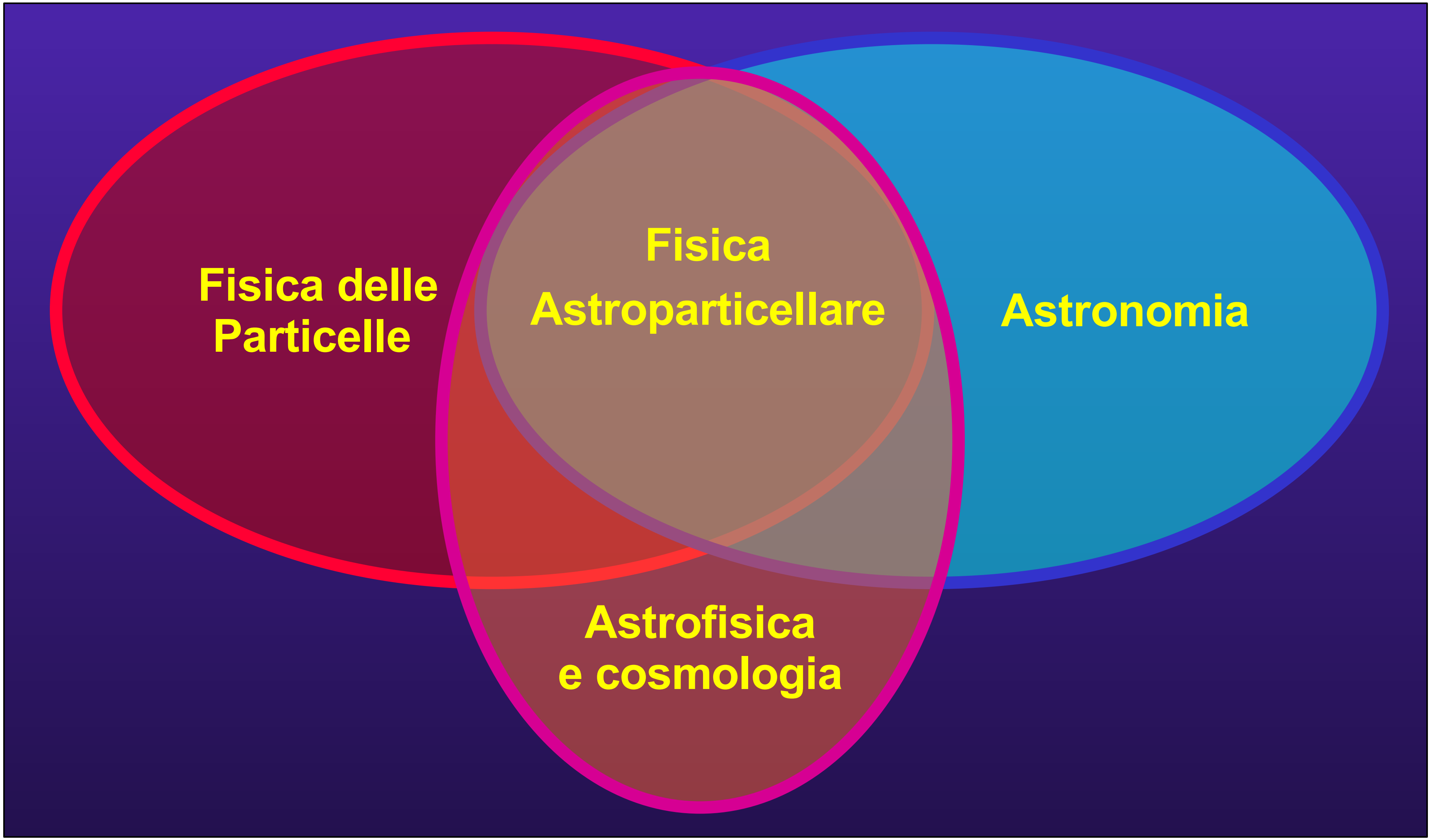
Stato della ricerca e prospettive su Materia Oscura e Fisica Astroparticellare

O.Cremonesi

INFN - Sez. di Milano Bicocca
Universita' di Milano Bicocca

Incontri di Fisica delle Alte Energie IFAE 2006 – 20/06/2006 Pavia

Fisica Astroparticellare/Astrofisica Nucleare



Fisica Astroparticellare/Astrofisica Nucleare

Una simbiosi esemplare ...

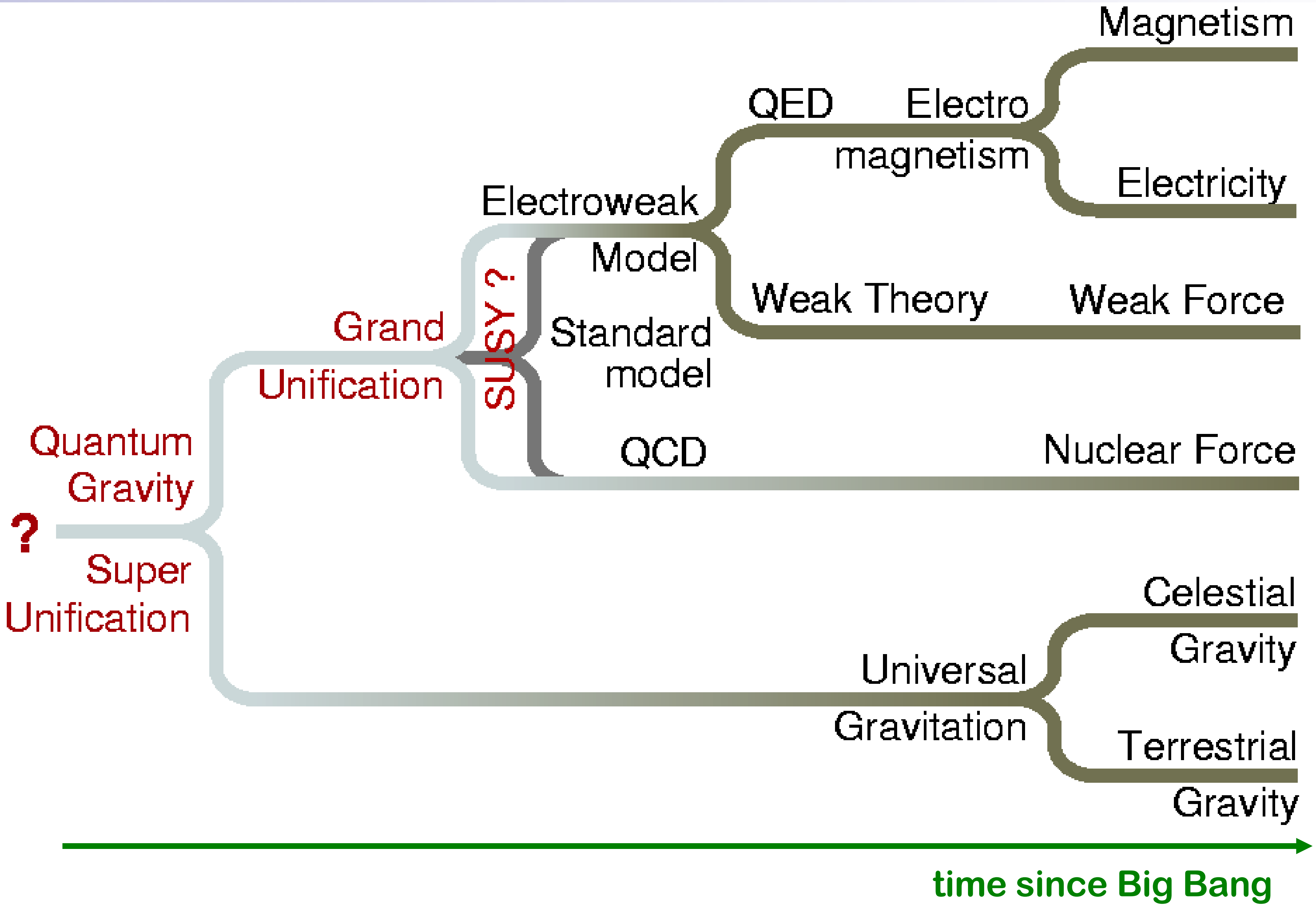
dalla fisica delle particelle

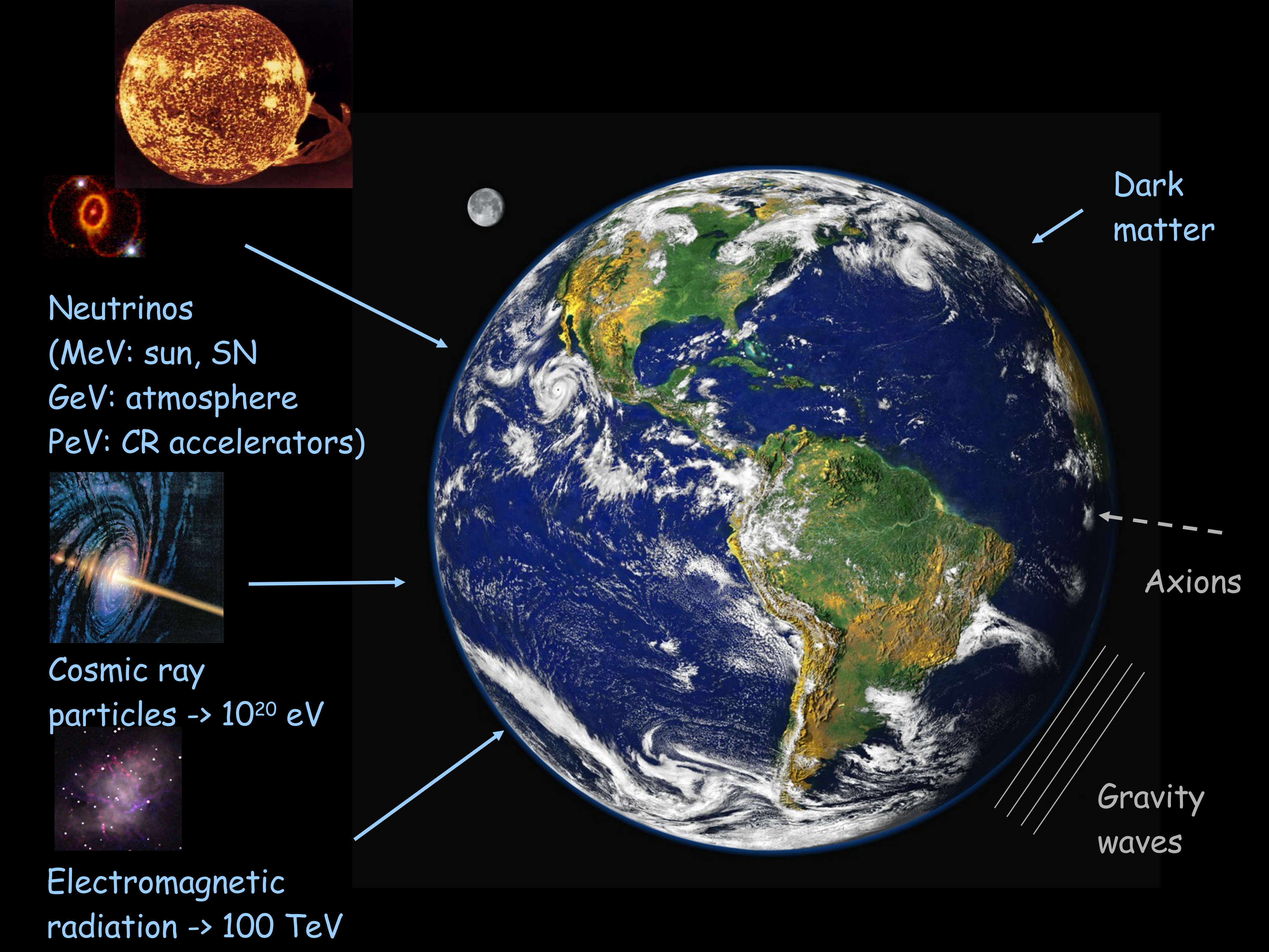
- metodi, risultati e teorie ... per spiegare l'Universo
  - Cosmologia (Big Bang)
  - Materia Oscura
  - ...
- tecniche sperimentali ... per migliorare le potenzialita' dell'Astronomia

dal cosmo

- particelle e nuovi fenomeni ...
  per accrescere le conoscenze della fisica delle particelle

Fisica Astroparticellare/Cosmologia




Dark
matter
Neutrinos
(MeV: sun, SN
GeV: atmosphere
PeV: CR accelerators)
Axions
Cosmic ray
particles -> 10^{20} eV
Gravity
waves
Electromagnetic
radiation -> 100 TeV

Campi di ricerca

Cosmologia e primi stadi dell'Universo
Composizione dell'Universo
Stati di non-equilibrio dell'Universo:

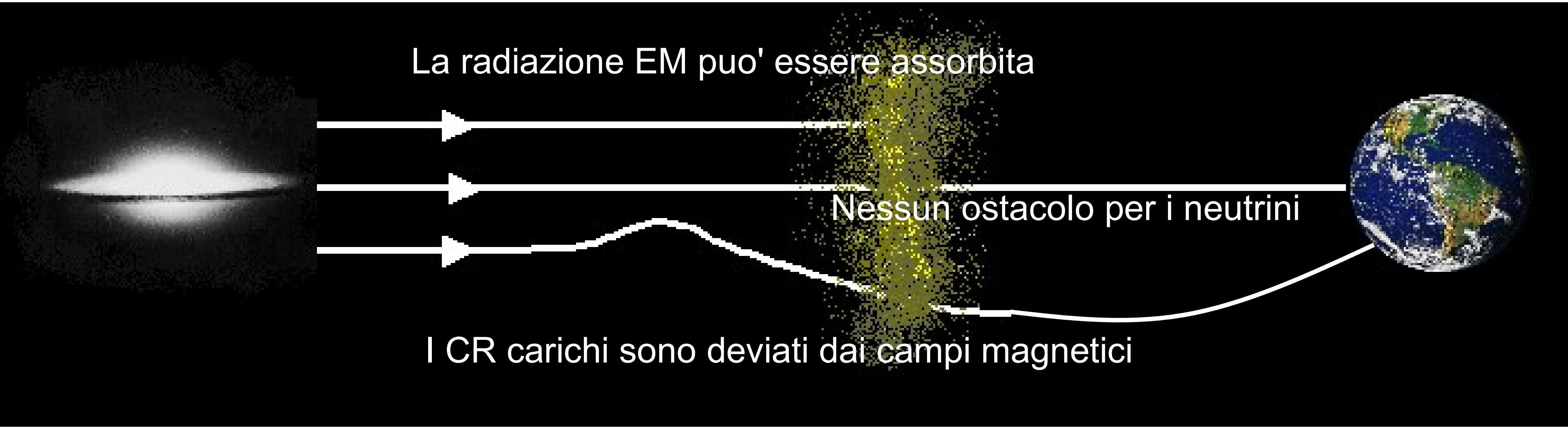
- radiazione EM (a tutte le frequenze)
- raggi cosmici (origine, costituzione e proprieta')
- neutrini (di tutte le energie/origini)

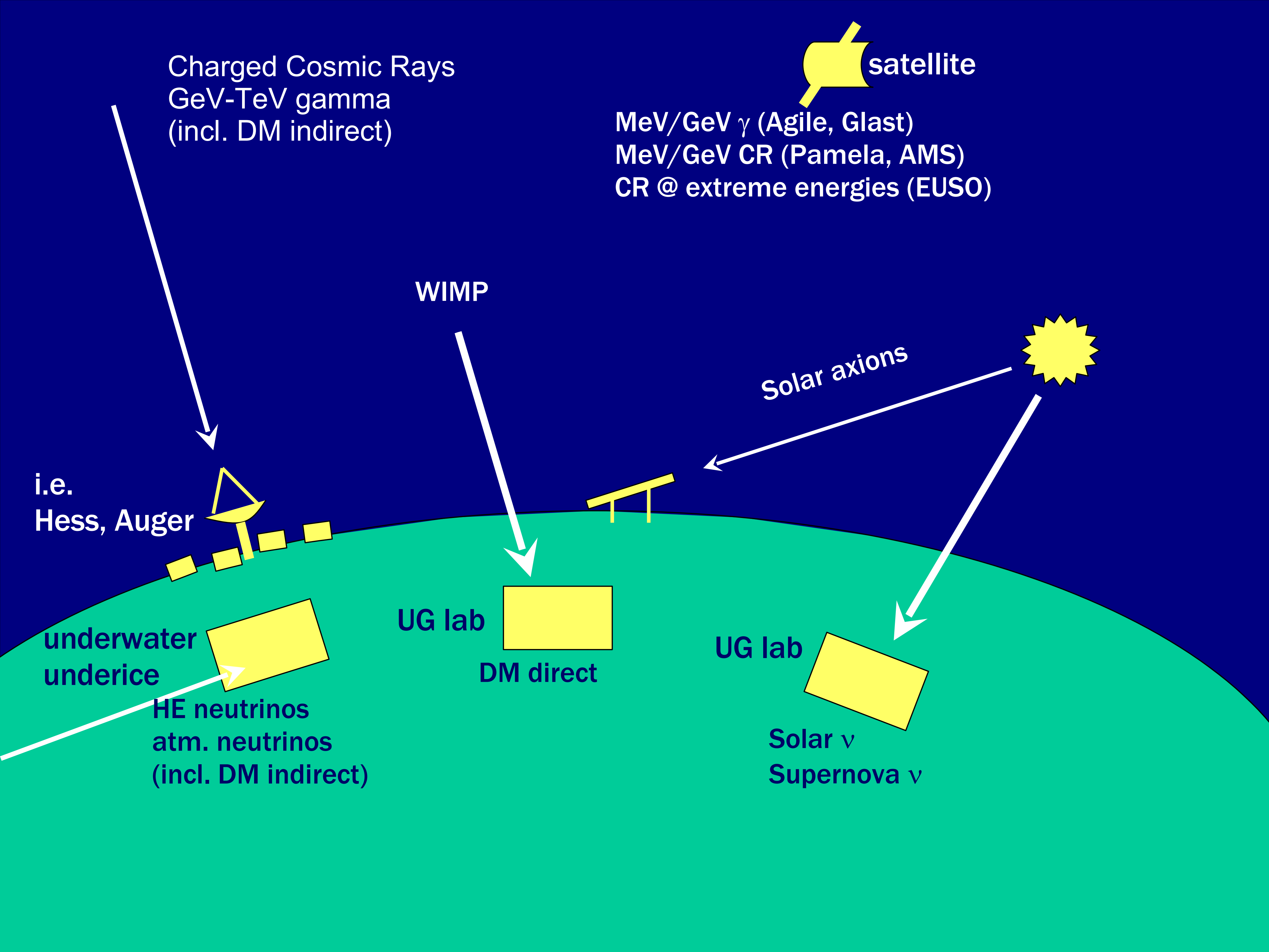
Proprieta' delle particelle:

- massa del neutrino (misure dirette, DBD,...)
- oscillazioni di neutrino
- materia oscura ed altre particelle esotiche (WIMPs, assioni, Q-Balls, monopoli magnetici, ...)
- Stabilita' del nucleone

Proprieta' della forza gravitazionale

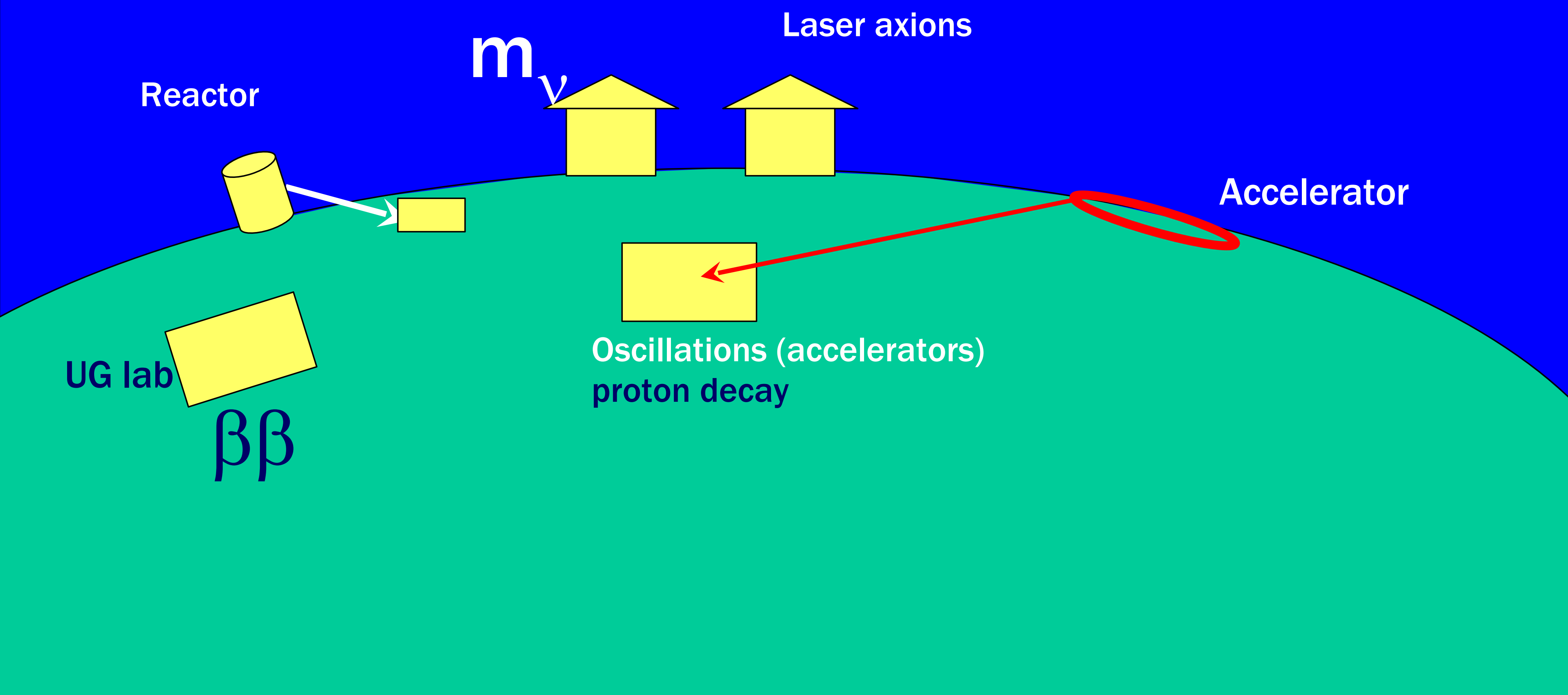
Astronomia “multi-mediale”



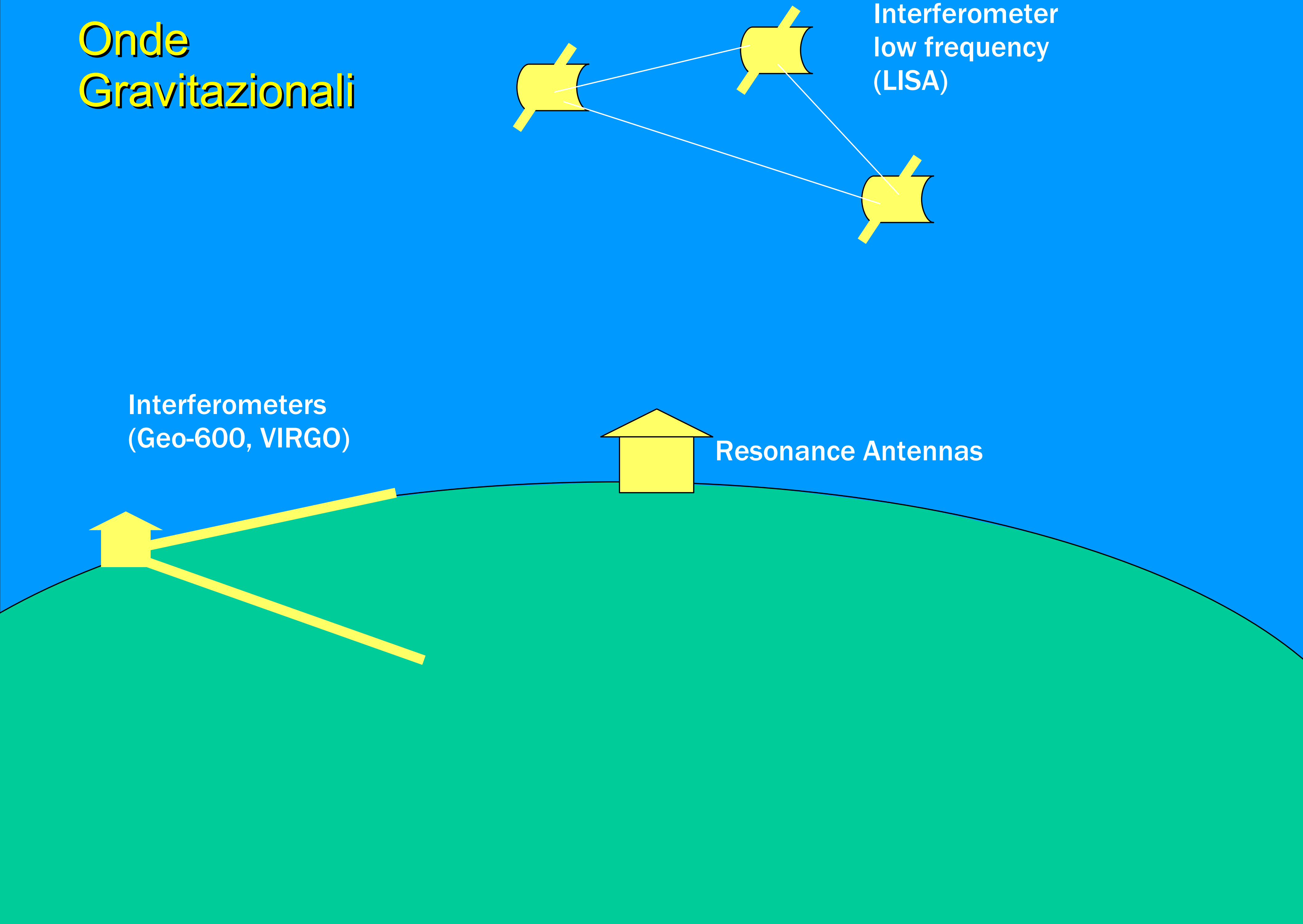

Charged Cosmic Rays
GeV-TeV gamma
(incl. DM indirect)
satellite
MeV/GeV γ (Agile, Glast)
MeV/GeV CR (Pamela, AMS)
CR @ extreme energies (EUSO)
WIMP
Solar axions
i.e.
Hess, Auger
UG lab
DM direct
underwater
underice
HE neutrinos
atm. neutrinos
(incl. DM indirect)
UG lab
Solar ν
Supernova ν

No particles from heaven but:

- same infrastructure ($\beta\beta$)
- closely related question (tritium decay)

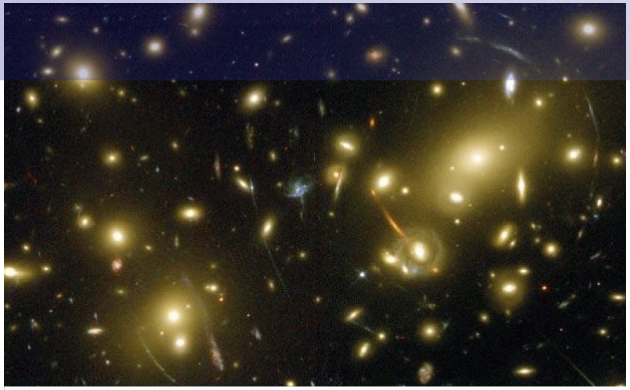


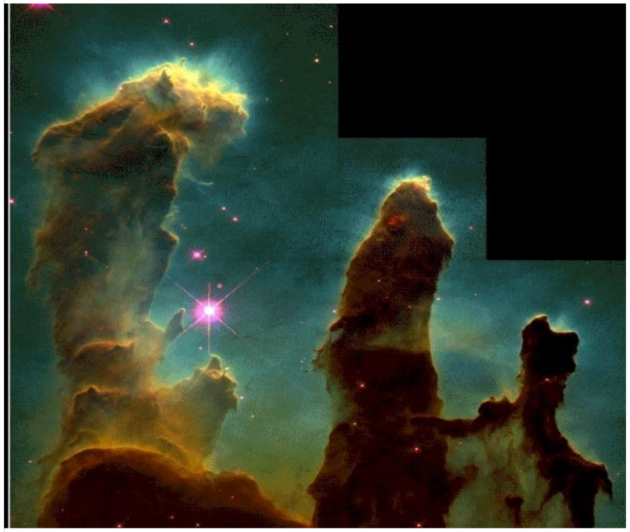
Onde Gravitazionali



MATERIA OSCURA

Materia Oscura





Evidenza :

Stabilita' ammassi di Galassie
Velocita' di rotazione delle Galassie
SN Ia
BBN
CMBR

Candidati astronomici

Nane Brune (stelle con m <0.1 M_{sole} - no fusione)
- insufficienti

Nane Bianche (stati finali di piccole stelle)
- insufficienti

Stelle di neutroni/Buchi neri (stati finali di grandi stelle)
- piu' rare delle nane bianche

Nebulose
- 90% della materia ordinaria: osservabili

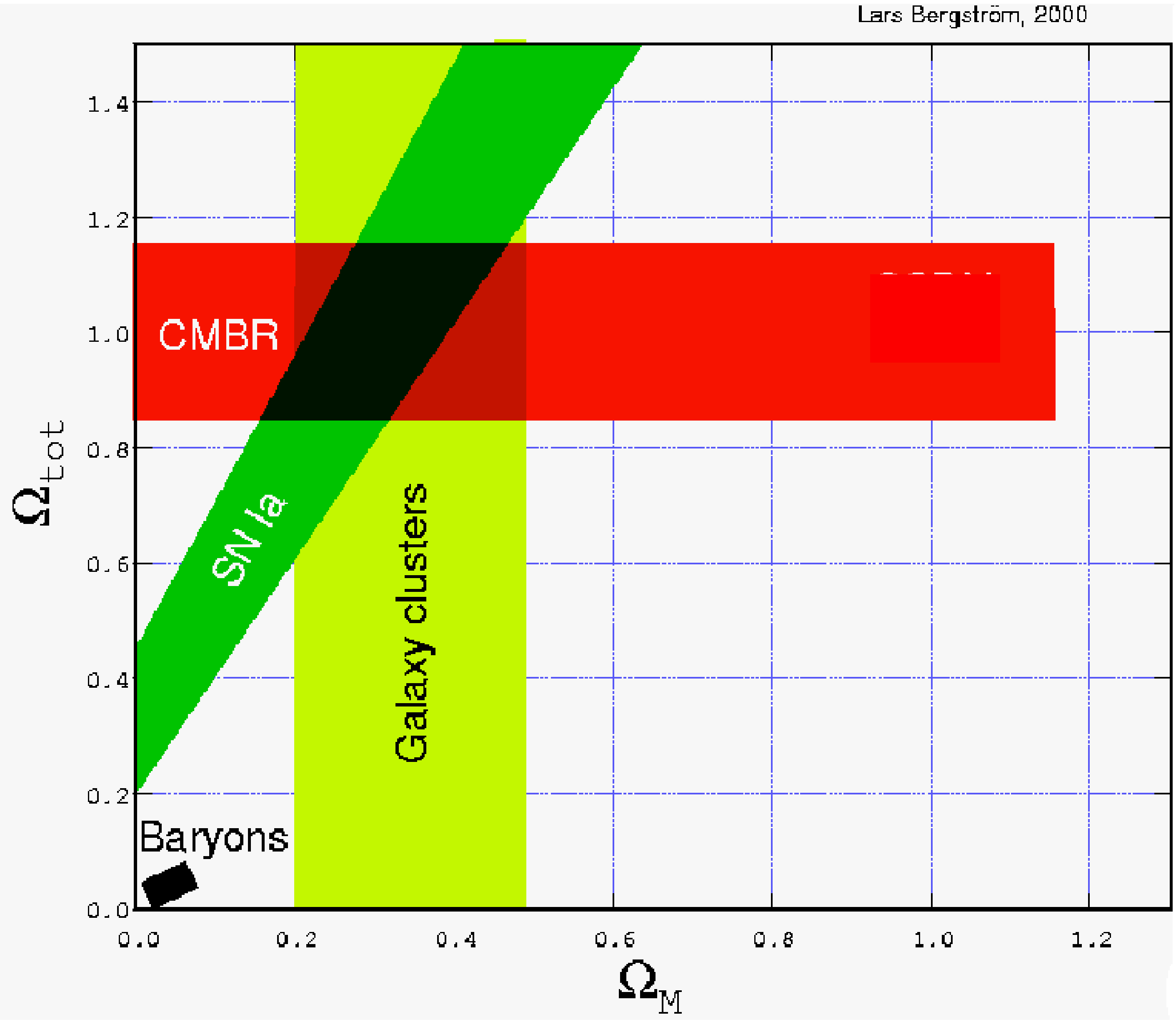
Candidati HEP:

Neutrini
- Evidenza di masse non nulle (oscillazioni) ... insufficienti

Assioni
- Difficilmente rivelabili ….

