

L'ASTRONOMIA MULTIMESSAGGERA

PID - Programma INFN per
Docenti
LNS 18-22 Febbraio 2019

R. Coniglione - INFN Laboratori Nazionali del Sud

Come guardiamo il cielo

2

Sin dalle origini l'uomo ha studiato l'Universo osservando la luce emessa dai corpi celesti

Da Galileo in poi, gli astronomi hanno sviluppato e costruito strumenti sempre più potenti per l'osservazione di stelle, pianeti e altri corpi celesti



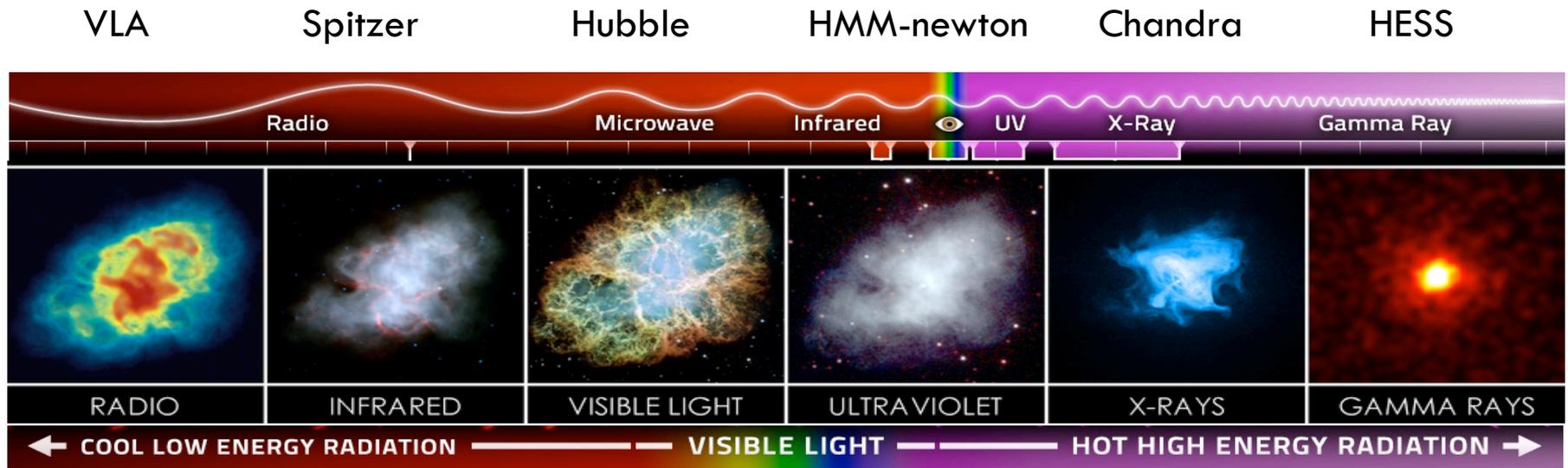
Ma come si fa astronomia oggi ?

3

- Astronomia tradizionale 🖐️ Luce visibile
- Astronomia a multi-lunghezza d'onda 🖐️ Onde radio, infrarosso, Raggi X, Raggi Gamma
- Astronomia particellare 🖐️ raggi cosmici, neutrini
- Astronomia con onde gravitazionali

Astronomia tradizionale ed a molte lunghezze d'onda

4

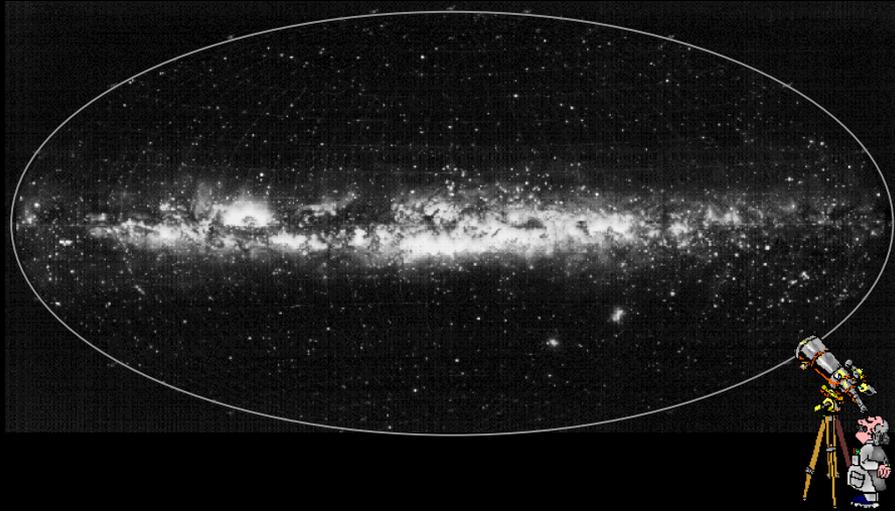


Nebulosa del granchio (Crab nebula)

