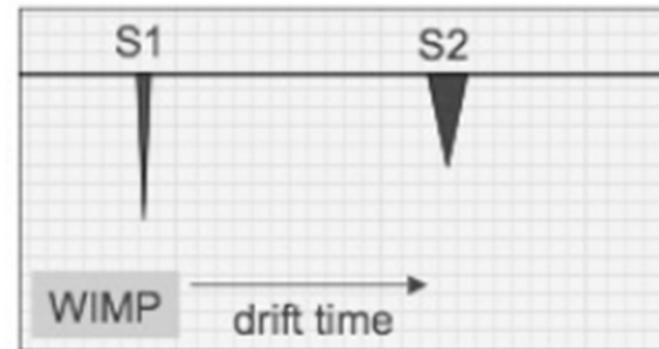
1. Si usa il gas nobile allo stato liquido come bersaglio per l'interazione;
2. Il rinculo del nucleo causa una piccola traccia di atomi ionizzati (ione-elettrone);
3. Parte di questi atomi ionizzati si ricombina velocemente con l'emissione di fotoni (segnale di scintillazione primaria S1);
4. Gli elettroni non ricombinati vengono fatti driftare in un campo elettrico fino a raggiungere la fase gassosa del rivelatore dove producono altri fotoni per scintillazione dopo un certo tempo τ ;
5. τ dipende dal punto in cui e' avvenuta l'interazione dello Wimp



Discriminazione del segnale dal fondo

Il passaggio di una particella (Wimp o fondo di vario genere) nel rivelatore provoca quindi due segnali S1 ed S2 separati da un tempo caratteristico che dipende dal punto in cui e' avvenuta l'interazione e dalle dimensioni del rivelatore

- Il segnale dovuto a Wimp pero' ha $S1 > S2$ in quanto il rinculo del nucleo porta a una densita' di coppie ioni-elettroni molto elevata → quindi la probabilita' di ricombinazione e quindi di emissione di luce S1 e' molto alta rispetto alla quantita' di elettroni che rimangono liberi di muoversi e produrre la luce S2;
- Una particella β o γ invece produce una densita' di coppie elettroni-buca piu' bassa → la probabilita' di ricombinazione e' piu' bassa e quindi $S1 < S2$;

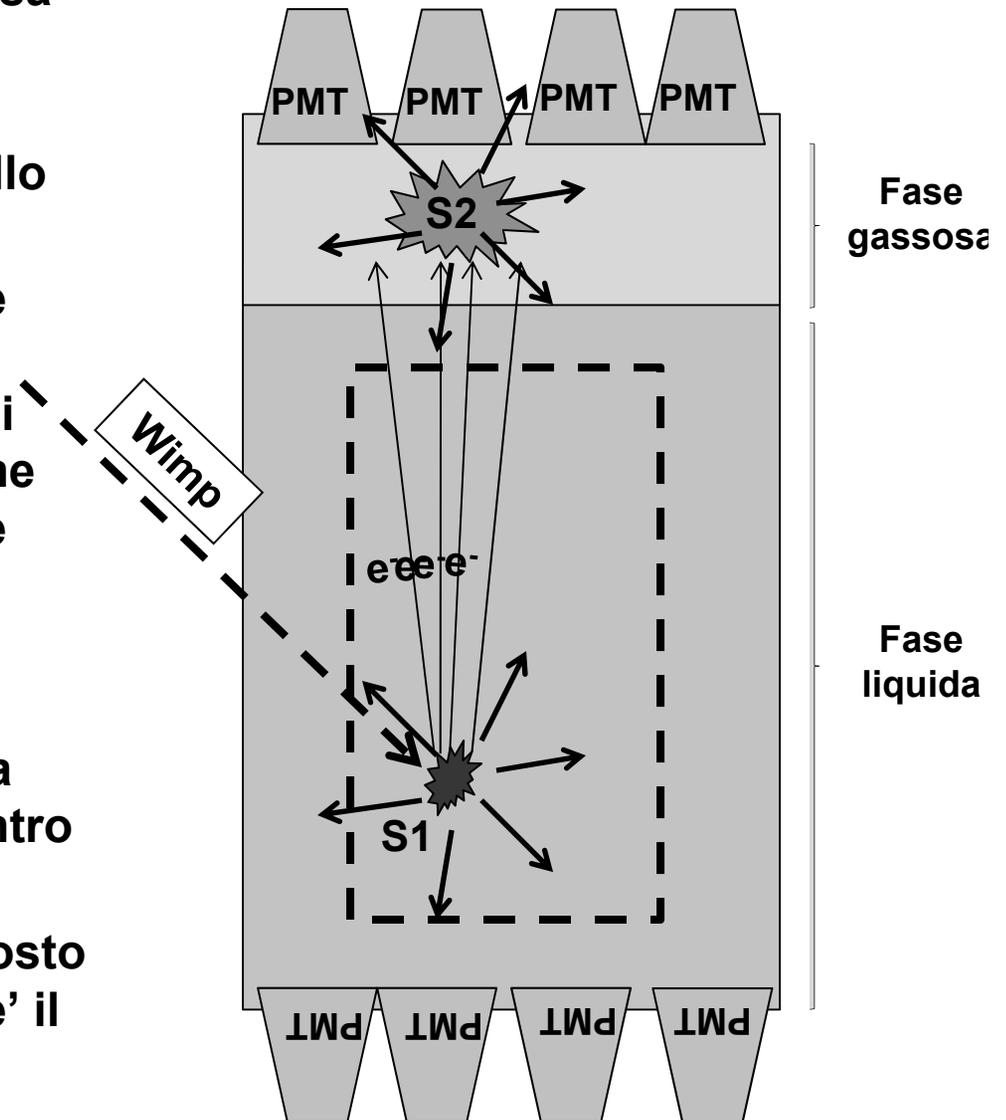


$$(S2/S1)_{wimp} \ll (S2/S1)_{gamma}$$

Purtroppo come al solito i neutroni si comportano esattamente come gli Wimps e quindi vanno eliminati con opportune schermature.

Il progetto Xenon

- Usa Xenon in fase liquida e gassosa come bersaglio;
- Grande A (130) → alto rate per l'interazione Spin Independent dello Wimp (che si presume vada $\sim A^2$);
- Lo Xenon liquido e' molto denso e quindi e' 'autoschermante': cio' significa che selezionando solo gli eventi che avvengono nella regione piu' interna del rivelatore si riduce significativamente la presenza di fondo esterno;
- Per fare cio' si ricostruisce la posizione dell'interazione primaria tramite il tempo di drift e il baricentro della luce secondaria S2 raccolta;
- Lo Xenon e' inoltre di per se piuttosto puro: un possibile contaminante e' il kripton che pero' si sa come rimuovere;

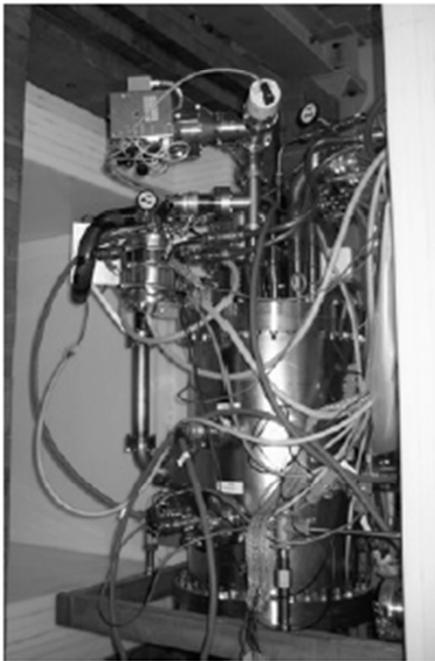




The XENON Roadmap



past
(2005 - 2007)



XENON10

Achieved (2007) $\sigma_{SI} = 8.8 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$

Phys. Rev. Lett. **100**, 021303 (2008)

Phys. Rev. Lett. **101**, 091301 (2008)

current
(2008-2010)