WIMPS (Neutralini)
- Candidati preferiti ... ma non unici

Materia Oscura: evidenze



$\Omega_{tot} = \rho_{total} / \rho_{critical}$

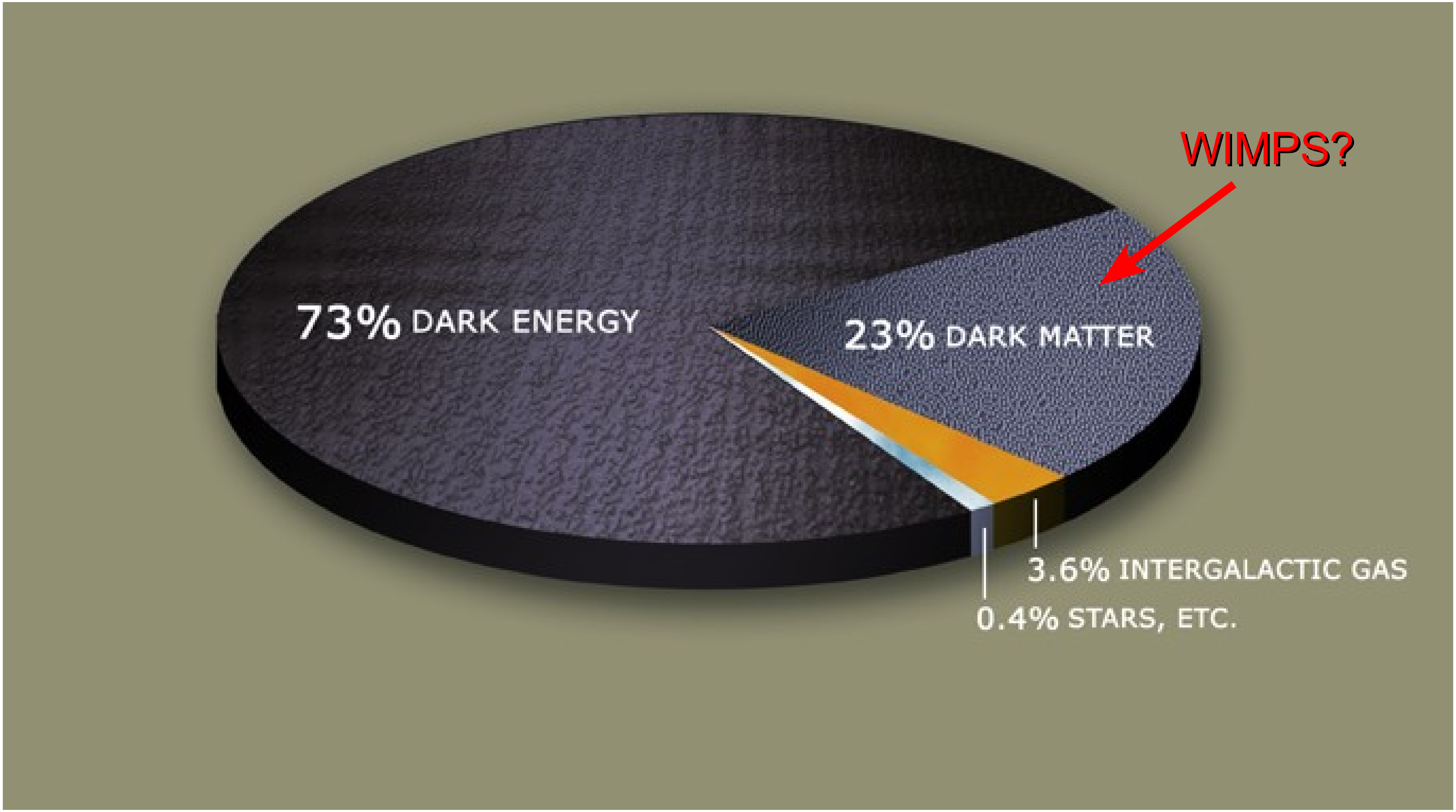
densita' critica (Universo piatto)

$\rho_{critical} = 3H^2/8\pi G_N$

H = h . 100 km/s/Mpc

$\Omega_M = \rho_{matter} / \rho_{critical}$

Composizione dell'Universo



Energia Oscura: ~2/3

Materia: ~1/3

WIMPs

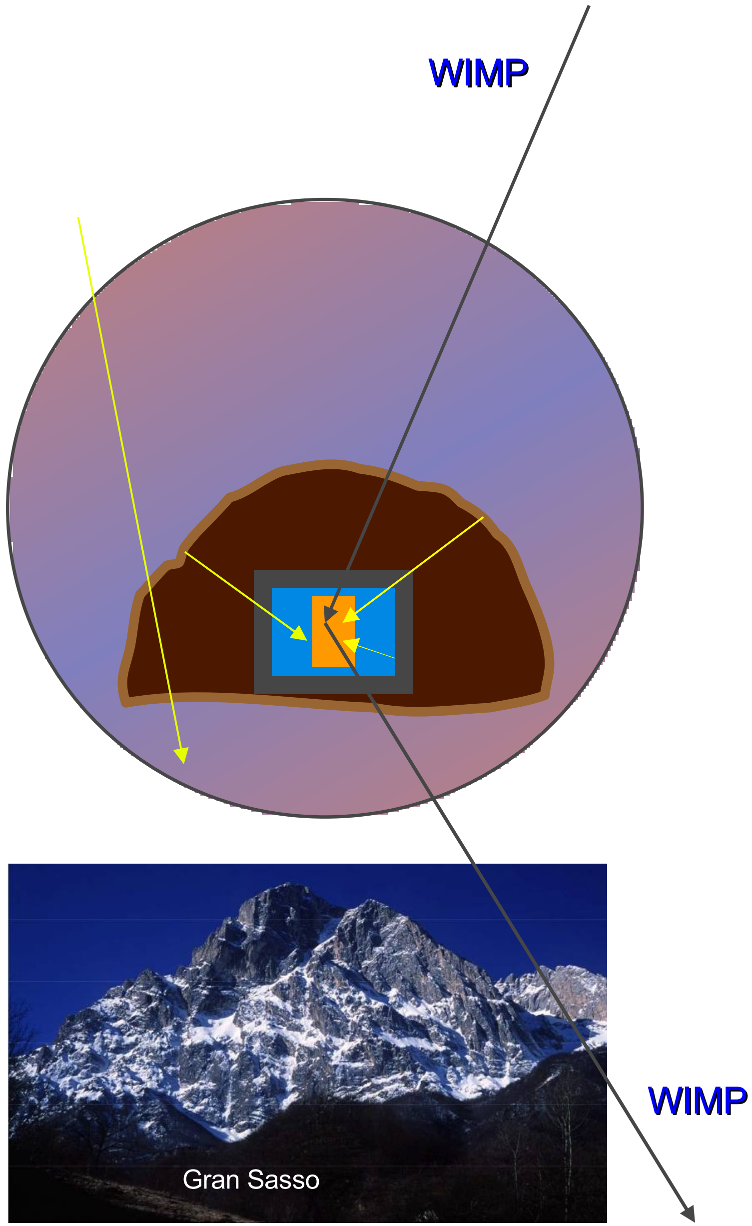
Sembrano davvero molte ...

... tuttavia solo poche di esse interagiscono

Se la loro interazione e' cosi' debole come e' possibile misurarle?

WIMPS: Misure dirette

... in laboratori sotterranei ... per evitare gli effetti dei raggi cosmici



10-100 WIMPs/litro
$\beta \sim 10^{-3}$

WIMPs diffondono elasticamente sui nuclei:

$$R \sim N\, n_\chi \langle\sigma_\chi\rangle$$

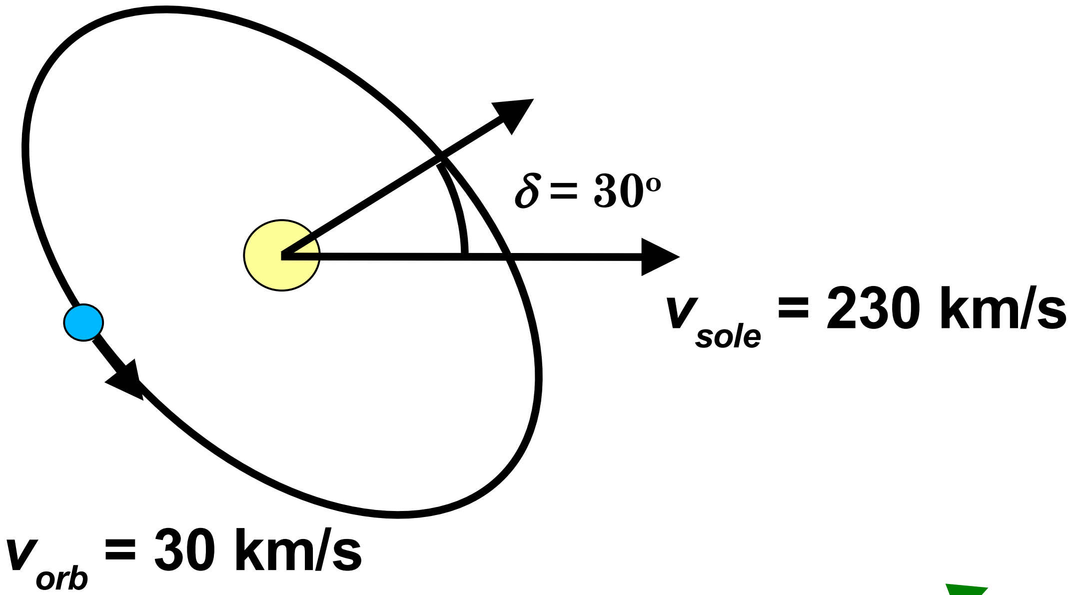
- N = numero di nuclei bersaglio nel rivelatore
- n_χ = densita' locale di WIMP
- $\langle\sigma_\chi\rangle$ = sezione d'urto di diffusione (mediata sulla velocita' relativa WIMP-rivelatore)

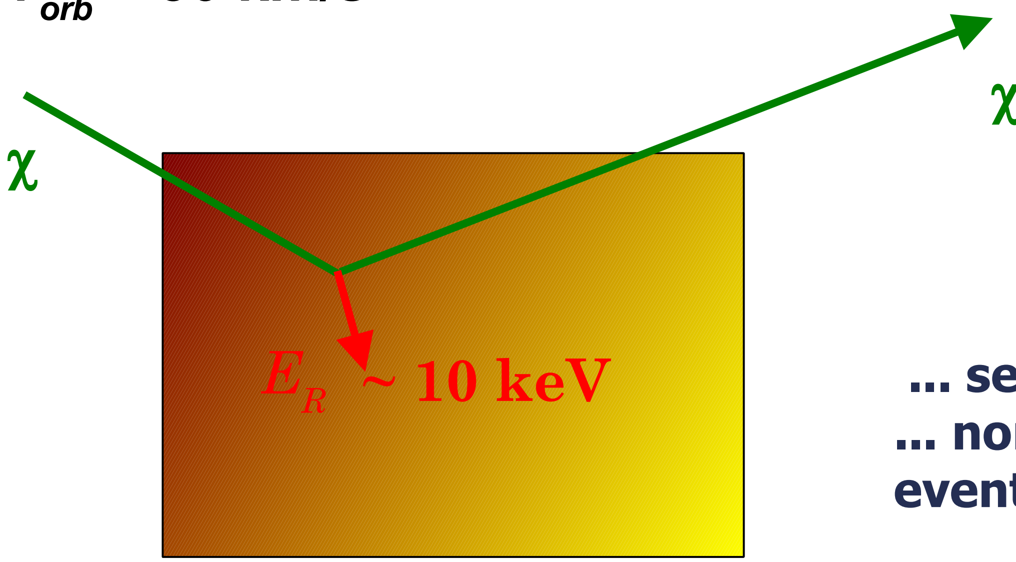
Segnale = interazioni di WIMPs (segnatura)

Background = interazioni e/γ ... neutroni

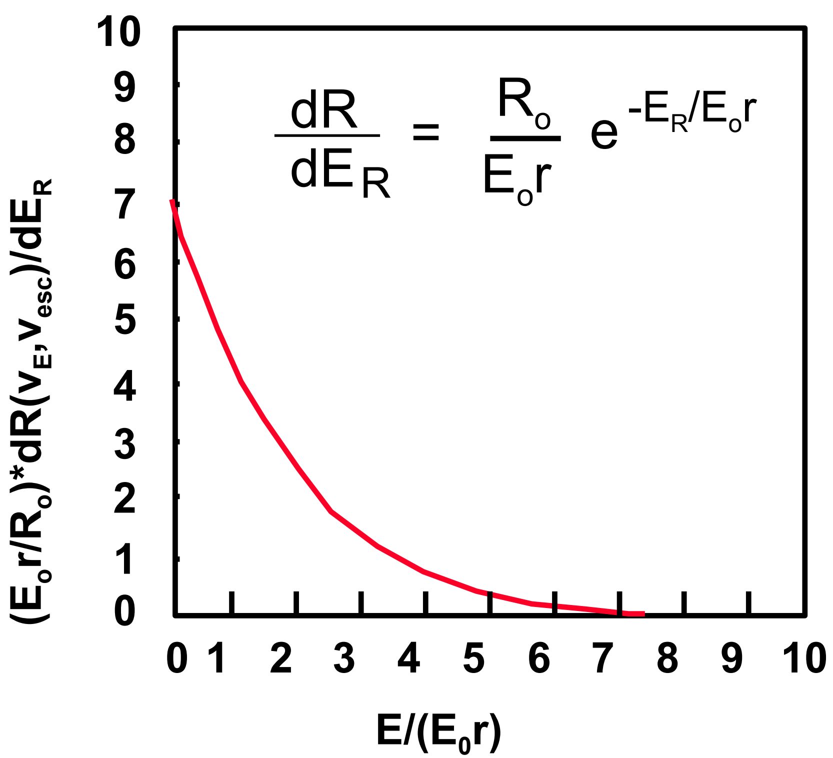
Misure dirette (2)

Moto di terra e sole nell'alone di χ





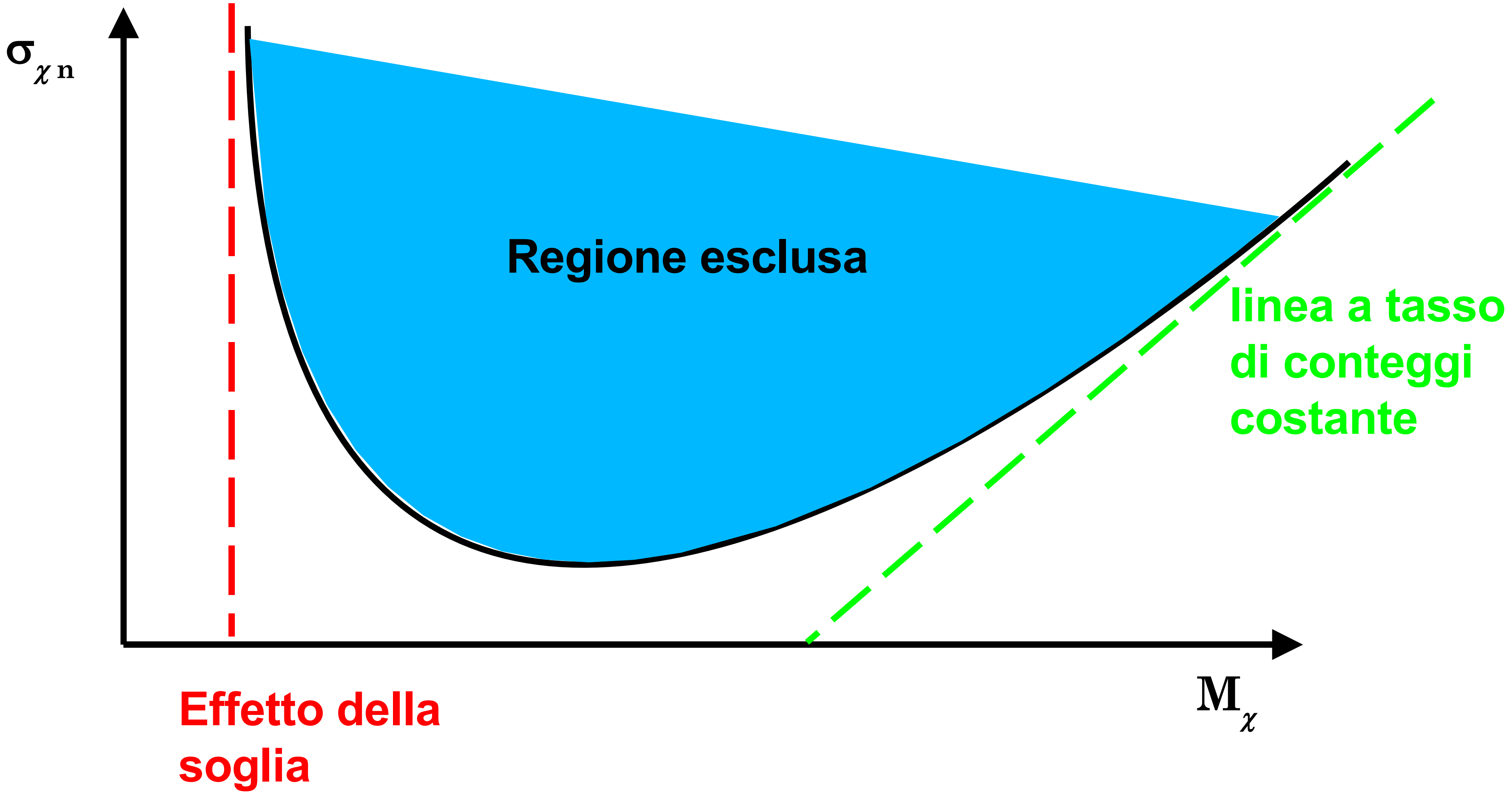
Spettro dei rinculi



... senza particolari caratteri distintivi ...
... non facilmente distinguibile da comuni eventi di fondo

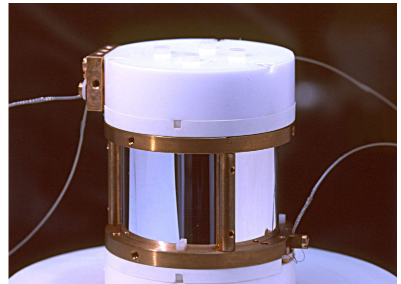
Plot di esclusione

Sezione d'urto WIMP-nucleon in funzione della massa delle WIMP

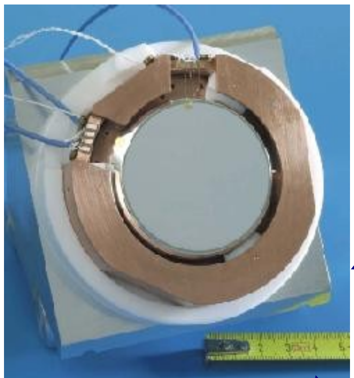


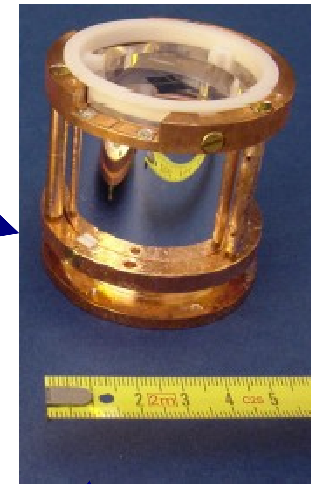
Tecniche di rivelazione diretta

Obiettivo principale:
riduzione del fondo



Fononi

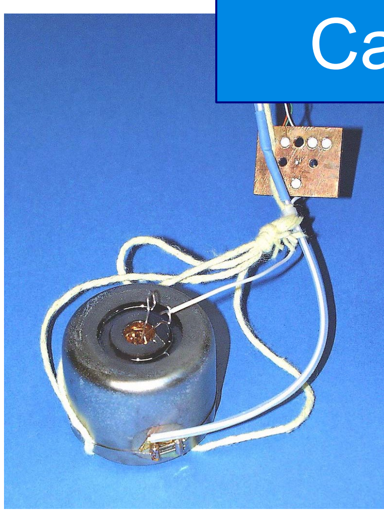


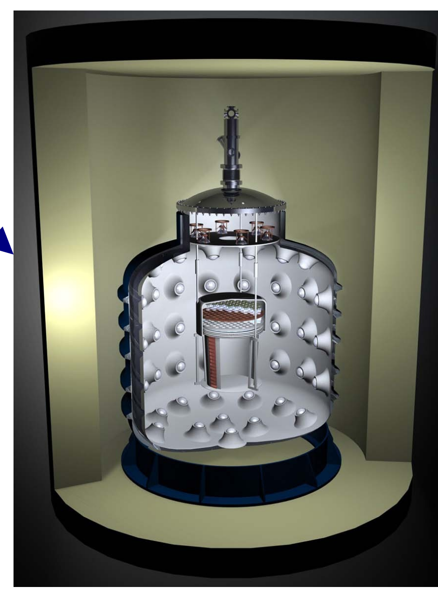


Rinculi

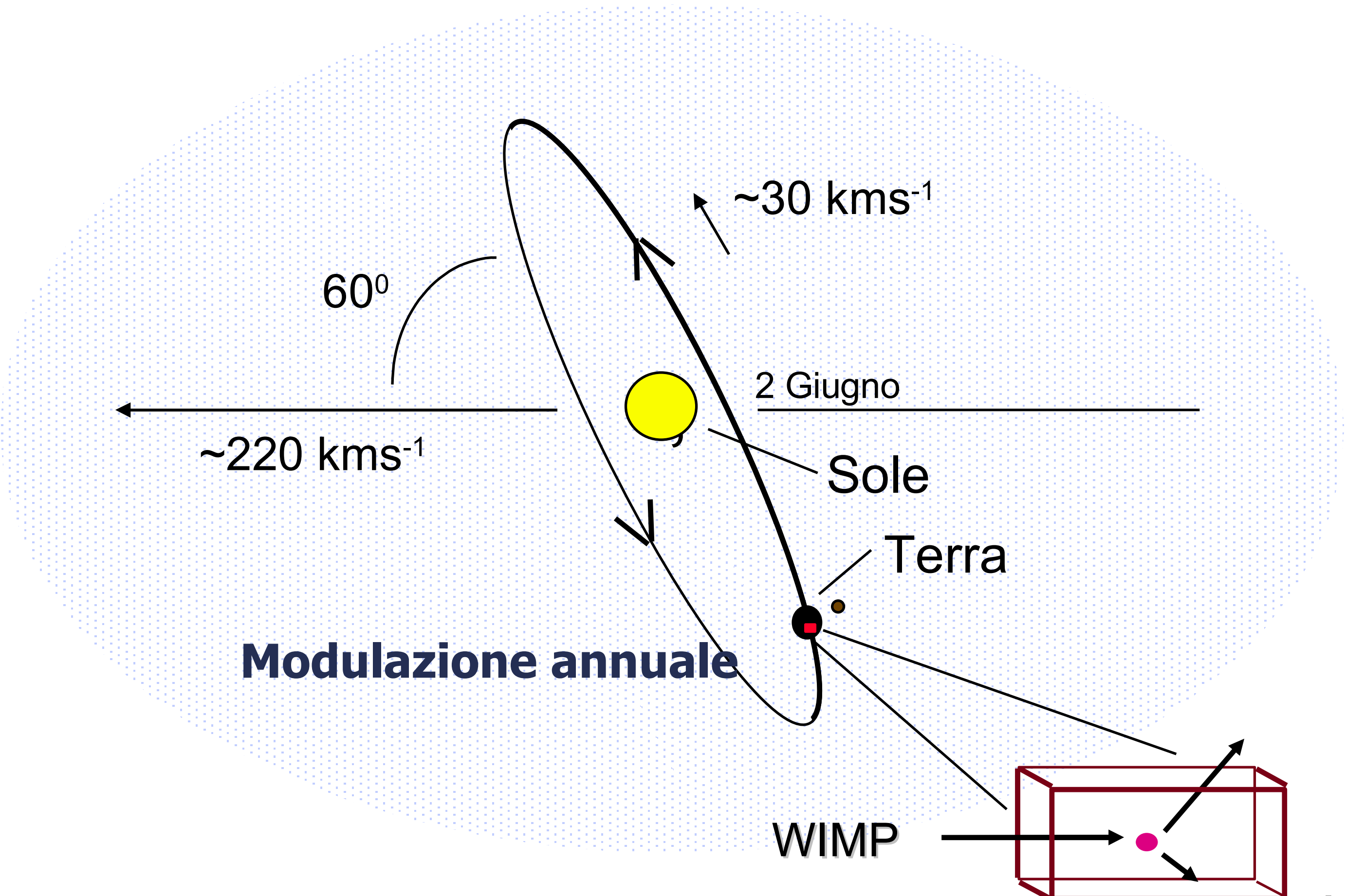
Carica

Luce

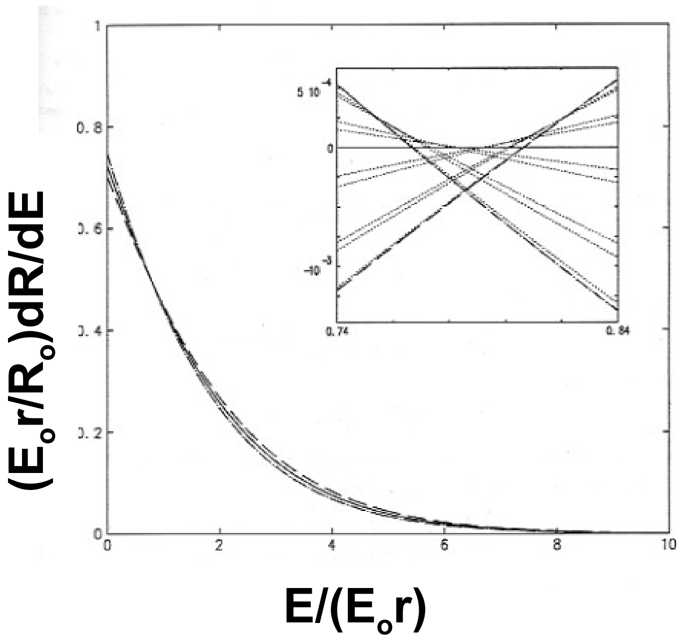


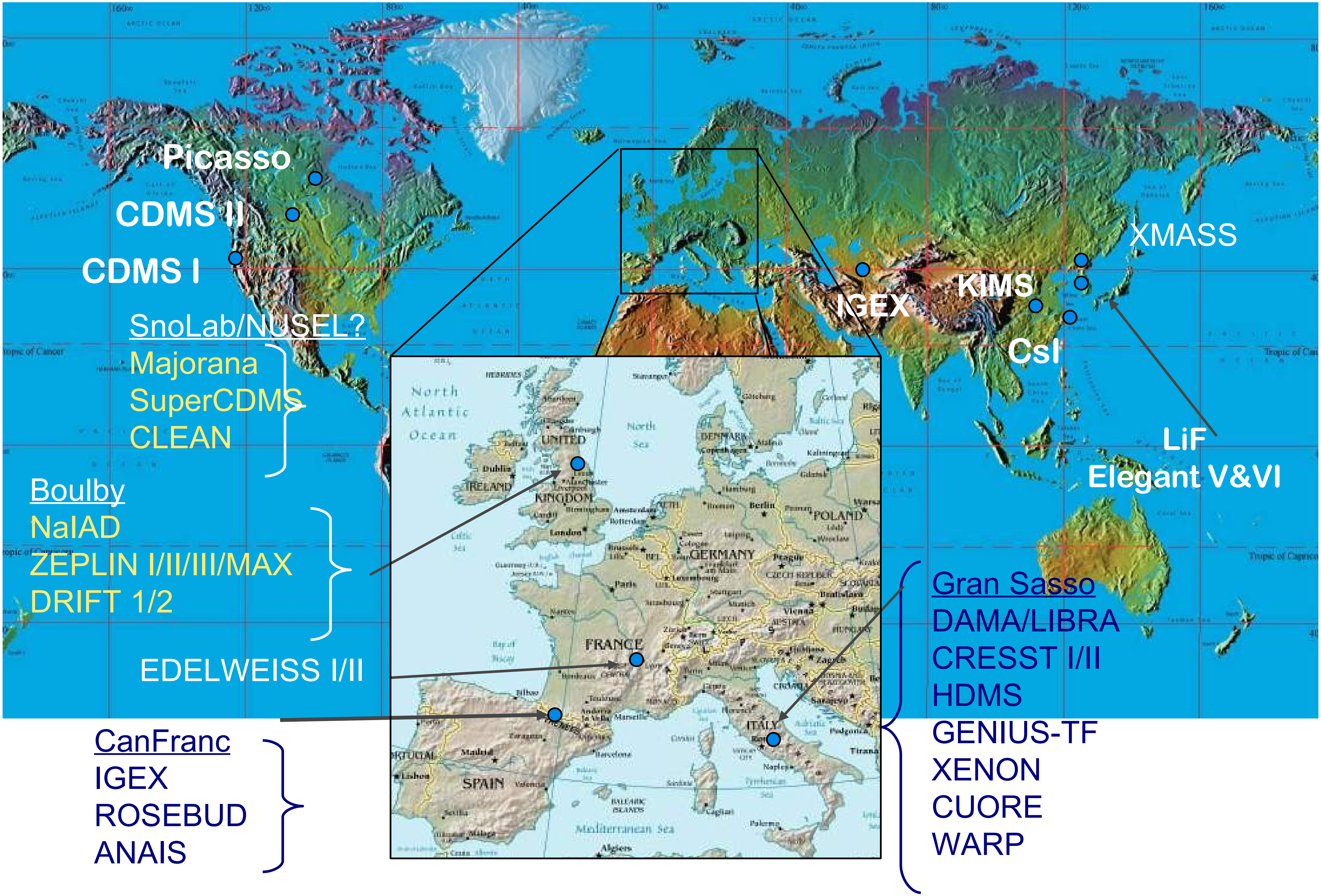


Modulazione stagionale



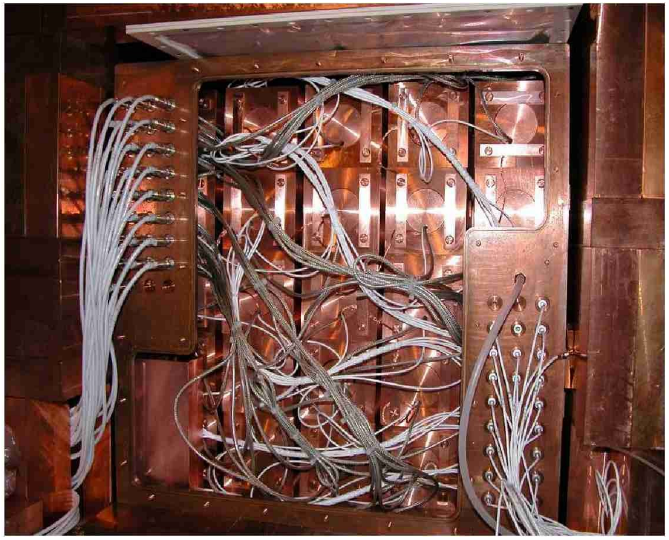
Effetto a livello di qualche percento nel tasso di conteggi sopra soglia

