



Underground: Neutrini nell'oscurità

Maurizio Spurio

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Università di Bologna

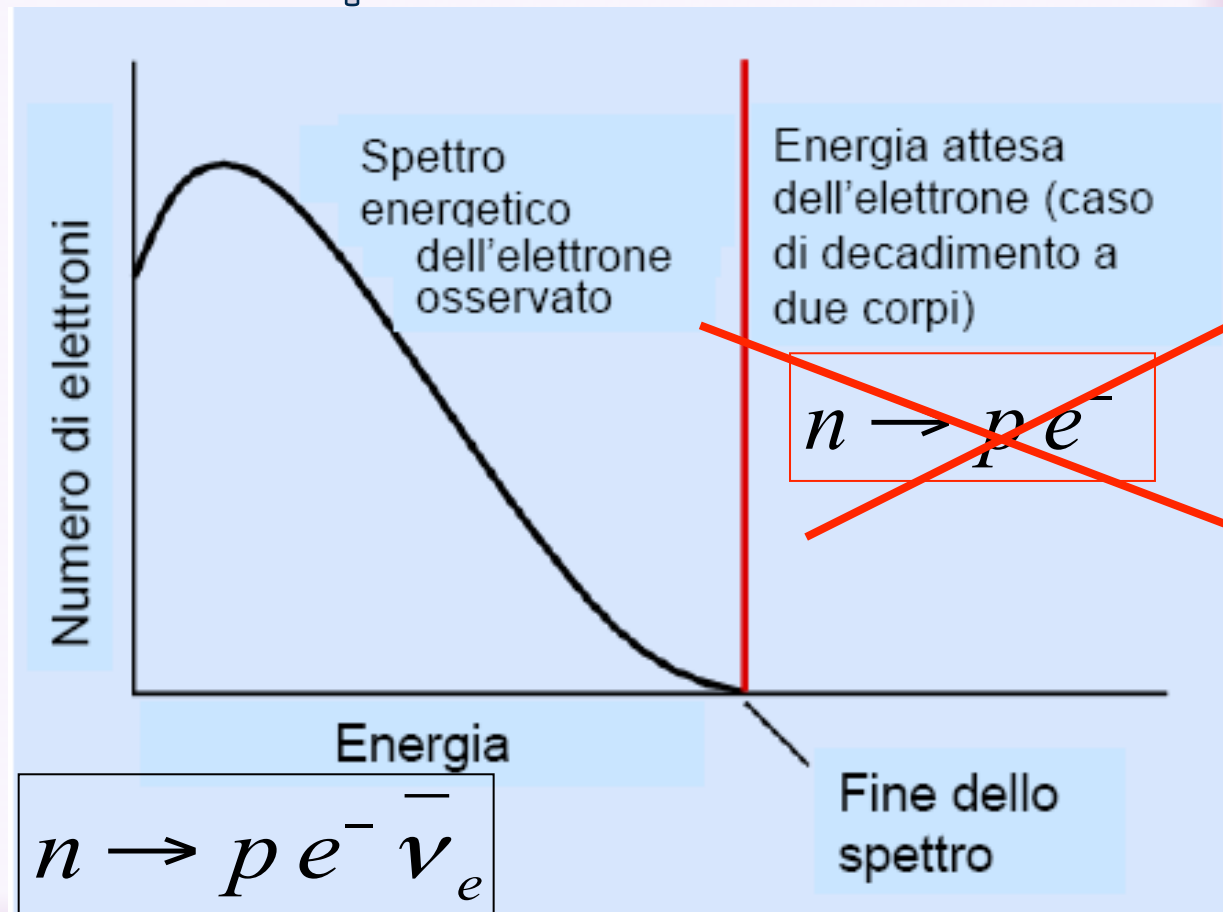
INFN - BO

FIAT LUX

FIAT NEUTRINO



W. PAULI (Zurigo, 4/12/1930): ho fatto una cosa terribile. Ho inventato una particella che non può essere rivelata!



VITA, MORTE E MIRACOLI COI ν .

1. VITA

PERCHE' E' IL ν E' DIFFICILE DA RIVELARE?

- ⦿ Perché non ha carica elettrica
 - Quindi non ha la proprietà di eccitare/ionizzare la materia attraversata e manifestarsi nei rivelatori di particelle
- ⦿ Perché non ha "accoppiamento" con la carica elettrica, come nel caso del fotone
- ⦿ Si manifesta solo attraverso le cosiddette "interazioni deboli", interazioni estremamente poco probabili con la materia
- ⦿ Ma allora le "interazioni deboli" sono importanti?

Timon, ti sei mai domandato che cosa siano quei lumicini lassù?

Pumbaa, io non mi faccio domande. Io le cose le so!

Oh! e cosa sono?

Sono delle lucciole, lucciole che sono rimaste attaccate a quell'enorme cosa nero-bluastro...



LA VITA DELLA STELLA



Gravità
Radiazione

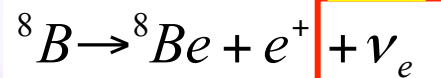
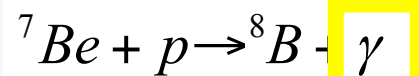
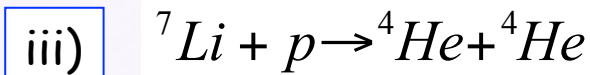
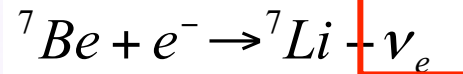
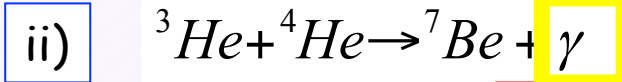
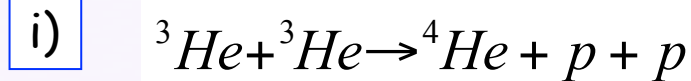
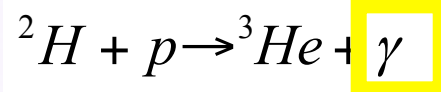
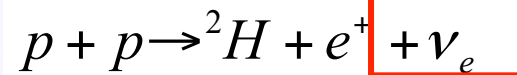
Oh sì! Io pensavo che fossero masse gassose che bruciavano a miliardi di km di distanza!

FLUSSO DI ENERGIA ↔ FLUSSO DI NEUTRINI

È a seguito dell'interazione debole e della presenza dei ν che il sole funziona da 5 mld di anni

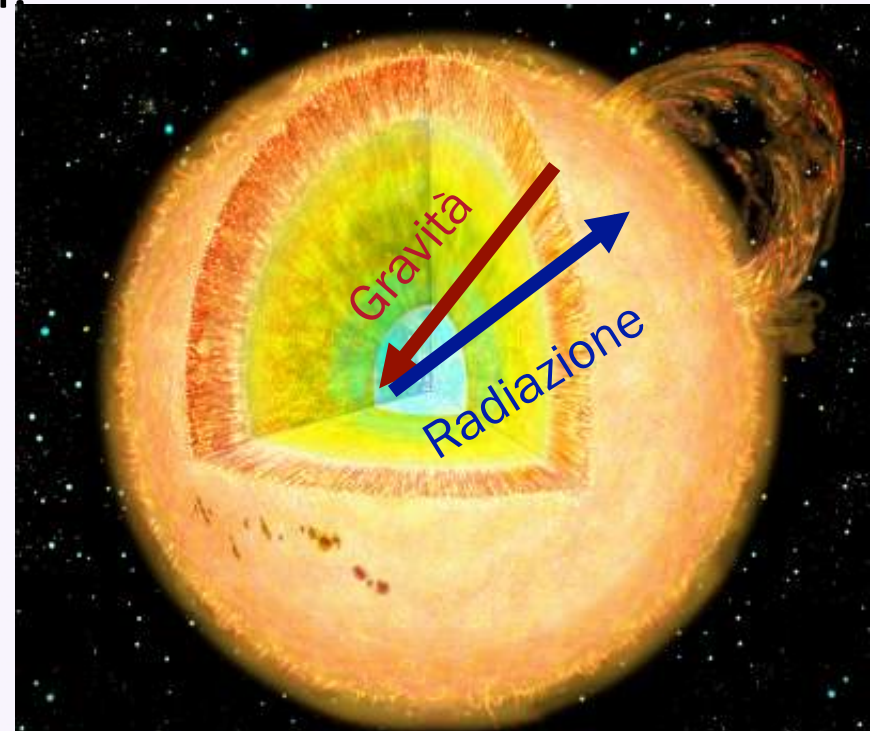
Reazioni di fusione
Nucleare:
Il ciclo del protone

Formazione
dell'elio



FLUSSO DI ENERGIA ↔ FLUSSO DI NEUTRINI

- ⊙ I fotoni di alta energia prodotti nelle reazioni nucleari “lavorano” per mantenere il Sole in equilibrio;
- ⊙ Energia dal sole = flusso di fotoni.
- ⊙ Una misura “diretta” di ciò che avviene all’interno del sole è possibile misurando i **neutrini** prodotti insieme ai fotoni.
- ⊙ I neutrini “non lavorano”
- ⊙ Flusso di ν del Sole sulla Terra:
 $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



PERCHÉ PER RIVELARE NEUTRINI OCCORRE ANDARE UNDERGROUND ?