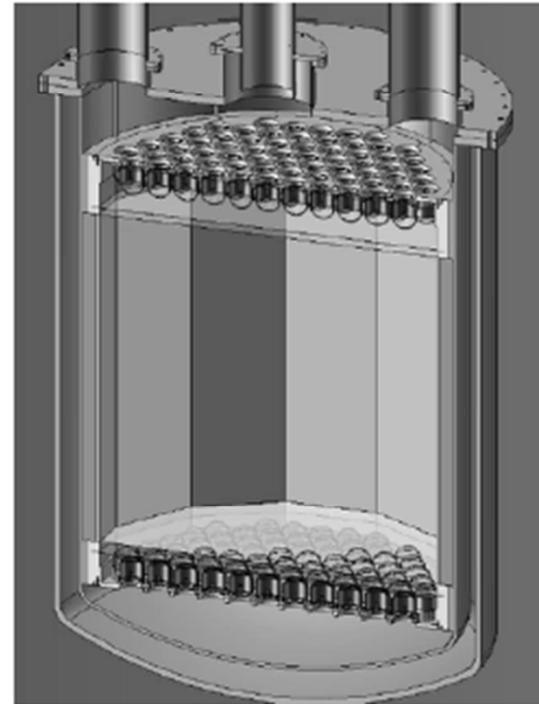


Cilindro di
 $h=30\text{cm}$, $d=30\text{cm}$

XENON100

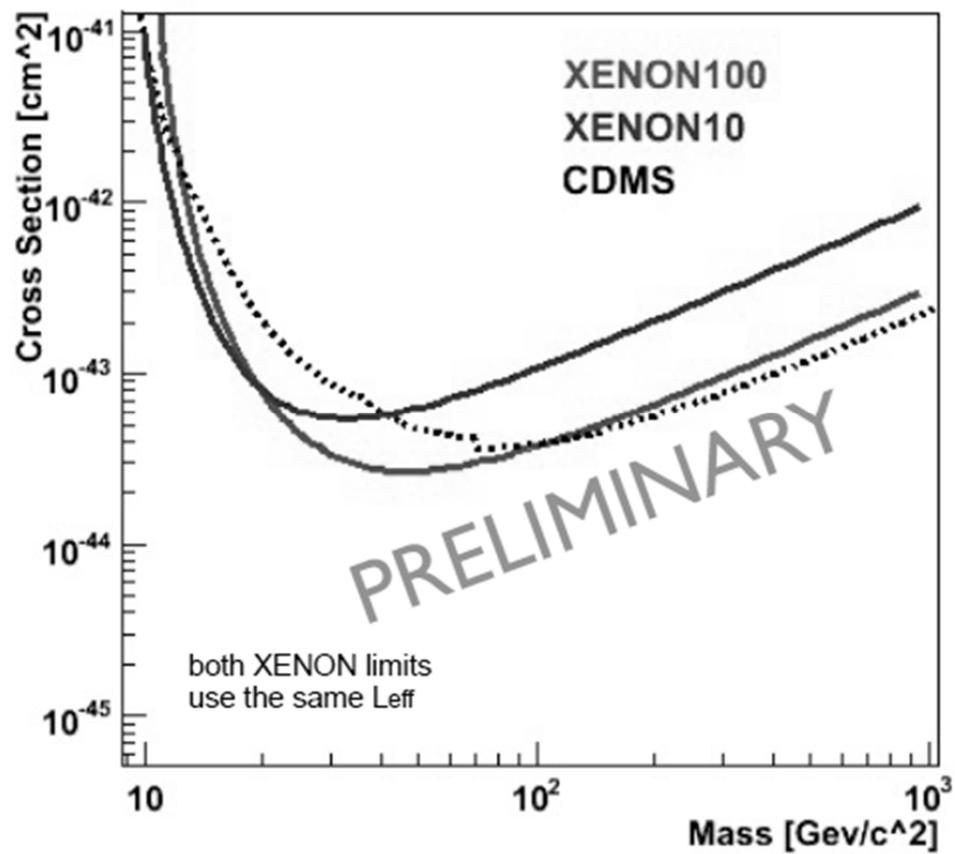
Projected (2010) $\sigma_{SI} \sim 2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$

future
(2011-2015)



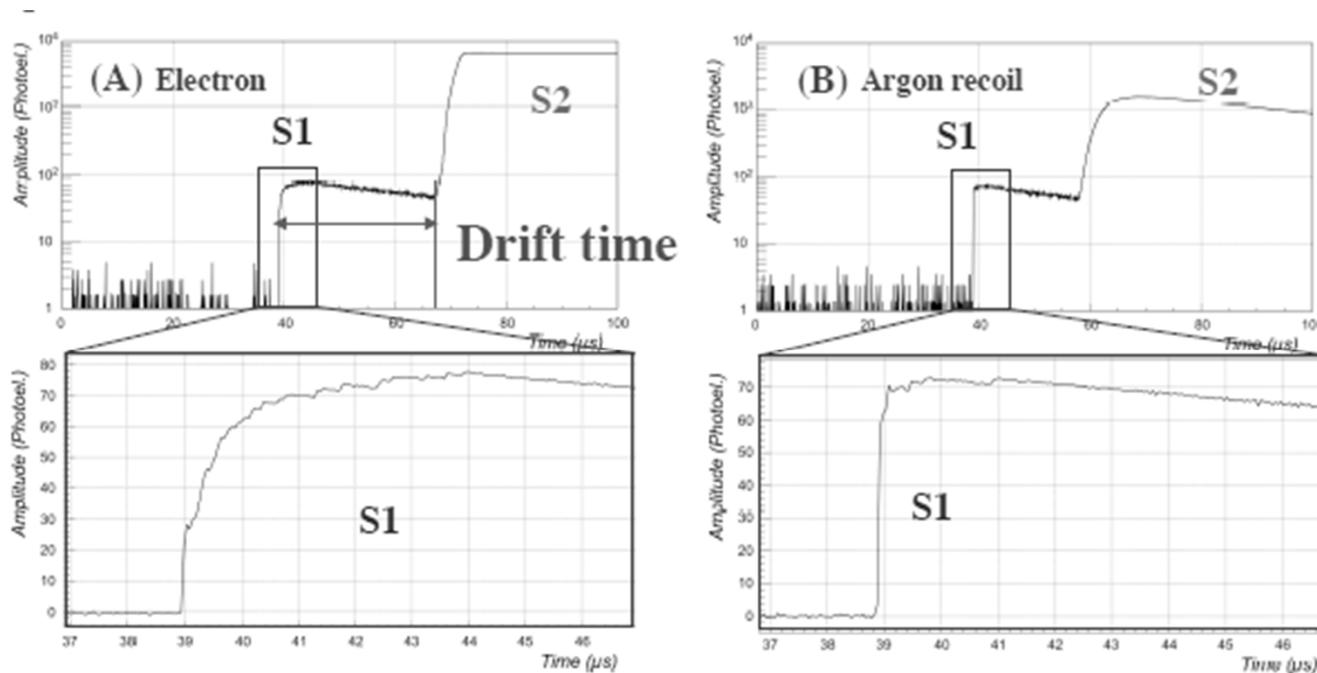
XENON1T

Goal: $\sigma_{SI} < 10^{-46} \text{ cm}^2$



Il progetto Dark-Side: Argon liquido a doppia fase

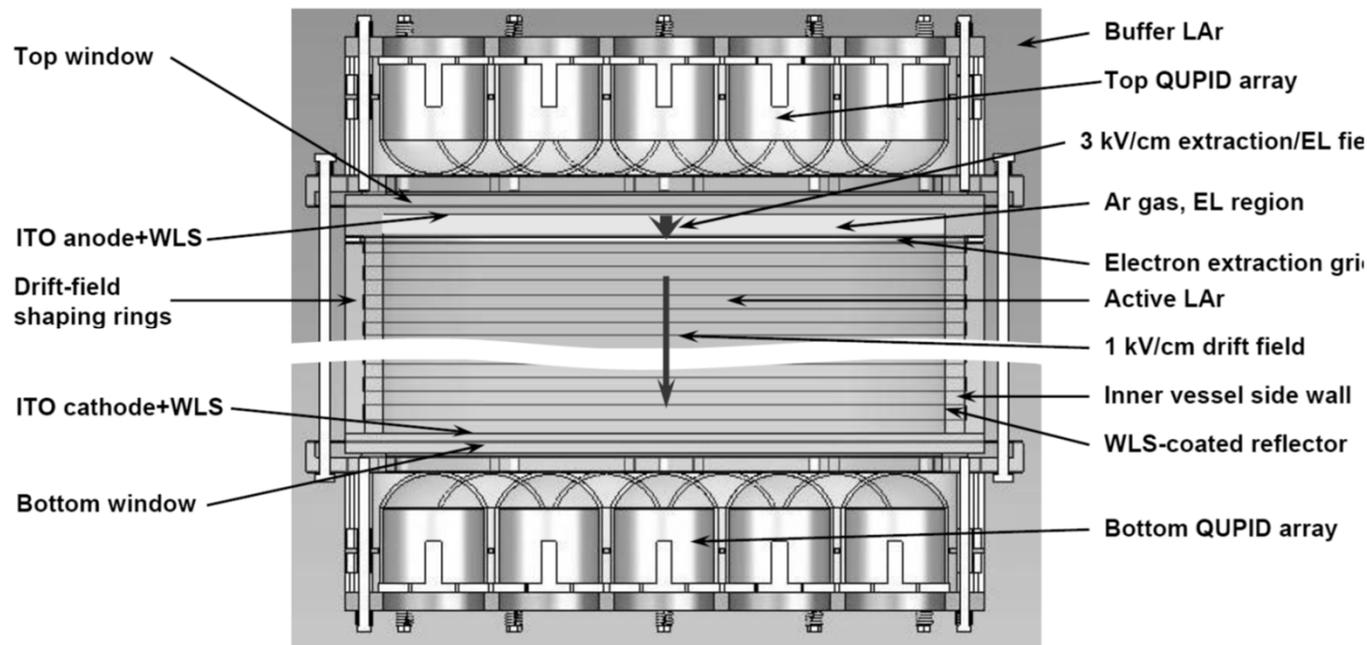
- Metodo aggiuntivo di selezione del segnale di Wimp dal fondo basato sulla differenza di impulso della scintillazione primaria S1: il segnale indotto da β e γ e' piu' lento rispetto a quello indotto dal rinculo del nucleo;