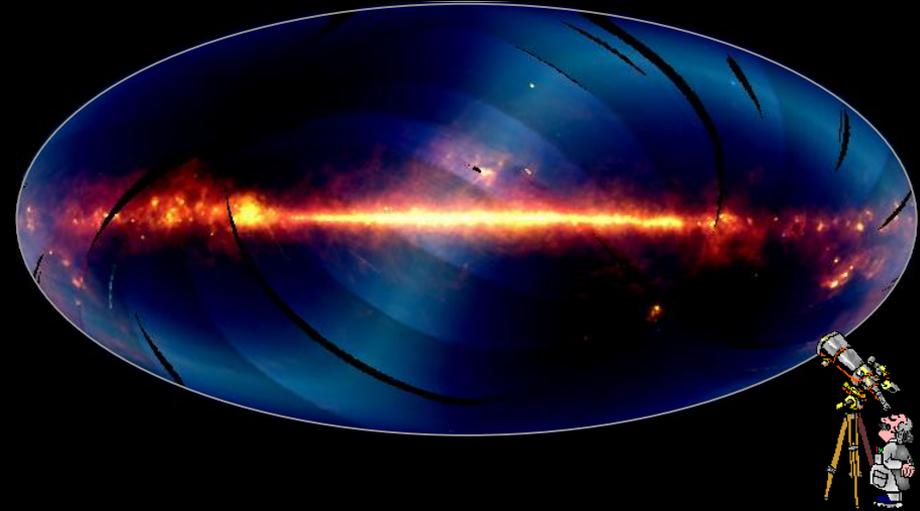
- E' una SNR (Super Nova Remnant)
- Osservata per la prima volta nel 1054
- Declinazione $+22^\circ$

Il cielo in coordinate galattiche

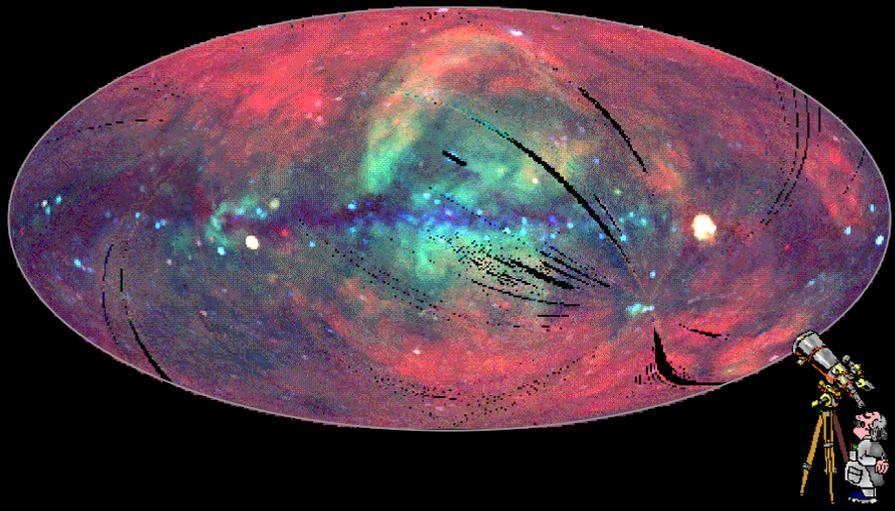
Radio Infrared Visible Light
(eV) X-rays Gamma rays



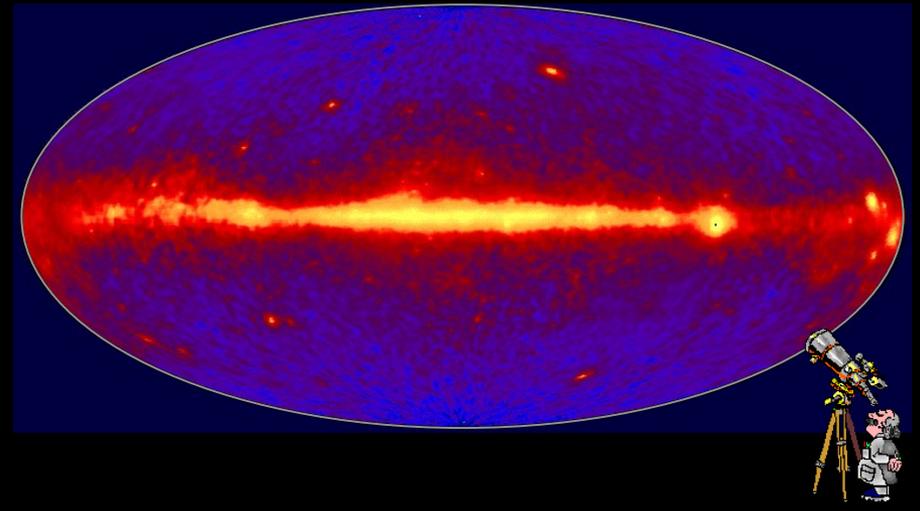
Radio Infrared
(10^{-2} eV) Visible Light X-rays Gamma rays