- ⊙ I Raggi Cosmici costituiscono il rumore che nasconde ogni possibile segnale dovuto all'interazione dei neutrini
- ⊙ Per schermarsi dal fondo, i rivelatori per neutrini sono situati in laboratori sotterranei (*underground*)
- ⊙ I rivelatori devono essere inoltre il più **radio-puri** possibile
- ⊙ Lo studio sperimentale dei neutrini dal sole (=comprensione dei processi che forniscono energia alle stelle) è stato un enorme sforzo degli anni 70 → oggi

PREMIO NOBEL 2002 PER LO STUDIO DEL SOLE TRAMITE NEUTRINI



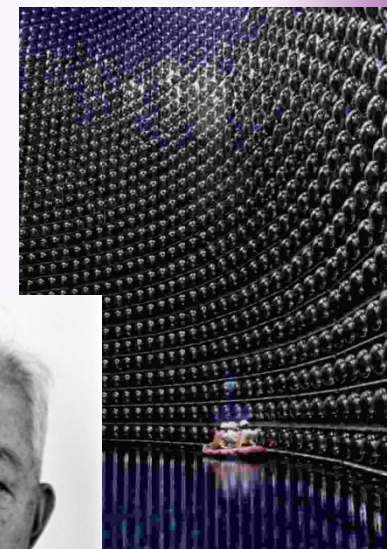
Raymond Davis Jr.

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/davis-lecture.pdf



Masatoshi Koshihara

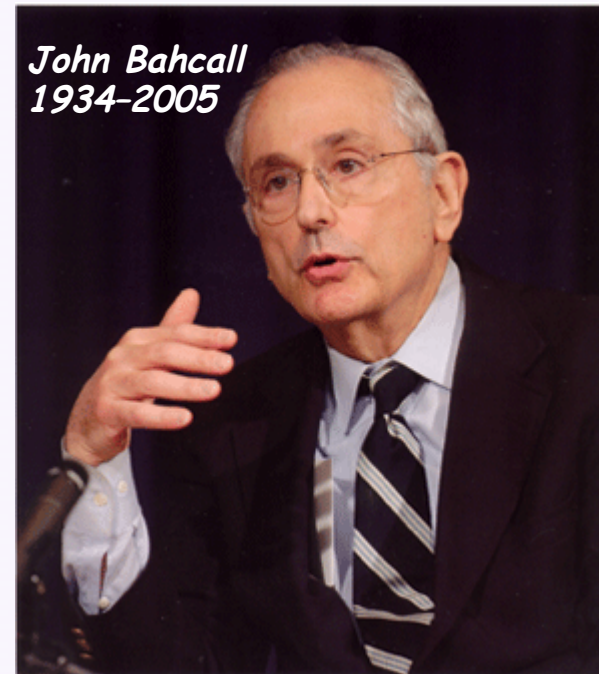
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2002/koshihara-lecture.pdf



NON-PREMIO NOBEL (E ANCOR PIÙ MERITEVOLE DI ESSERE RICORDATO)

- ⊙ J. Bahcall: The main author of the SSM
- ⊙ The standard solar model is derived from the conservation laws and energy transport equations of physics, applied to a spherically symmetric gas (plasma) sphere
- ⊙ Constrained by the luminosity, radius, age and composition of the Sun

<http://www.sns.ias.edu/~jnb/>

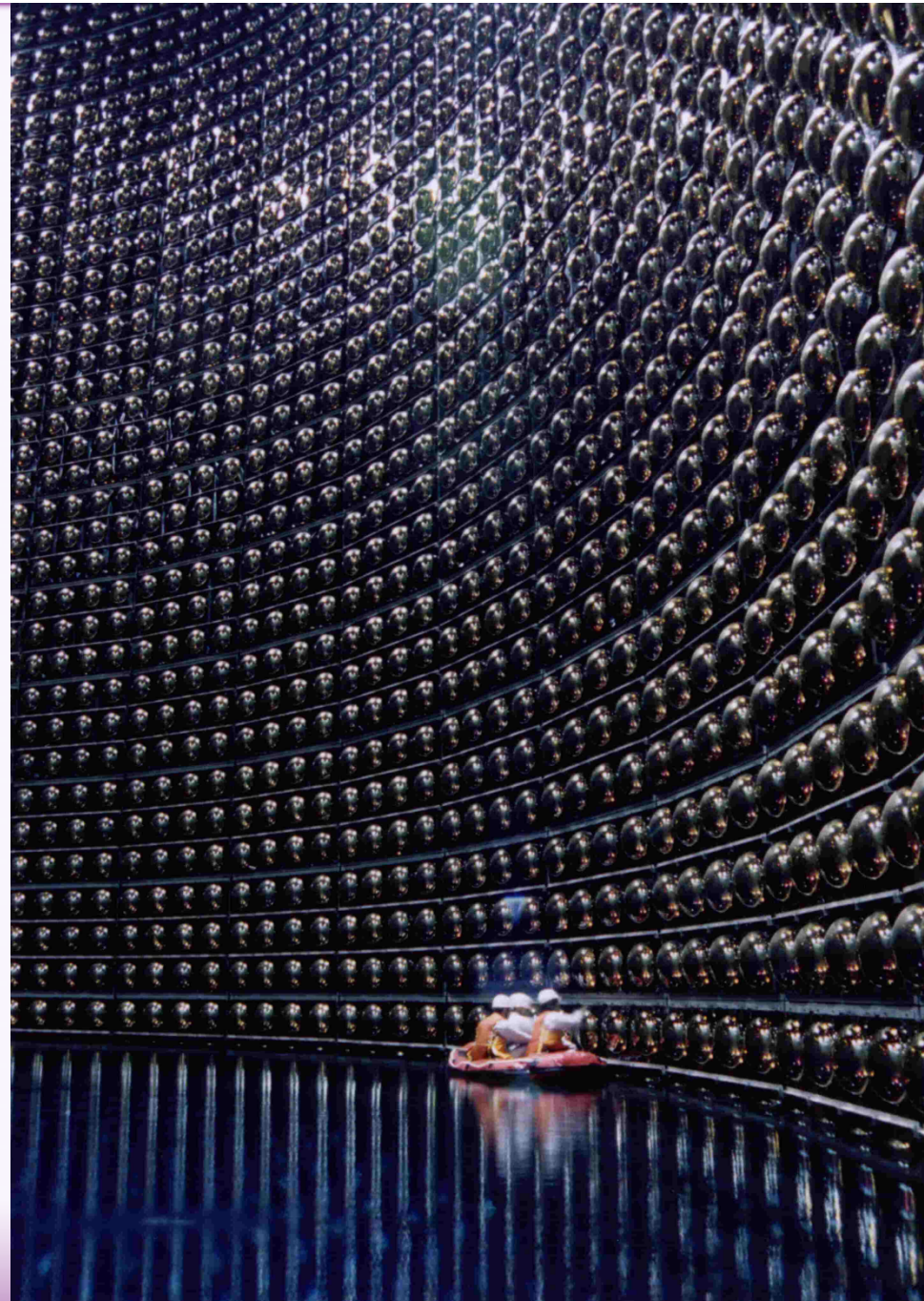


Nota: Leggere l'articolo (tradotto anche in italiano)

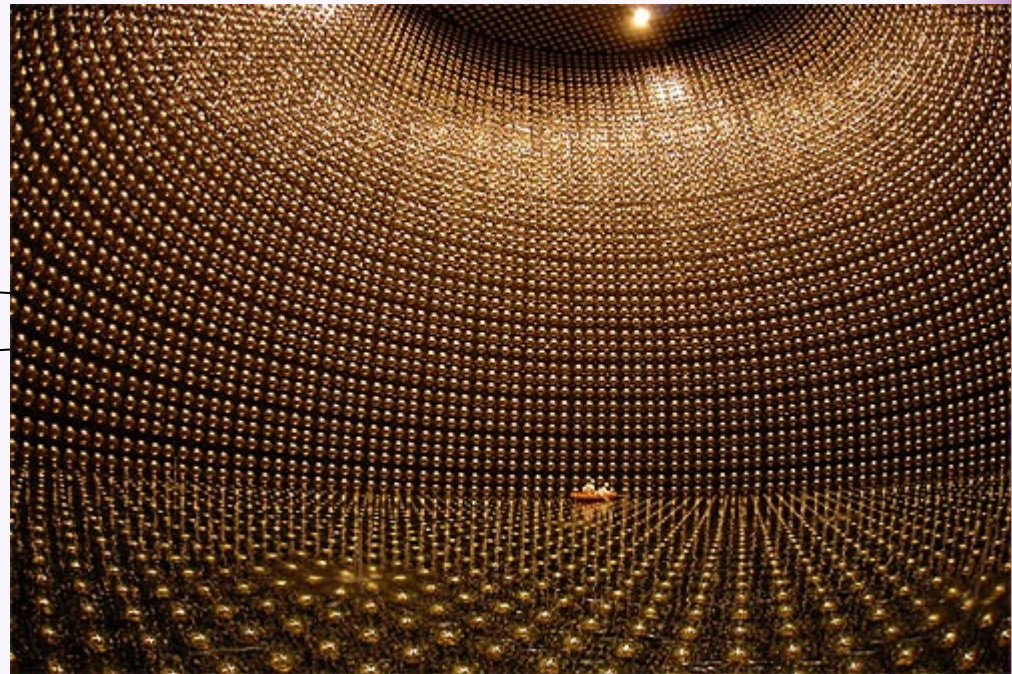
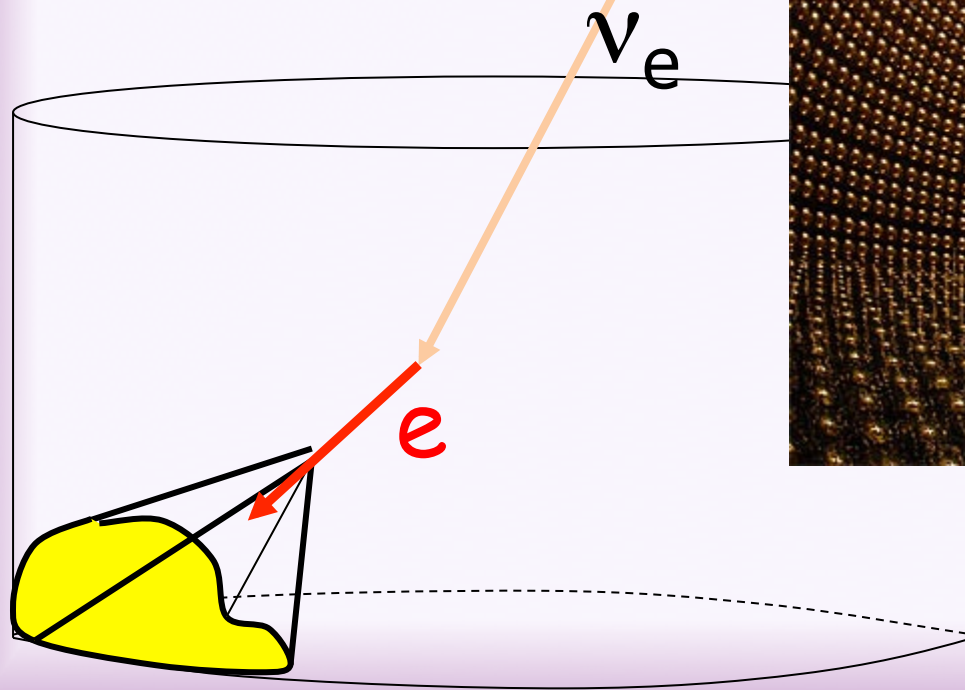
<http://www.sns.ias.edu/~jnb/Papers/Popular/Nobelmuseum/italianmystery.pdf>

RIVELATORI ENORMI!