- Segnale dovuto a β e γ : S1/S2 piu' piccolo e S1 e' piu' lento;
- Segnale dovuto a rinculo di nucleo: S1/S2 piu' grande e S1 e' piu' veloce;

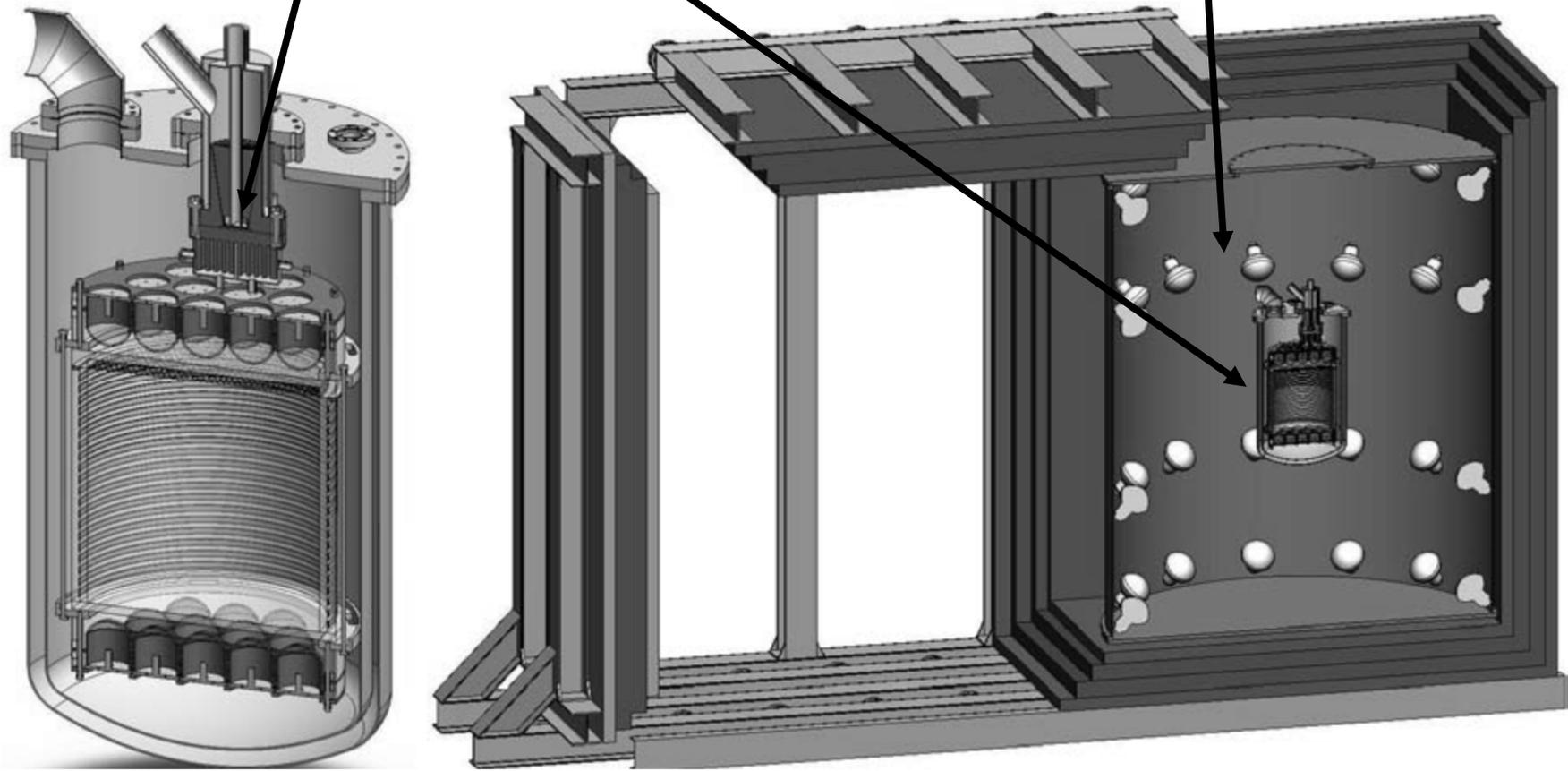
DarkSide50: 50 Kg di Argon

- Dopo test di fattibilita' di ~ 10 Kg si e' al momento nella fase intermedia di 50 Kg;
- Per la rimozione dei neutroni l'esperimento prevede un veto attivo di scintillatore liquido che circonda la camera principale contenente 50Kg di Ar liquido;
- PROBLEMI: l'Ar ha l' isotopo ^{39}Ar che decade beta ($Q=565$ keV) e rappresenta un fondo intrinseco al rivelatore stesso;
- Si utilizza Ar estratto in profondita' dove la contaminazione da ^{39}Ar e' trascurabile;
- Prima test al Gran sasso (2013-2014) con Argon liquid comune (non estratto in profondita');