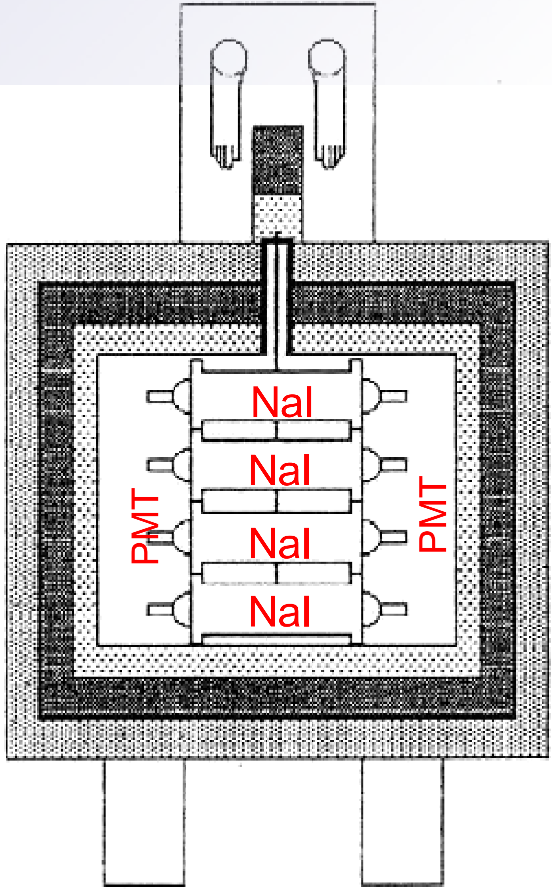



Picasso
CDMS II
CDMS I
SnoLab/NUSEL?
Majorana
SuperCDMS
CLEAN
Boulby
NaIAD
ZEPLIN I/II/III/MAX
DRIFT 1/2
EDELWEISS I/II
CanFranc
IGEX
ROSEBUD
ANAIS
IGEX
KIMS
CsI
XMASS
LiF
Elegant V&VI
Gran Sasso
DAMA/LIBRA
CRESST I/II
HDMS
GENIUS-TF
XENON
CUORE
WARP

DAMA @ LNGS

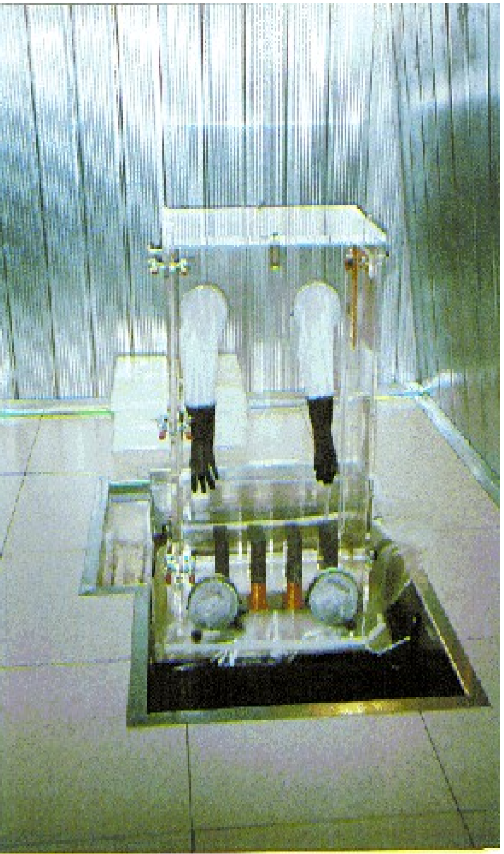
9 cristalli NaI ultrapuri ~100 kg
Pesanti schermature e flusso di N2
Nessun uso di discriminazione
Ricerca della modulazione annuale
Presa dati completata nel luglio 2002

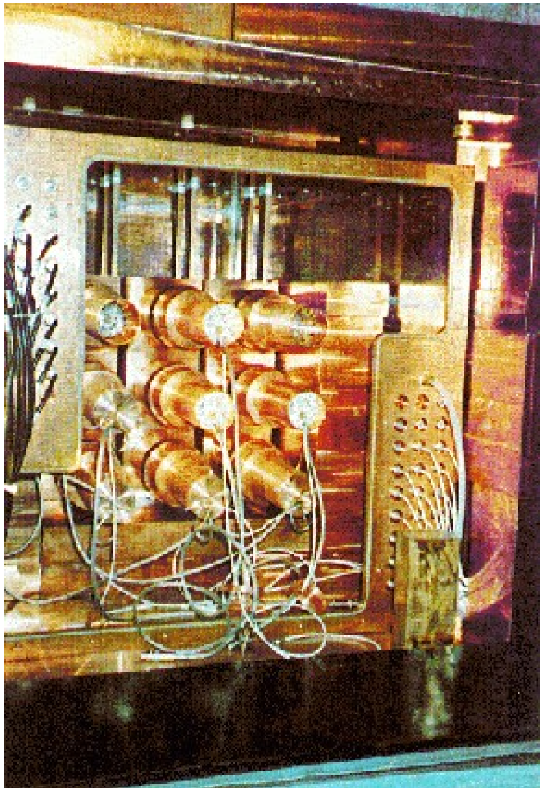


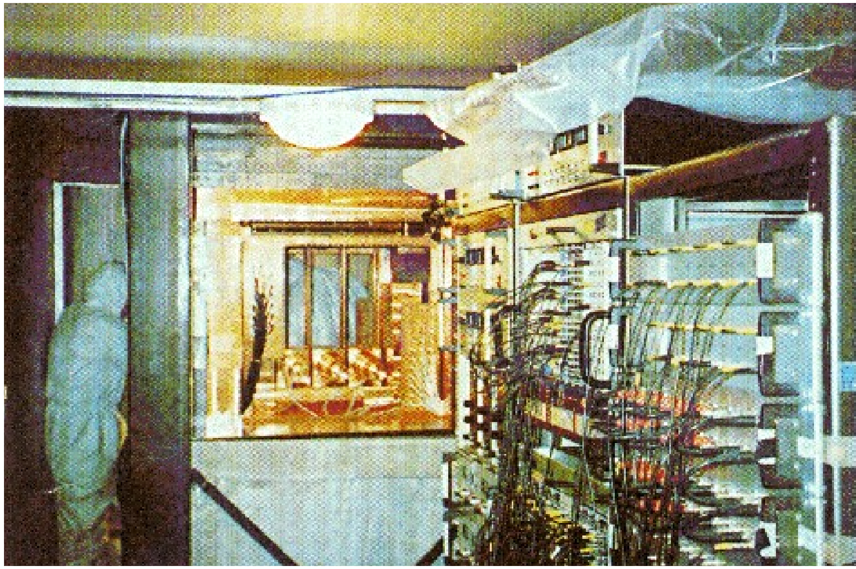


Sta ancora producendo risultati

- **Search for superdense nuclear matter**
- **Search for heavy clusters decays**







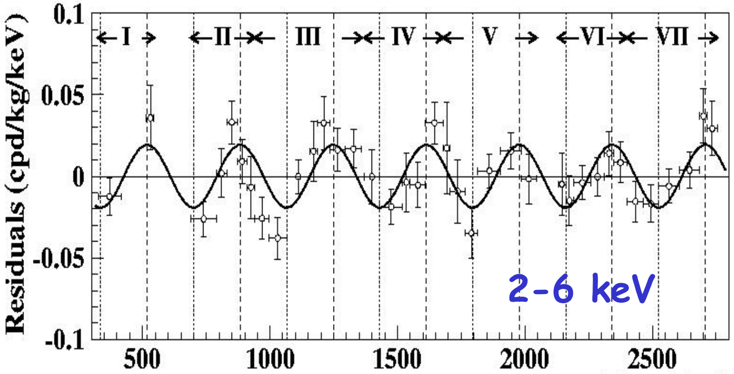
DAMA: segnale model-independent

Presa dati conclusa nel luglio 2002

Esposizione totale: 107,731 kg.d

Segnale di modulazione annuale: 6.3σ

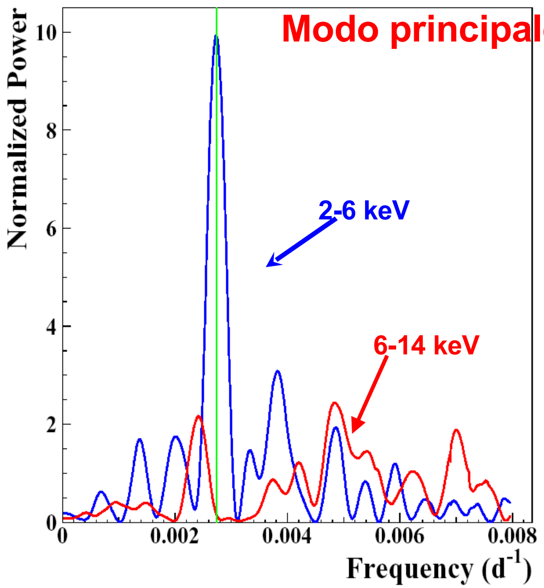
Evidenza model-independent per l'esistenza di WIMP nell'alone galattico



fit: $A = (0.0192 \pm 0.0031)$ cpd/kg/keV

$P(A=0)=7\cdot10^{-4}$

Spettro di potenza dei residui

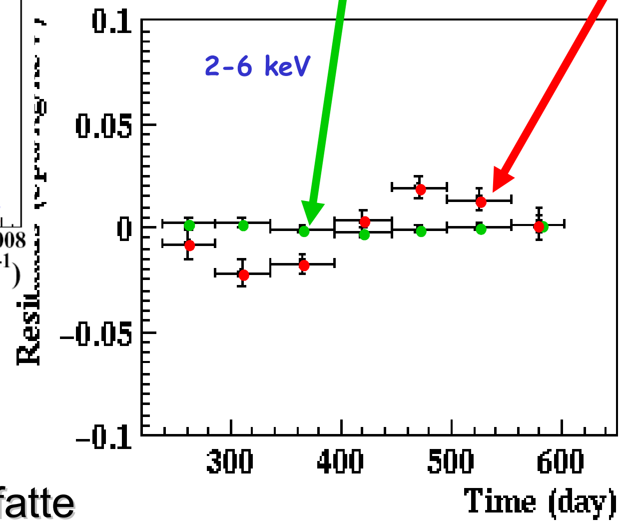


Modo principale $2.737 \cdot 10^{-3}\ d^{-1} \approx 1\ y^{-1}$

No WIMP

Residui per eventi multiple hit

Residui per eventi single hit



Fit (tutti i parametri liberi):
$A = (0.0200 \pm 0.0032)$ cpd/kg/keV
$t_0 = (140 \pm 22)$ d
$T = (1.00 \pm 0.01)$ y

Tutte le richieste per un segnale di modulazione sono soddisfatte

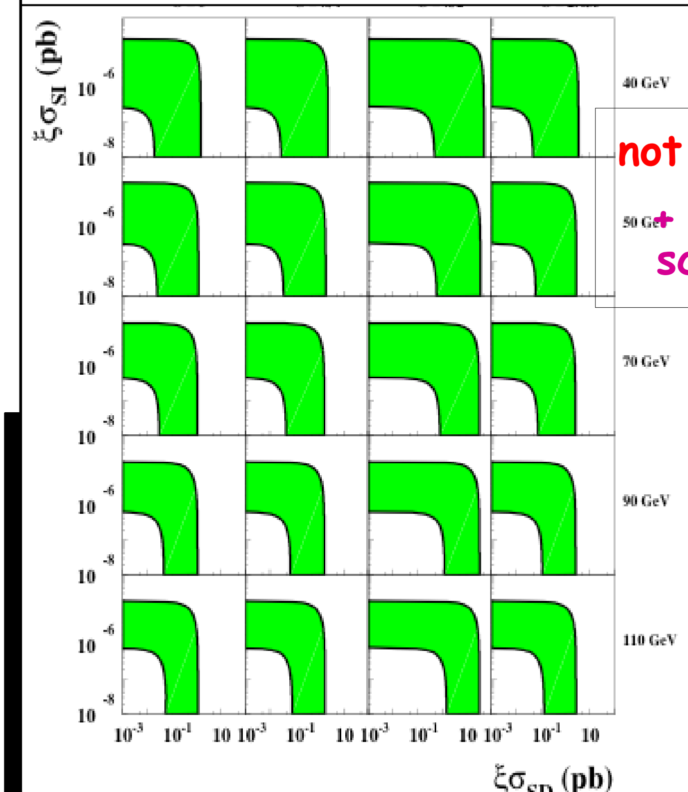
Nessun effetto sistematico o "side reaction" in grado di soddisfare simultaneamente tutte le richieste

Few Examples of corollary quests for the candidate particle

(Riv. N.Cim. vol.26 n.1. (2003) 1-73 and ref. therein for more)

General case: DM particle with SI&SD couplings (Na and I are fully sensitive to SD interaction, on the contrary of e.g. Ge and Si)

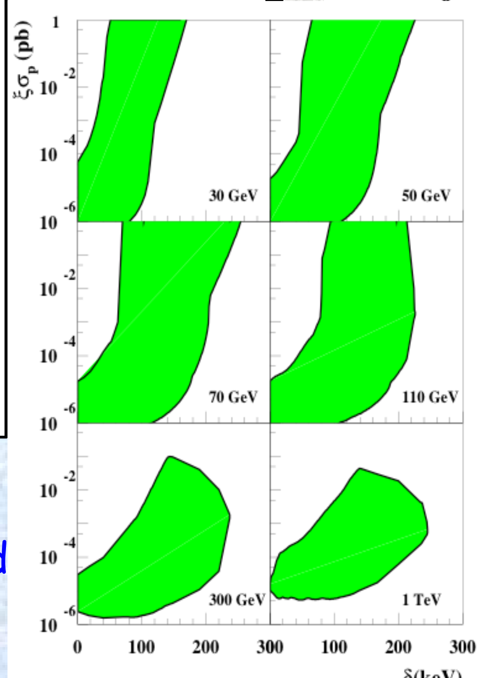
Examples of slices of the allowed volume in the space ($\xi\sigma_{SI}$, $\xi\sigma_{SD}$, m_W, θ) for some of the possible θ ($tg\theta = a_n/a_p$, with $0 \leq \theta < \pi$) and m_W



not exhaustive

+ different scenarios?

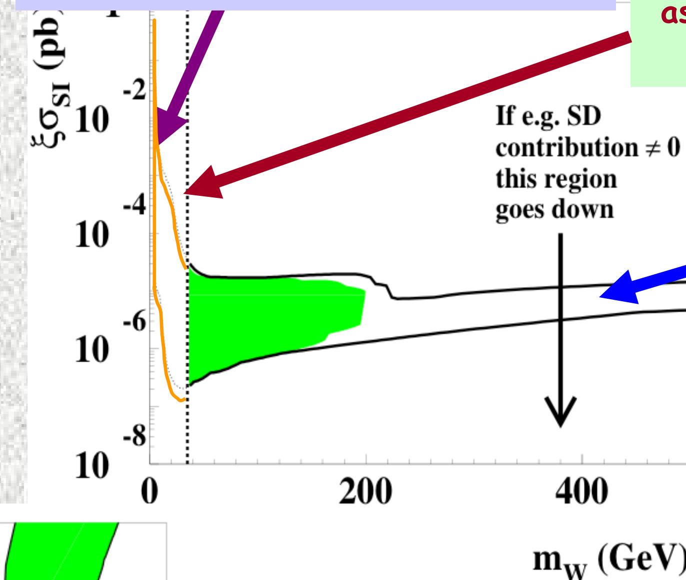
inelastic interaction: W + N → W* + N (S_m/S_0 enhanced): examples of slices of the allowed volume in the space ($\xi\sigma_p$, m_W, δ) [e.g. Ge disfavoured]



DM particle with dominant SI coupling

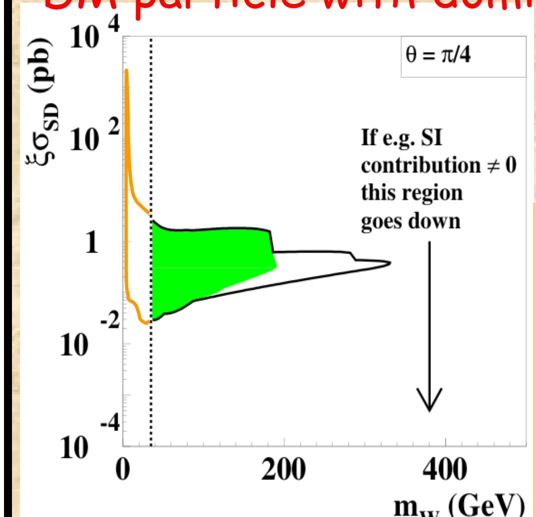
Region of interest for a neutralino in supersymmetric schemes where assumption on gaugino-mass unification at GUT is released and for "generic" DM particle

Model dependent lower bound on neutralino mass as derived from LEP data in supersymmetric schemes based on GUT assumptions (DPP2003)



higher mass region allowed for low v_0, every set of parameters' values and the halo models: Evans' logarithmic C1 and C2 co-rotating, triaxial D2 and D4 non-rotating, Evans power-law B3 in set A

DM particle with dominant SD coupling



volume allowed in the space (m_W, $\xi\sigma_{SD}$, θ); here example of a slice for $\theta=\pi/4$ ($0 \leq \theta < \pi$).

Regions above 200 GeV allowed for low v_0, for every set of parameters' values and for Evans' logarithmic C2 co-rotating halo models

LIBRA

Upgrade di DAMA:

- 250 kg di NaI radio-puro
- nuova elettronica e DAQ

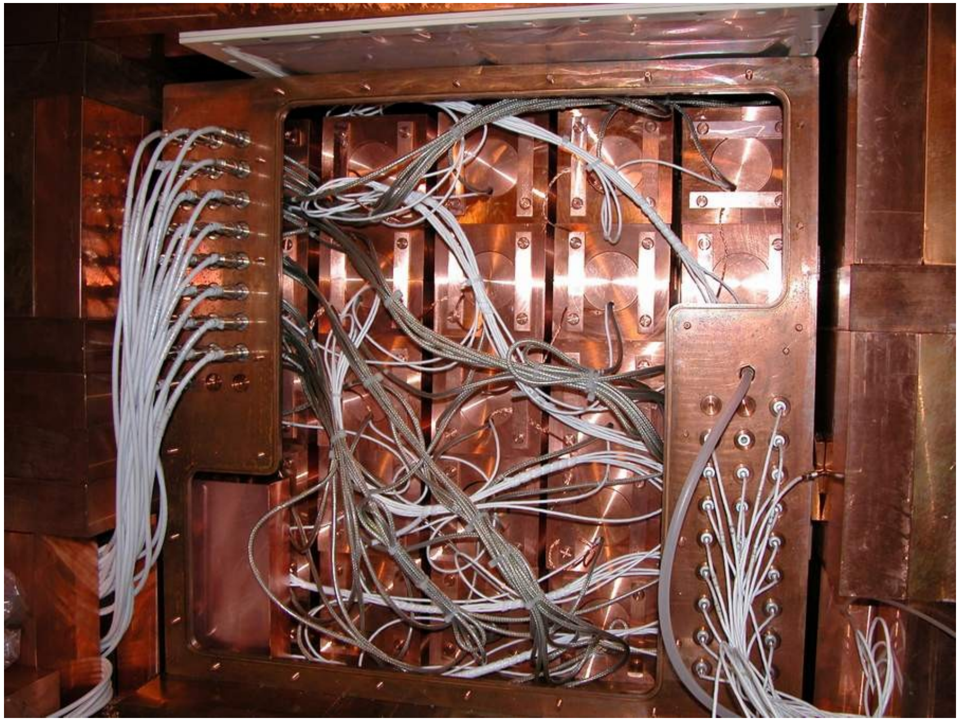
miglioramenti

- fondo
- resa di luce

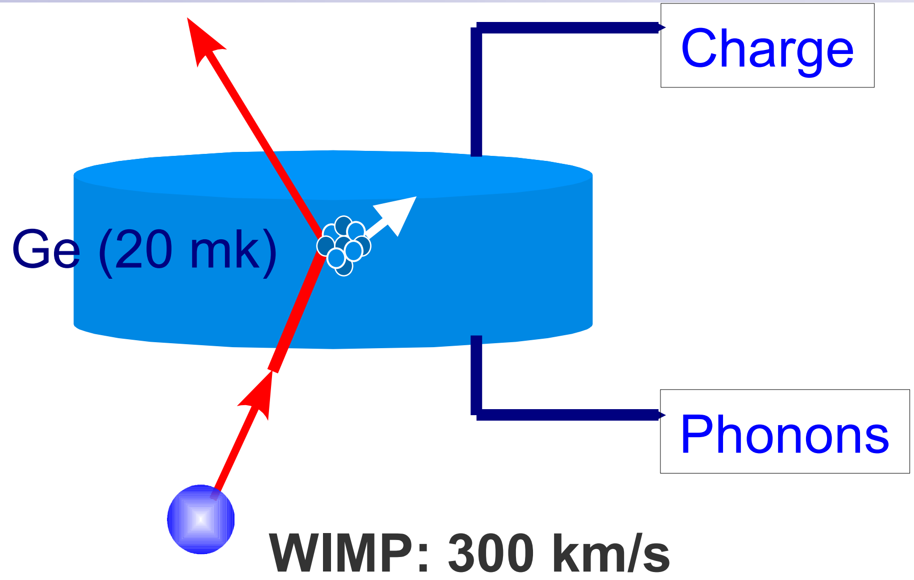
installazione completata alla fine del 2002

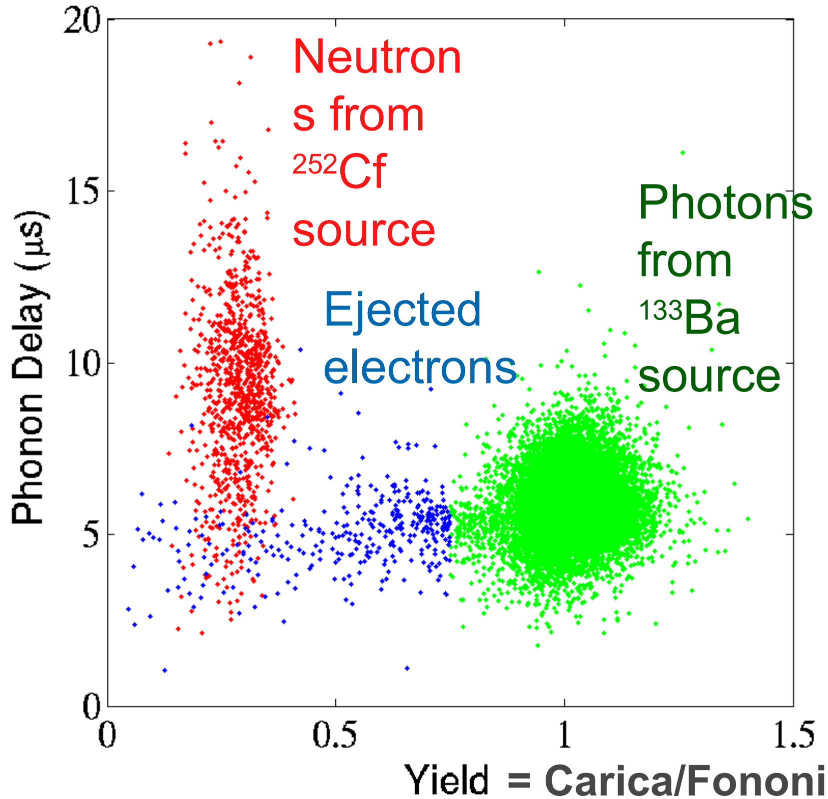
in misura dal Marzo 2003

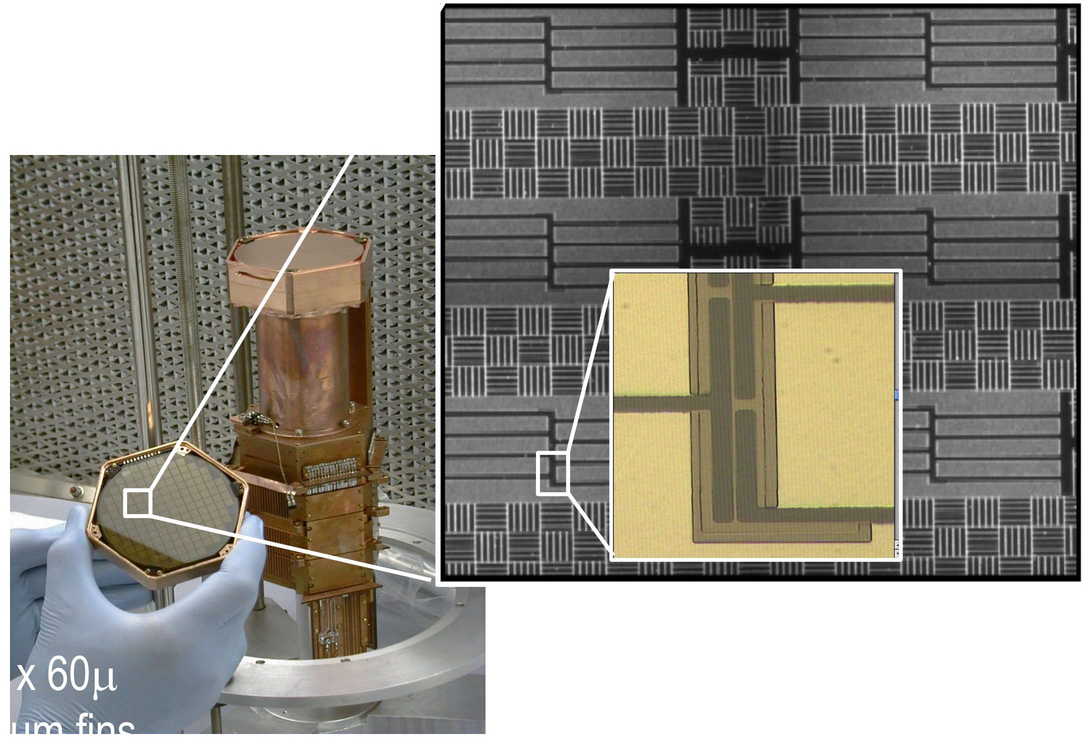
Risultati:
solo quando la statistica sara' pari a quella di DAMA



CDMS







WIMPs (e neutroni)
producono rinculi nucleari con Y ~ 1/3

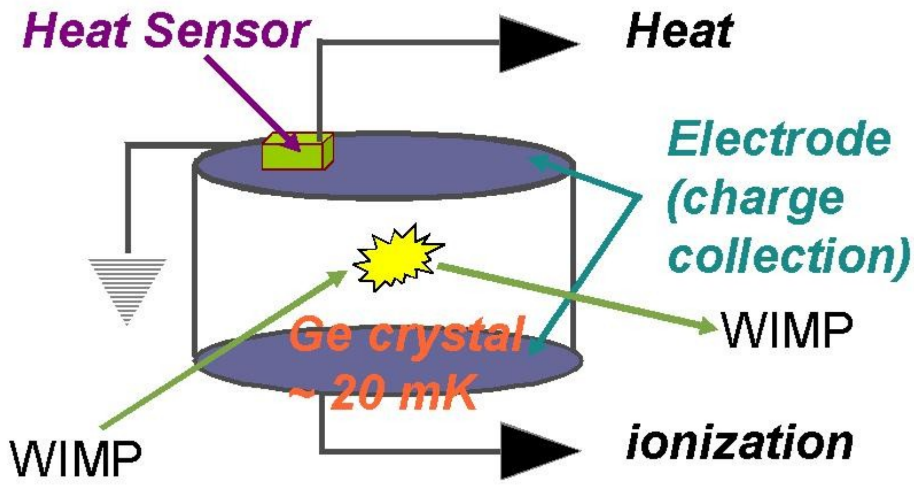
Maggior parte del fondo: Y ~ 1

Elettroni superficiali: Y < 1

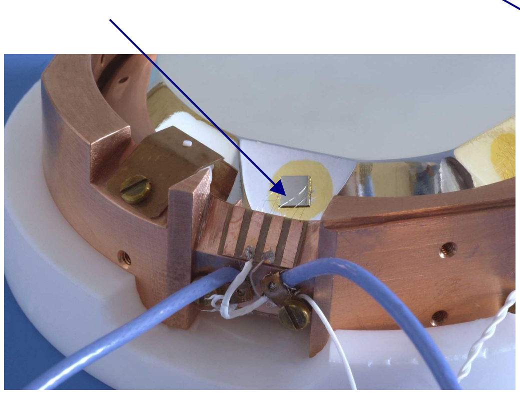
Timing di fononi e charge:
separazione di eventi di bulk e superficiali

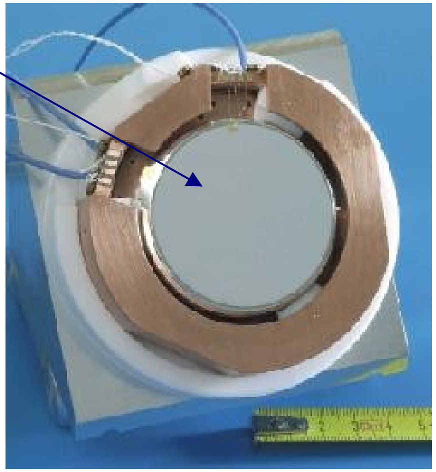
EDELWEISS

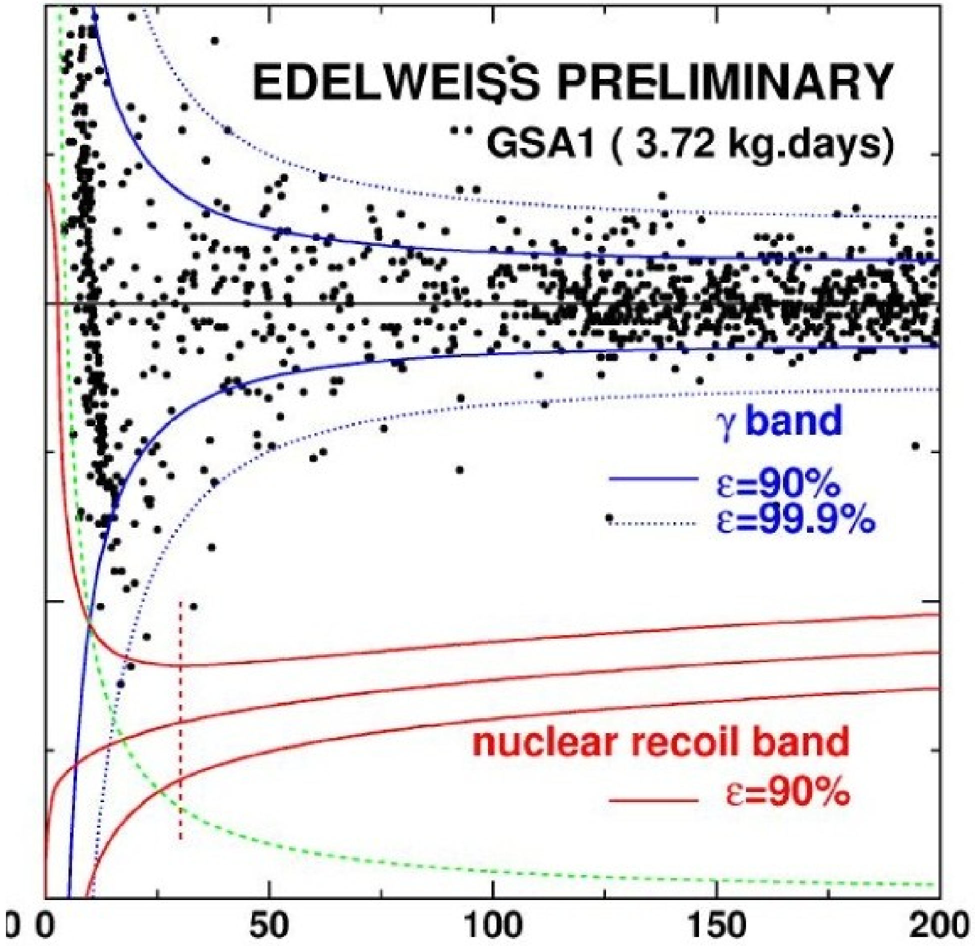
Frejus (4800 mwe)
20 kg d (1 kg Ge);
3 ev in NR region > 20 keV