- ⊙ Super-Kamiokande in Giappone
- 1000 m Underground
- 50.000 ton di acqua purificata
- 11000 +2000 PMTs
- Attivo dal 1996

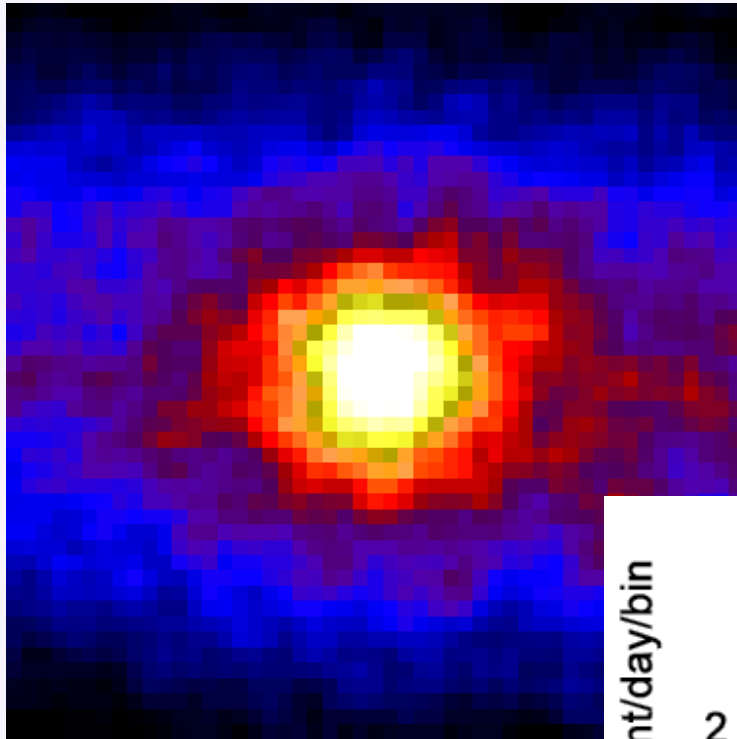


SUPERKAMIOKANDE: NEUTRINI DAL SOLE CONTRO ELETTRONI

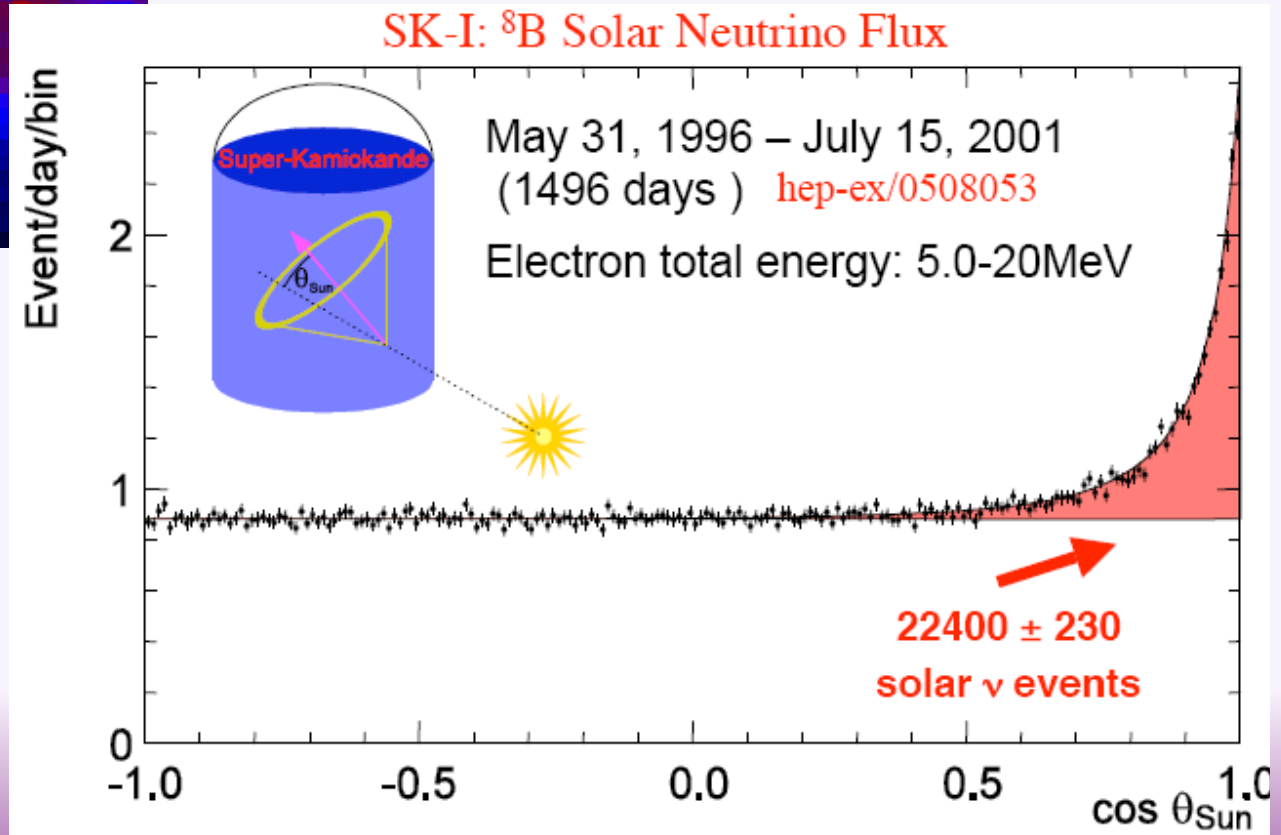


LAUREA H.C. A M. KOSHIBA - BOLOGNA





IL SOLE VISTO COI NEUTRINI DI SK



PROBLEMA: I NEUTRINI DAL SOLE SEMBRAVANO TROPPO POCHI!

- ⊙ Problema nell'astrofisica del sole o cattivi esperimenti?
- ⊙ NO: proprietà del neutrino! (Massa non nulla)

❖ Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Canada

- ❖ Sfera di 18m , ad una profondità di 2.5 km
- ❖ Riempita di acqua pesante
- ❖ 10000 PMTs

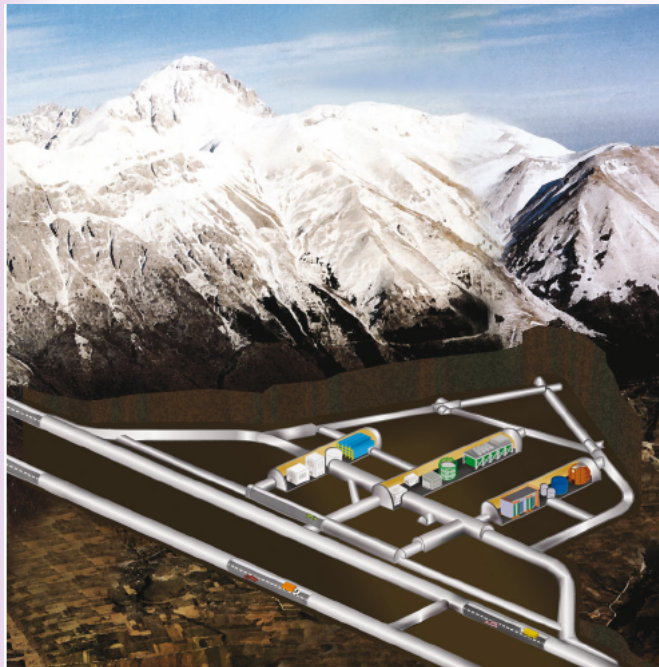


Scoperta che i neutrini hanno
massa: “oscillazioni”