Radio Infrared Visible Light X-rays
(10^3 eV) Gamma rays

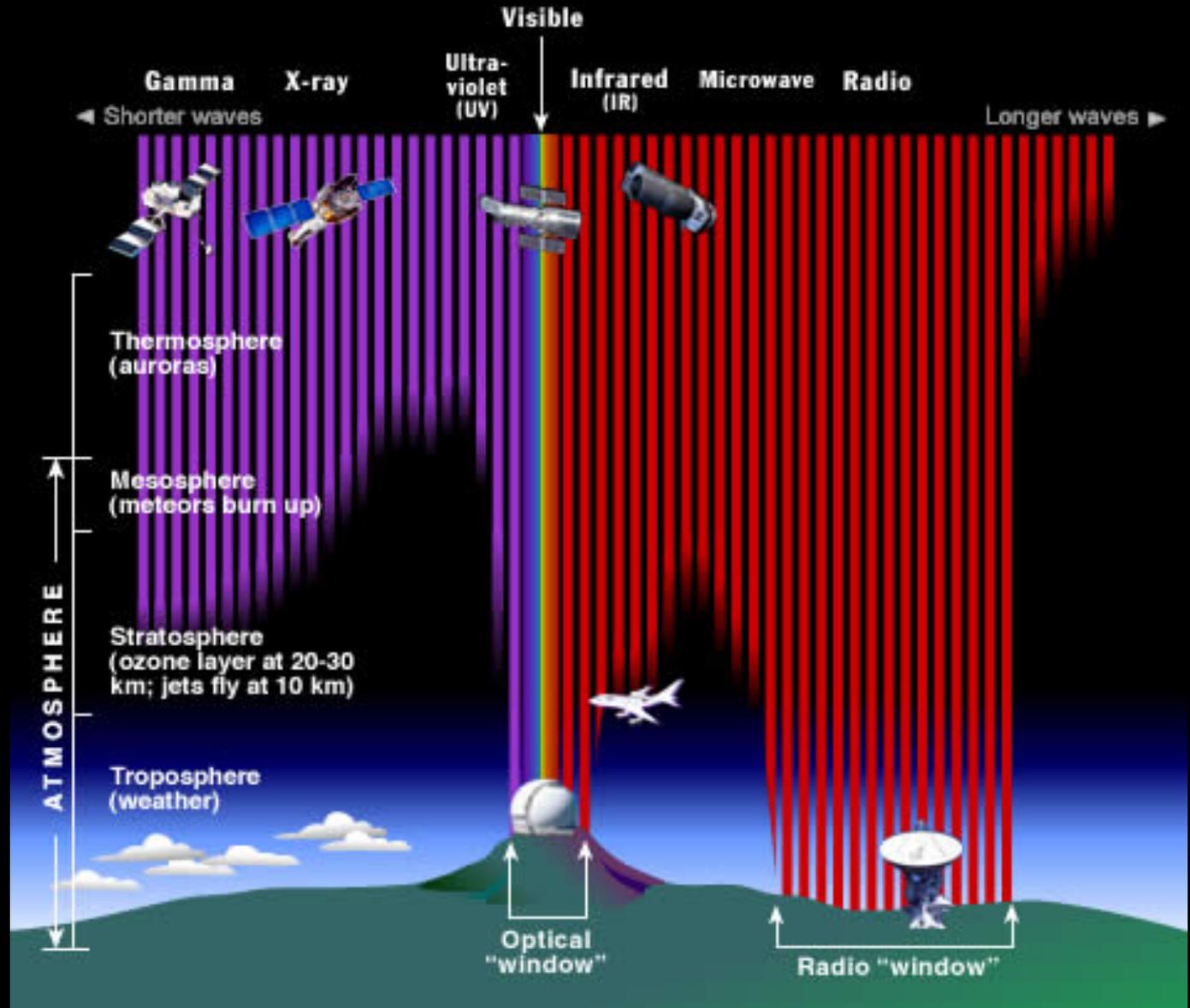


Radio Infrared Visible Light X-rays Gamma rays
(10^9 eV)



Gli strumenti

6



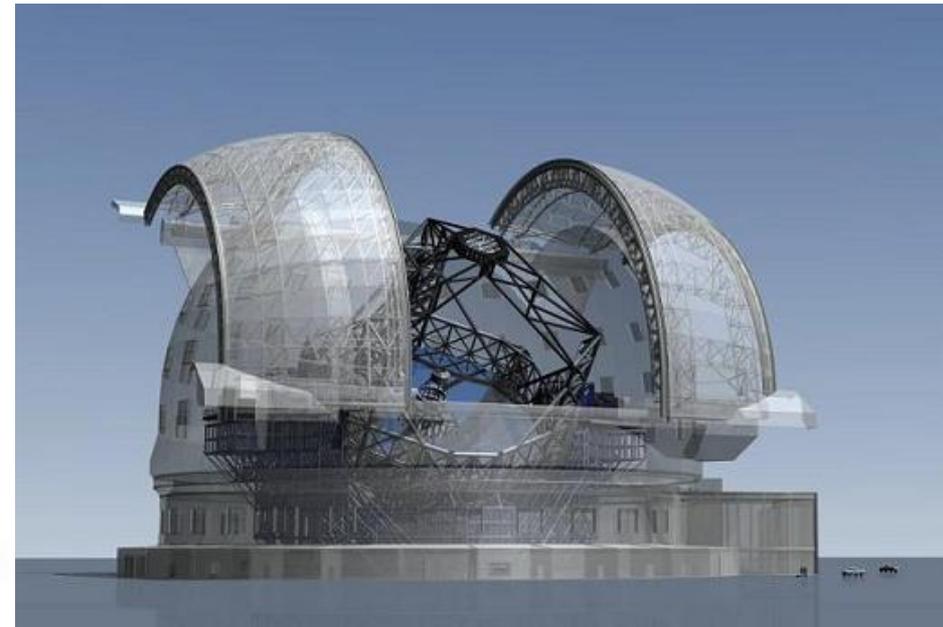
Nel visibile

7



Il “Very Large Telescope” (ESO Cile) è oggi il telescopio nell’ottico più potente al mondo. E’ composto da quattro telescopi principali, ciascuno dotato di uno specchio primario da 8,2 metri di diametro, e quattro telescopi ausiliari da 1,8 metri di diametro.