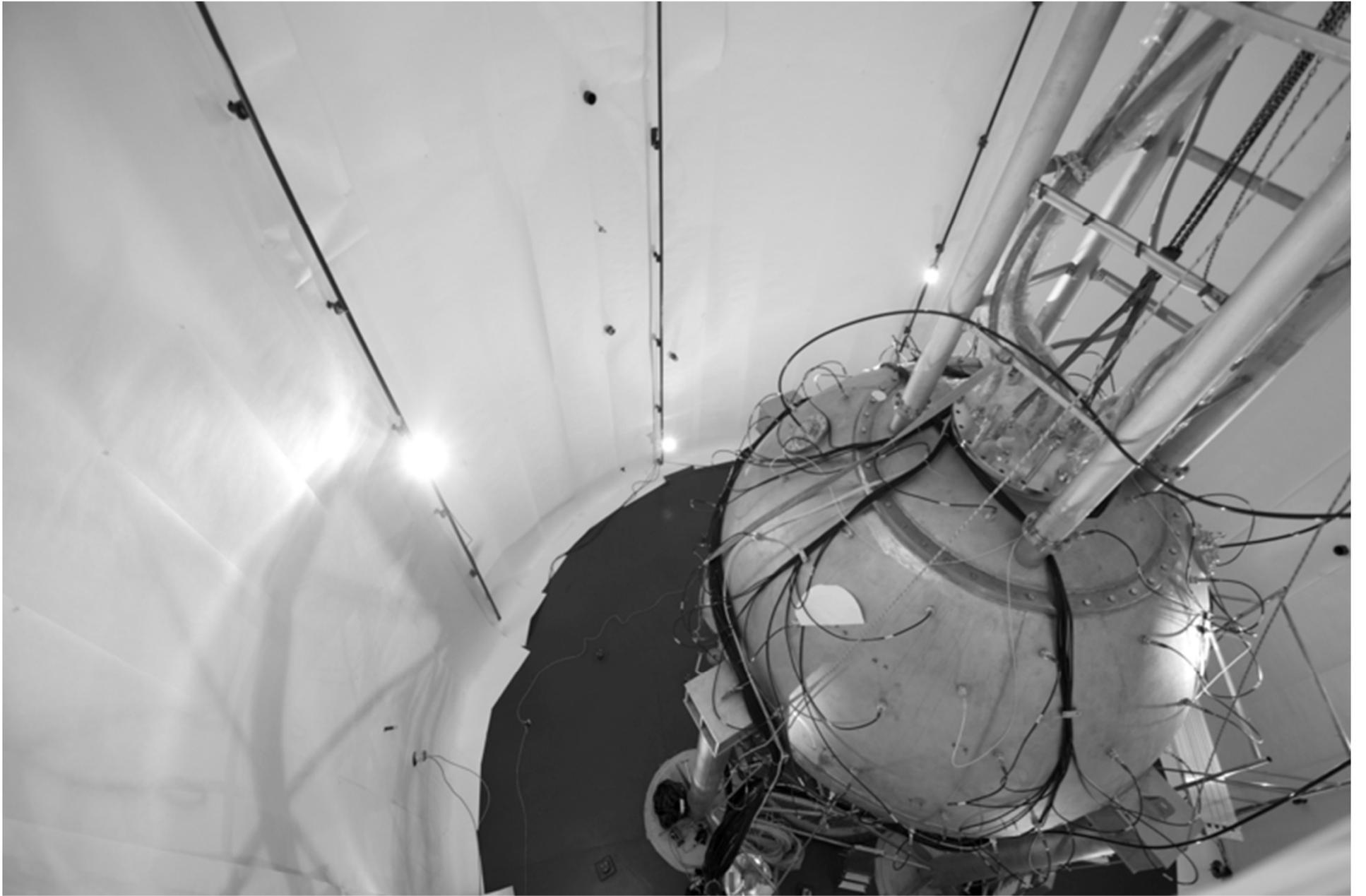


LAr (150 Kg, fiduciale 50 Kg)

**LAr (150 Kg, fiduciale 50 Kg)
Immerso in scintillatore liquido
che serve come veto per i
neutroni**







Altre idee ?

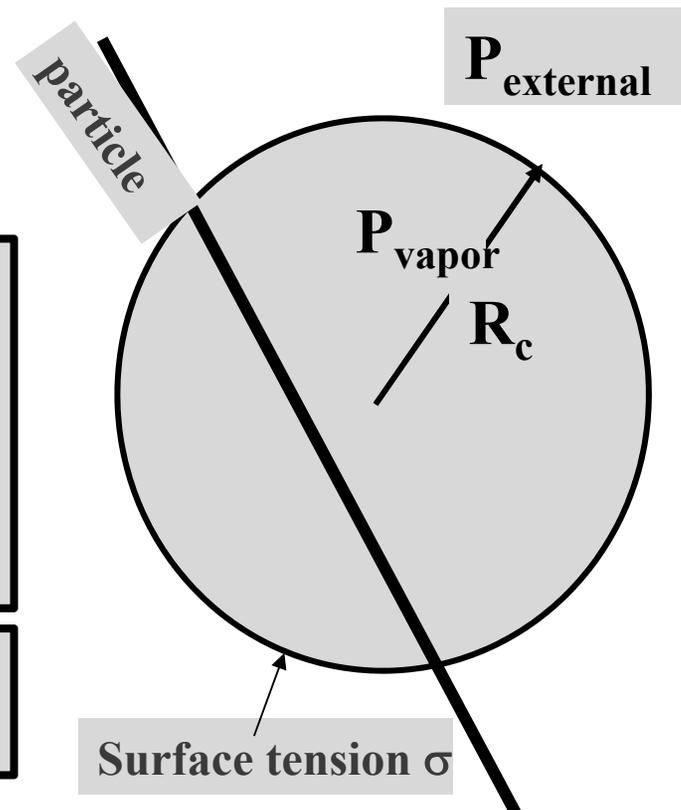
Ricerca di materia oscura con rivelatori a bolle

- Utilizzo di liquidi in condizioni “surriscaldate” (ovvero a temperature prossime a quella di ebollizione);
- Il passaggio di una particella provoca la produzione di una bolla di vapore;
- Se il raggio della bolla $R > R_c$ (ovvero se dE/dx della particella e' maggiore di un valore critico) la bolla e' in grado di espandersi; altrimenti implode e non risulta visibile;

Il rinculo di un nucleo dovuto a WIMP provoca la produzione di una bolla che puo' venire fotografata.

La potenza di questa tecnica e' che in opportune condizioni di lavoro, il rivelatore e' cieco alle particelle debolmente ionizzanti (e^- , γ). Quindi una buona parte del fondo e' automaticamente eliminato;

Naturalmente neutroni e particelle α sono fondi da eliminare



Tecnica impiegata in tre modi diversi

CAMERA A BOLLE (esp. COUPP);

- **Camera a bolle convenzionale;**
- **Dopo che la bolla si e' formata c'e un tempo morto piuttosto lungo;**

SDD Super Heated Droplet Detector (esp. Picasso);

- **Goccioline di liquido surriscaldato in sospensione in un gel;**
- **Sistema molto piu' stabile, ma difficolta' a scalare a grandi masse**

Geyser (PICASSO+?, MOSCAB?)

- **Potrebbe essere il metodo del futuro;**
- **Tecnica che permette di ristabilire dopo l'enucleazione della bolla la condizione di partenza in poco tempo (< 1 sec);**

Discriminazione fondi: neutroni e particelle alpha

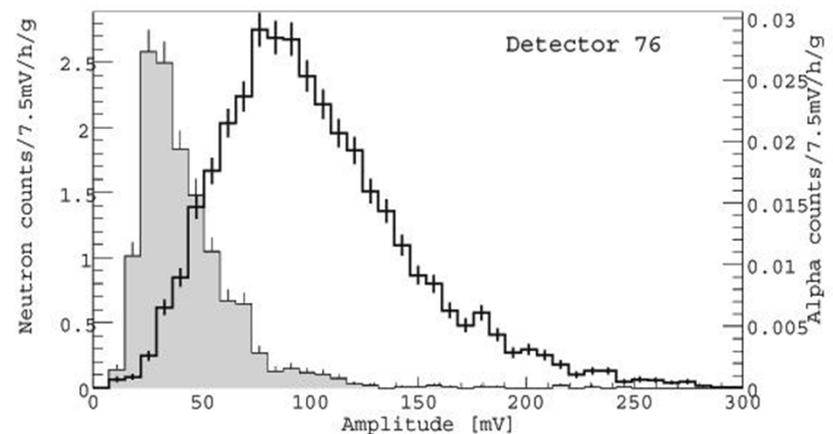
- Come detto, per costruzione, i rivelatori che utilizzano la tecnica a bolle sono “ciechi” alle particelle debolmente ionizzanti (elettroni, gamma);
- I neutroni possono venire discriminati in quanto producono una catena di bolle (mentre lo Wimp interagisce al piu’ una volta!);
- Le particelle α possono venire eliminate tramite discriminazione acustica;

DISCRIMINAZIONE ACUSTICA DELLE PARTICELLE ALPHA

- Le bolle emettono ultrasuoni durante la loro crescita, portandosi informazioni relative ai primi momenti della loro formazione.
- Vi è una significativa differenza tra ampiezze di eventi indotti da nuclei o da particelle alpha. (*PICASSO Collaboration, New J. Phys. (2008) arXive: 0807.1536*);

In particolare, le particelle alpha sono “piu’ rumorose” rispetto ai nuclei in quanto fanno un percorso piu’ lungo ($\sim 40 \mu\text{m}$);

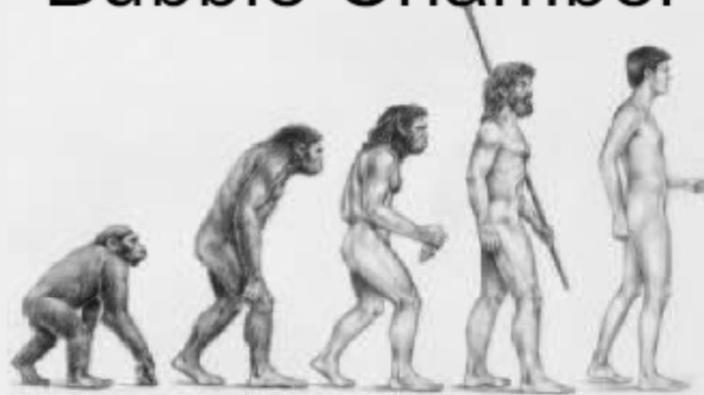
• Questo permette di eliminarle in maniera efficiente;