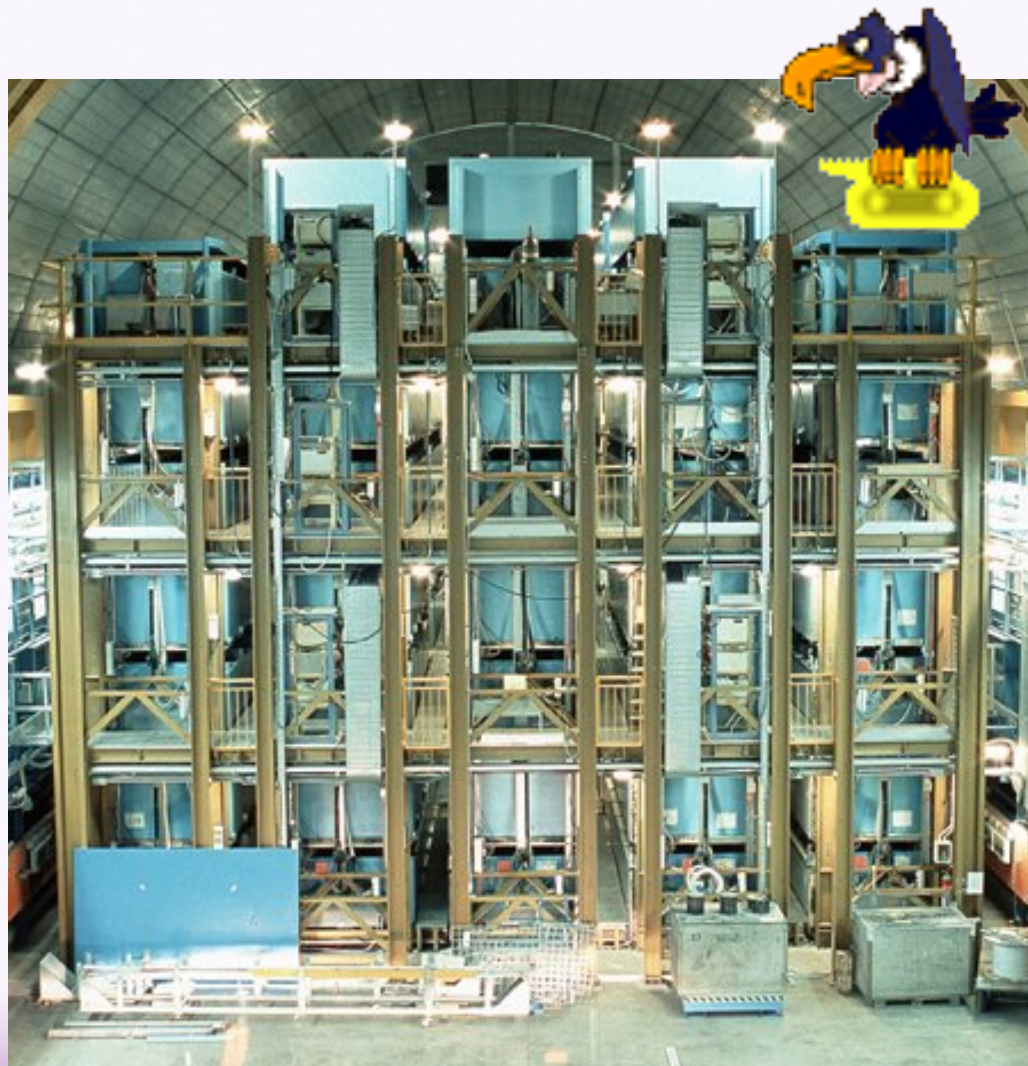




Strumenti eccezionali ai laboratori del Gran Sasso: BOREXINO



IL RIVELATORE LVD AL GRAN SASSO



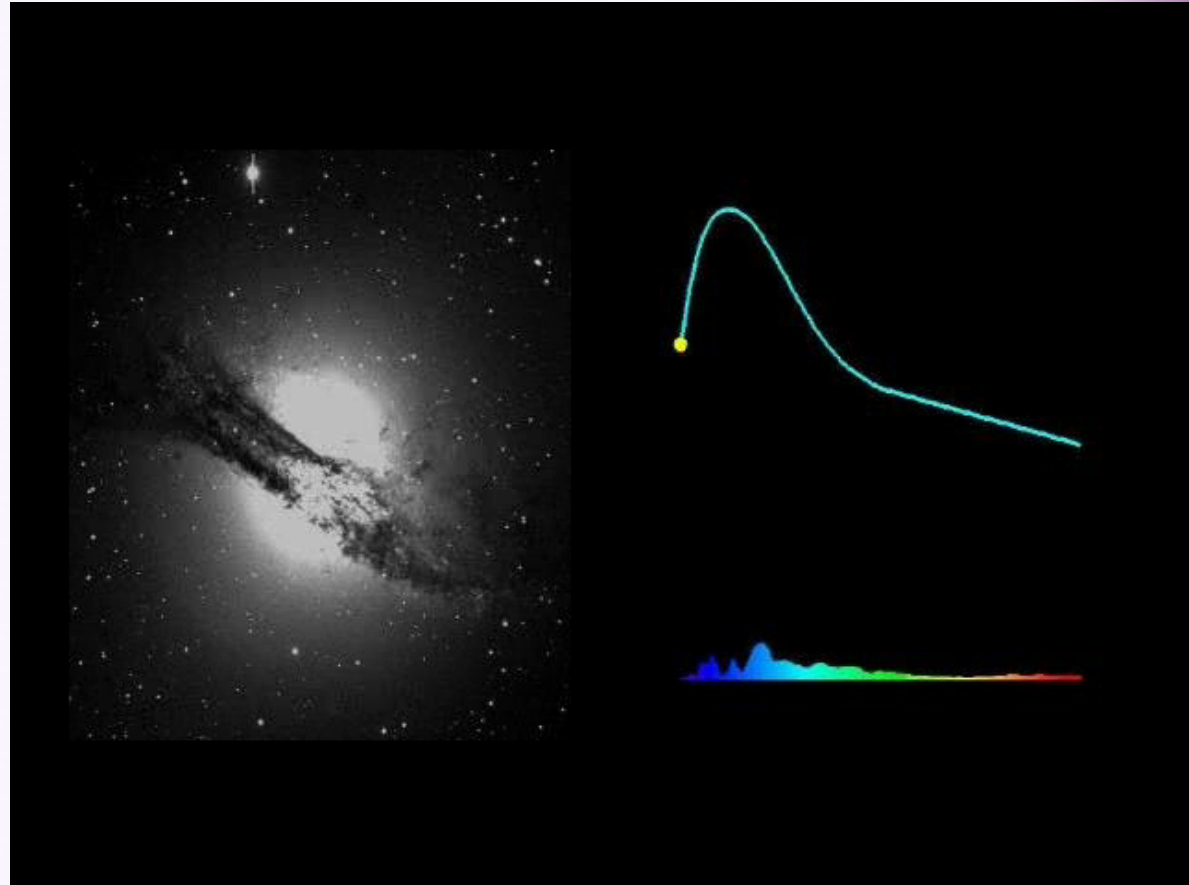
VITA, MORTE E MIRACOLI COI ν .

2. MORTE



...NASCITA DEI NUCLEI OLTRE IL FERRO

Una supernova nella Galassia Centaurus A. Il clip è stato preparato dal "Supernova Cosmology Project" con l'aiuto del Lawrence Berkeley National Laboratory's Computer Visualization Laboratory (N. Johnston: animazione) al "National Energy Research Scientific Computing Center"



...NASCITA DEI NUCLEI OLTRE IL FERRO

		NON-METALS																
		Atomic #										2						
		Symbol										He						
		Atomic Mass										4.00260						
1	1 H 1.0094											2 He 4.00260						
		p-block																
		Transition Metals																
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0122											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.179
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305	3 IIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIIB	9 VIIB	10 IB	11 IB	12 IIB	13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
4	19 K 39.098	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.88	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.847	27 Co 58.933	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
5	37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.91	54 Xe 131.29
6	55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 to 71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.85	75 Re 186.21	76 Os 190.2	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7	87 Fr (223)	88 Ra 226.03	89 to 103	104 Unq (261)	105 Unp (262)	106 Unh (263)	107 Uns (262)	108 Uno (265)	109 Uue (266)	110 Uun (267)	(Mass Numbers in Parentheses are from the most stable of common isotopes.)							
		Metals										Phases						
												Solid						
												Liquid						
												Gas						
Rare Earth Elements		d-block										f-block						
Lanthanide Series		57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97		
Actinide Series		89 Ac 227.03	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np 237.05	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)		

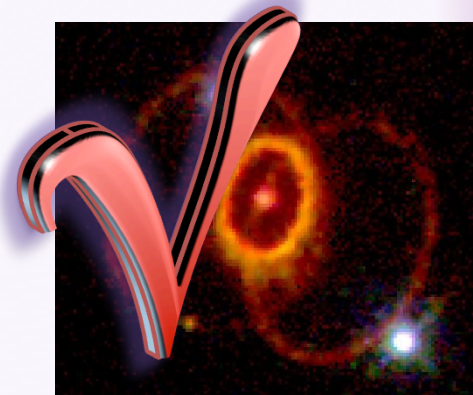
QUANTA ENERGIA VIENE RILASCIATA ?

- ⊙ Supernova da stella di massa $\sim 10 M_{Sole}$
- ⊙ Energia di legame gravitazionale liberata:

$$E_b \approx 3 \times 10^{53} \text{ erg} = 17\% M_{Sole} c^2$$

- ⊙ Ingredienti:

- 99% neutrini
- 1% energia cinetica dell'esplosione
- 0.01% luce



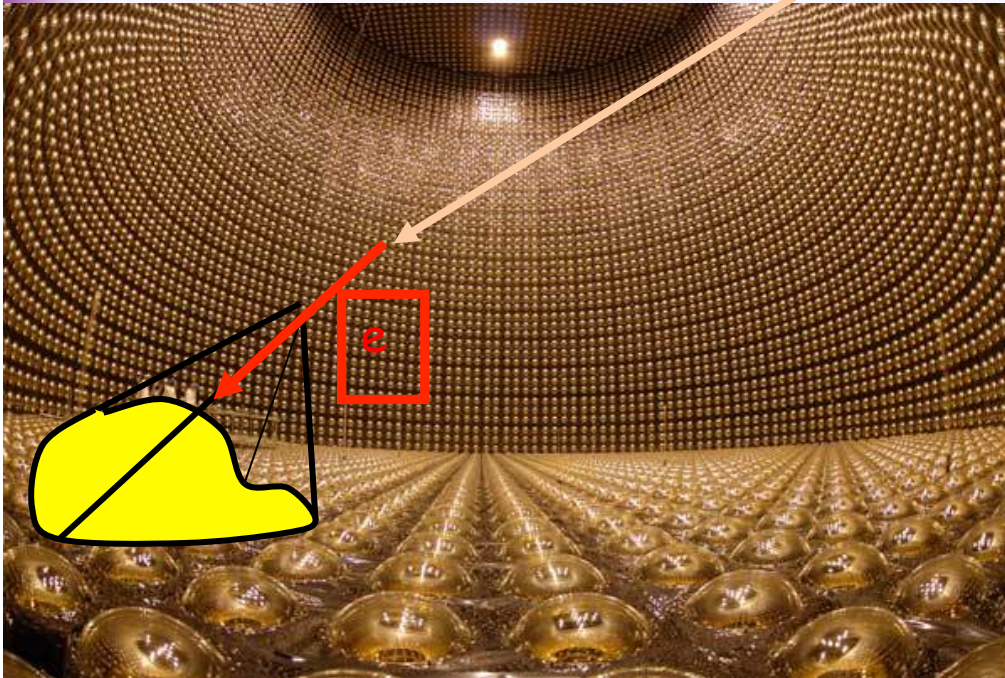
- ⊙ L'emissione avviene in un intervallo di ~ 10 secondi
- ⊙ Impulso di neutrini visibile in rivelatori sulla Terra.
- ⊙ Problema: le esplosioni osservabili sono rare (1/30 anni)