Dal 2005 l’ESO sta lavorando per sviluppare il “extremely large optical/infrared telescope (ELT)”. Specchio primario da 39m.

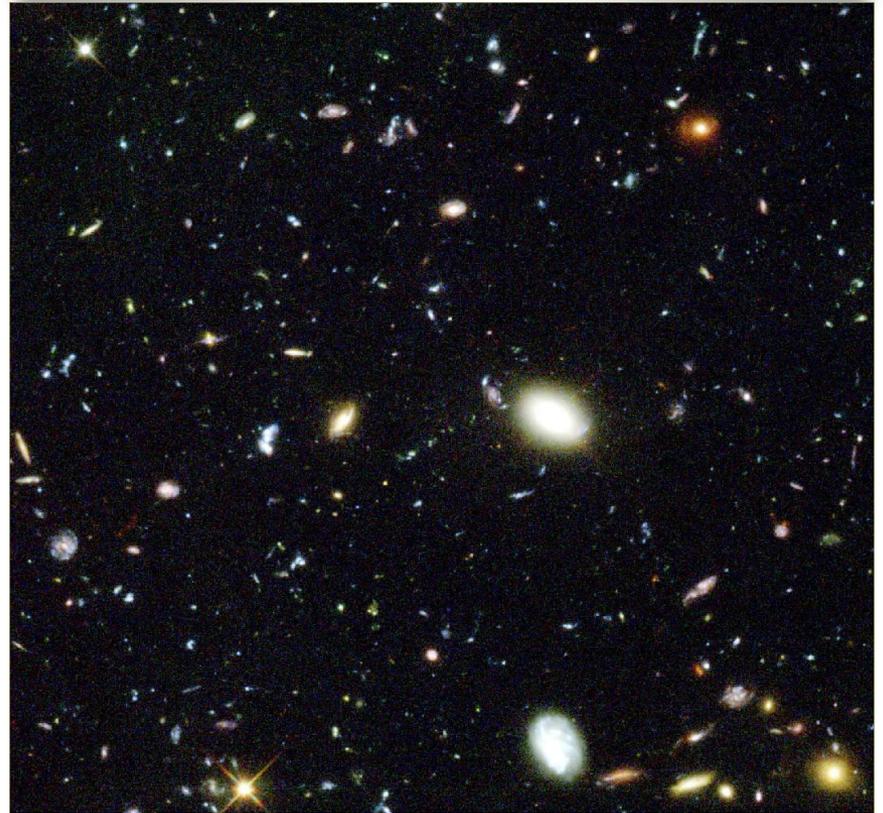


Telescopi ottici nello spazio

8



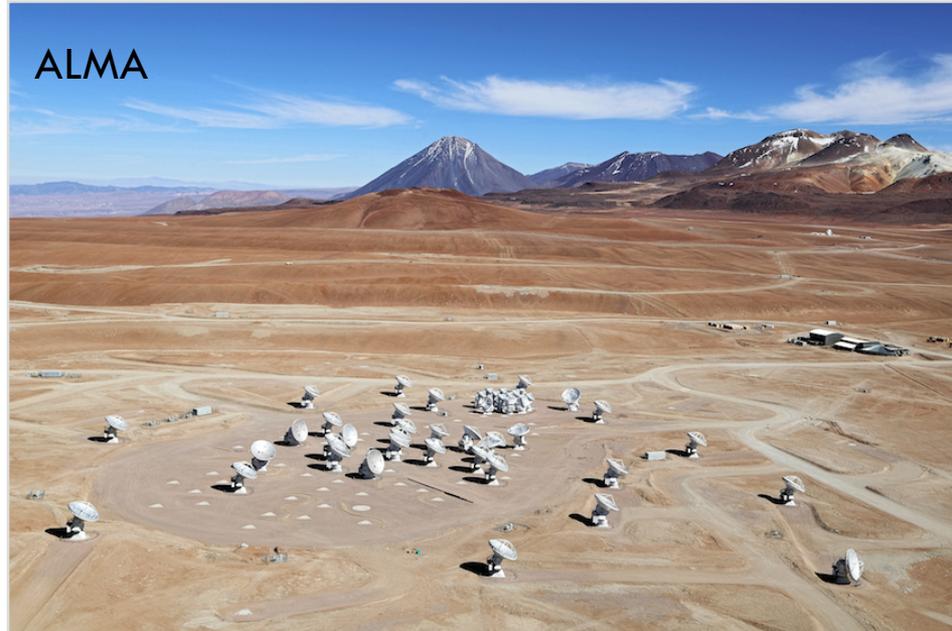
L'Hubble Telescope (NASA) ci ha permesso di spingere lo sguardo fino alle regioni più remote dell'Universo