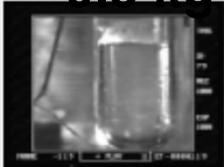
The COUPP experiment

Chicagoland Observatory for Underground Particle Physics

COUPP Bubble Chamber Program



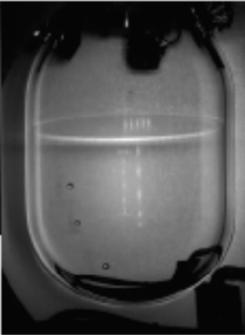
0.3 kg



Test tube



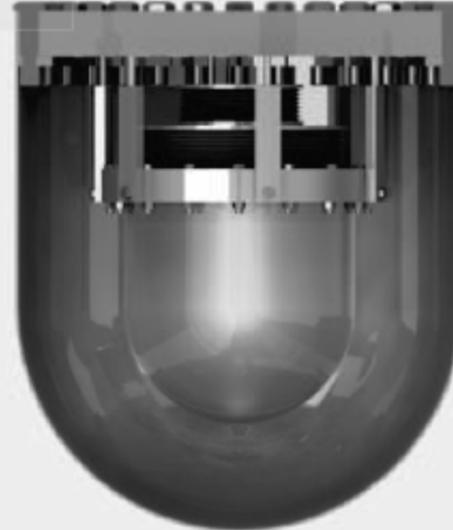
COUPP 2kg



COUPP 4kg



COUPP 60kg



COUPP 500kg

Progetto

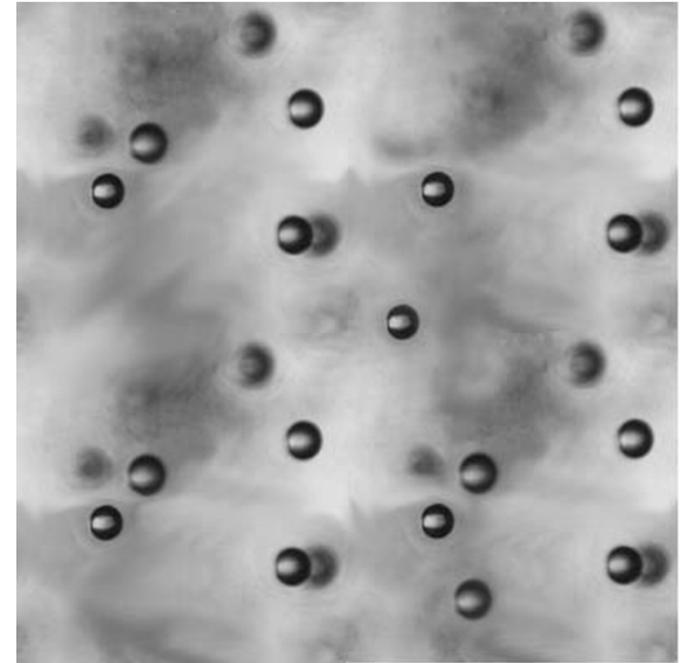
Funzionanti

In costruzione

SDD : Superheated Droplet Detector

esperimento PICASSO

- Matrice di Gel+Freon (C_4F_{10});
- 150 μm goccioline di C_4F_{10} ;
- Temperatura e P ambiente;
- La temperatura d'operazione determina la soglia di energia
- $T=45\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow E_{\text{th}} = 2\text{ keV}$



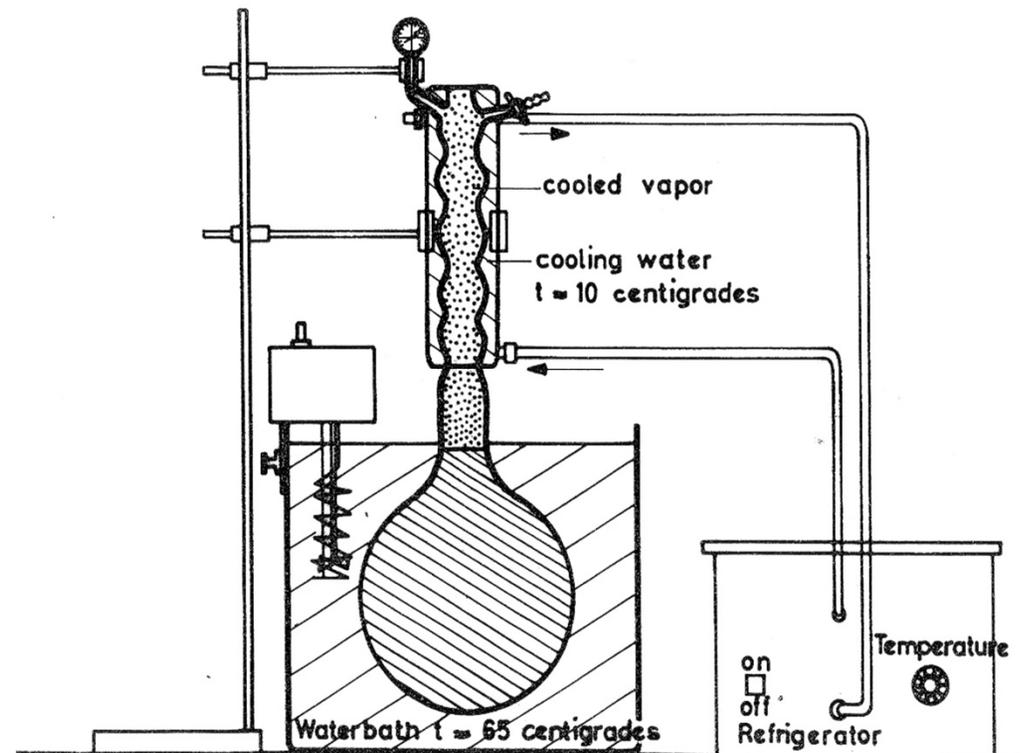
FATTI NEGATIVI:
-Scarsa quantità di materia
Massima quantità raggiunta
~2 kg.



IL FUNZIONAMENTO DEL GEYSER

Ne è stato costruito uno solo (a Berna da B.Hahn e H.W.Reist nel 1973 per ricerche di fisica nucleare- elementi transuranici);

- Il liquido è tenuto a temperatura T_2 (es. 65°) con un bagno termico;
- -Il vapore sopra la superficie del liquido è tenuto a temperatura $T_1 < T_2$ (es. 10°) raffreddando il collo della bottiglia (con acqua);
- se c'è un rilascio locale di energia (rinculo di un nucleo), si crea una bolla che diventa supercritica e cresce a valori grandi *spingendo il liquido nel collo della bottiglia.*

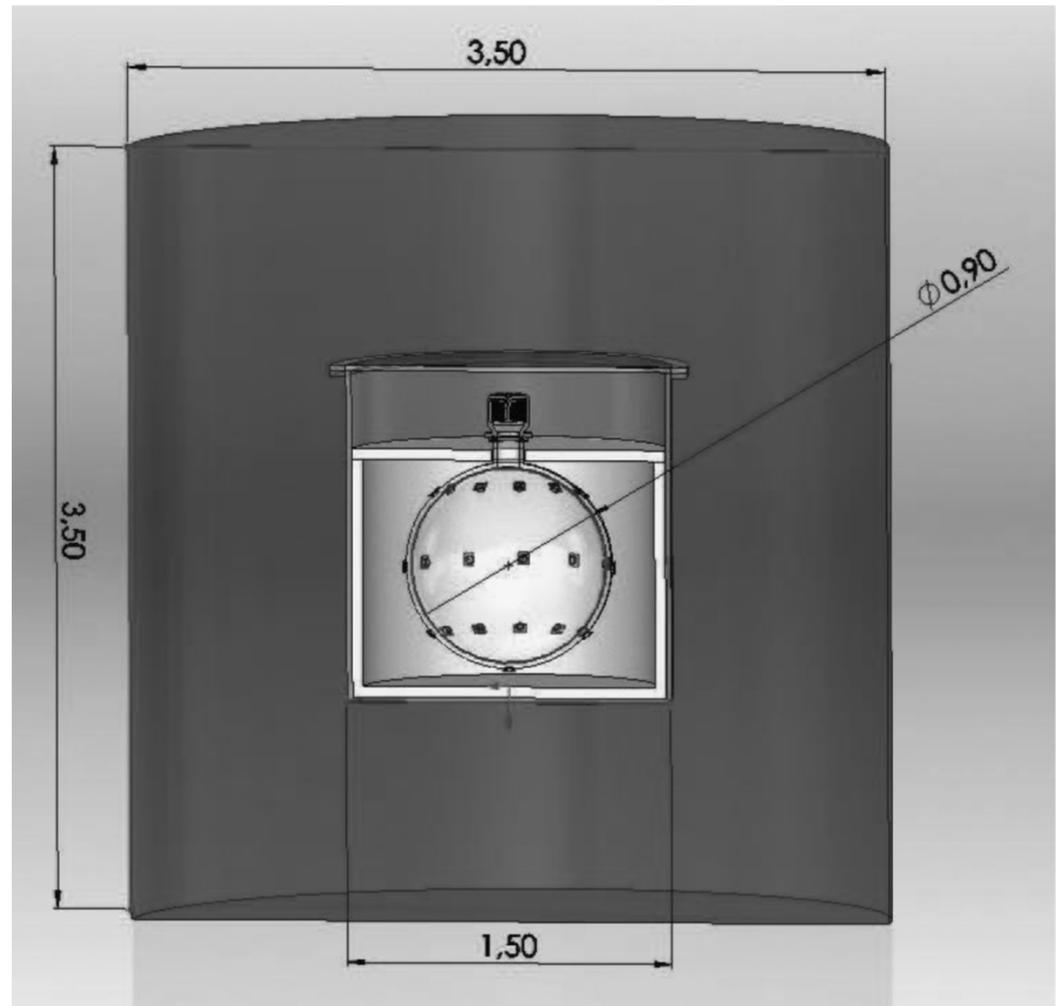


- il vapore caldo nel collo ricondensa;
- *lo stato metastabile è automaticamente reinstallato (Tempo < 1 s).*