SN1987A



Anno	Dove furono registrate	Brillantezza
185	Cina	>Venere
369	Cina	>Marte o Giove
1006	Cina, Corea, Giappone, Europa, Arabia	>Venere
1054	Cina, India, Arabia	>Venere
1572	Europa	~Venere
1604	Europa	~Giove
1987	(Chile)	

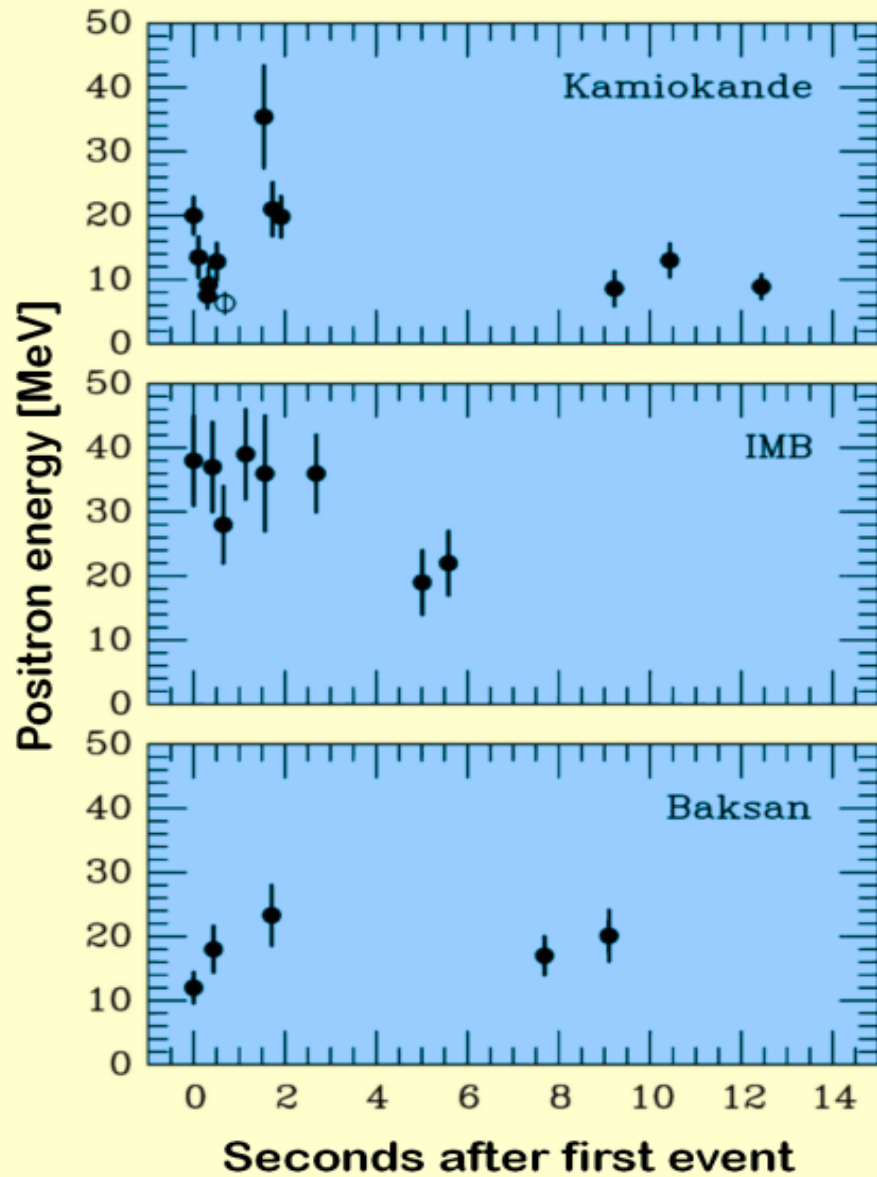
RIVELATORI DI NEUTRINI DA SN1987A



- ◉ Kamiokande: 2000 t di acqua
- ◉ 12 eventi rivelati in 12 s

- ◉ Esperimenti sotterranei in Giappone (Kamiokande), USA (IMB) e Russia (Baksan)
- ◉ Informazioni astrofisiche fondamentali su come avviene il processo di collasso gravitazionale.
- ◉ **Problema**: rivelatori piccoli e SN distante (pochi eventi).
- ◉ In attesa della prossima SN

NEUTRINI DA SN1987A

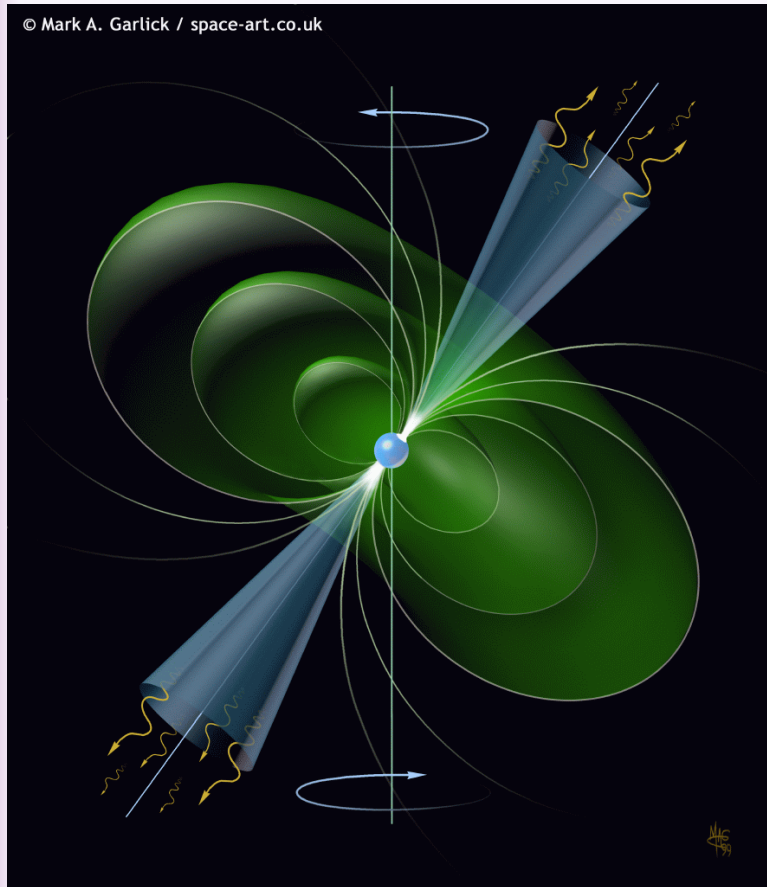


VITA, MORTE E MIRACOLI COI ν .

3. “MIRA- COLI”



DOPO LA “MORTE” IN ASTROFISICA

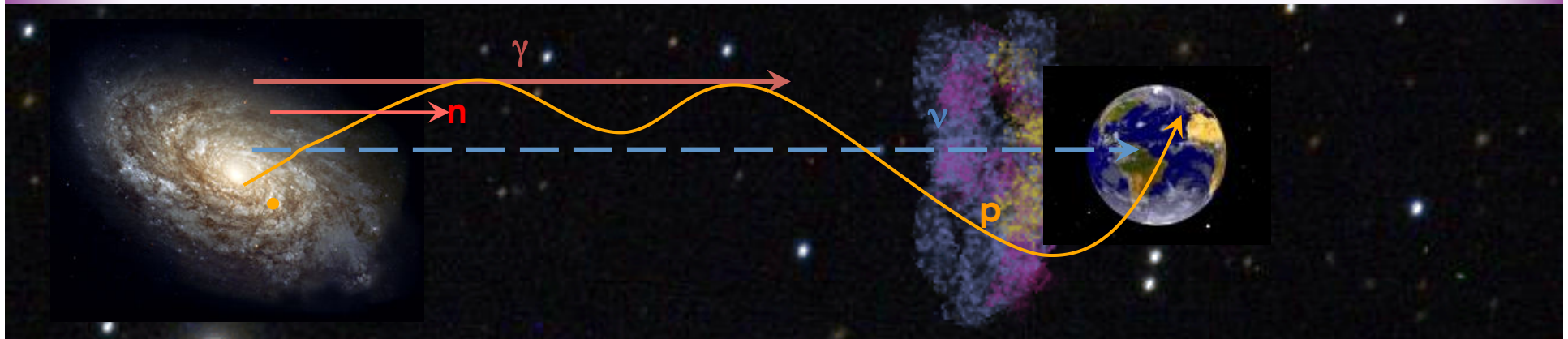


◎ Oggetti collassati galattici: PULSAR



◎ Oggetti extragalattici: AGN
Nucleo centrale: buco nero di massa 1 miliardo di volte il Sole