Radio astronomia

9

ALMA



ALMA (Atacama Large Millimeter/
submillimeter Array) in funzione dal
2013 in Cile



SKA (Square kilometre Array) in fase
progettuale



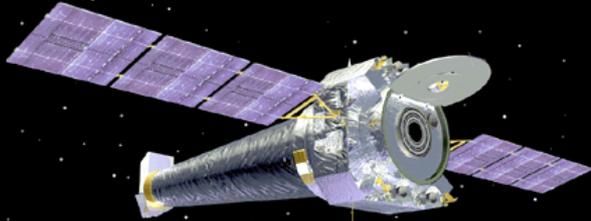
SKA



Astronomia con raggi X e Gamma

10

Il satellite X Chandra



Il satellite gamma Fermi



Astronomia con raggi Gamma di alta energia

11

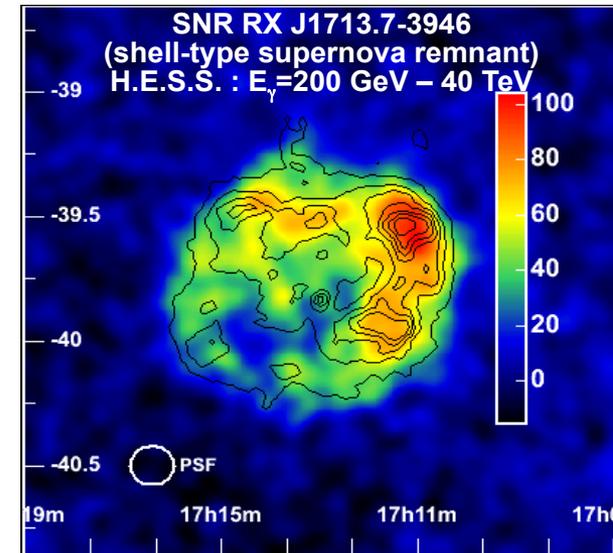
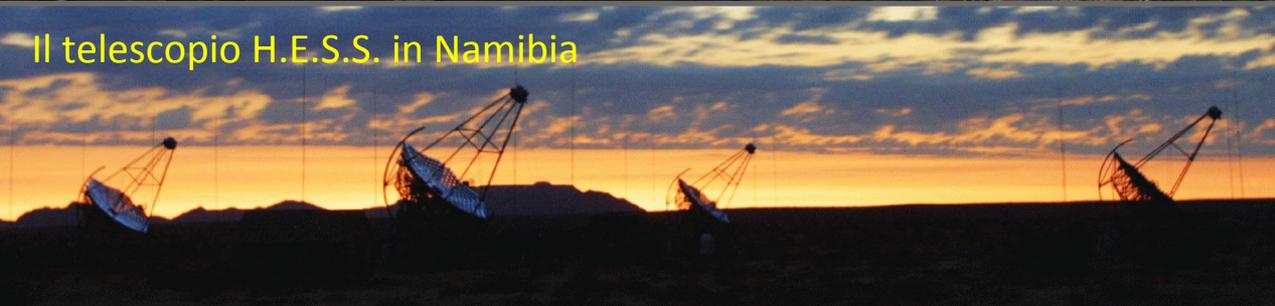
Il telescopio MAGIC alle Canarie