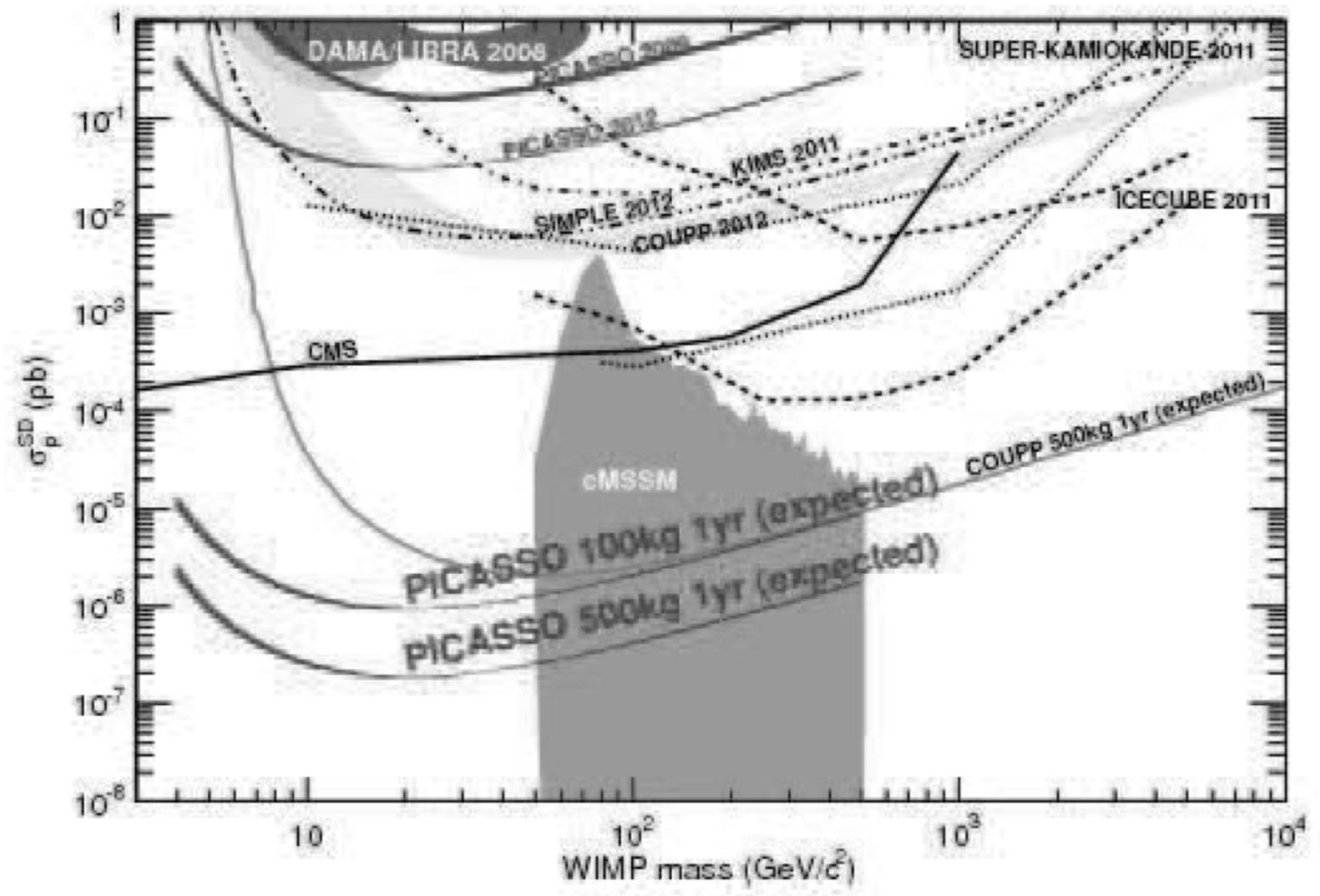
Proposta di PICASSO+

Si propone di utilizzare la tecnica Geyser per arrivare a un rivelatore di ~ 500Kg di $C_4 F_{10}$

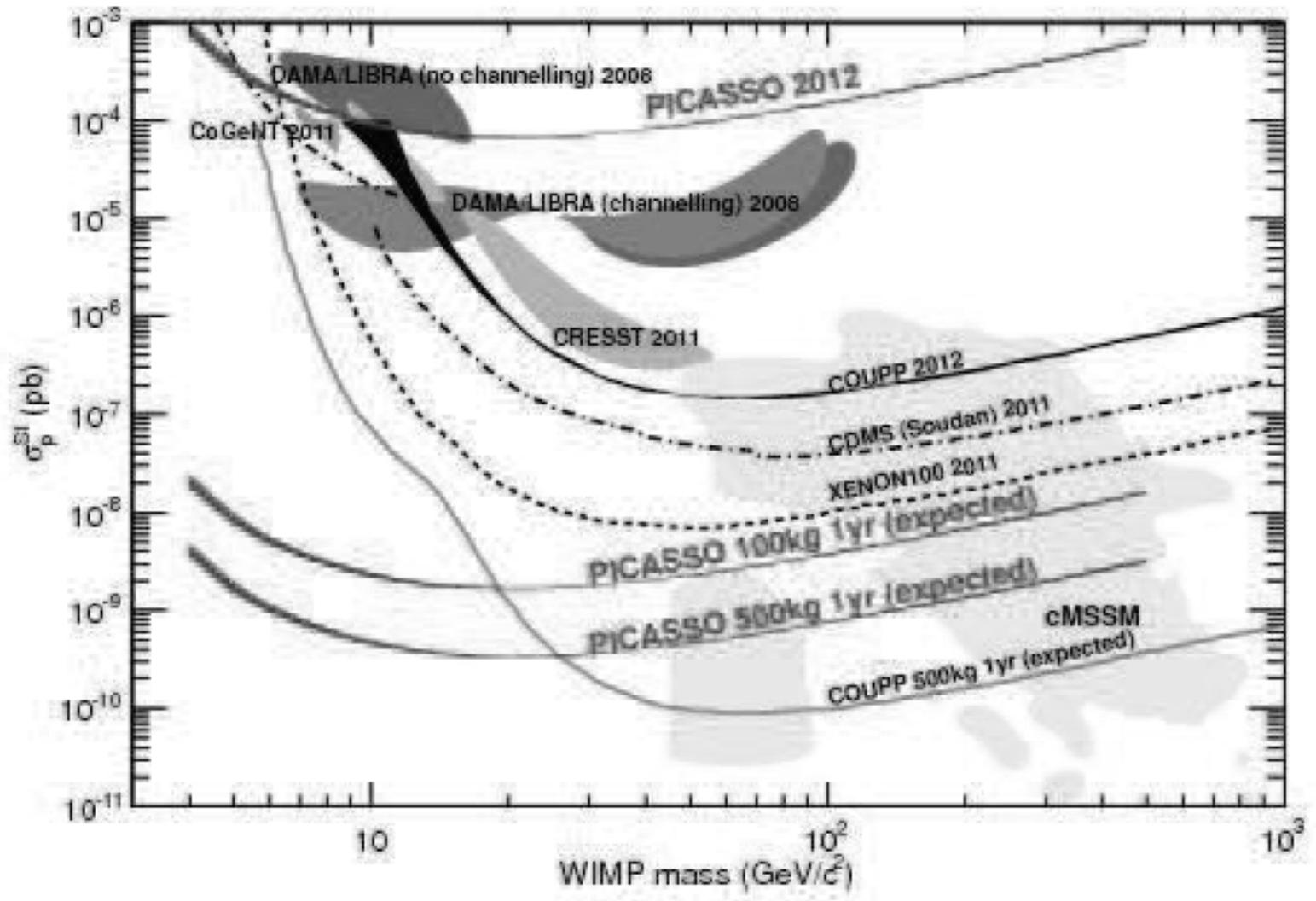
- Il fatto di utilizzare il ^{19}F permette di essere sensibili alle interazioni spin-dependent;
- Inoltre, data la piccola massa del ^{19}F e' sensibile anche a Wimps di massa relativamente piccola (<15GeV);