Al sputtered electrodes







EDELWEISS II

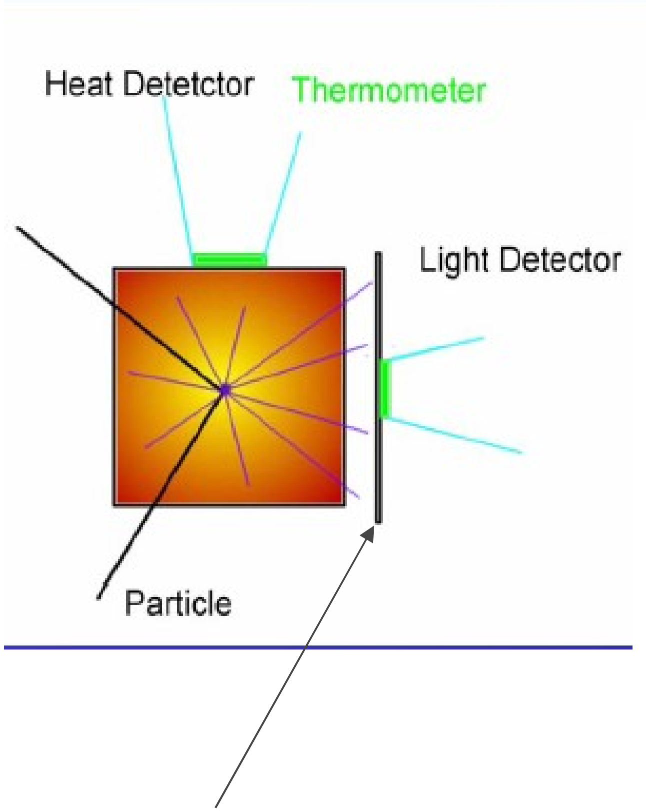
fattore 100 in sensibilita'

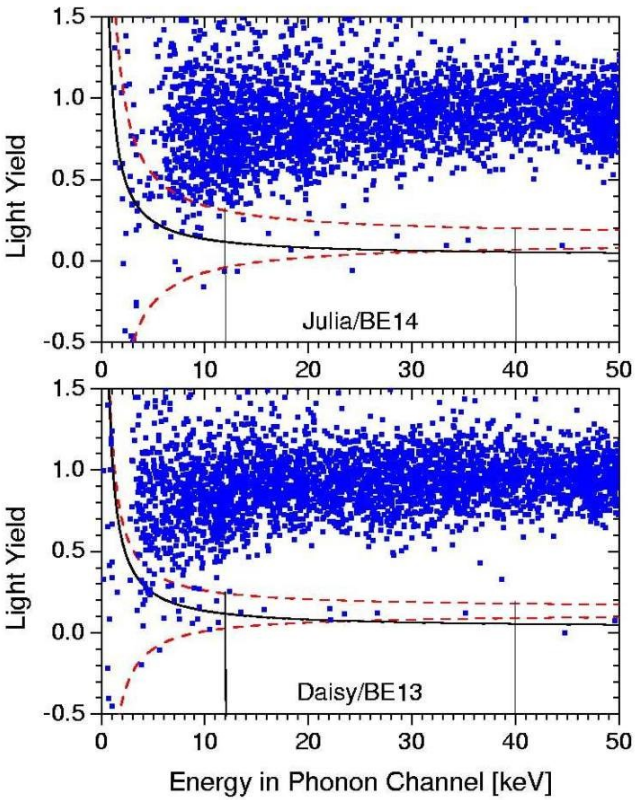
- 21 × 320 g Ge-NTD
- 7 thin film (NbSi) 200 g Ge

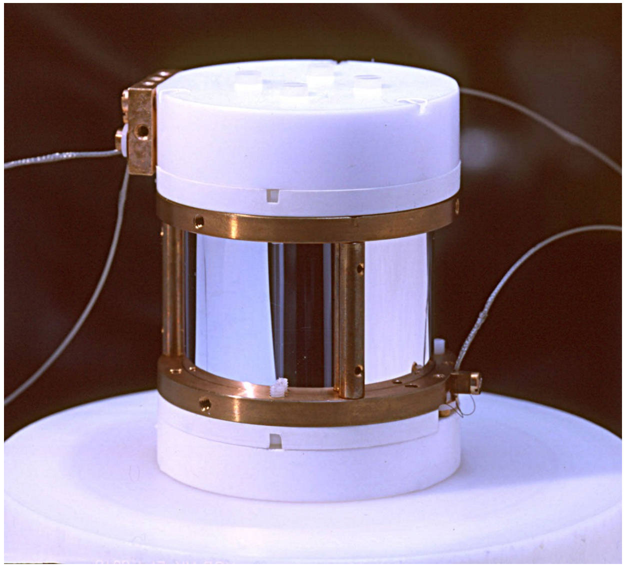
(28 rivelatori → 120)

CRESST II

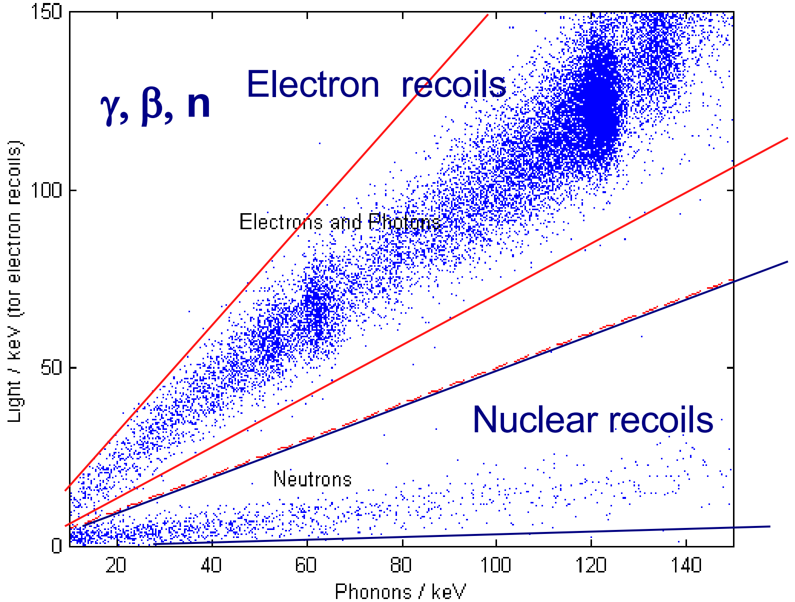
Gran Sasso (3800 mwe)
$CaWO_4$ @12 mK:
rivelatori simultanei di fononi + luce







Calibrazione: rivelatore di test da 6g



Luce vs fononi

IL FUTURO

MASSE ELEVATE (1 ton)
programmi a fasi

DISCRIMINAZIONE DEL SEGNALE

RIDUZIONE DEL FONDO

RIVELATORI CRIOGENICI

SuperCDMS (proposto a NSF/DoE)
rivelatori tipo CDMS
3 fasi: 25 kg –> 150 kg –> 1t

EURECA (Edelweiss+Cresst)
tecnologia non ancora definita

RIVELATORI CONVENZIONALI

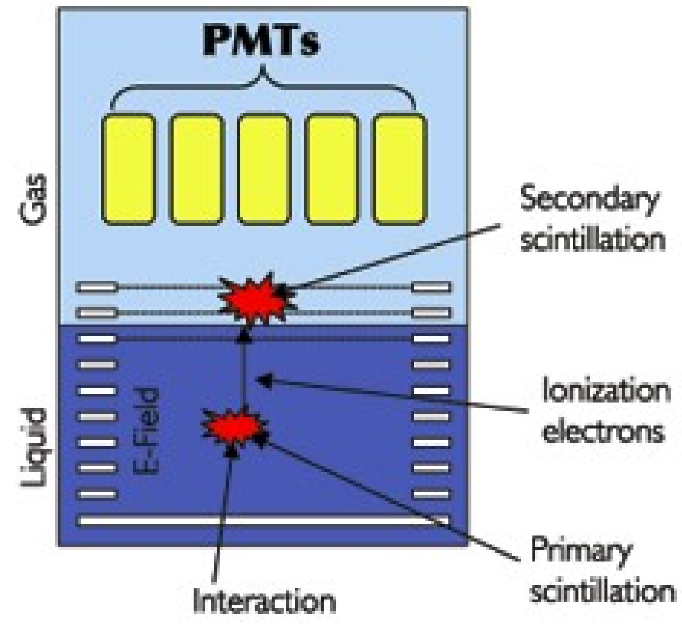
DAMA-1ton
upgrade di DAMA/LIBRA

RIVELATORI A GAS(LIQUIDI) NOBILI

LXe: **XENON, ZEPLIN** (II/III/max), **XMASS**
LAr: **WARP, ArDM**
LNe: **CLEAN** (principalmente per neutrini solari)

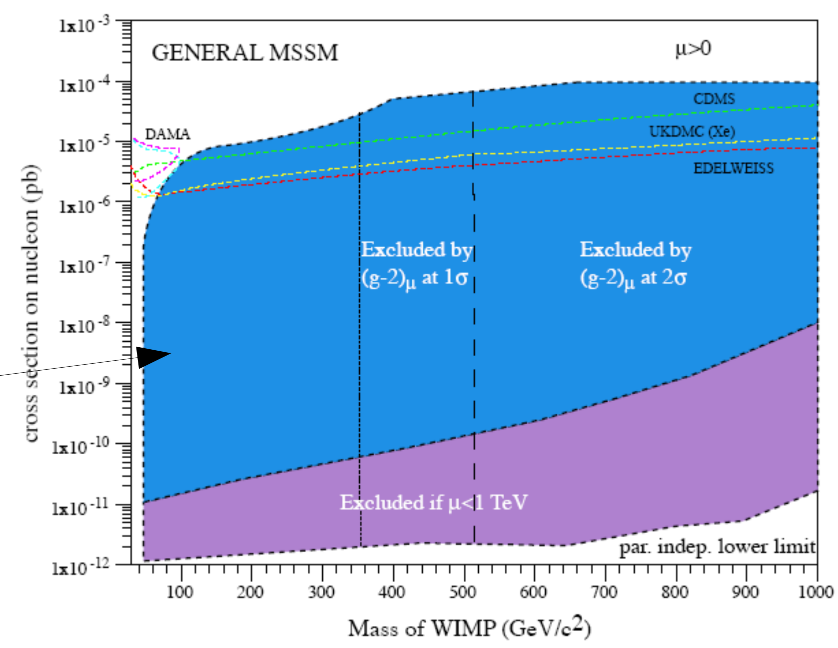
WARP @ LNGS

- Discriminazione basata sulla misura simulatanea di scintillazione e ionizzazione
  (sistema a 2 fasi: LAr e gas Ar)
  S1=scintillazione, S2=Ionizzazione.
  Discriminazione di forma su S1
  $(S2/S1)_{Elettroni}$ » $(S2/S1)_{Rinculi}$

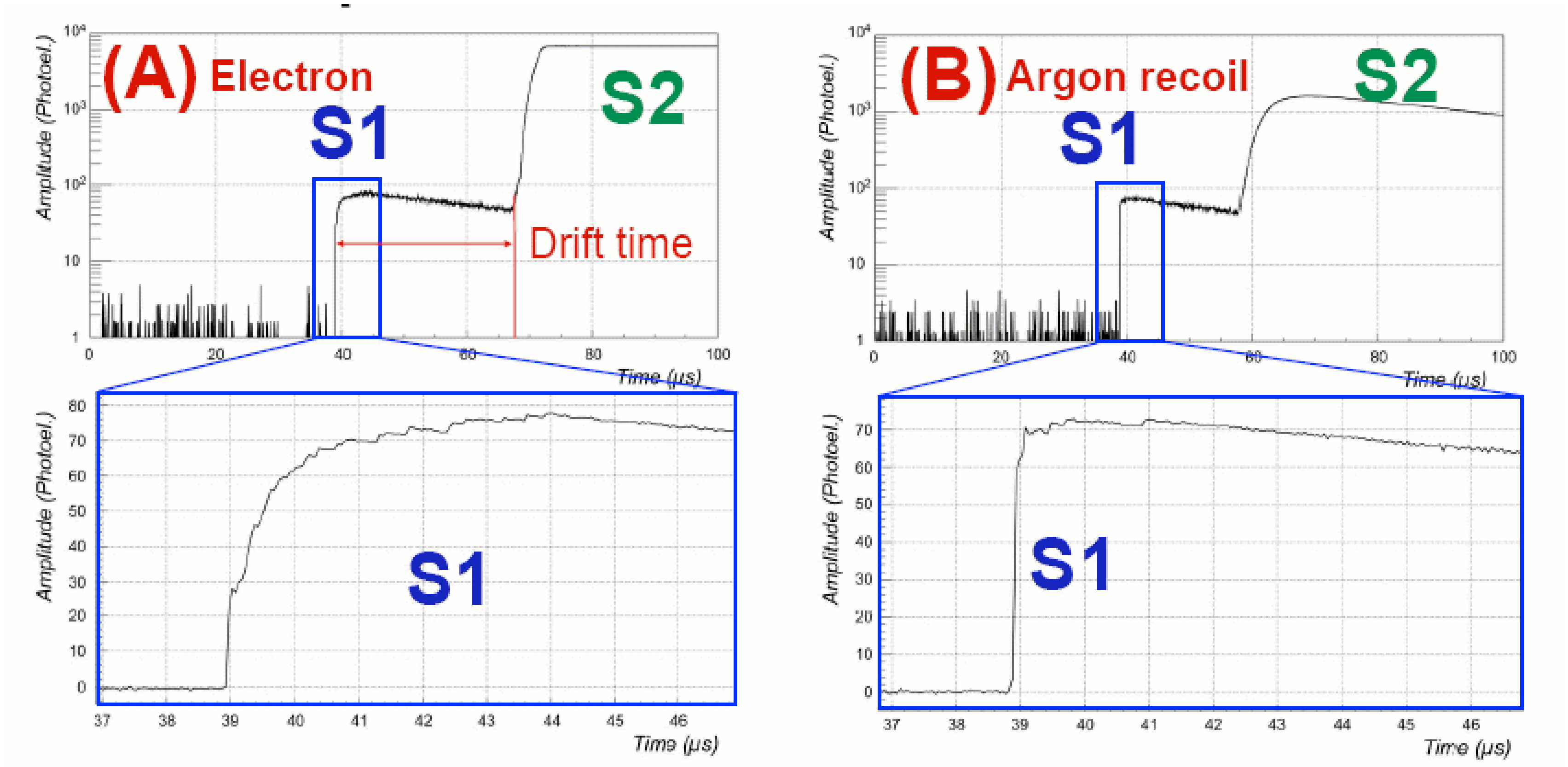


- Massa dei rivelatori incrementabile quasi a piacere (programma graduale)

- Goal scientifico:sensibilita' sufficiente per analizzare lo spazio dei parametri favorito nell'ambito di MSSM.
  $M_W \sim$ 40-400 GeV
  $\sigma_{nW} \sim 10^{-6}$-10^{-11} pb



DOPPIA DISCRIMINAZIONE



Eventi caratterizzati da:

- rapporto S2/S1tra scintillazione secondaria (S2=carica) e primaria (S1)
- tempo di salita del segnale primario S1

Particelle al minimo: alto S2/S1(~100) e S1 lento

Particelle alfa e rinculi nucleari: basso S2/S1 (<5) E s1 VELOCE

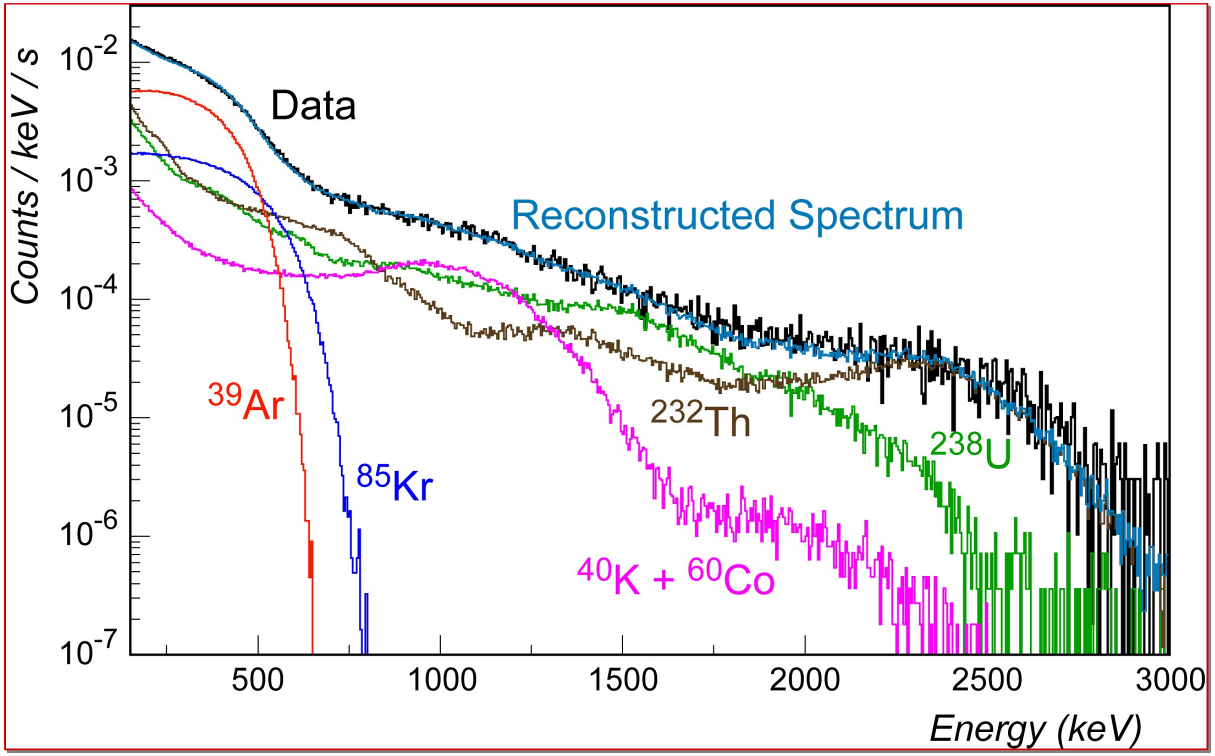
WARP: prototipo da 2.3 l

Caratterizzazione del metodo

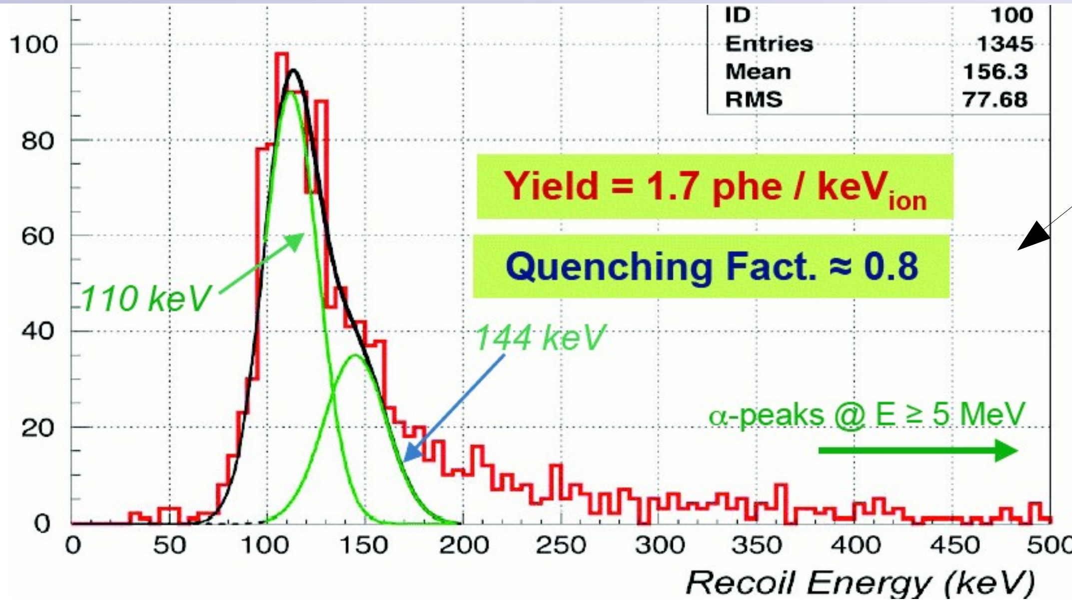
- efficienza di estrazione in funzione del campo elettrico
- produzione di luce (proporzionale)
- risposta del rivelatore a diverse sorgenti (α, γ e n)
- **S1 @ 1kV/cm – n: 0.67 phe/keV γ: 2.3 phe/keV**
- Separazione: S2/S1 @ 3.5 kV/cm

  e: 11.9 α: 0.19 rinculi: < 0.19
- **Studio dei contributi di fondo**
- **Risultati DM (rilevanti)**

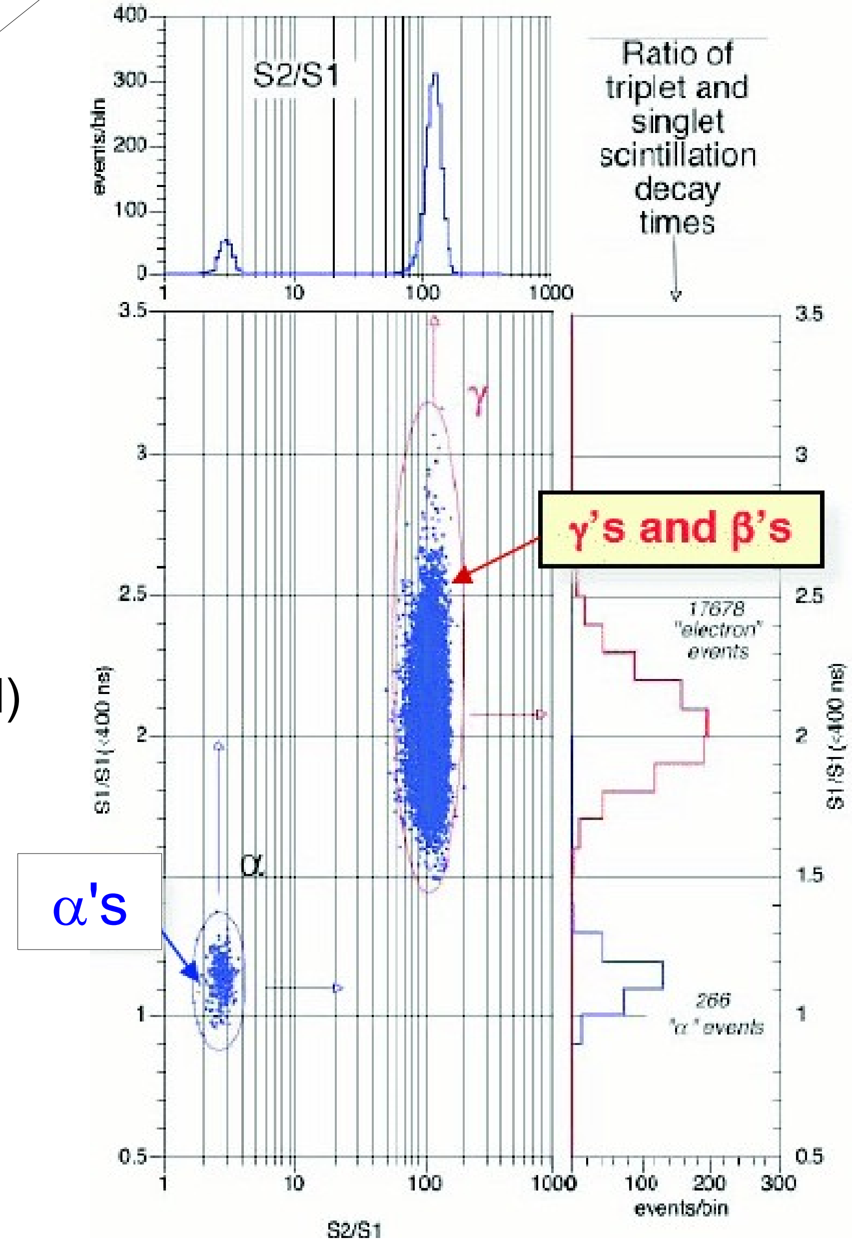
Rate (Hz) - Eγ > 150 keV	
^{232}Th chain	0.74
^{238}U chain	0.64
^{40}K + ^{60}Co	0.26
^{85}Kr	**0.56**
^{39}Ar	**1.50**
Total reconstr.	3.70
Total measured	3.71

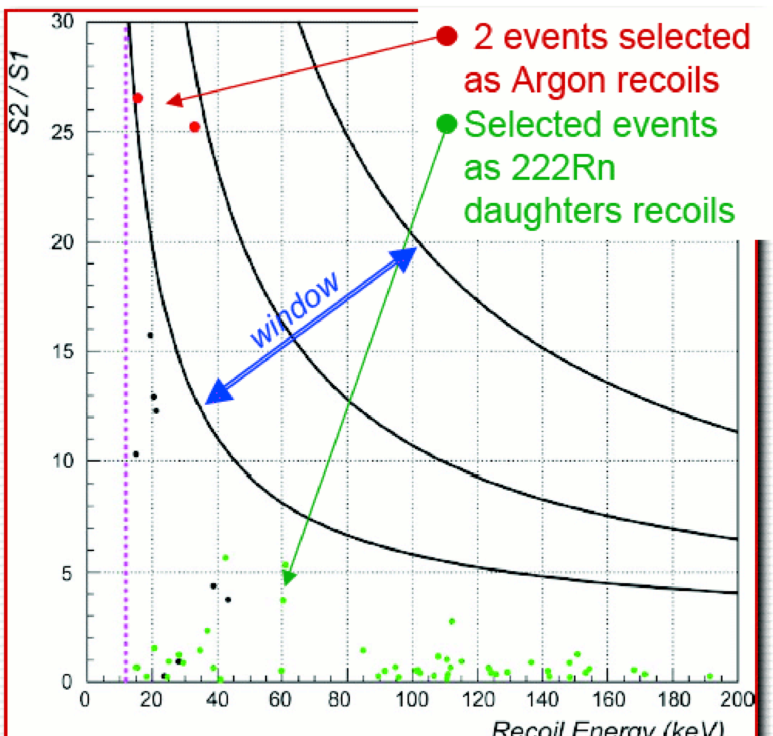


WARP 2.3: risultati



Energia riculi nucleari (^{222}Rn: 110 e 140 keV)





Primi candidati
10.1 kg d (5.5 d)

Analisi combinata S2/S1 e RT S1

WARP-140 (100 l)

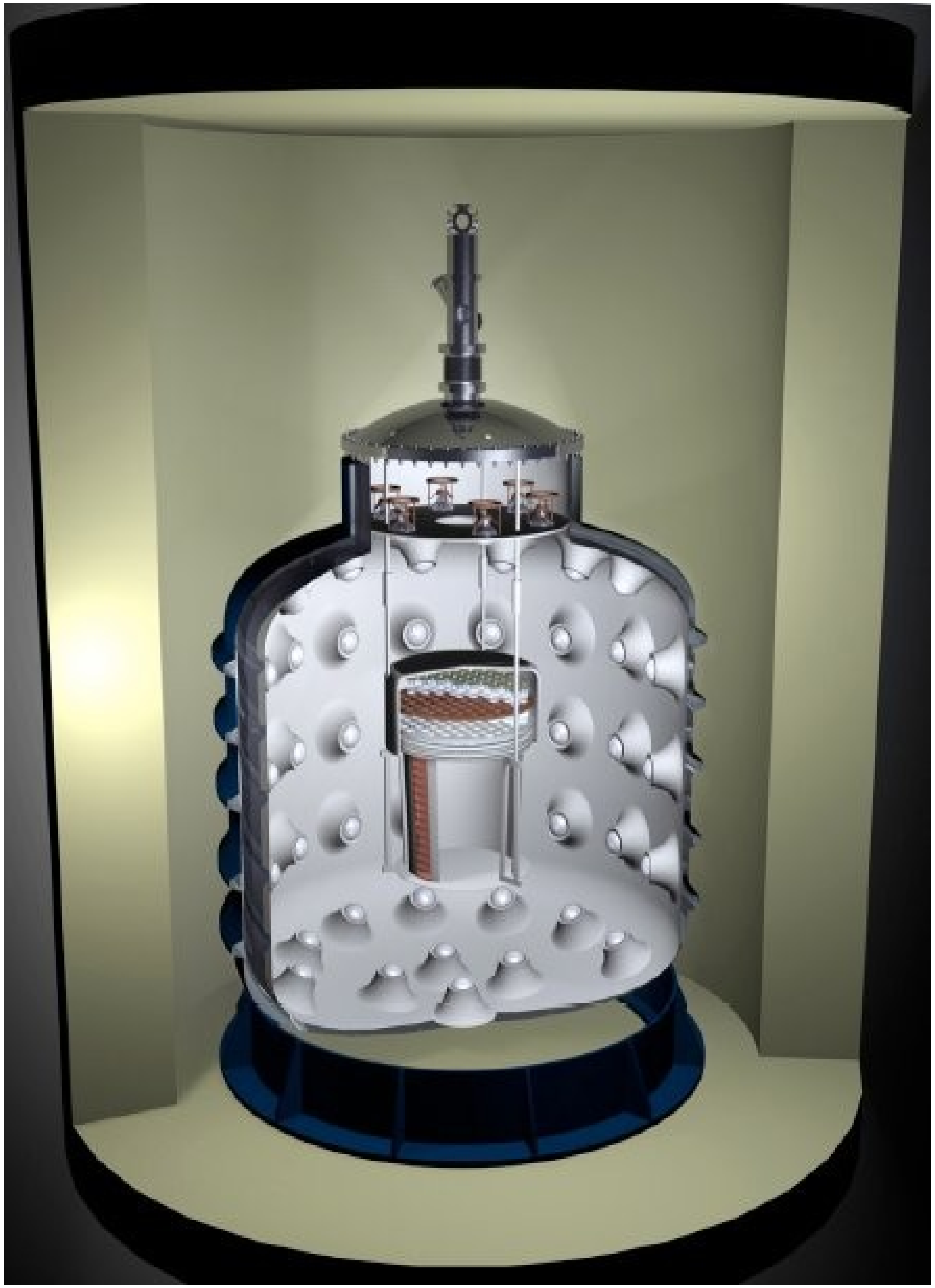
- Volume sensibile a 2 fasi: 100 litri
- Ampia regione di veto attivo (LAr)
- Pesanti schermature passive per γ e n