Sorgente Galattica RXJ1713
E' una SNR (Super Nova
Remnant)
con $R=0.6^\circ$

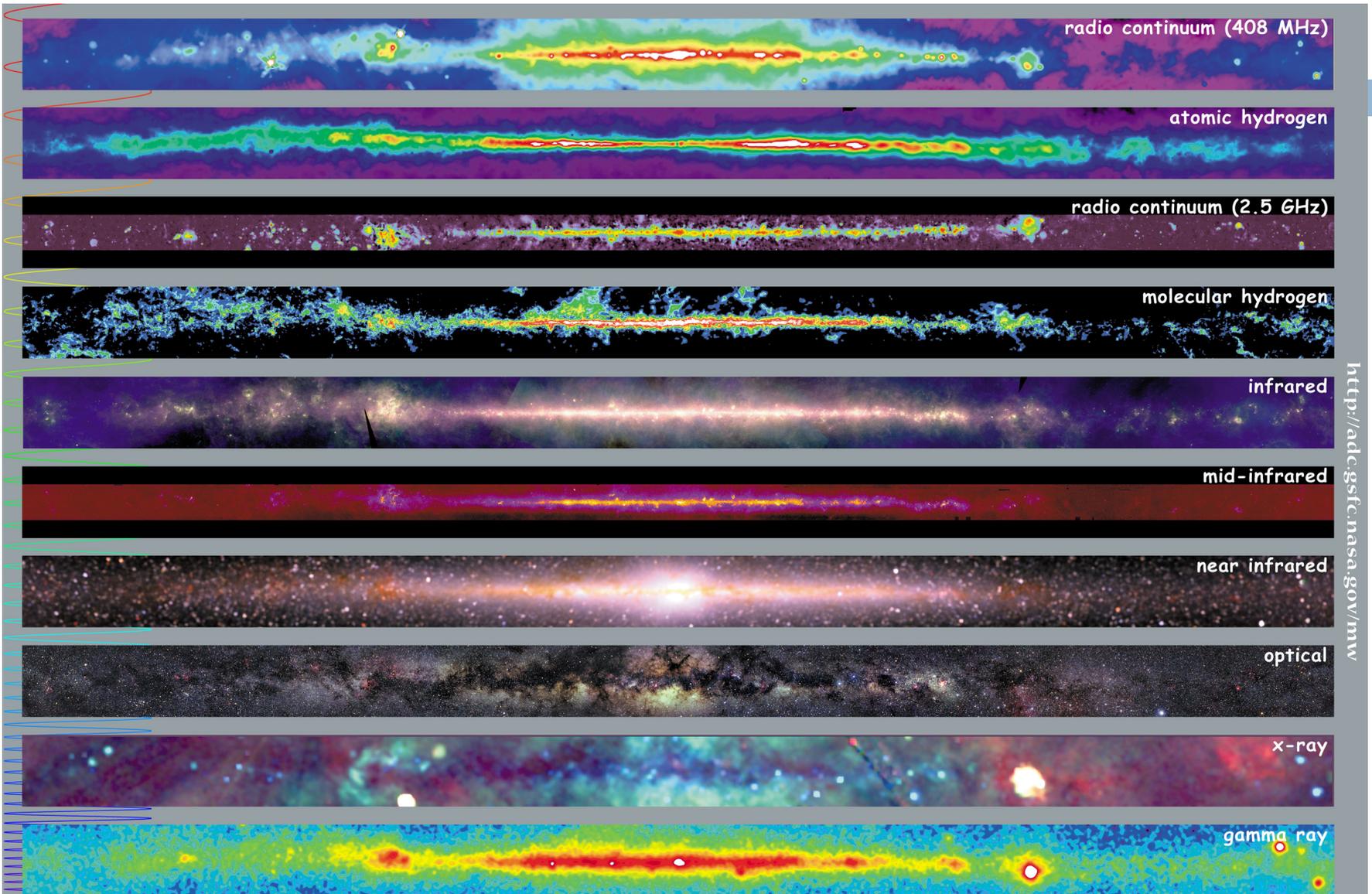


Il telescopio H.E.S.S. in Namibia

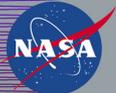


Il nostro Piano galattico

12



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

... e le altre sonde

13

- Anche se la principale sorgente di informazioni dal cosmo è rappresentata dalla radiazione elettromagnetica, questa non è la sola sonda con cui possiamo osservare l'Universo

Altre particelle arrivano dal cosmo:

- Raggi cosmici
- Neutrini
- Onde gravitazionali

Tecniche di rivelazione tipiche della fisica delle particelle

La fisica astroparticellare

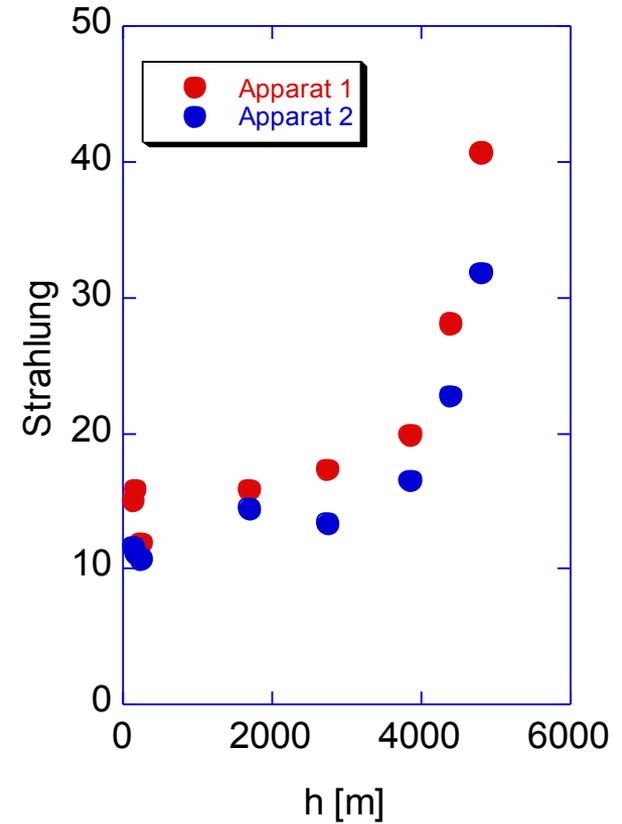
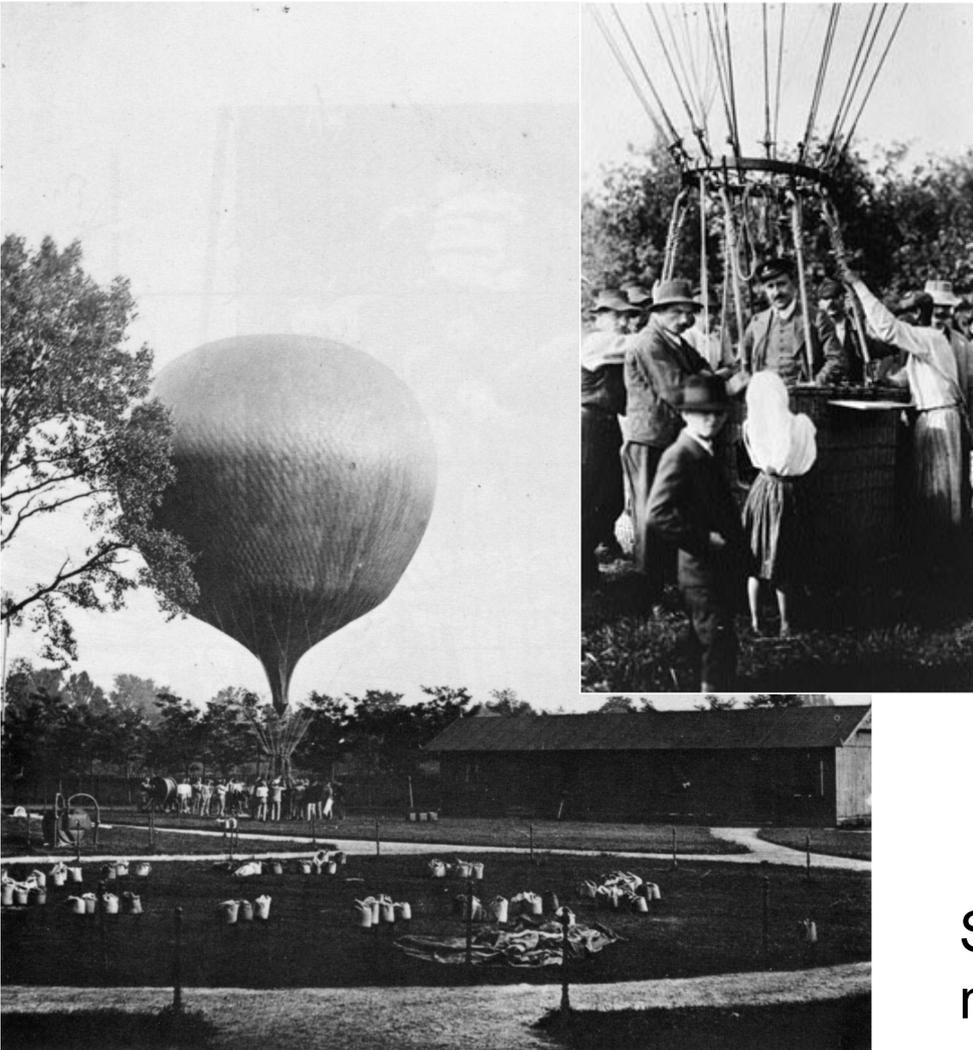
14

Una nuova branca della fisica: la Fisica Astroparticellare



I raggi cosmici

15



Scoperta da V. Hess
nel 1912

I raggi cosmici

16

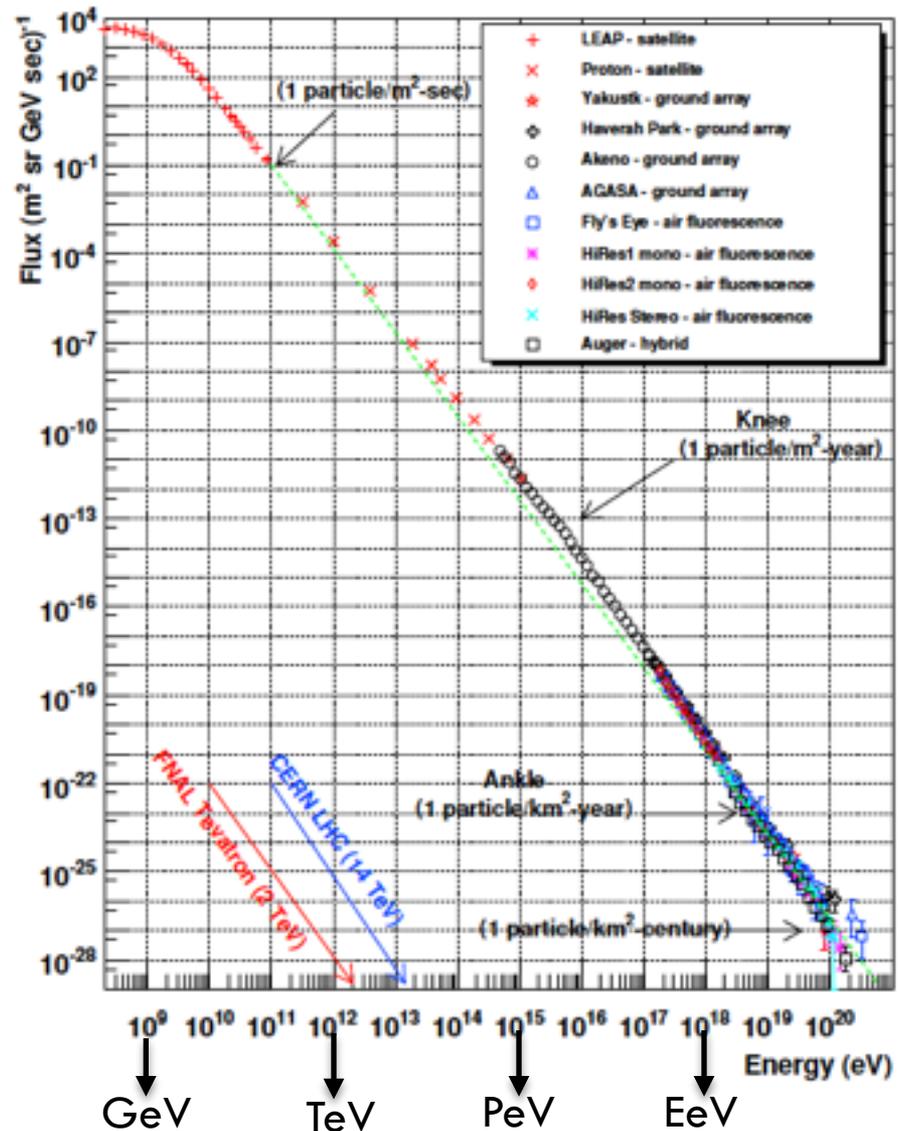
Principalmente composti da
p ($\approx 85\%$)
He ($\approx 12\%$)
nuclei più pesanti ($\approx 1\%$)