RAGGI COSMICI: neutrini, protoni e fotoni



Fotoni: interagiscono con la materia e la radiazione

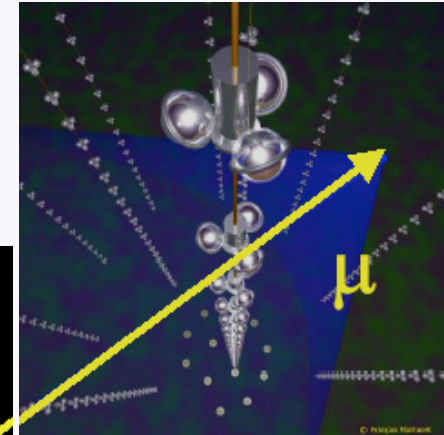
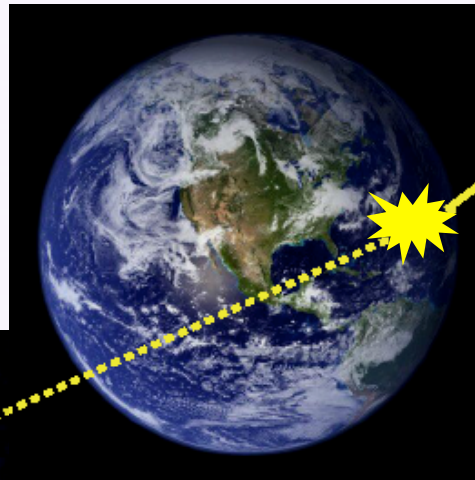
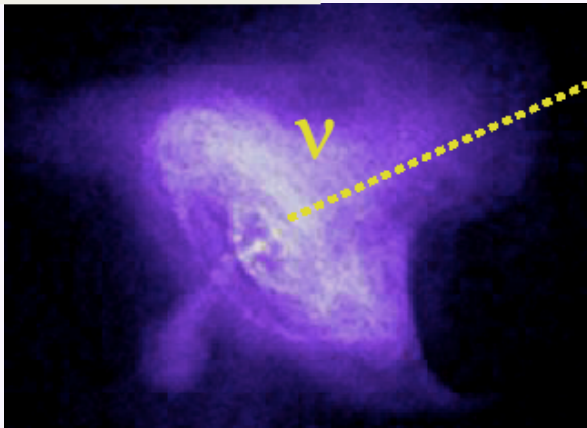
Protoni: (HE)interagiscono con la Radiazione cosmica di fondo (CMB) e sono deflessi da campi magnetici (se di bassa energia)

Neutroni: non sono stabili

Inconveniente neutrini: enormi rivelatori (~Gton) sono necessari

NUOVE SONDE PER L' ASTROFISICA: I NEUTRINI

Neutrini sono emessi da potentissime sorgenti nella nostra Galassia o in Galassie lontane

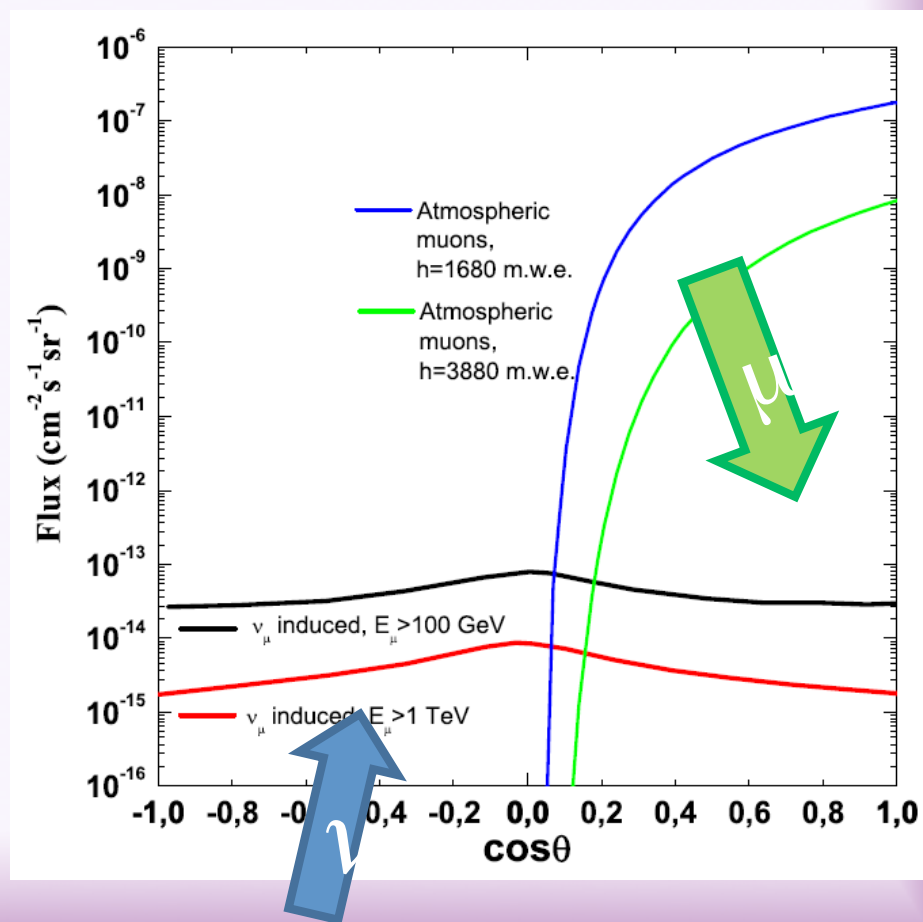
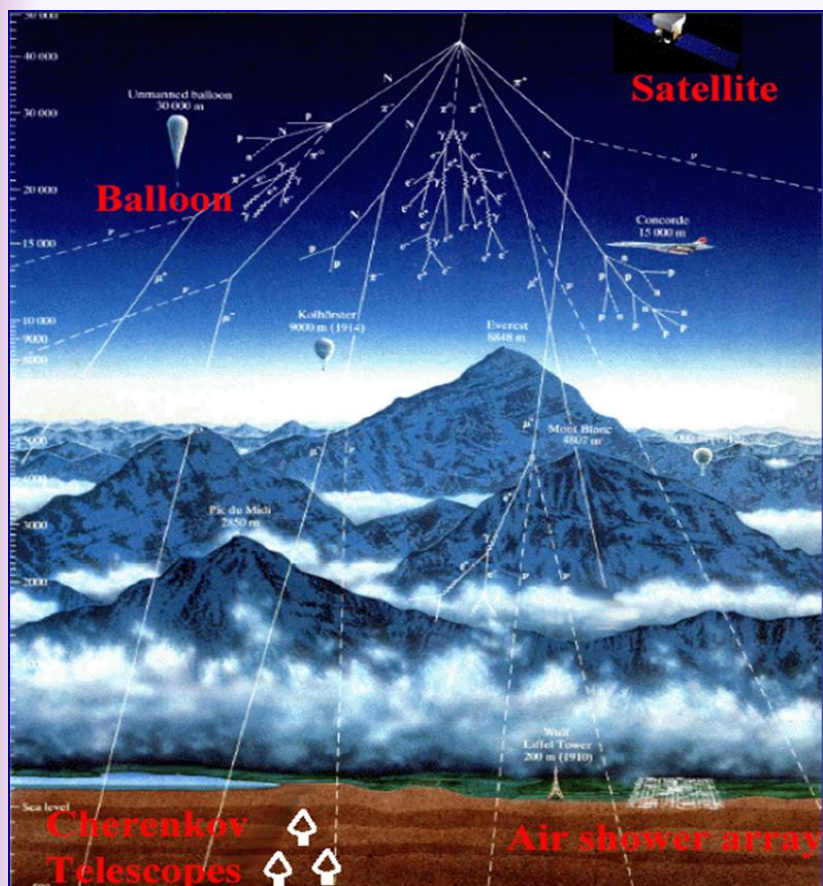


Muoni emettono luce in acqua/giaccio

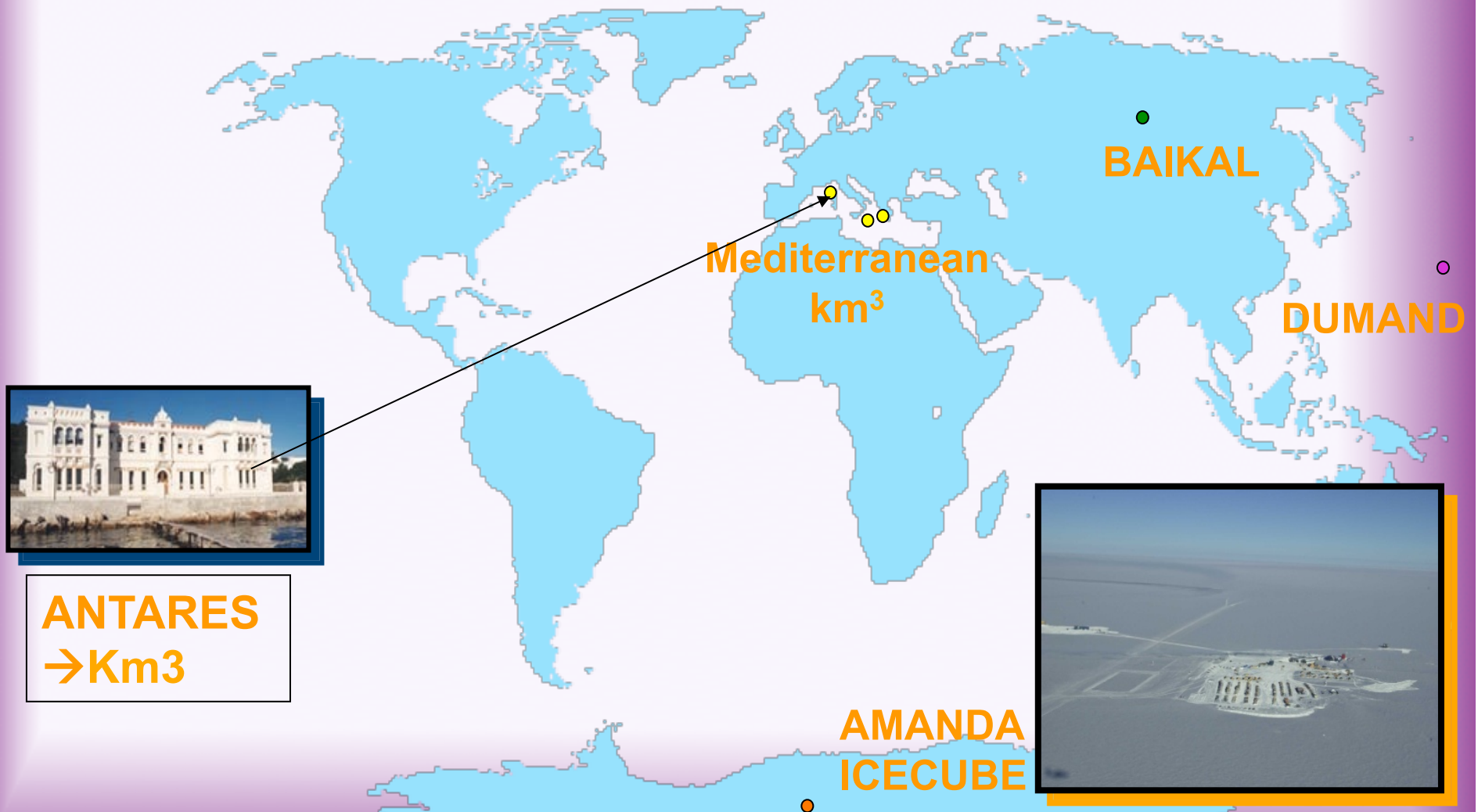
ν interagiscono nella Terra e producono μ