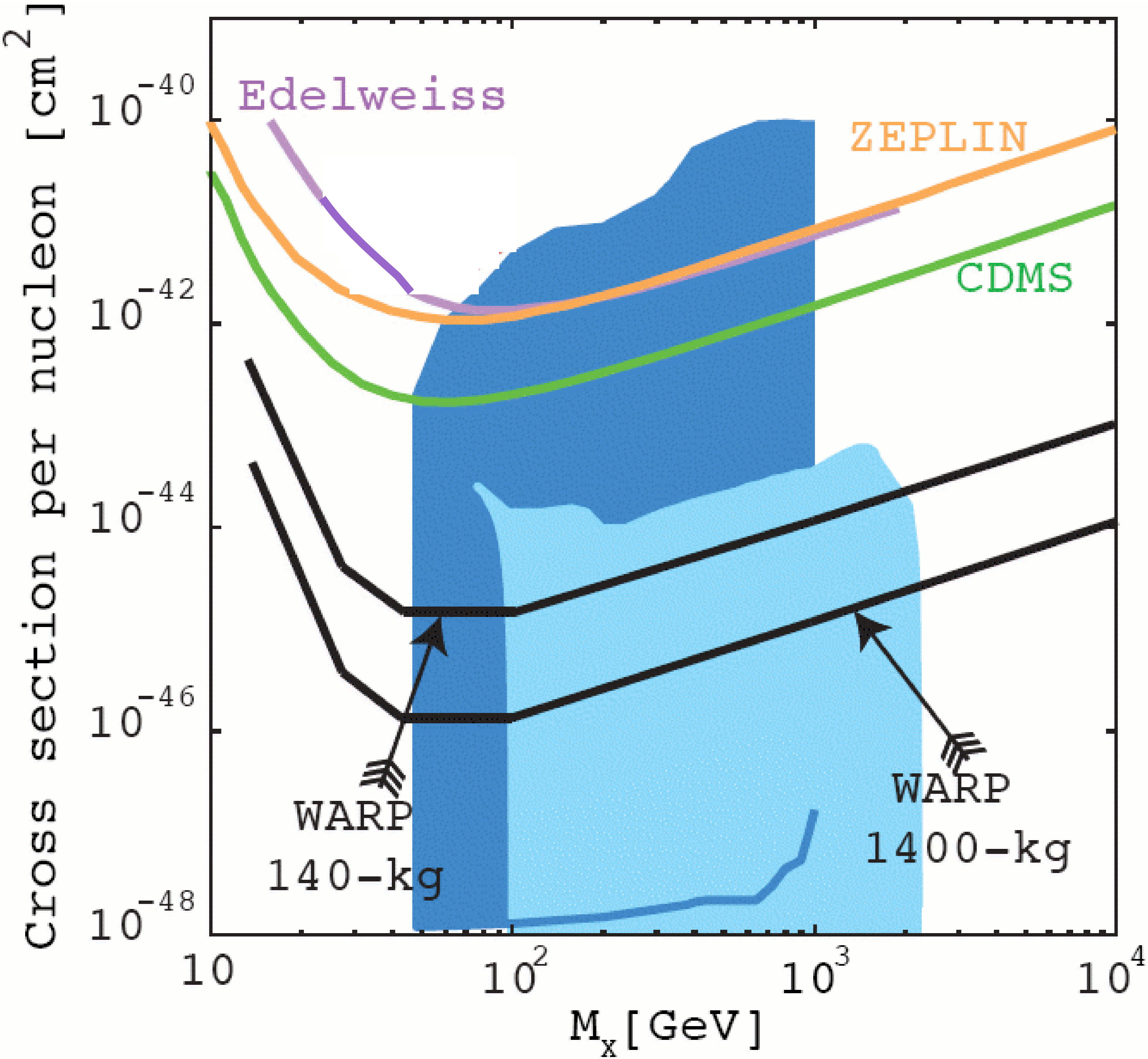
Rivelatore interno

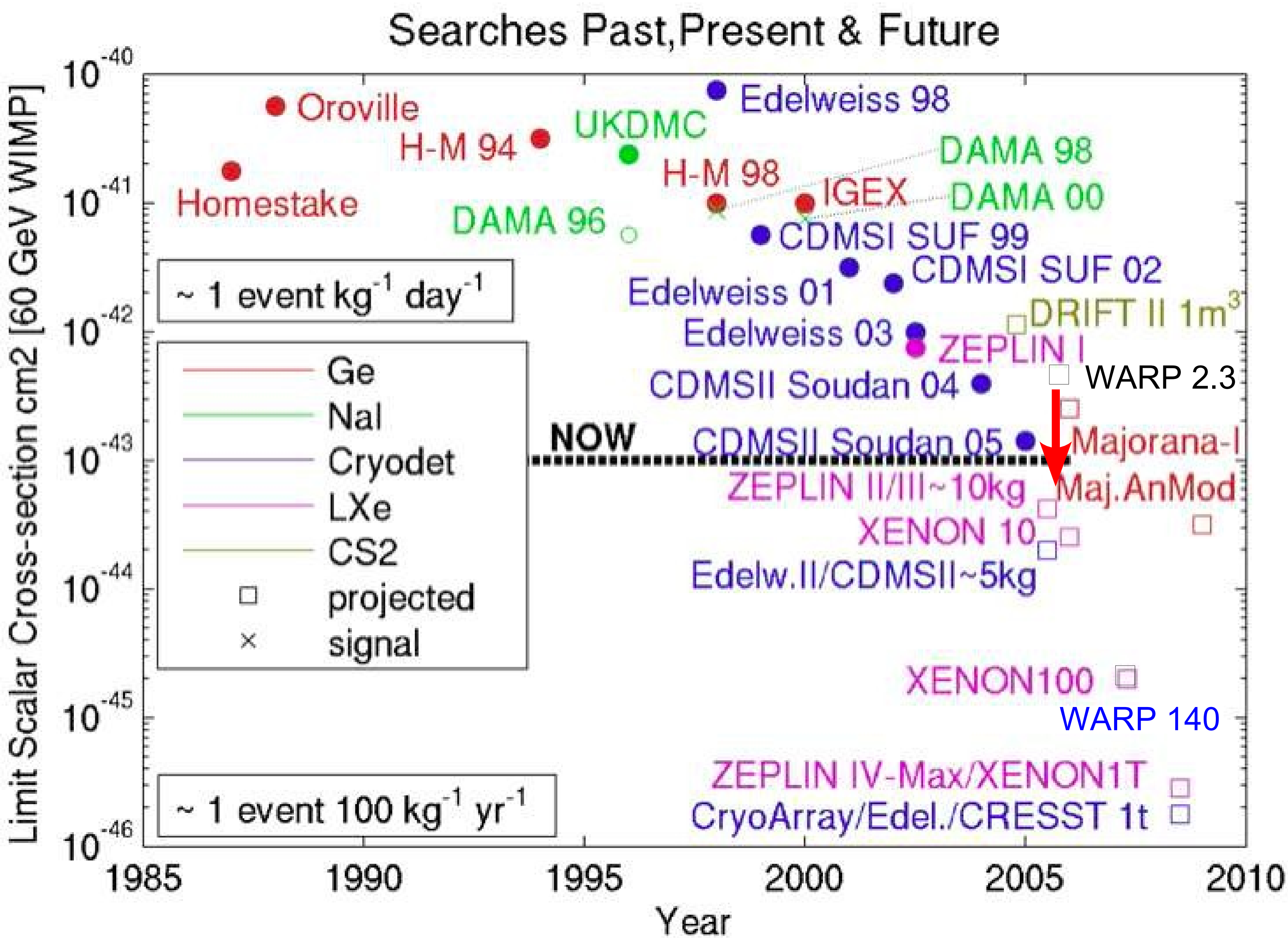
- Il volume sensibile riproduce lo schema della camera da 2.3 litri (dimensioni e materiali a parte)
- 62 PMT da 2” (copertura 10%)
- Cappa in acciaio inox per formare la tasca di Ar gassoso
- Sistema di anelli di rame depositati su strato di kapton

Veto Attivo

- Strato rifletente su tutte le superfici interne
- Efficienza veto: $1/10^4$
- 400 PMT da 3” (copertura 10%)
- 3 phe/keV – 20 phe di soglia




Cross section per nucleon [cm^2]
10^{-40}
10^{-42}
10^{-44}
10^{-46}
10^{-48}
Edelweiss
ZEPLIN
CDMS
WARP
140-kg
WARP
1400-kg
10
10^2
10^3
10^4
M_X [GeV]



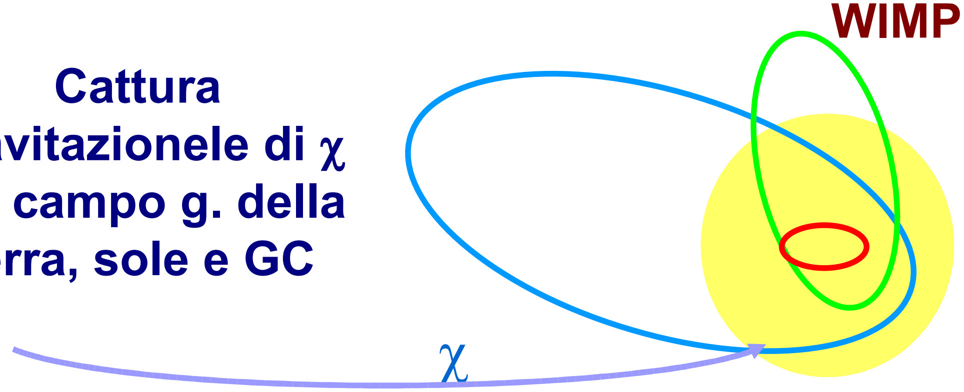
Searches Past,Present & Future
Limit Scalar Cross-section cm2 [60 GeV WIMP]
Year
~ 1 event kg-1 day-1
~ 1 event 100 kg-1 yr-1
Ge
NaI
Cryodet
LXe
CS2
projected
signal
NOW
Oroville
Homestake
H-M 94
UKDMC
Edelweiss 98
DAMA 98
H-M 98
IGEX
DAMA 00
DAMA 96
CDMSI SUF 99
CDMSI SUF 02
Edelweiss 01
DRIFT II 1m3
Edelweiss 03
ZEPLIN I
WARP 2.3
CDMSII Soudan 04
CDMSII Soudan 05
Majorana-I
ZEPLIN II/III~10kg
Maj.AnMod
XENON 10
Edelw.II/CDMSII~5kg
XENON100
WARP 140
ZEPLIN IV-Max/XENON1T
CryoArray/Edel./CRESST 1t

WIMP: rivelazione indiretta

Annichilazione nell'alone, terra, sole, centro galattico

Segnatura	Esperimento
alone Positroni, Antiprotoni Gamma $\chi\ \chi \to Z\ \gamma,\ \gamma\gamma$	BESS, CAPRICE, AMS, CELESTE, GLAST, VERITAS, MILAGRO, HESS, MAGIC, CANGAROO….
Terra, Sole, GC Neutrini $\chi\ \chi \to WW,\ ff$ $W, f \to \nu X$	SuperK, Baksan,IMB, MACRO AMANDA, ANTARES, Baikal, …

Cattura gravitazionele di χ nel campo g. della terra, sole e GC



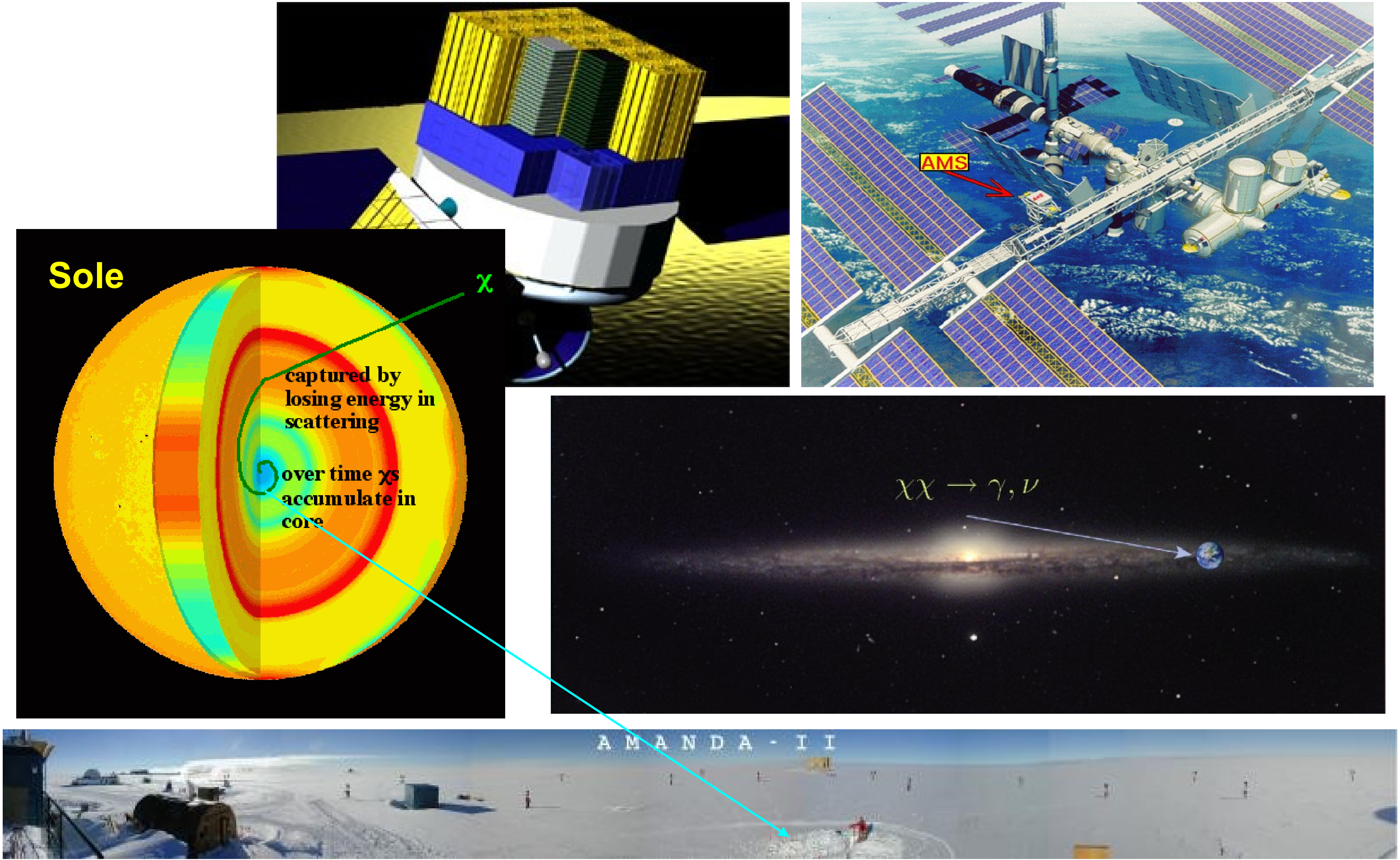
WIMPperdono energia per interazione elastica

fino a cattura ($v < v_{escape}$)

Equilibrio cattura + annichilazione:

densita' costante del core

Misure indirette



RADIAZIONE EM

Campo di interesse tipicamente astronomico

Analisi a diverse lunghezze d'onda

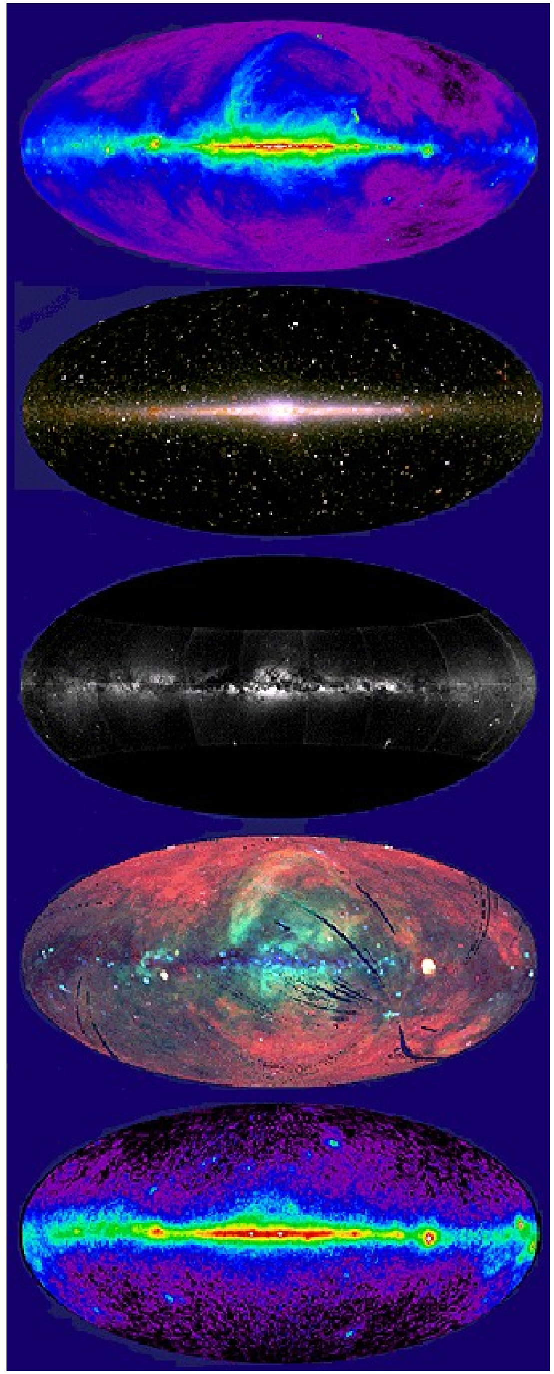
Radio

Infrared

Visible light

X-ray

Gamma Ray

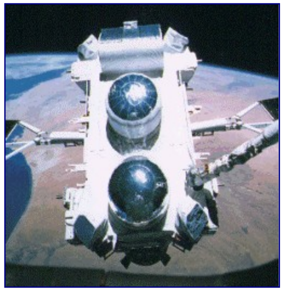


Radio télescope
de Bonn

Satellite
COBE

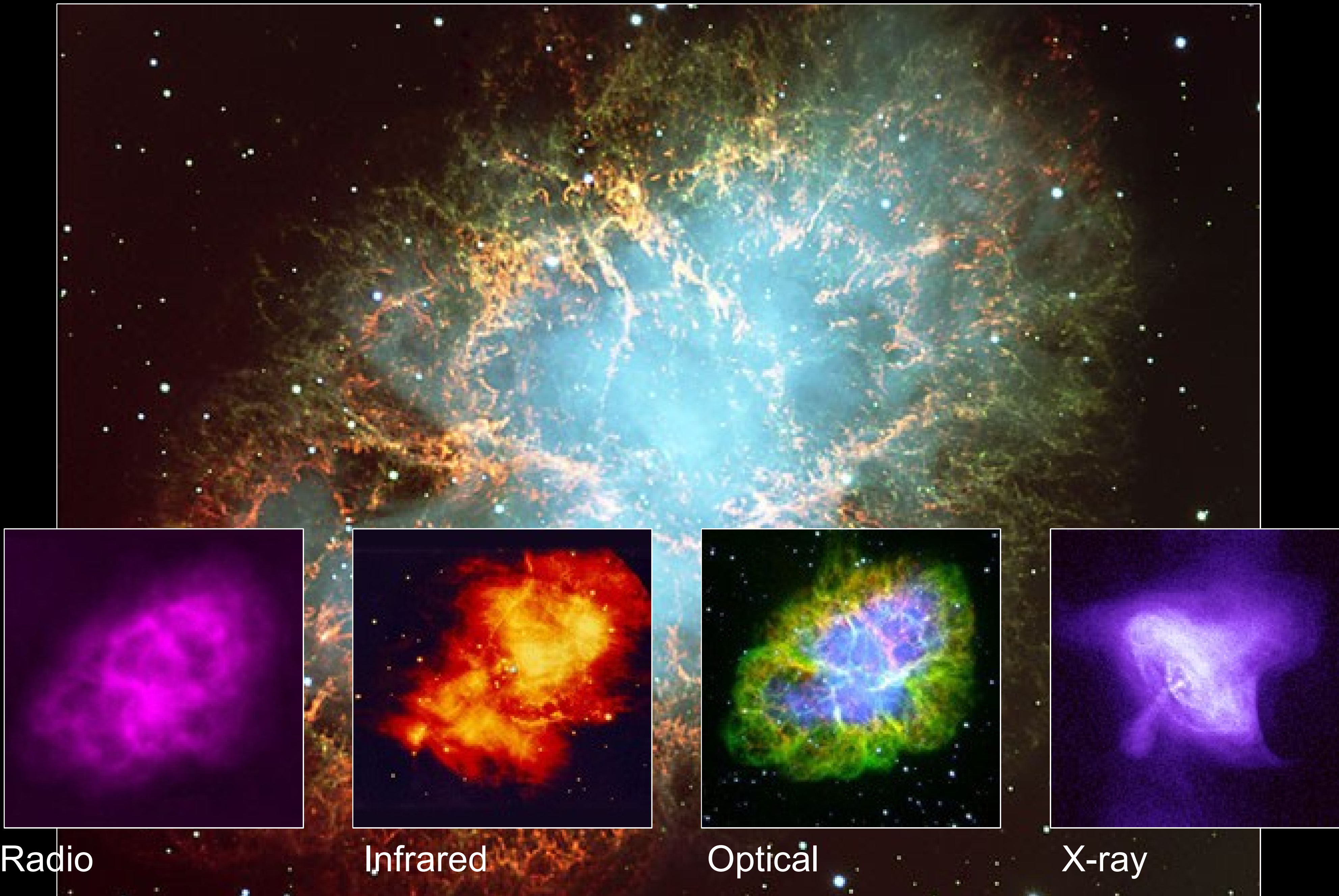
Télescope du
Mont Palomar

Satellite
INTEGRAL



Satellite
CGRO

Nebulosa del Granchio



CMBR

Risultati di noteole rilevanza per cosmologia (Ω) e fisica delle particelle (Σm_ν).

Esperimenti su

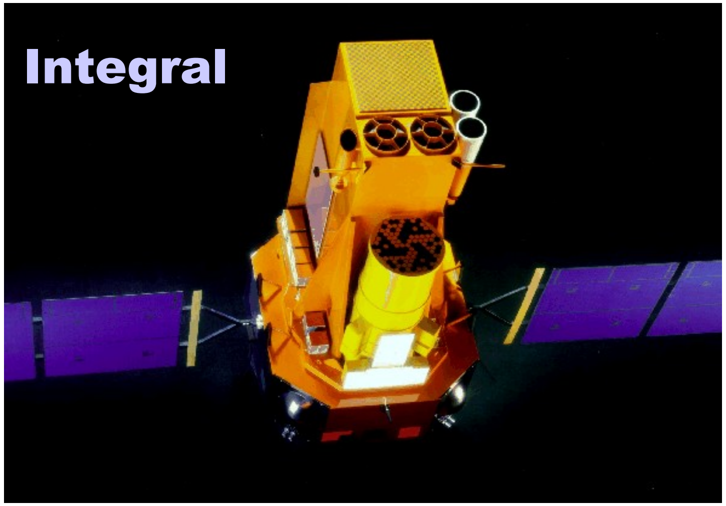
- Palloni: BOOMERANG, MAXIMA
- Satellite: WMAP

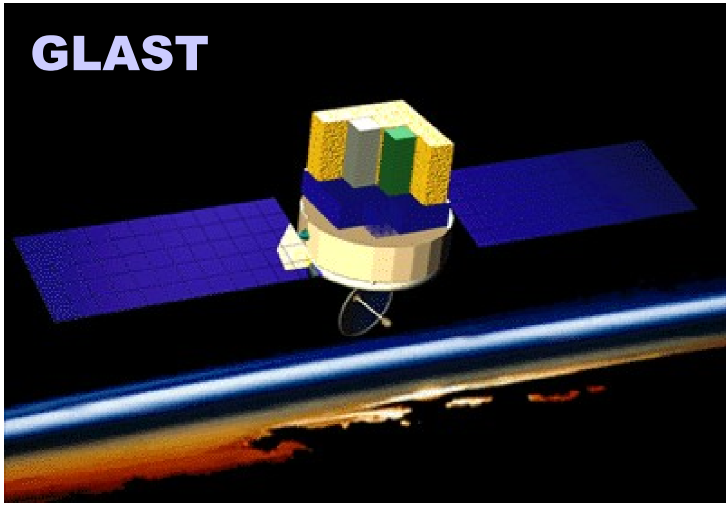
Inserimento in un campo di ricerca estrememamante importante e dal quale la Fisica delle Alte Energie è attualmente assente.

Gli esperimenti della prossima generazione basati principalmente sull'uso di **bolometri**

Astronomia γ

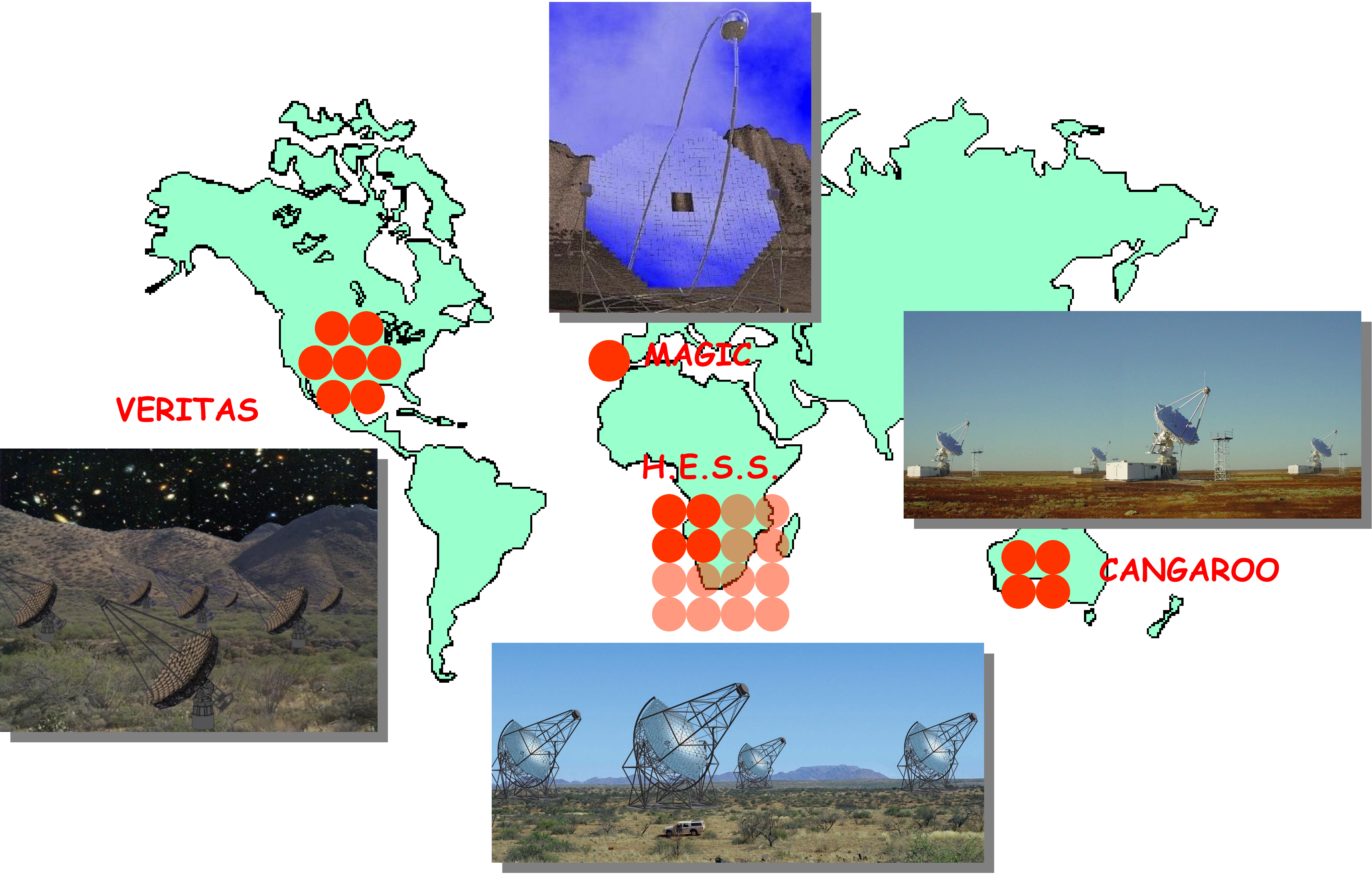
“Bassa Energia”: satellite





Alta Energia: da terra

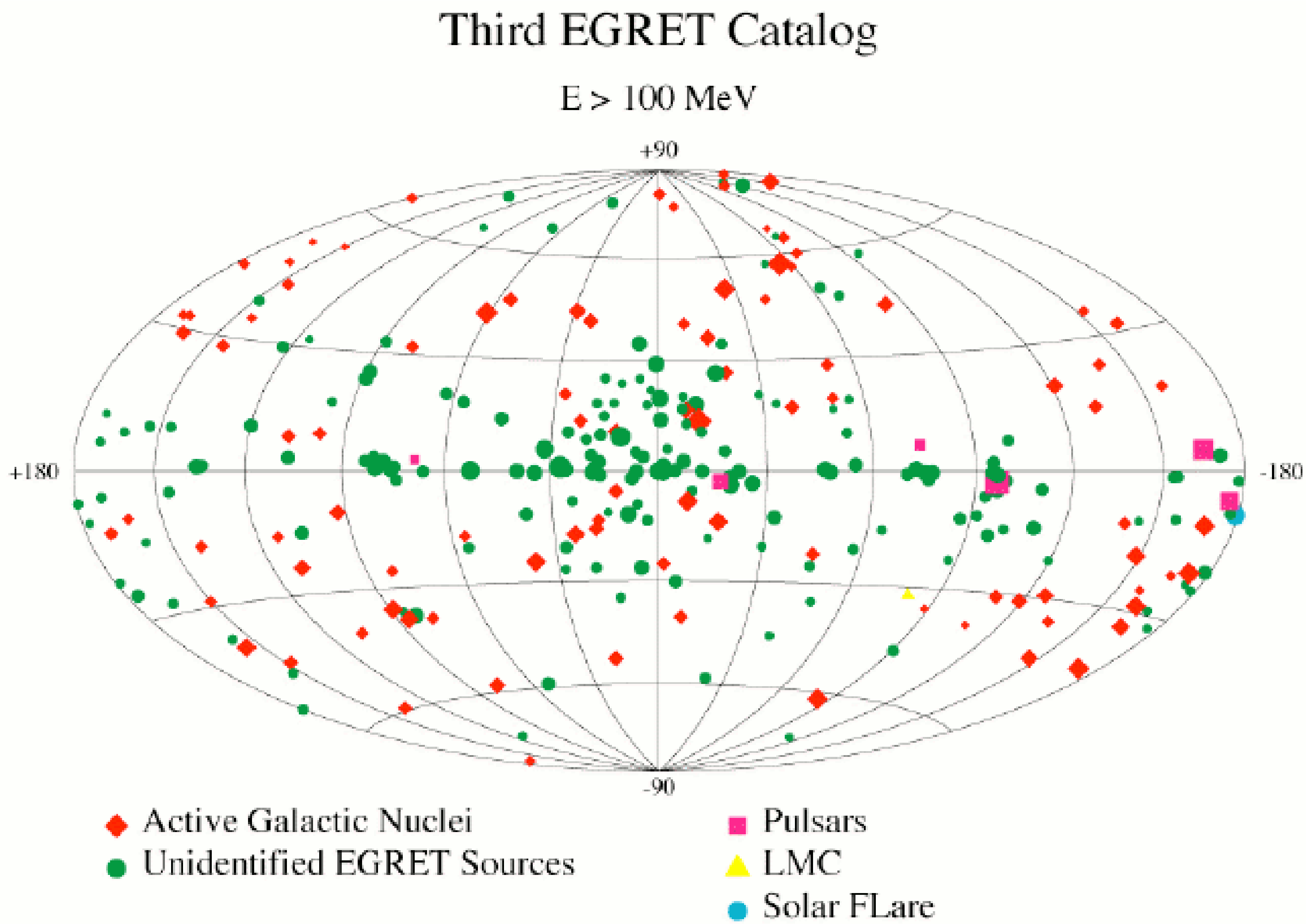
Il futuro dell'astronomia γ da terra



Astronomia γ

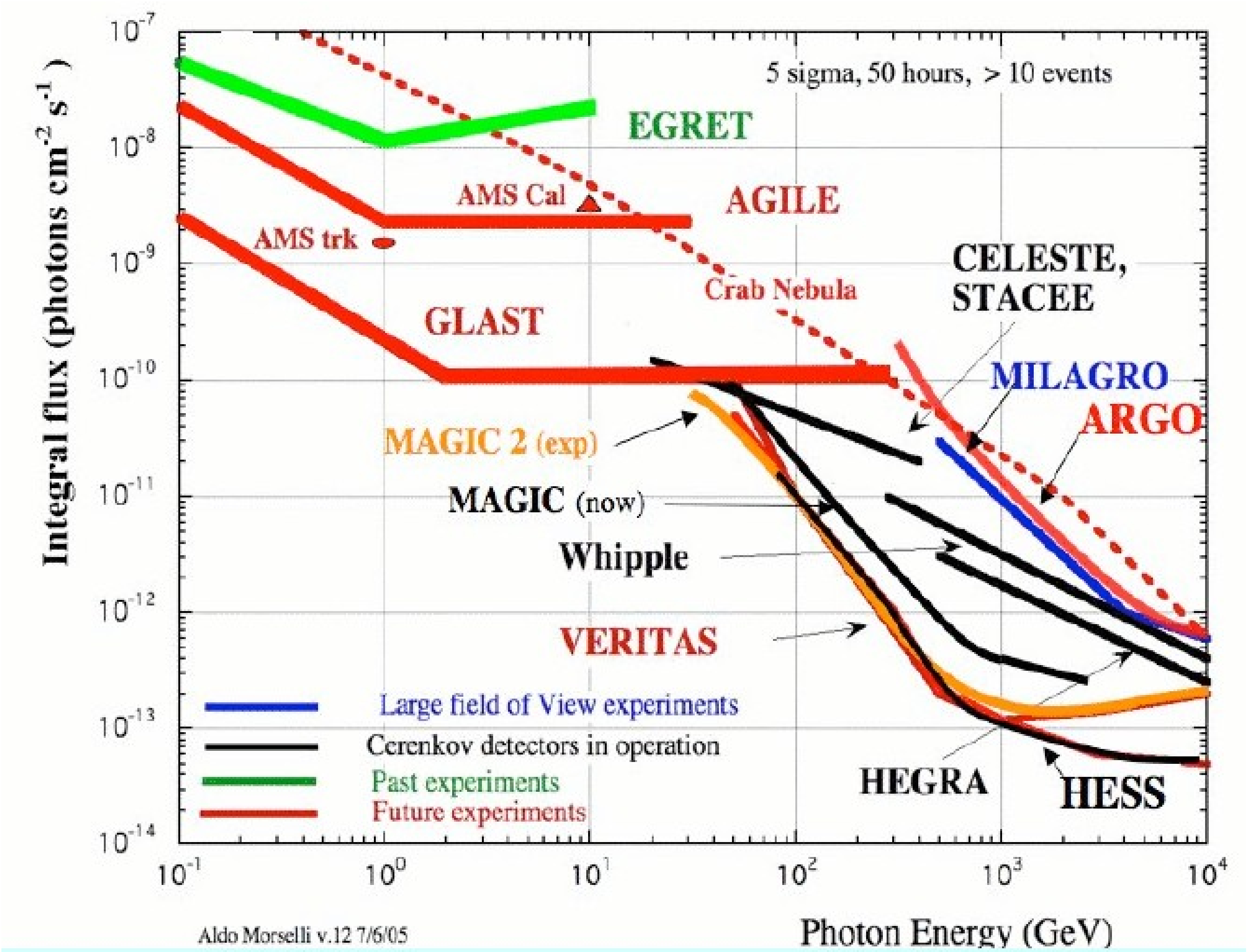
Astronomia dallo spazio
Astronomia da terra
- IACT
- EAS