Limiti raggiungibili da PICASSO+ in caso di interazioni spin-dependent (1 anno di presa dati)



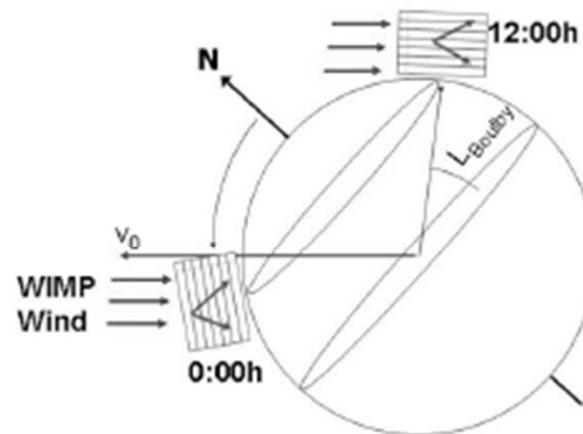
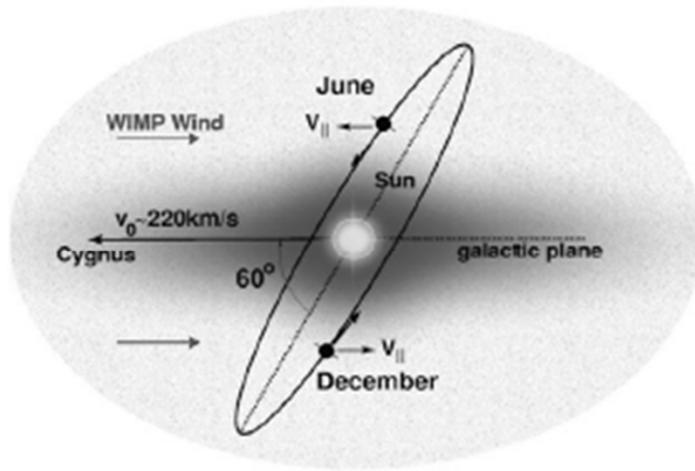
Limiti raggiungibili da PICASSO+ in caso di interazioni spin-independent (1 anno di presa dati)



Altre idee ?

Misura della direzione di rinculo del nucleo

- Il sistema solare si muove all'interno della galassia con una velocità di ~ 220 Km/sec;
- Il vento di Wimps ci dovrebbe quindi venire da una direzione particolare (\sim la direzione della costellazione del Cigno);
- Attenzione che ovviamente questa velocità si compone con la velocità di rotazione della terra \rightarrow bisogna tenere in conto di questo, ma è facilmente calcolabile;
- Una possibilità di discriminare segnale di Wimps da fondo è quello di misurare la direzione del rinculo del nucleo;



Tecniche ancora in fase di studio: l'esperimento DRIFT (Directional Recoil Identification From Tracks)

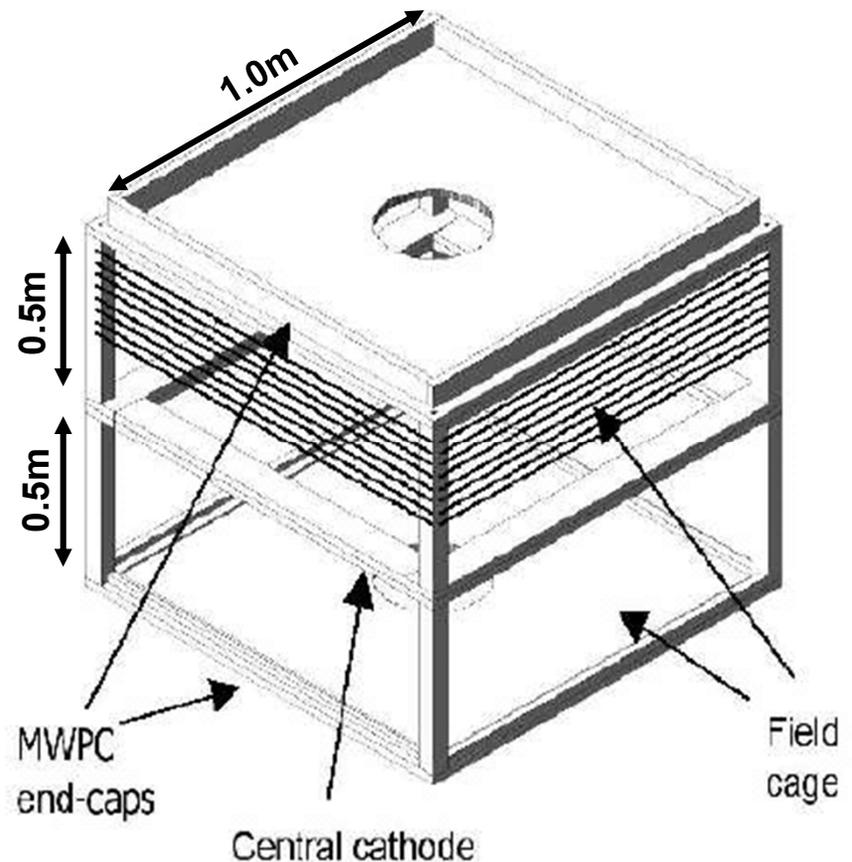
- La peculiarità di questo esperimento in fase di studio è la capacità di determinare la direzione del rinculo del nucleo (oltre che l'energia);

- DRIFT-I consiste in una TPC contenente CS_2 operata a bassa pressione (così la traccia del nucleo è relativamente lunga);

- Due volumi di 0.5 m^3 l'uno che si affacciano su un catodo comune;

- Gli elettroni di ionizzazione prodotti dalla particella nel volume fiduciale vengono raccolti da due MWPC;

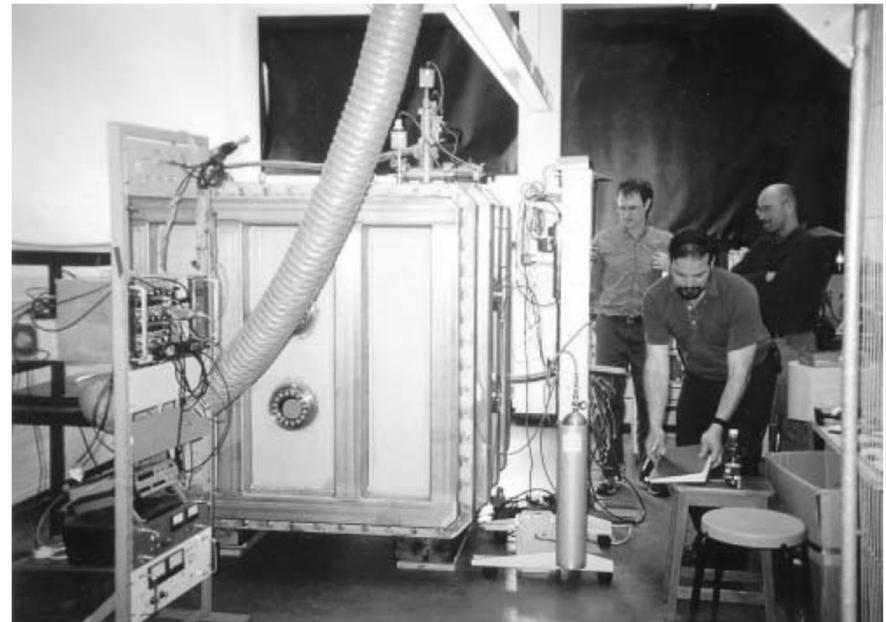
- La traccia viene ricostruita sfruttando l'informazione dei tempi di raccolta dei singoli elettroni ai fili delle MWPC (come usualmente avviene nelle TPC);



L'esperimento DRIFT

- E' possibile discriminare il segnale dovuto al rinculo del nucleo da quello dovuto a elettroni e gamma, grazie al differente range atteso per i diversi tipi di particelle (efficienza di discriminazione prevista $> 99.9\%$ a $E \sim 6$ keV);
- DRIFT-I dovrebbe andare ad esplorare regioni nello spazio (σ - M_{Wimp}) con $\sigma \sim 10^{-42}$ cm²;
- L'idea e' di arrivare a uno stadio DRIFT-III con masse dell'ordine di 100Kg passando per stadi intermedi DRIFT-II con 30-50 volte la sensitivita' di DRIFT-1 ($s \sim 10^{-44}$ cm²);