TELESCOPIO PER ν = UN RIVELATORE CHE GUARDA IN BASSO!

Il flusso di muoni atmosferici dall'alto domina di molti ordini di grandezza il flusso di eventi indotti da interazioni di neutrini.



TELESCOPI DI NEUTRINI



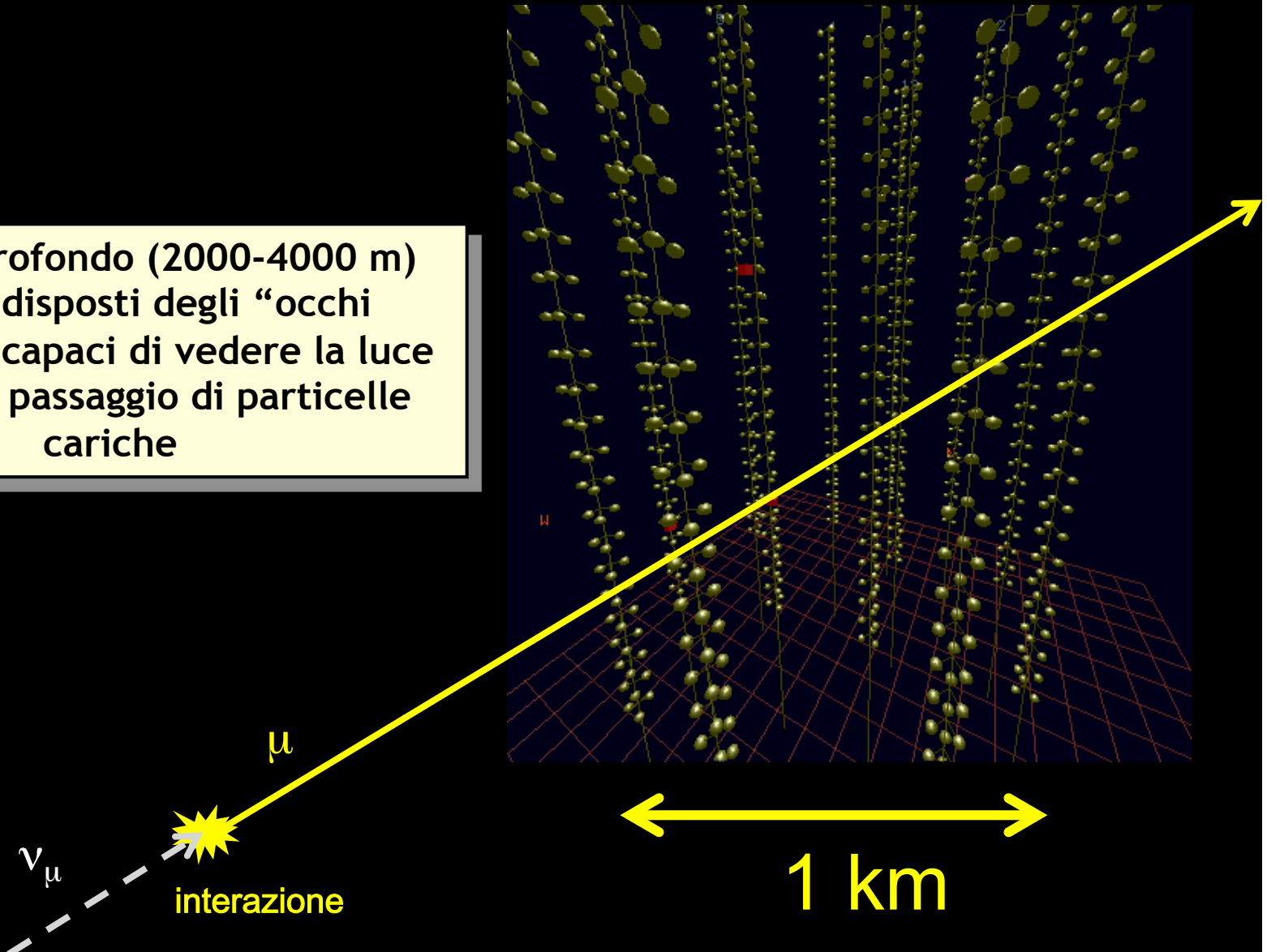
ANTARES
→ Km³



AMANDA
ICECUBE

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Nel mare profondo (2000-4000 m) vengono disposti degli “occhi elettronici” capaci di vedere la luce emessa dal passaggio di particelle cariche