Astronomia γ non vuol piu' dire solo identificare nuove sorgenti: **spettro energetico e morfologia**



Astronomia γ (2)

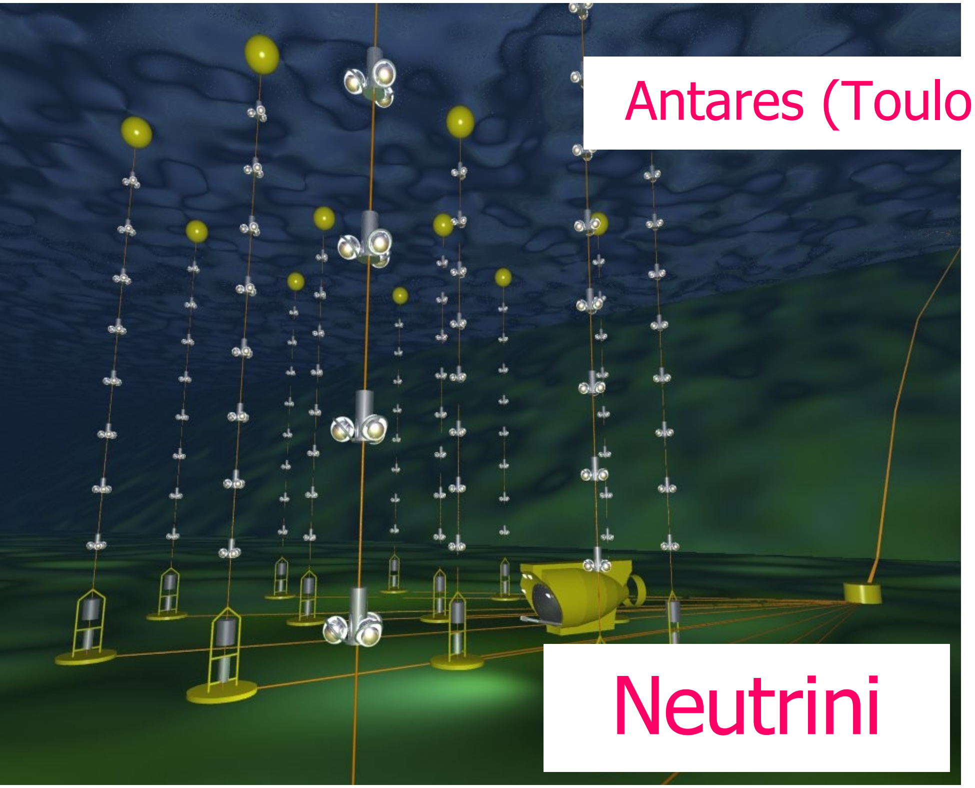
Sensibilita' dei rivelatori γ



Presente:
- AGILE
- GLAST
- MAGIC
- ARGO-YBJ

Futuro:
- GILDA
- Polarimetria X
- HESS+MAGIC

ASTRONOMIA NON FOTONICA

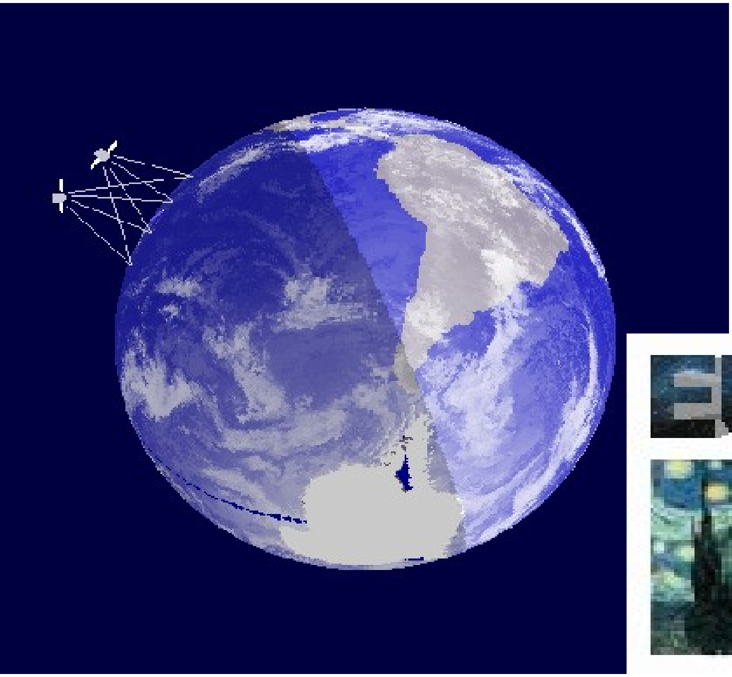


Antares (Toulon)

Neutrini

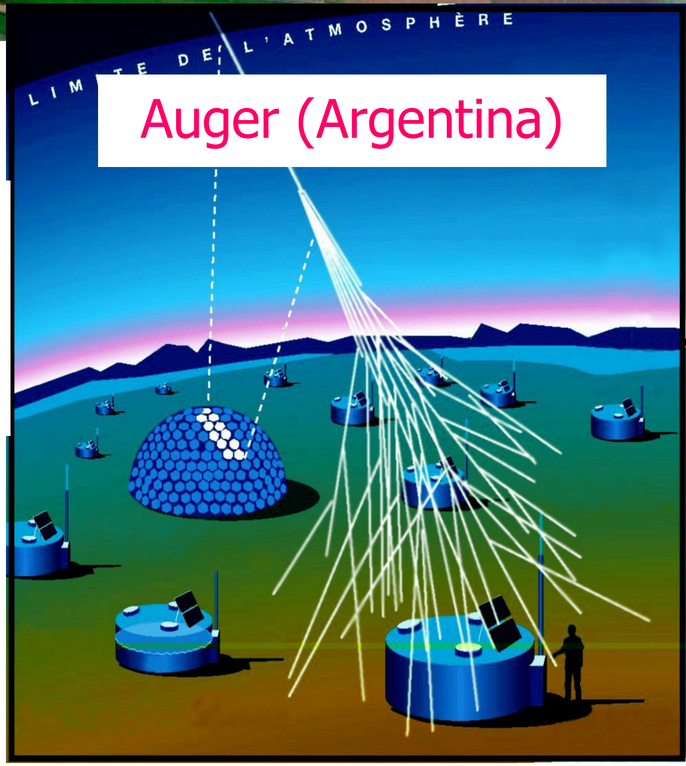
Gravitational Waves

Virgo (Pisa)



High Energy

Cosmic Rays

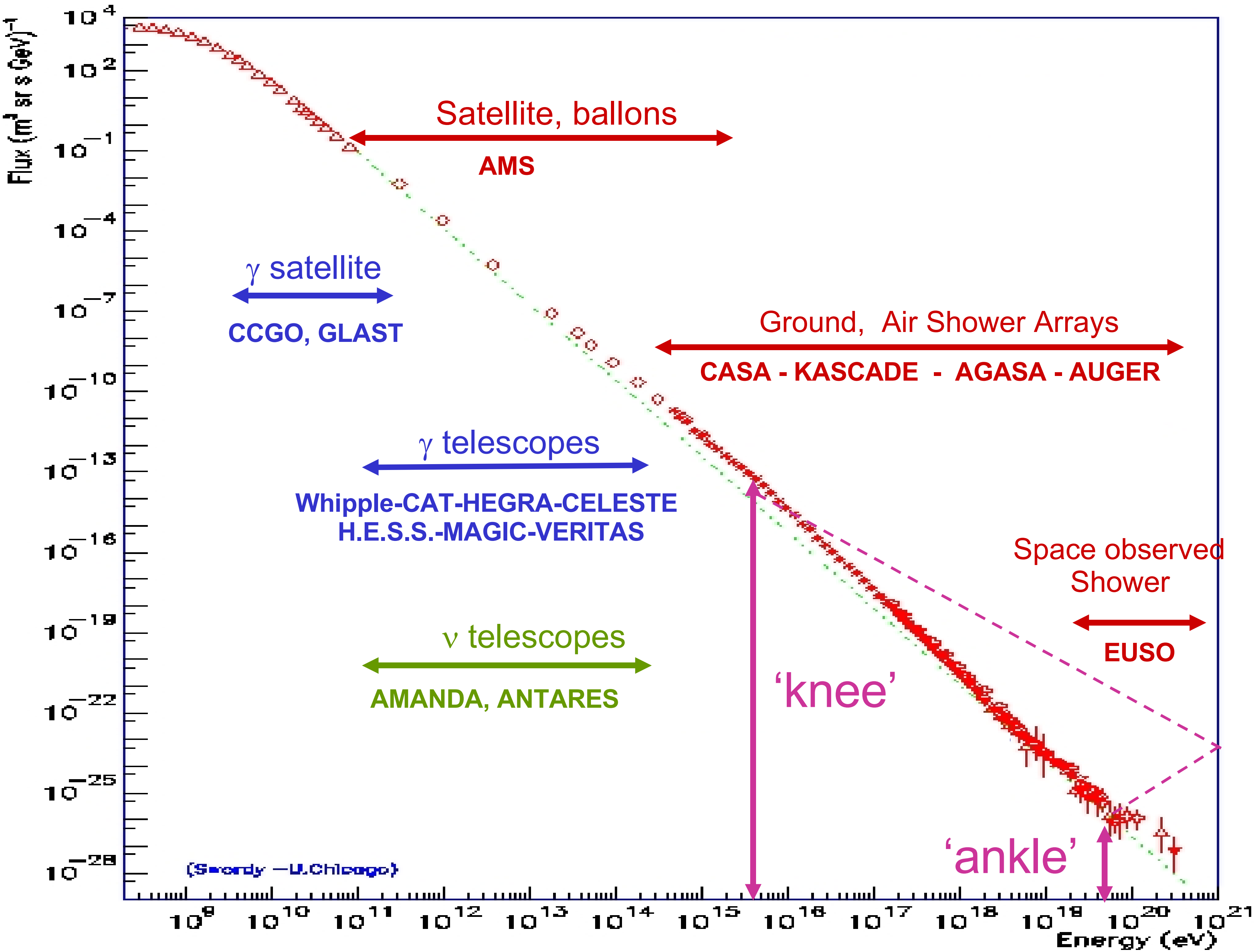


Auger (Argentina)

RAGGI COSMICI CARICHI

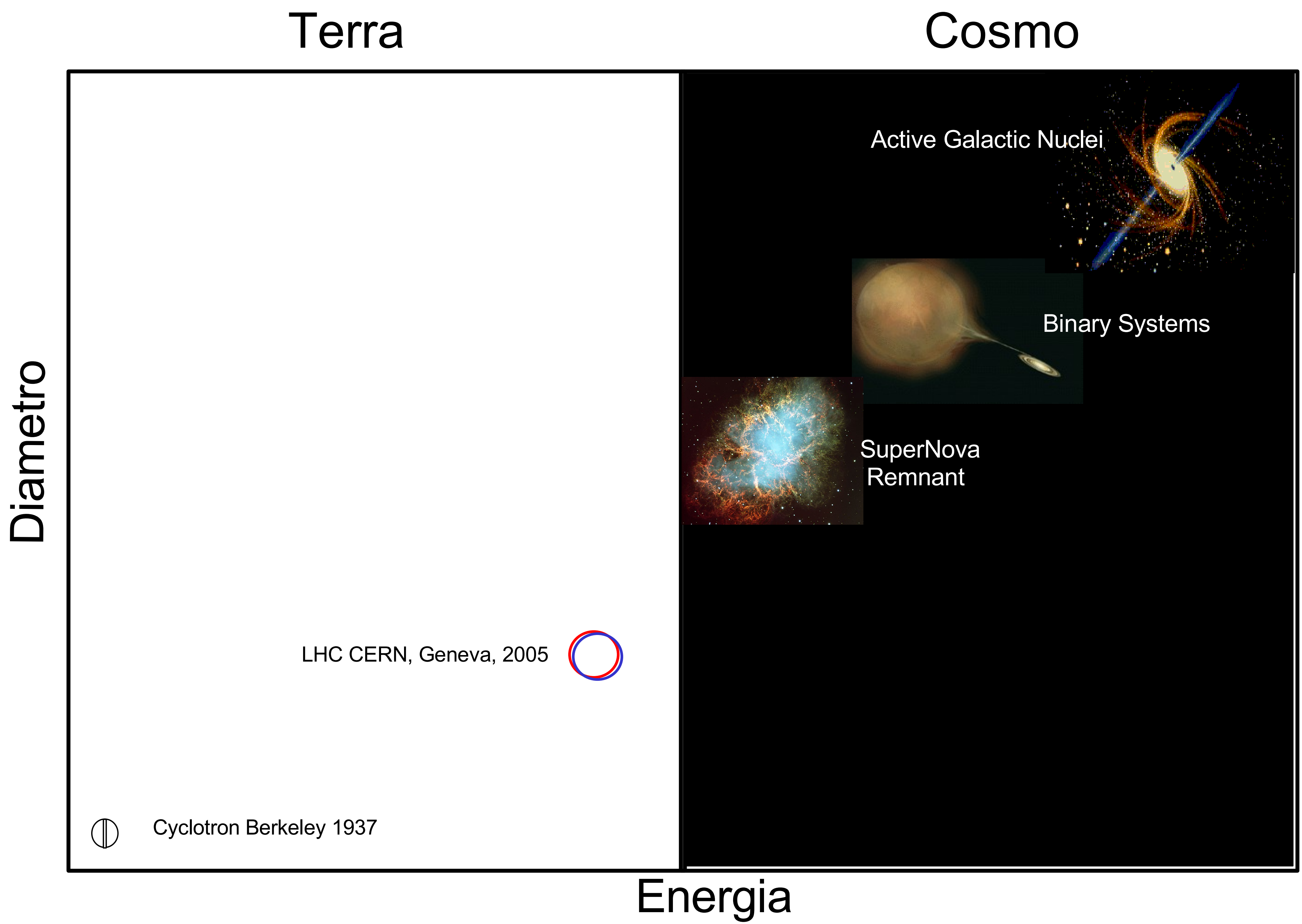
- Spettro
- Origine
- Composizione

Spettro



Flux (m² sr s GeV)⁻¹
Satellite, ballons
AMS
γ satellite
CCGO, GLAST
Ground, Air Shower Arrays
CASA - KASCADE - AGASA - AUGER
γ telescopes
Whipple-CAT-HEGRA-CELESTE
H.E.S.S.-MAGIC-VERITAS
Space observed
Shower
EUSO
ν telescopes
AMANDA, ANTARES
'knee'
'ankle'
Energy (eV)

Origine



Terra
Cosmo
Active Galactic Nuclei
Binary Systems
SuperNova
Remnant
LHC CERN, Geneva, 2005
Cyclotron Berkeley 1937
Diametro
Energia

Raggi cosmici carichi

E < 10^{14} eV esperimenti su palloni e/o satelliti

JACEE	PAMELA
RUNJOB	AMS-02
ATIC	
CREAM	
	CALET
	NUCLEON

E > 10^{19} eV esperimenti da terra ...

- spettro energetico
- regione GZK
- distribuzione direzionale(sorgenti puntiformi)
- oomposizione: nucleileggeri o pesanti, fotoni, neutrini, altro (?)

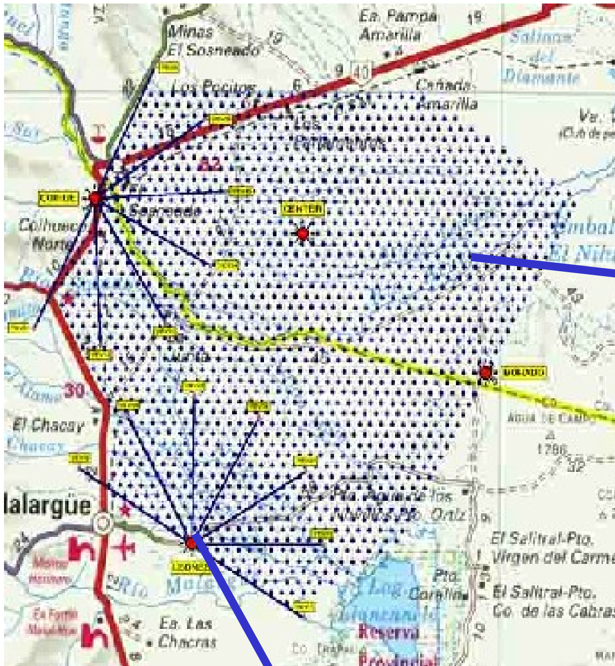
AUGER

EUSO

UHE ν_τ

AUGER

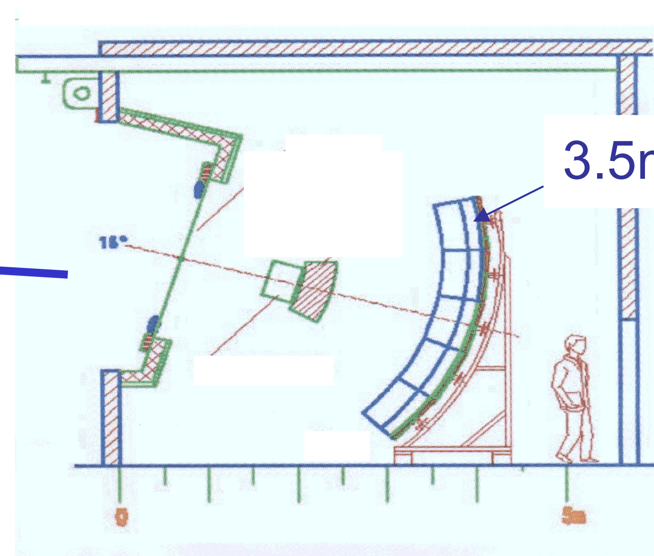
2 siti di 3000km^2 ciascuno, E > 5.10^{18}eV



Southern site,
Mendoza Province,
Argentina

Water Cherenkov
Tanks
(1600 each 10m^2)

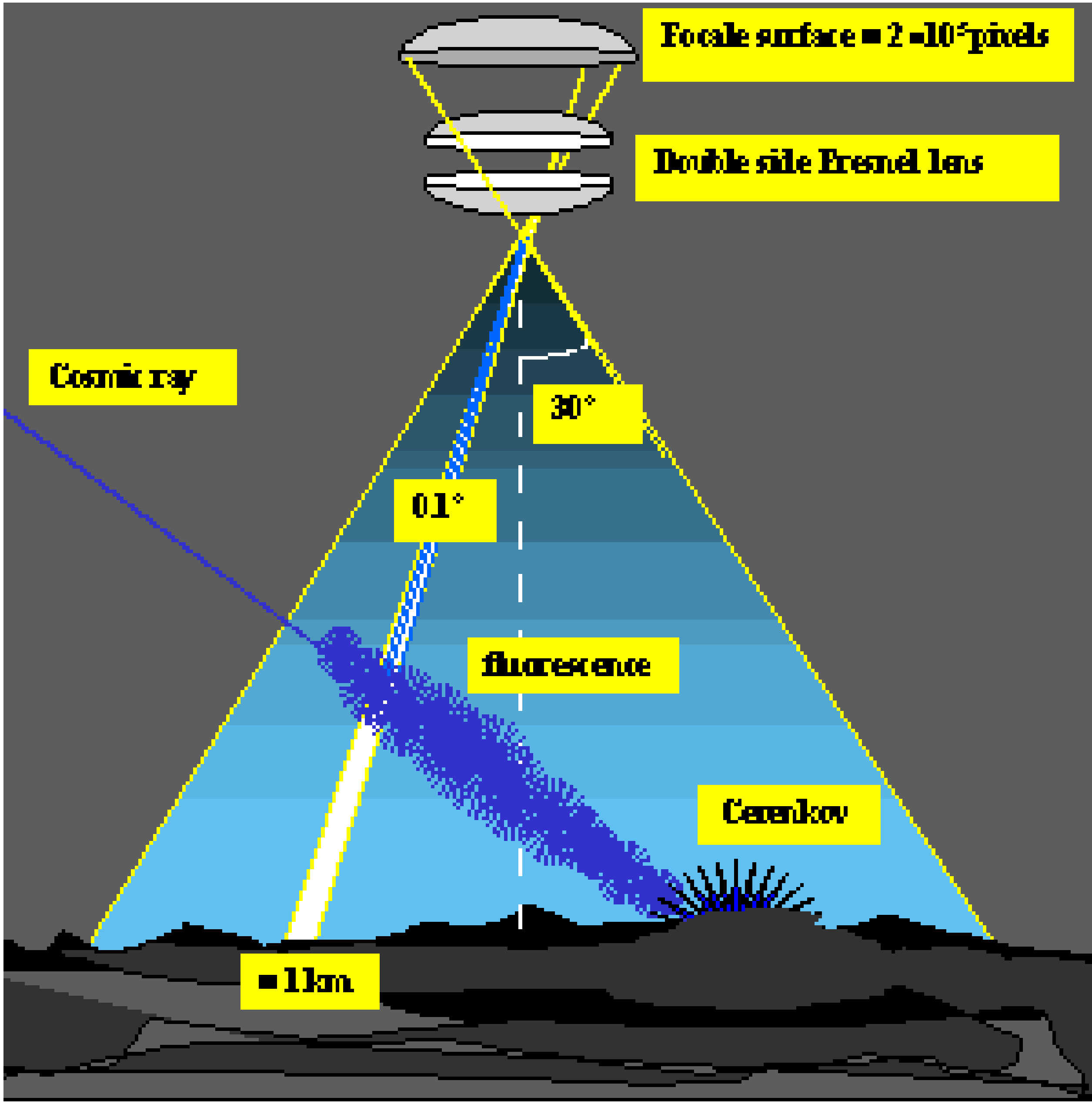
Fluorescence Telescopes (6 telescopes each 30° $\times$30° at 4 sites)

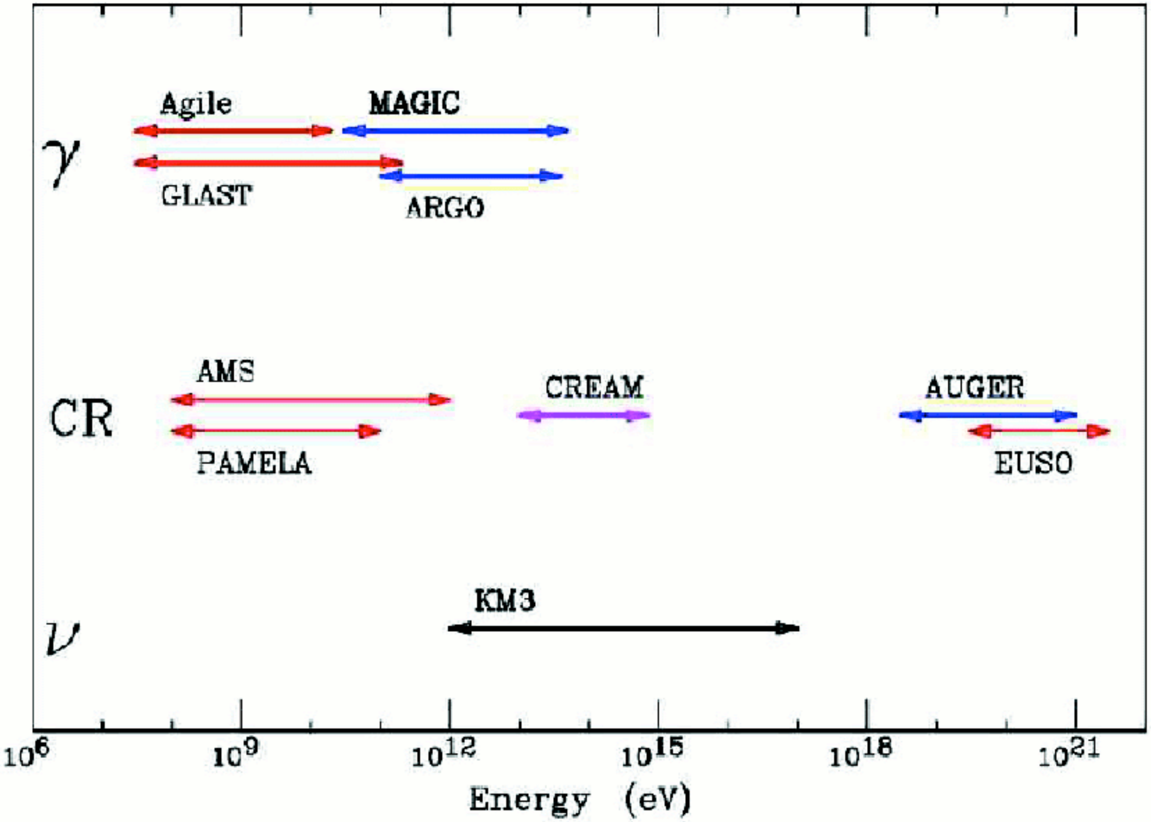


3.5m mirrors

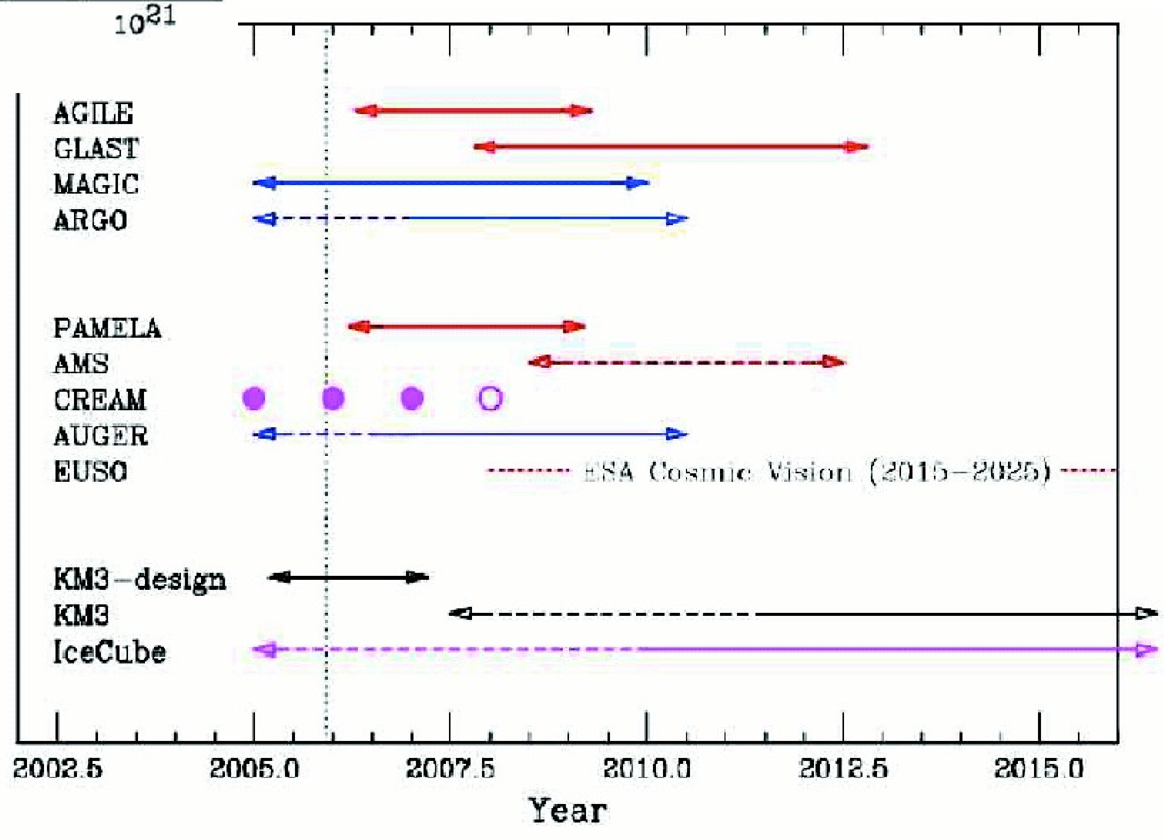
EUSO

- L'atmosfera terrestre e' un rivelatore ideale per i raggi cosmici di Energia Estrema.
- Nuova idea (EUSO – 2010?-): osservare la fluorescenza dall'alto (satellite)





γ
Agile
MAGIC
GLAST
ARGO
CR
AMS
CREAM
AUGER
PAMELA
EUSO
ν
KM3
10^6
10^9
10^{12}
10^{15}
10^{18}
10^{21}
Energy (eV)



AGILE
GLAST
MAGIC
ARGO
PAMELA
AMS
CREAM
AUGER
EUSO
ESA Cosmic Vision (2015–2025)
KM3–design
KM3
IceCube
2002.5
2005.0
2007.5
2010.0
2012.5
2015.0
Year

NEUTRINI

Proprieta' del neutrino

Oscillation evidence
- Neutrino mix
- Neutrino mass
- 3 (+1) neutrino standard model

Verification

Still open questions
- Neutrino DIRAC/Majorana nature
- Neutrino mass scale (smallness, ordering)
- Exotic (sterile) neutrinos
- Cosmological relevance
- Unexpected

Experimental approaches:
- neutrinoless double beta decay
- kinematical mass measurements
- cosmological determinations
- nuclear part ignorance (difficult comparison)

Future:
- phased program to solve most of the (all relevant) open questions
- Improve neutrino mixing matrix knowledge
- improve nuclear (theoretical/experimental) knowledge

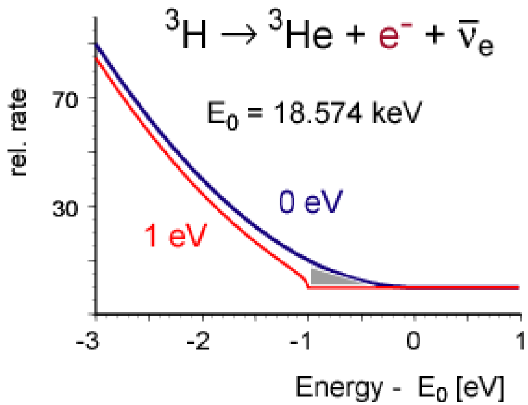
Massa del Neutrino

ß-decay : m_ν

status 2003 : m_ν < 3 eV (PDG)
potential 2010 : m_ν < 200 meV (90% CL.)
exp. : KATRIN, μ-calorimeter(?)