DRIFT-I e' stato istallato nella miniera di sale di Boulby a 1100 m di profondita'

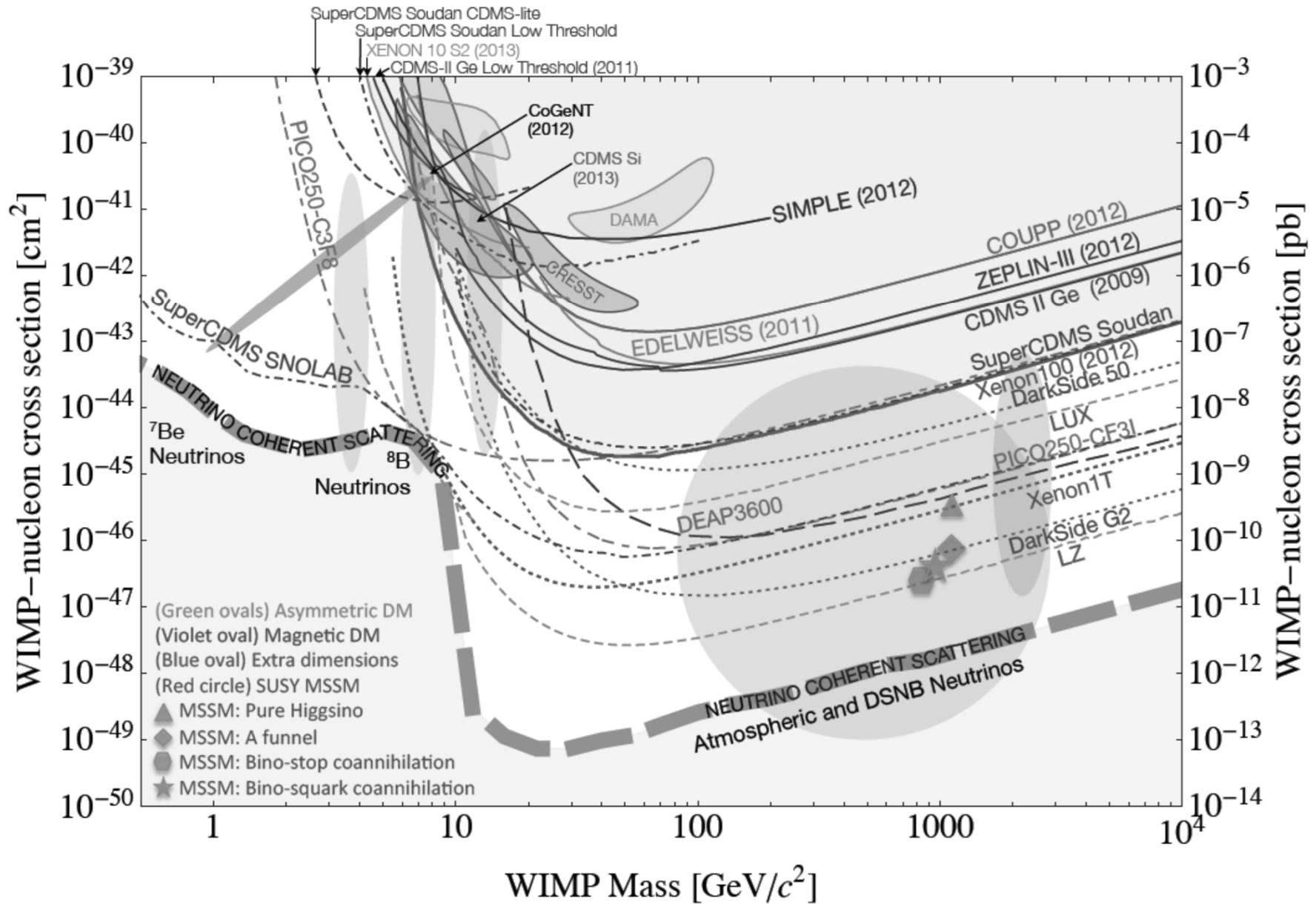


Misura della direzione di rinculo del nucleo: altre idee

Si stanno studiando diverse idee alternative per misurare la direzione di rinculo del nucleo

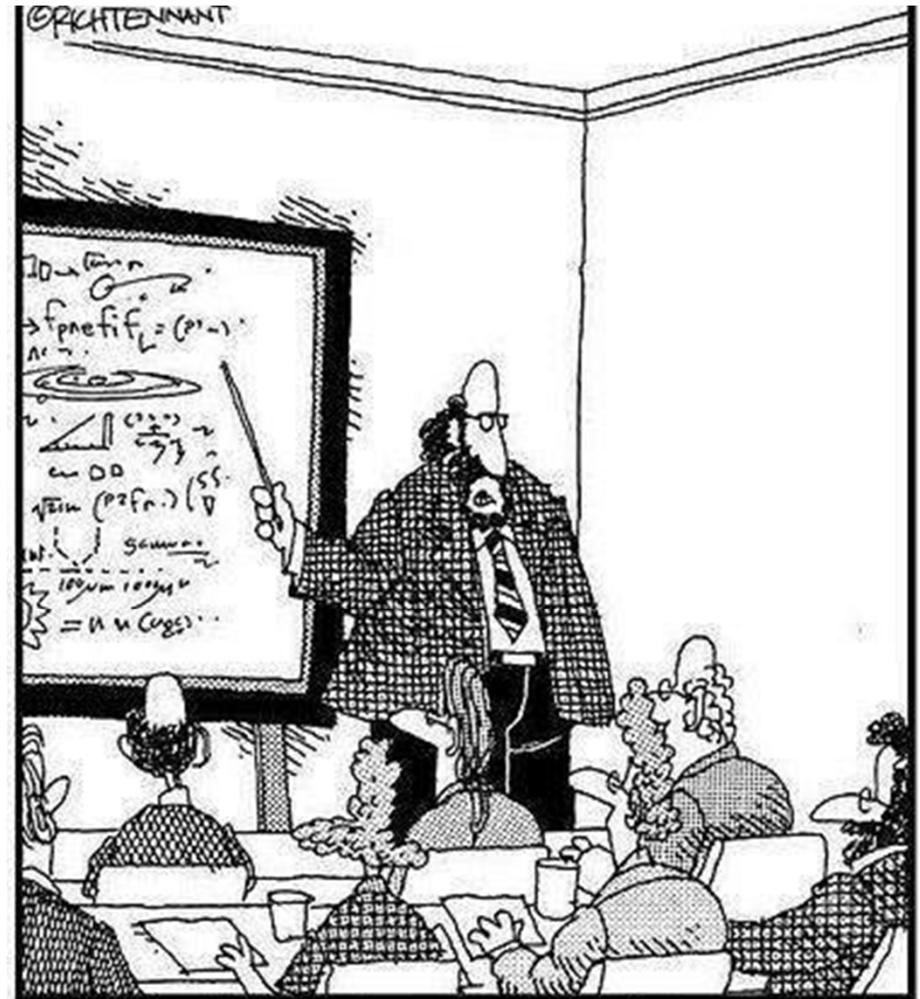
- **emulsioni nucleari a granularita' finissima che permettano di tracciare anche percorsi piccolissimi (risoluzione ~ 10 nm e meno)**
- **cristalli scintillanti anisotropi la cui risposta in luce dipende dalla direzione (per esempio il tungstenato di Zn)**

Conclusioni



Conclusioni

- La materia oscura e' uno dei campi piu' affascinanti della fisica attuale;
- Moltissime tecniche diverse sono state implementate per rivelarla;
- Per ora le tecniche ibride sono quelle che esplorano le regioni piu' ampie nello spazio dei parametri (σ - M_{Wimp}) grazie alla loro capacita' di discriminare fondo da segnale;
- Gli esperimenti futuri dovranno puntare sull'aumento della massa e della radiopurezza, requisiti spesso in contraddizione fra loro;
- Sara' inoltre importante esplorare nuove tecniche come quelle che permettono il tracciamento del nucleo di rinculo;



"Along with 'Antimatter,' and 'Dark Matter,' we've recently discovered the existence of 'Doesn't Matter,' which appears to have no effect on the universe whatsoever."

$$\langle E_R \rangle \sim \frac{v_0^2}{(1 + M_A / M_\chi)} \sim \begin{cases} M_\chi^2 \text{ se} & M_\chi \ll M_A \\ C \text{ se} & M_\chi \gg M_A \end{cases}$$

$v_0 = 220 \pm 20 \text{ Km/s}$