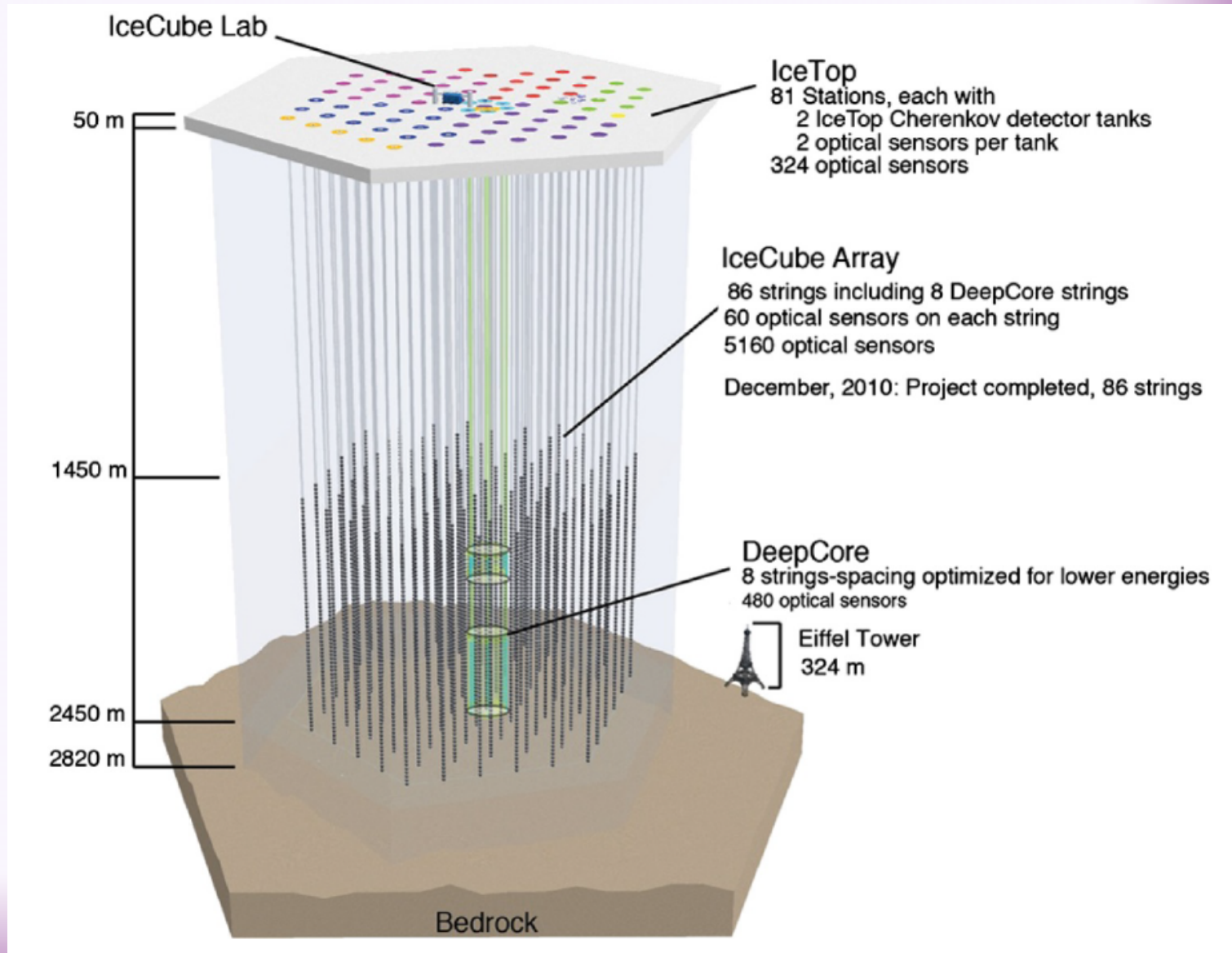
DIFFERENZE: IL GHIACCIO



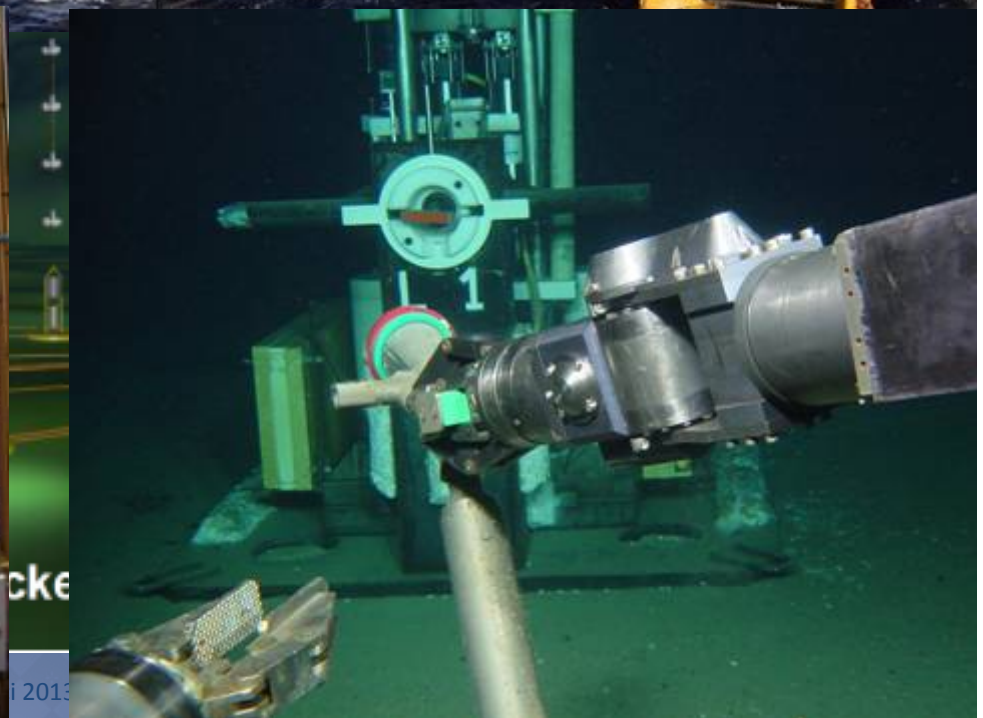
...E L'ACQUA



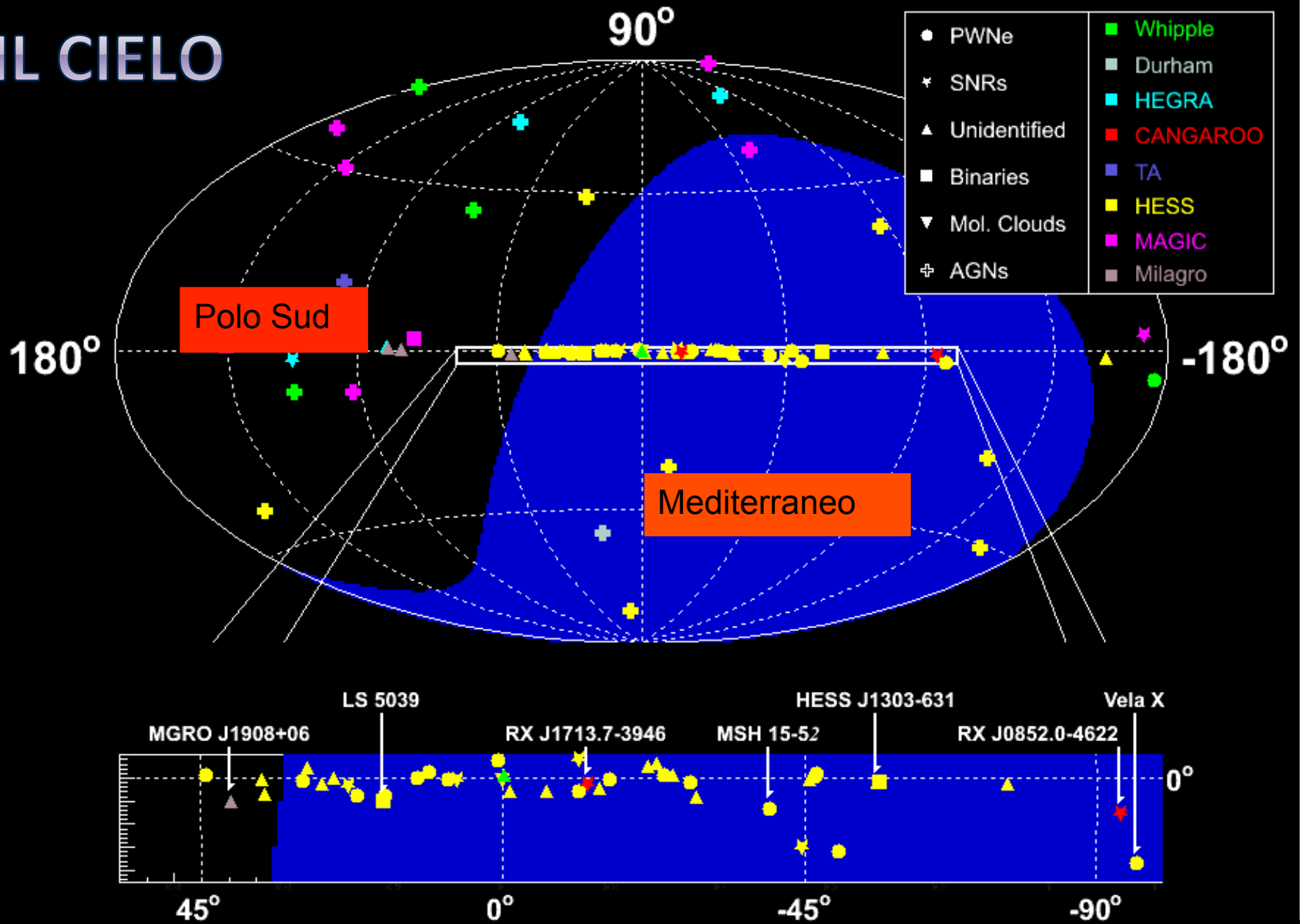
ICECUBE AL POLO SUD



ANTARES



IL CIELO



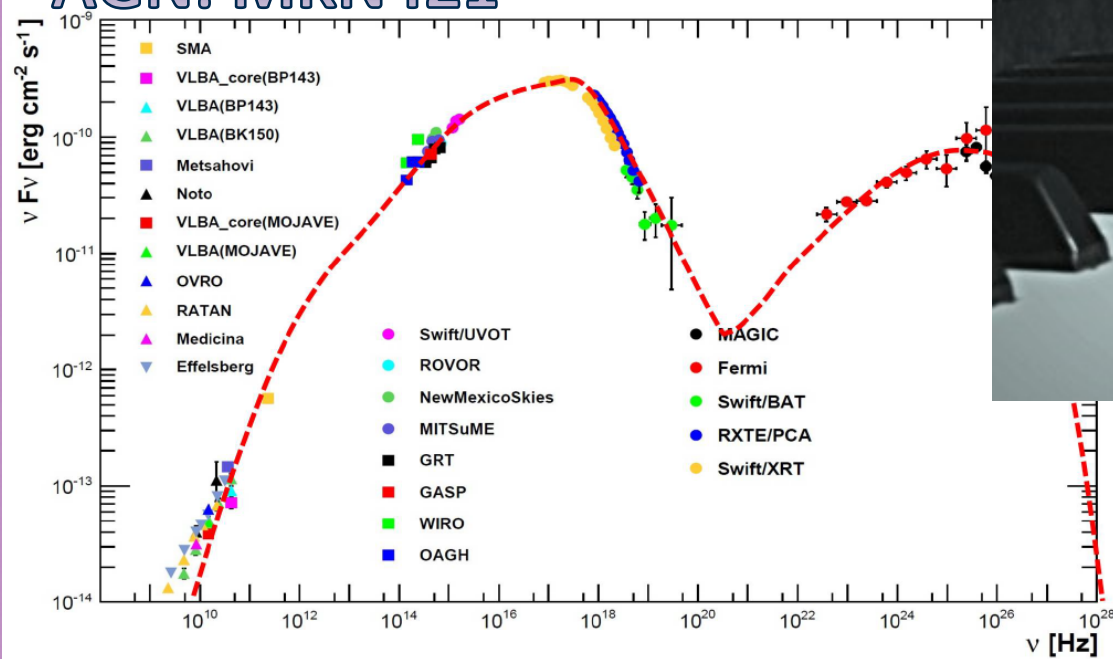
CONCLUSIONI: I ν ...

- ⊙ ... sono tra i Raggi Cosmici quelli che sono i più elusivi
- ⊙ ... sono emessi in un gran numero di processi astrofisici
- ⊙ ... trasportano informazioni complementari rispetto ai fotoni
- ⊙ ... hanno piccola probabilità d'interazione
 - Fuggono senza interagire dalle sorgenti
 - Sono per questo motivo difficili da rivelare
- ⊙ ...hanno permesso di verificare il funzionamento del Sole (fusione nucleare nelle stelle)
- ⊙ ...sono stati rivelati dal collasso gravitazionale della SN1987A (99% dell'energia di legame della stella in neutrini)
- ⊙ ...nuove sonde per l'astrofisica delle alte energie

CONCLUSIONI

- Astrofisica con “luce”: come una sonata con un pianoforte con oltre 20 ottave

AGN: MKN421



- Astrofisica con neutrini: è aggiungerci il suono del