0νßß-decay : ‹ m_ν ›

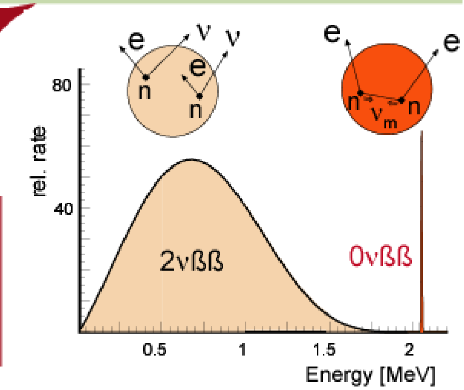
status 2003 : ‹m_ν› < 0.5 eV (90% CL.)
potential 2010 : ‹m_ν› < 20-50 meV (90% CL.)
exp.: Genius, Majorana, Cuore, EXO, MOON



m_ν

‹m_ν›

neutrino mass measurements -
status and perspectives



m_ν

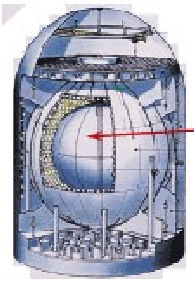
Σm_i

astrophysics : ν_e, ν_μ & ν_τ

status 2003 : m_ν < 23 eV
potential 2010 : m_ν < ~ 1 - 5 eV
exp. : Super-K, SNO

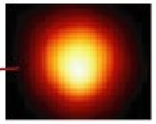
cosmology : Σm_i

status 2003 : Σm_i < 0.7 eV
potential 2010 : Σm_i < ~ 0.3 eV
} *model-dep. CMB&LSS*
exp. : WMAP, Planck, SDSS,

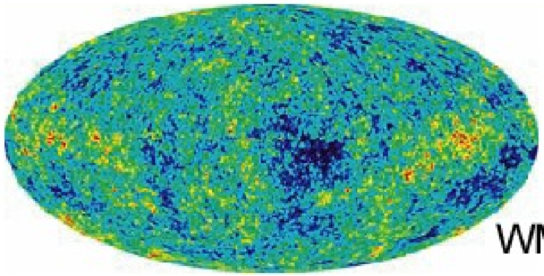


ν

SN200x(?)-ν-ToF



SN20xx



WMAP

Decadimento Doppio Beta

Neutrino DIRAC/Majorana nature (unique possibility)

Neutrino mass scale (smallness, ordering)

$|\langle m_{\beta\beta}\rangle| = |\sum_i m_i U_{ei}^2|$

HDM positive result

Present and near future searches:

- Bolometers (CUORICINO, CUORE)
- GERDA-I

Relevant/Dominant LNGS international position

Future

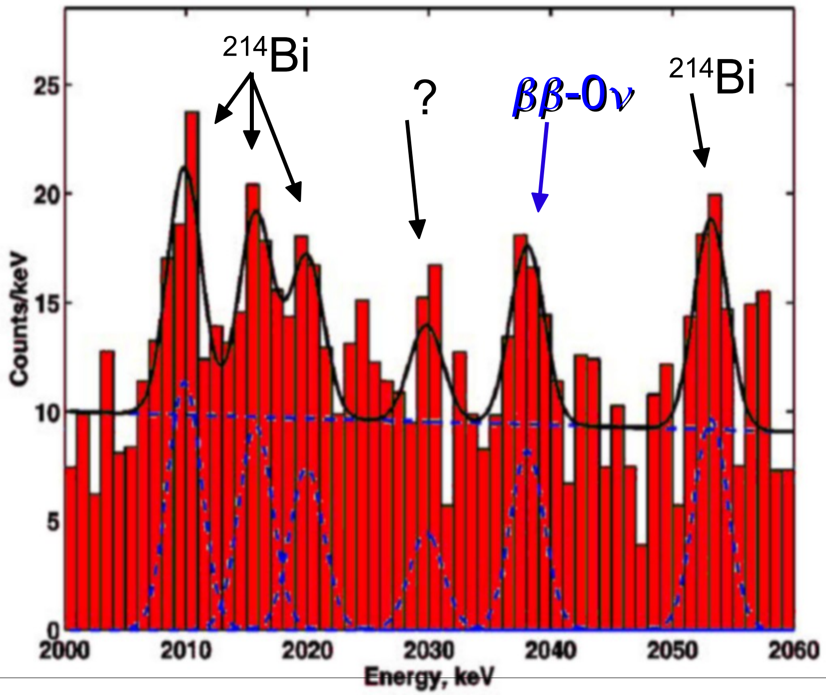
- GERDA-II, GERDA/MAJRANA

- promote nuclear mass matrix computation
- support the ongoing LNGS experimental progra
- promote R&D for
- ultralow-background
- different isotopes
- Exploit existing structures (e.g. Borexino)

^{76}Ge: segnale DDB

Esperimento HM@ LNGS: migliore applicazione dell'approccio omogeneo (Fiorini 1964)

- 13 anni di presa dati con un'esposizione di 71.7 kg×y
- risultati eccellenti in termini di impiego di germani arricchiti e livello di conteggio di fondo
- esperimento di riferimento per tutti



Dati 1990 – 2003: effetto positivo

esposizione = 71.7 kg×y

$$\tau_{1/2}^{0\nu} = 1.2\times10^{25} \text{ years}$$

$$\langle m_\nu \rangle = 0.44 \text{ eV}$$

H.V.Klapdor-Kleingrothaus *et al*., Phys. Lett. B 586 (2004) 198

Risultato controverso

- Numero di conteggi esiguo
- Sistema "automatico di riconoscimento di righe"
- Significativita' statistica fortemente dipendente dalla stima del fondo ... valutato in una finestra troppo stretta
- Interpretazione: accordo marginale – picchi non completamente spiegati

Tuttavia:
necessita' di verifica da parte degli esperimenti futuri

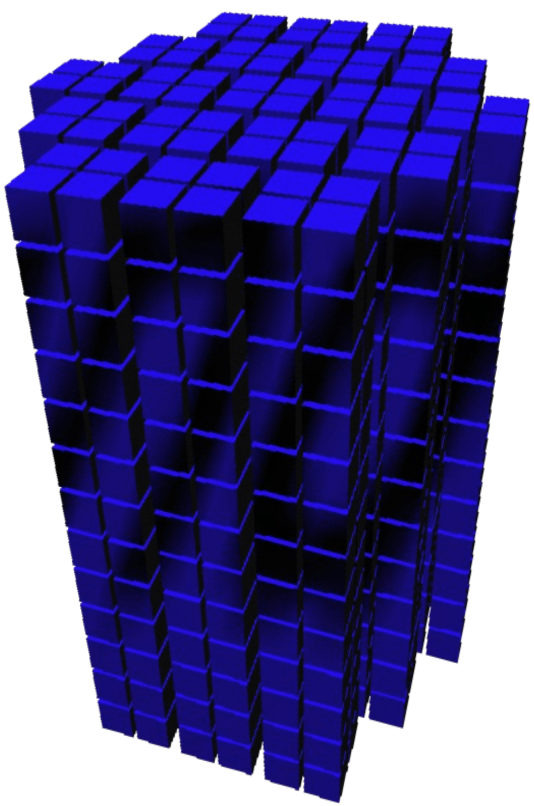
CUORE

Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

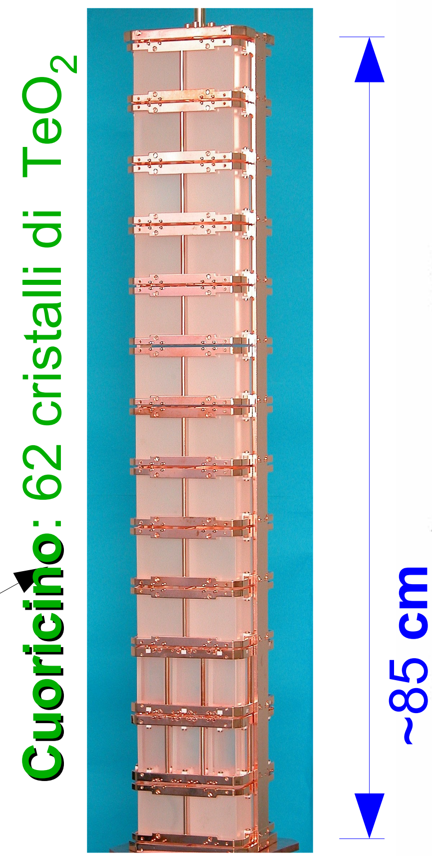
- **array di 988 cristalli di TeO_2 di 5×5×5 cm^3 (750 g)**
  - **741 kg TeO_2 calorimetro granulare**
  - **600 kg Te = 203 kg ^{130}Te**
- **$\beta\beta(0\nu)$, Cold Dark Matter, Assioni**

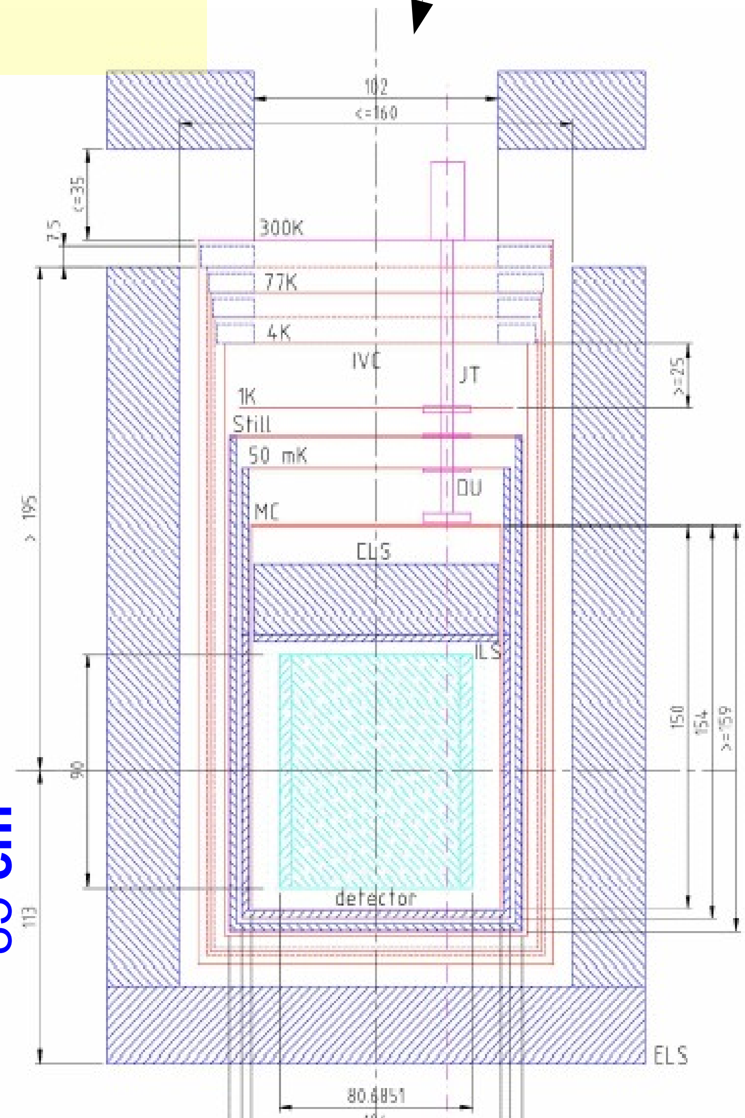
Singolo refrigeratore a diluizione (~ 10 mK)

Cristalli raggruppati in in una matrice "cilindrica" di 19 torri



Singola torre:
13 moduli da 4 cristalli





GERDA

LoI Aprile 2004, hep-ex/0404039

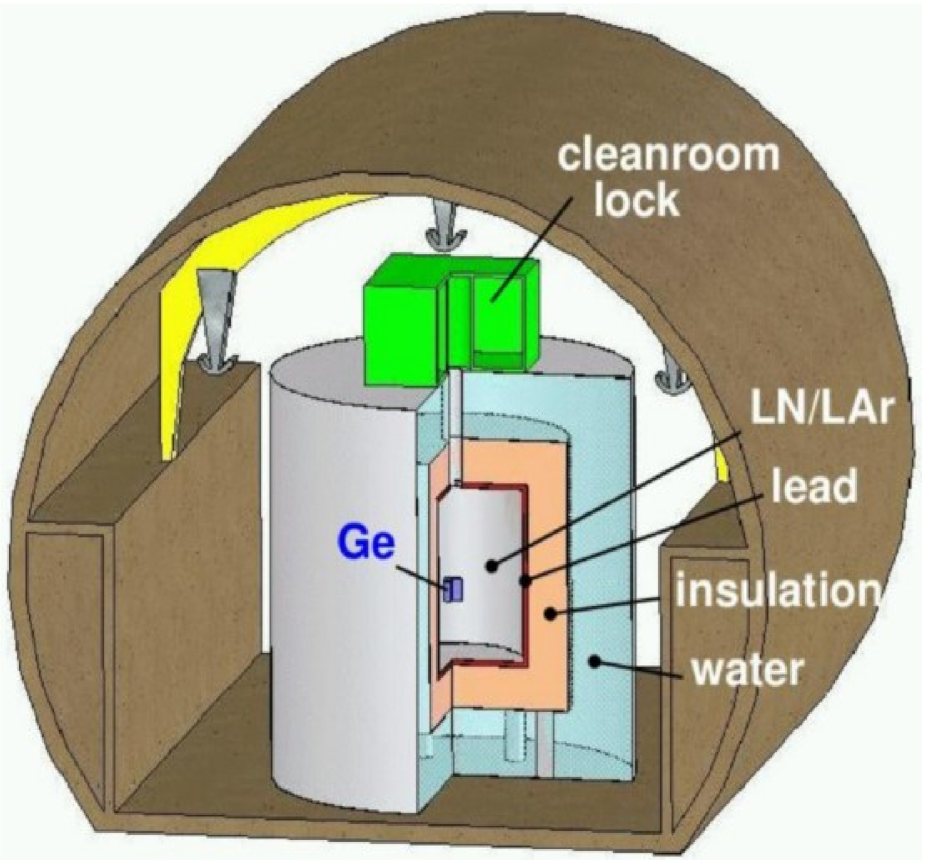
idea: indagine del risultato HM in un tempo breve utilizzando i rivelatori arricchiti in ^{76}Ge esistenti (HM, IGEX) $\Rightarrow$ evidenza in un tempo breve

approccio ereditato da GENIUS ma con meno LN2

- Cristalli di Ge nudi in LN2 o LAr

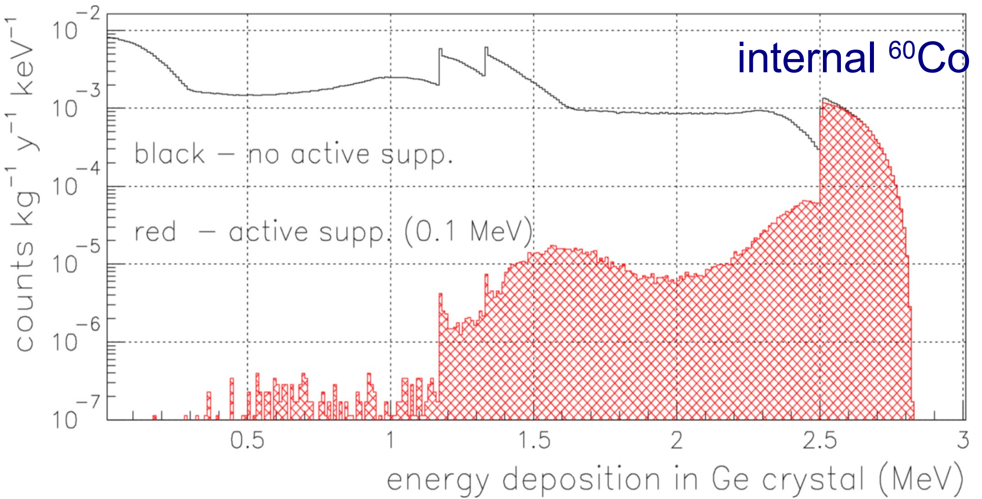
Piu' compatto

- 1.5 m LN2(LAr) + 10 cm Pb + 2 m acqua
- Fondo migliore di 2-3 ordini di grandezza rispetto ai valori attualmente ottenuti
  fondo esterno: 10^{-3} c/keV/kg/y
- Schermatura attiva con LAr scintillante



Finalita' scientifiche

- Sensibilita' dell'ordine di 90 meV prima del 2010
- verifica del risultato positivo di HM con lo stesso isotopo
  - Verifica dell'esistenza di righe vicine a 2039 keV
- Misura competitiva DM tramite riduzione del fondo di un fattore ~400



Misure dirette (cinematiche) di m_ν

Model independent measurement (unique safe method)

Neutrino mass scale (inverted ordering)

$$\langle m_\beta \rangle = \{ \sum_i m_i^2 |U_{ei}|^2 \}^{1/2}$$

Spectrometers dominance: systematics test
International competition: KATRIN

Present and near future searches:

- Bolometers (MANU-2, MI-BETA)

Future

- MARE

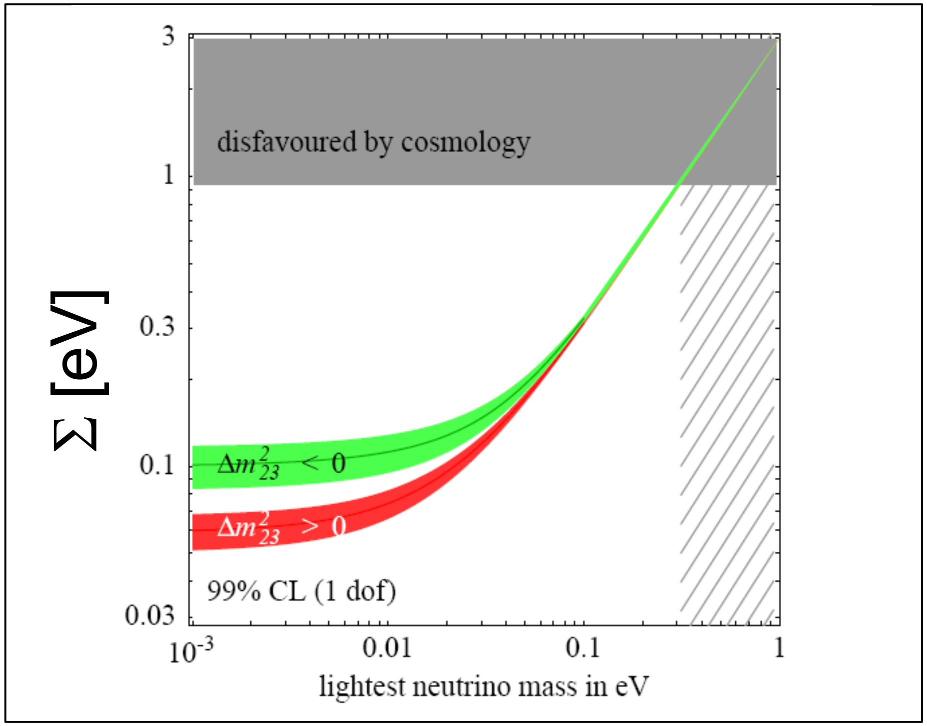
- check spectrometers systematics
- promote alternate measurements with sensitivity O(0.1 eV)
- R&D for even improved sensitivities (possible for bolometers)

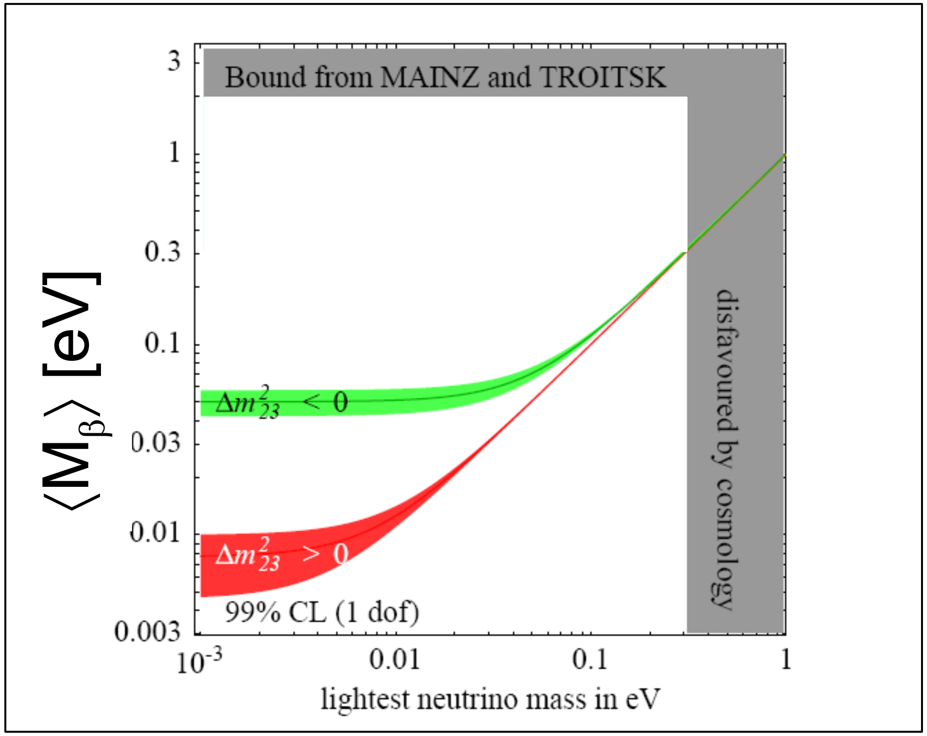
Misura cinematica di m_ν

2 approcci sperimentali possibili

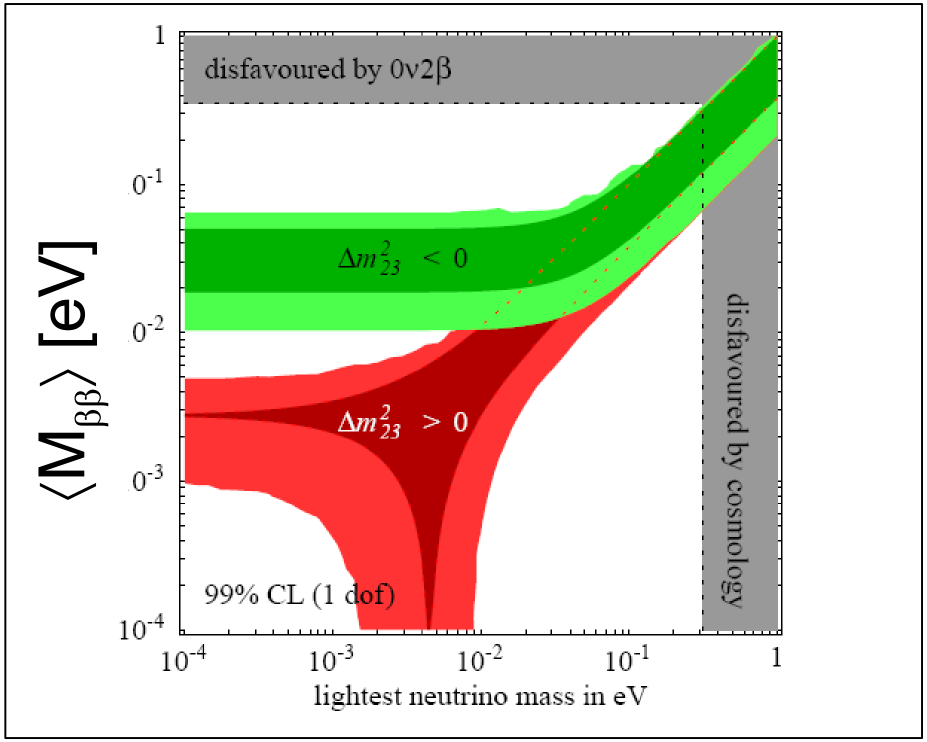
- Spettrometri magnetici (^3H)
  esperimenti di Mainz e Troitsk
  sorgente $\beta \neq$ rivelatore
  - ▲ alta risoluzione energetica (1÷10 eV)
  - ▲ elevata statistica presso E_0
  - ▼ correzioni problematiche:
    - risposta dello spettrometro
    - autoassorbimento nella sorgente
    - decadimento β su stati finali eccitati atomici o molecolari
- miglior risultato (Mainz):
  $m_{\nu_e}^2 = -1.6 \pm 2.5 \pm 2.1$ eV^2/c^4
  $\Rightarrow m_{\nu_e} < 2.2$ eV/c^2
- KATRIN: sensibilita' 0.25 eV
  Loi hep-ex/0109033

- Calorimetri termici (^{187}Re)
  esperimenti di Milano e Genova
  sorgente $\beta \subseteq$ rivelatore
  - ▲ nessun effetto di autoassorbimento della sorgente
  - ▲ alta risoluzione energetica
  - ▲ misurano tutta l'energia $E = E_0 - E$ anche le eccitazioni atomiche/molecolari
  - ▼ lentezza:
    - pile-up
    - bassa attività $\beta \Rightarrow$ bassa statistica
- Milano: sensibilità ~10 eV
  1 anno di misura: $m_{\nu_e} < 15$ eV
- Genova: $m_{\nu_e} < 26$ eV/c^2 (non pubblicato)
- MARE $\rightarrow$ 1 eV $\rightarrow$ 0.1 eV





Strumia-Vissani hep-ph/0503246



ASTRONOMIA NEUTRINICA

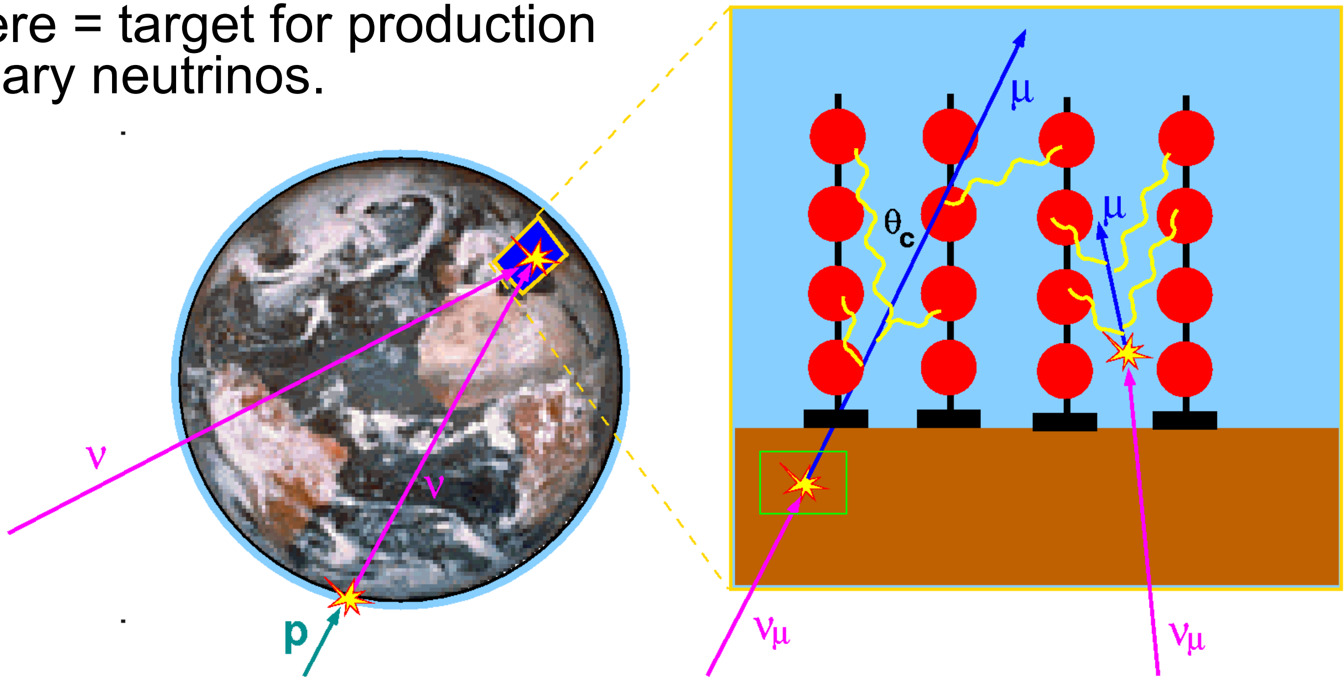
Principio

Čerenkov light:

- In water: $\theta_C \approx 43°$
- Spectral range used: ~ 350-500nm.

Role of the Earth:

- Screening against all particles except neutrinos.
- Atmosphere = target for production of secondary neutrinos.



Neutrino reactions (key reaction is $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$):

- Cross sections and reaction mechanisms known from accelerator experiments (in particular HERA).
- Extrapolation to highest energies (> 100 TeV) uncertain.

Astronomia di altissima energia

BAIKAL, AMANDA: in presa dati

NESTOR, ANTARES, NEMO R&D: in fase di realizzazione

ICECUBE: in costruzione, completamento 2010

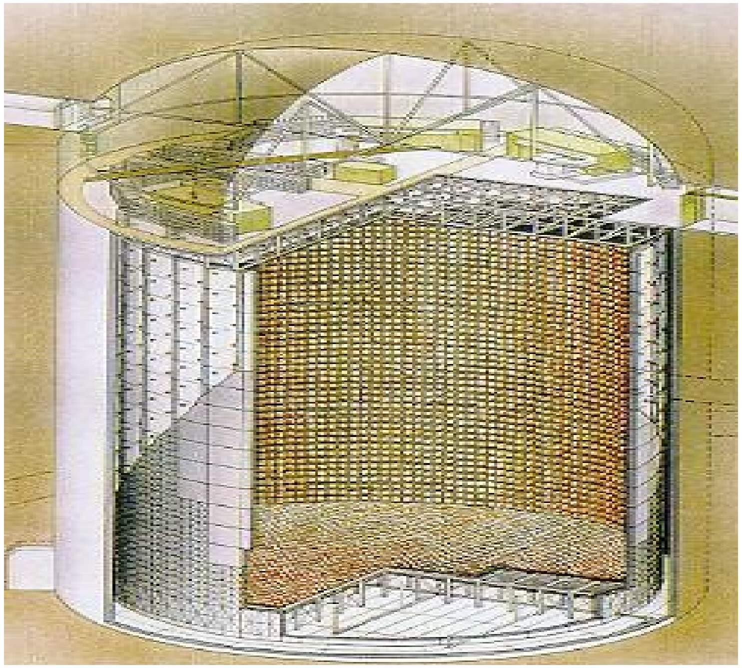
KM3 nel Mediterraneo ?

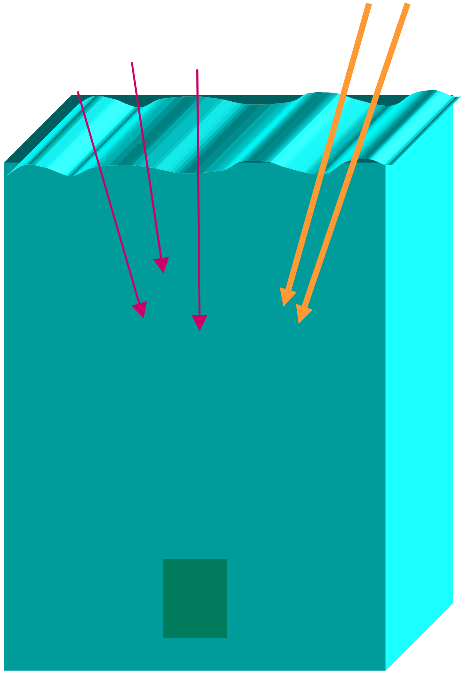
Rivelatori sotto il mare/ghiaccio

Rivelatori di enorme massa : ~ 30 M ton ,
Calorimetri di Ferro: > 5000 Meuro solo per il ferro,
H_2O e' il mezzo piu' economico ~ 20 Meuro

Progetti sotterranei simili a SuperKamiokande (30 K t) dell'ordine di 1 M ton richiedono centinaia di Meuro

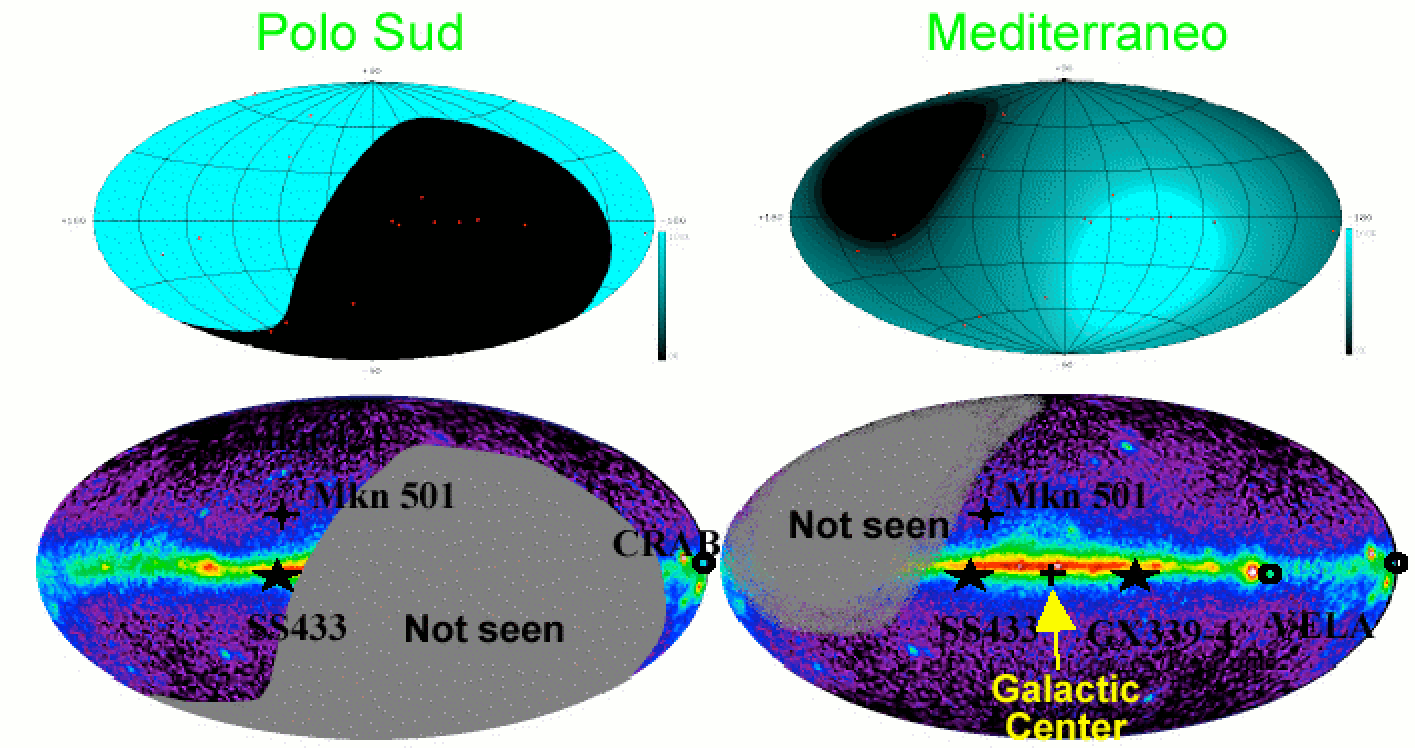
Servono almeno 1000 m di acqua per assorbire luce e raggi cosmici





Astronomia di altissima energia (2)

Futuro: competizione tra ICE CUBE e il progetto nel mediterraneo

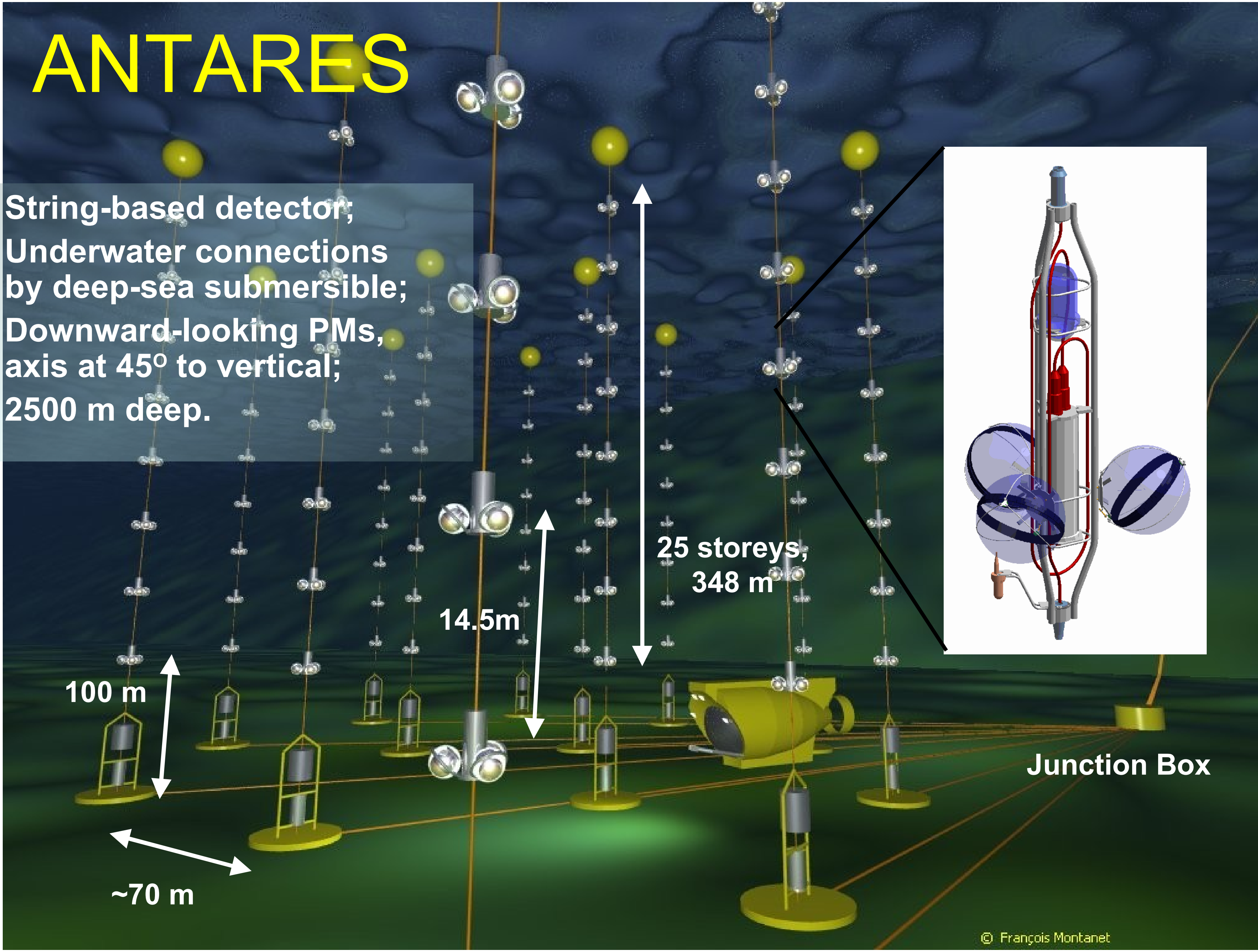


- Assenza di:
  - Radiottività del ^{40}K
  - Sedimentazione
  - Bioluminescenza
- Labs ~ 100 m
- Lsca < 20 m

- Possibile il recupero e la riconfigurazione del rivelatore
- Possibilità di sfruttare maggiori profondità
- L_{abs} ~ 70 m
- L_{sca} > 100 m

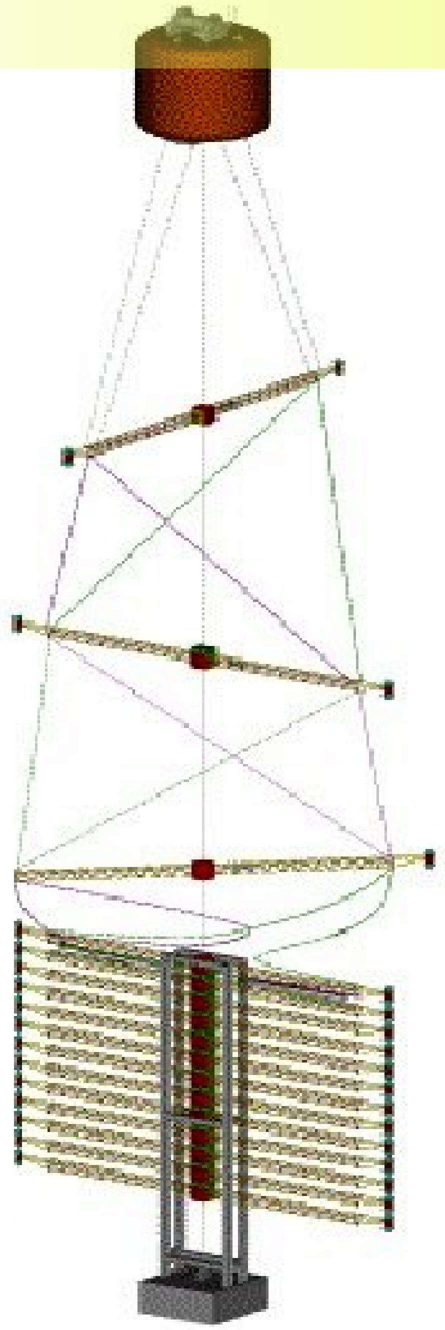
ANTARES

- String-based detector;
- Underwater connections by deep-sea submersible;
- Downward-looking PMs, axis at 45° to vertical;
- 2500 m deep.



NEMO

- Extensive site exploration (Capo Passero near Catania, depth 3340 m);
- R&D towards km³: architecture, mechanical structures, readout, electronics, cables ...;
- Simulation.



Example: Flexible tower

- 16 arms per tower,
  20 m arm length,
  arms 40 m apart;
- 64 PMs per tower;
- Underwater connections;
- Up- and downward-looking PMs.

ONDE GRAVITAZIONALI

GW

Verifica Relativita' Generale

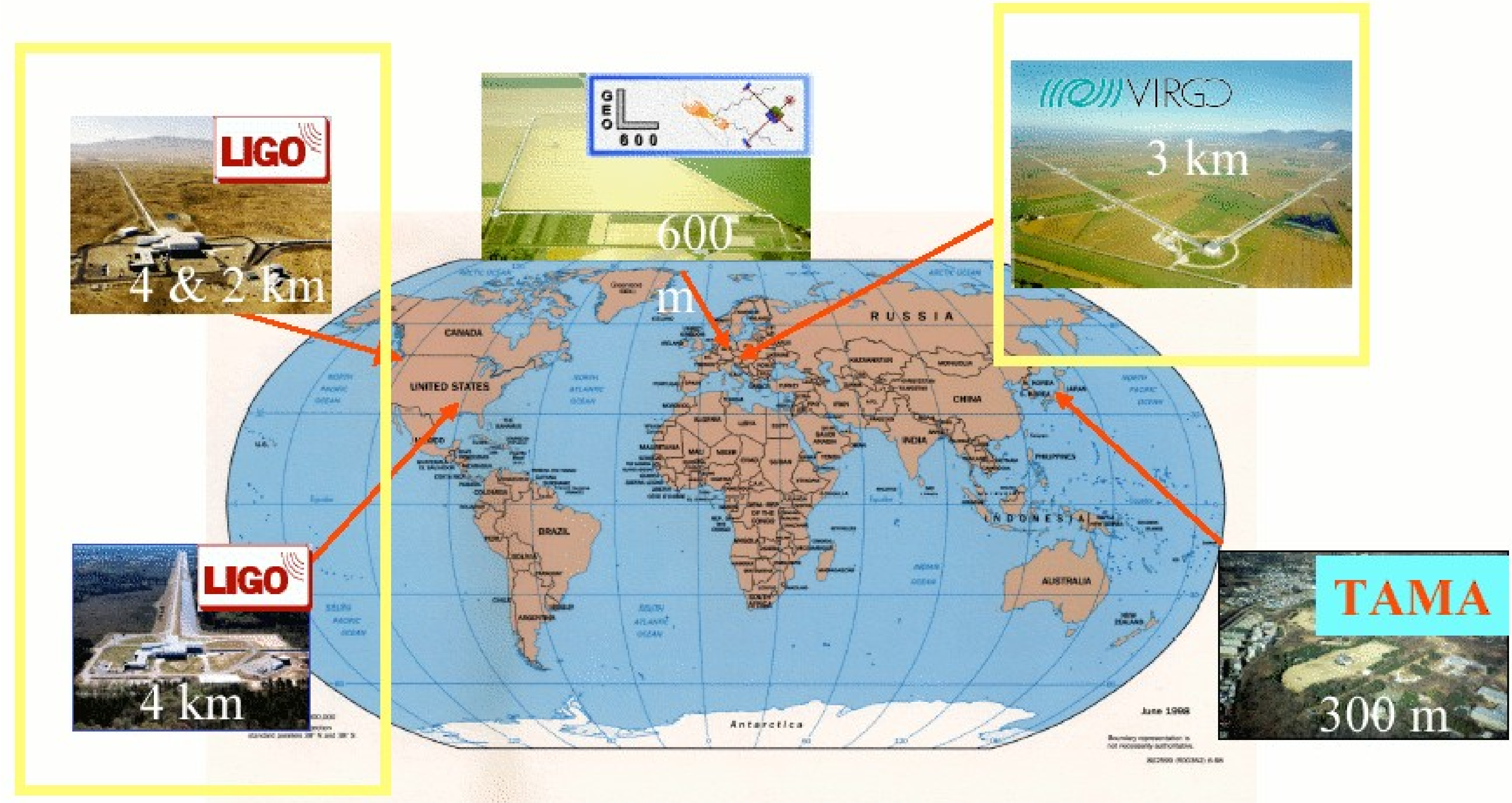
Sorgenti di Onde Gravitazionali

Approcci sperimentali:

- Antenne Risonanti
- Interferometri
- Rivelatori nello spazio


Gravitational Wave Detectors
Allegro, LSU Lousiana
MiniGRAIL, Leiden (Olanda)
Auriga, Legnaro
MINIGRAIL
GEO
AURIGA
EXPLORER
NAUTILUS
LIGO
LIGO
ALLEGRO
EXPLORER
Explorer, CERN
Schenberg, San Paolo (Bra)
MARIO SCHENBERG
Nautilus, Frascati
AIGO
NIOBE
Antenne risonanti nel mondo
gravitational wave research

Interferometri



Onde gravitazionali

Presente:

ROG e AURIGA (Tre Rivelatori Risonanti)

Osservatorio permanente per burst nella galassia

VIRGO LIGO (Interferometri Terrestri) LISA (Interferometro Spaziale)

Il Network di rivelatori gravitazionali come un unico rivelatore:

L'analisi dei dati in coincidenza tra piu rivelatori e' essenziale per la rivelazione del segnale e per la misura dei 5 parametri indipendenti dell onda.

Medio termine:

LIGO+
VIRGO+
GEO-HF (Germay)
SFERA
DUAL

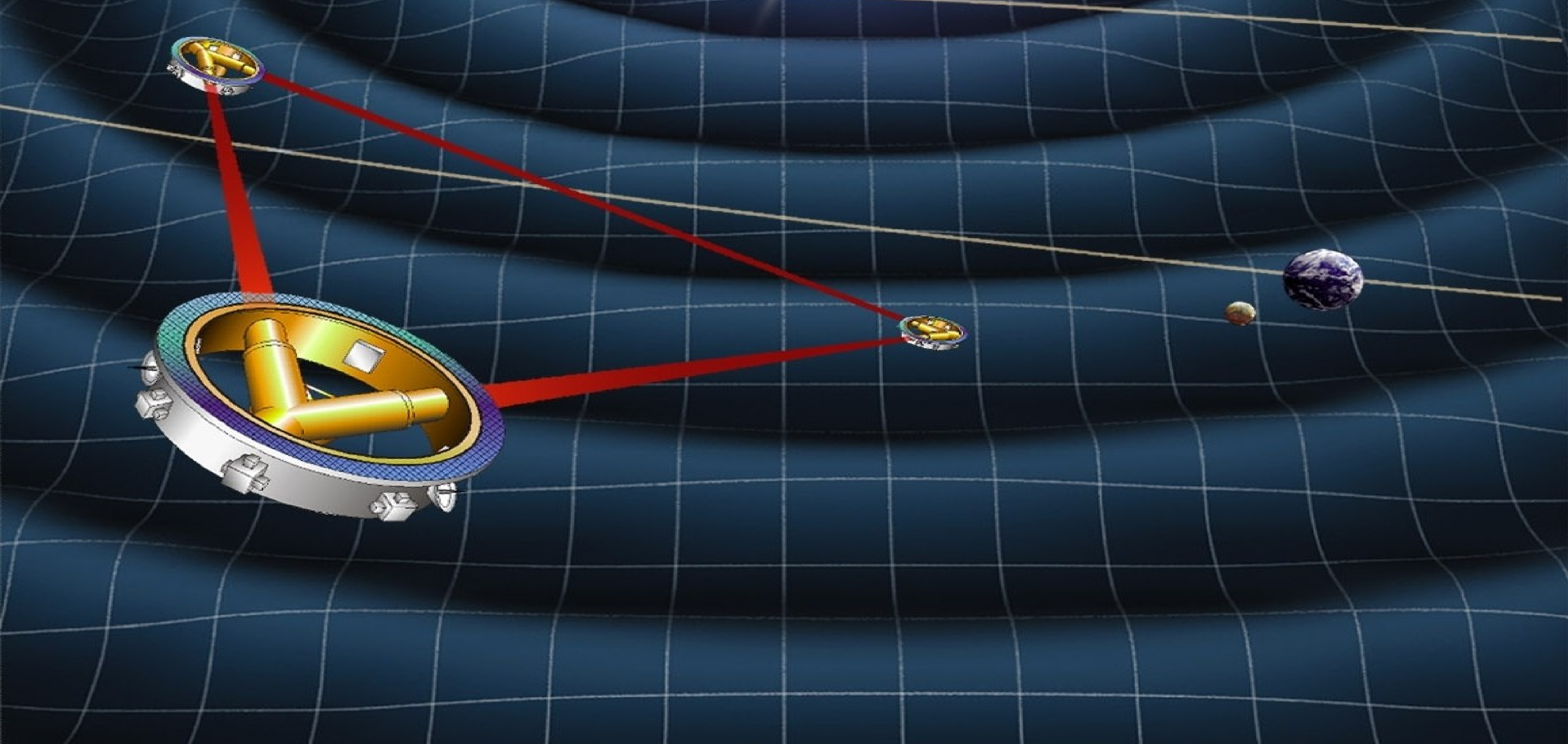
Lungo termine:

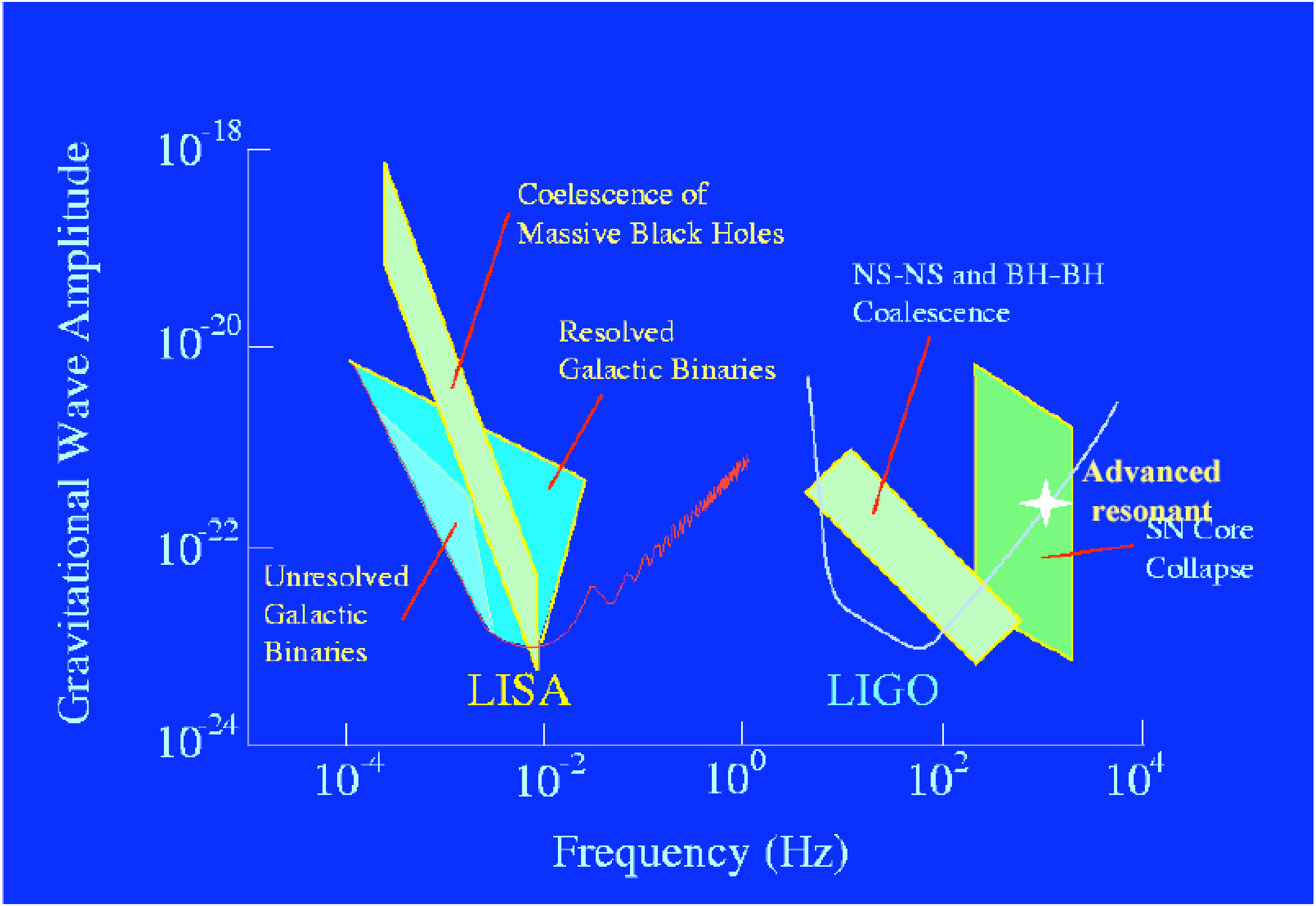
Advanced LIGO + Virgo+
LCGT (Japan)

LISA PF

Rimodulazione del piano di lavoro: sistema di lettura ottico, e *facility* di test al suolo

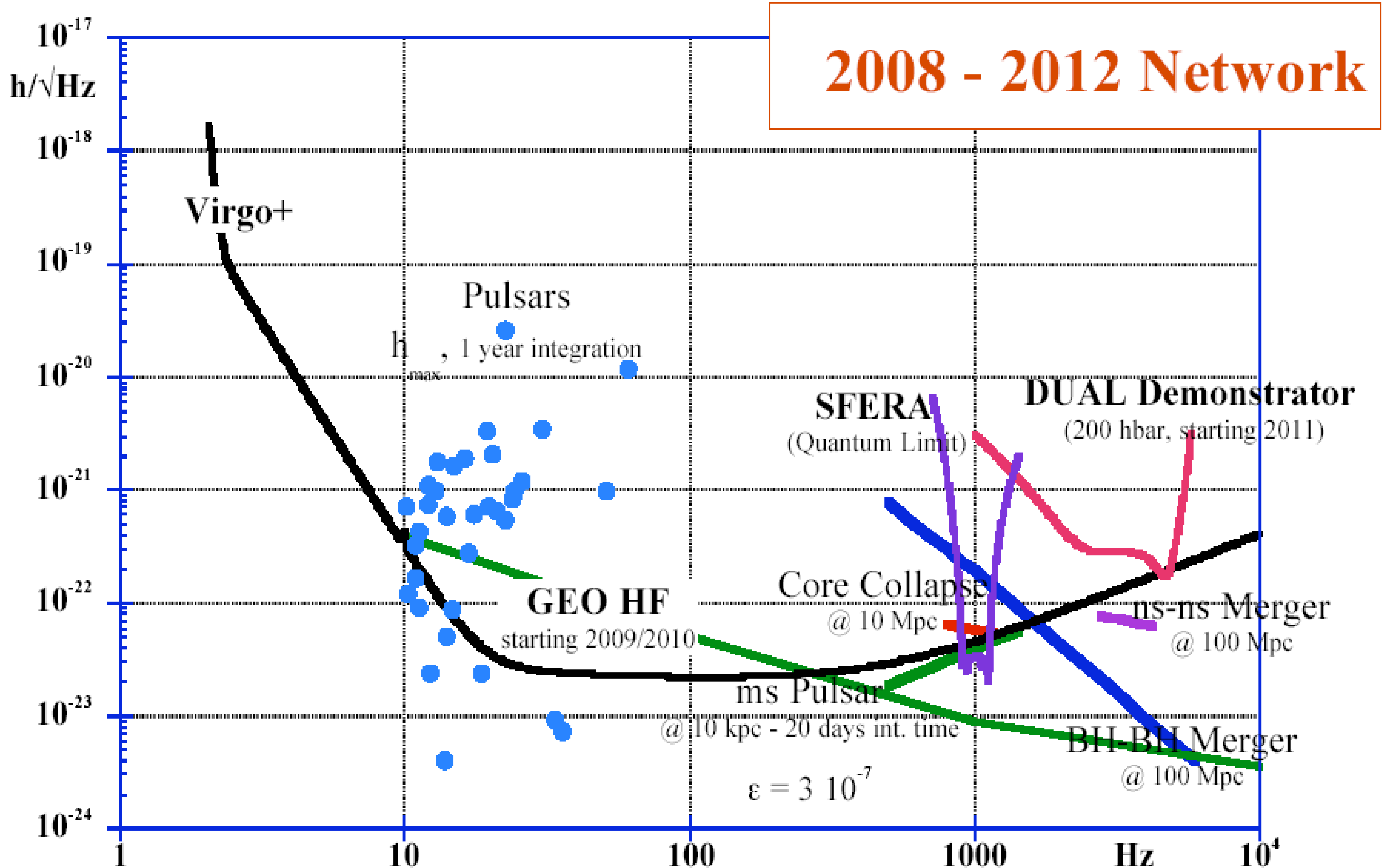
LISA PF Collaboration





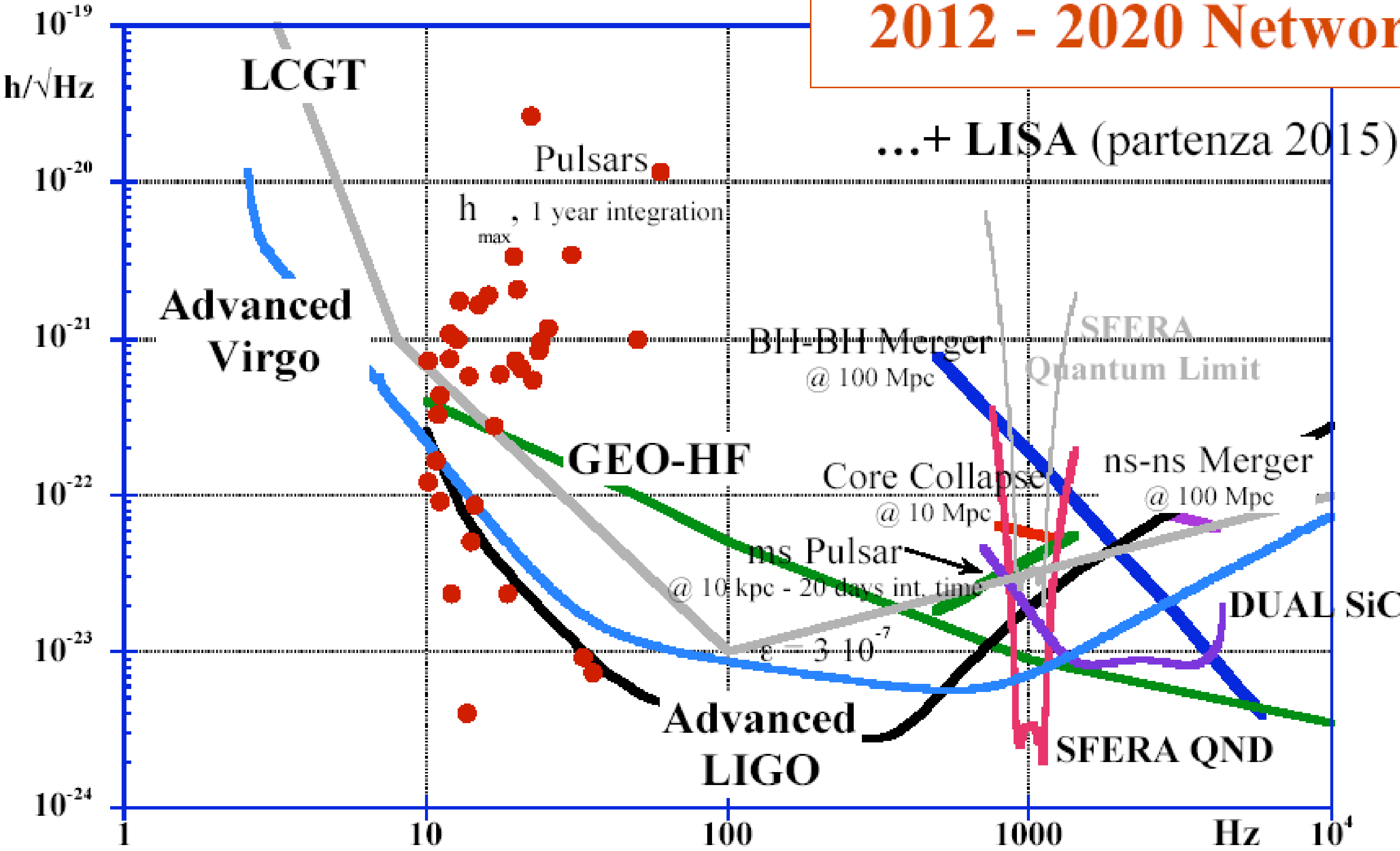
Gravitational Wave Amplitude
10^{-18}
10^{-20}
10^{-22}
10^{-24}
Coelescence of
Massive Black Holes
Resolved
Galactic Binaries
Unresolved
Galactic
Binaries
NS-NS and BH-BH
Coalescence
Advanced
resonant
SN Core
Collapse
LISA
LIGO
10^{-4}
10^{-2}
10^{0}
10^{2}
10^{4}
Frequency (Hz)

2008 - 2012 Network



	NS-NS	NS-BH	BH-BH	SNe
Event Rate (per year)	0.025-10	10^{-3}-15	3 10^{-2}-90	1
Range (Mpc)	114	230	584	10

2012 - 2020 Network



	NS-NS	NS-BH	BH-BH	SNe
Event Rate	3/yr - 4/day	1/yr - 6/day	3/month - 30/day	20
Range (Mpc)	300	750	z=0.45	100

Conclusioni

Simbiosi tra Astrofisica e Fisica delle Alte Energie con grandi opportunita' di avanzamento per entrambe le discipline

Grande competizione/collaborazione internazionale

Scambio di conoscenze e di interessi

Opportunita' uniche per

fisica del neutrino
supersimmetrie