I raggi cosmici

17

il flusso decresce rapidamente con l'energia misurati su 32 ordini di grandezza

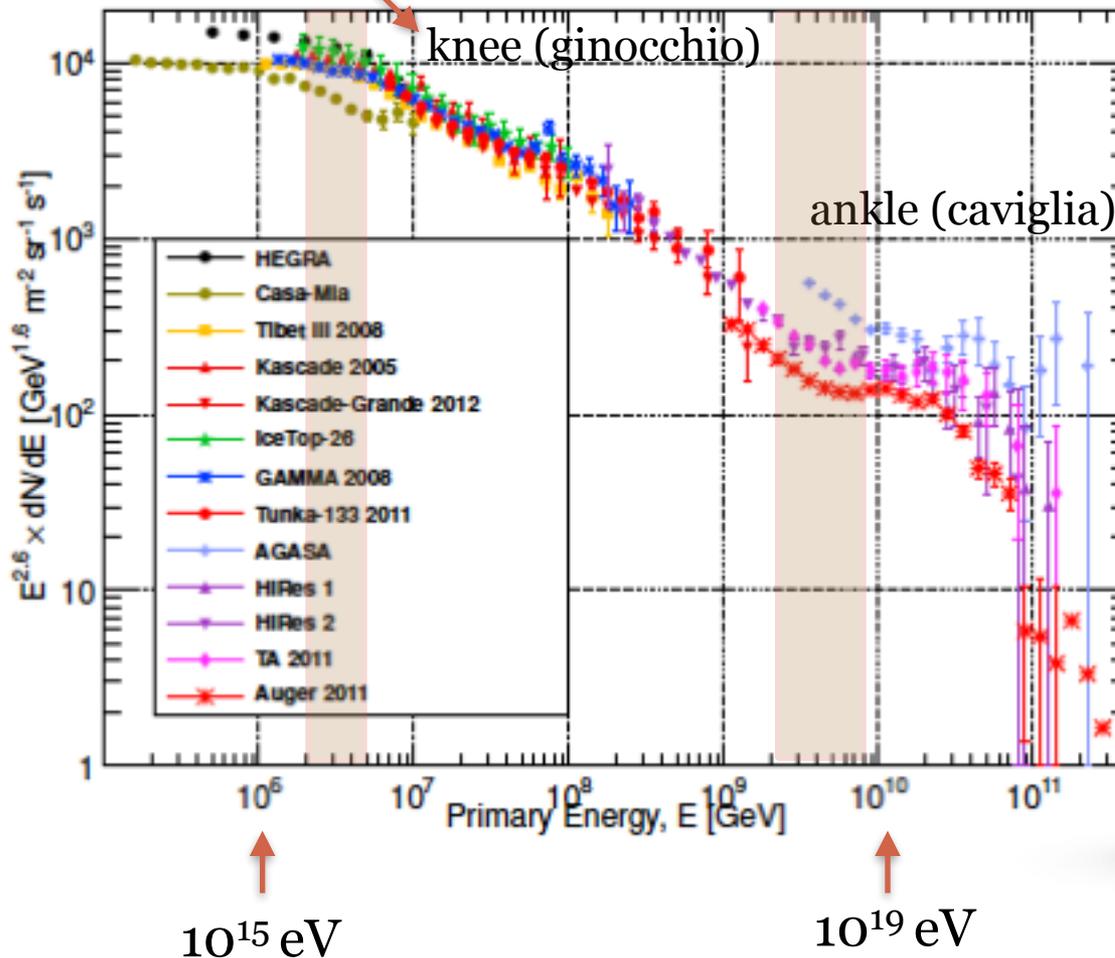


I raggi cosmici

raggio di Larmor
 $R_L = E/(Ze B_G)$

18

campo magnetico galattico troppo debole per confinare le particelle di energia più alta



$$dN/dE \propto E^{-\gamma}$$

$$\gamma \approx 2.7 \text{ per } E < \text{knee}$$

$$\gamma \approx 3.3 \text{ per } \text{knee} < E < \text{ankle}$$

$$\gamma \approx 2.7 \text{ per } E > \text{ankle}$$

origine extragalattica

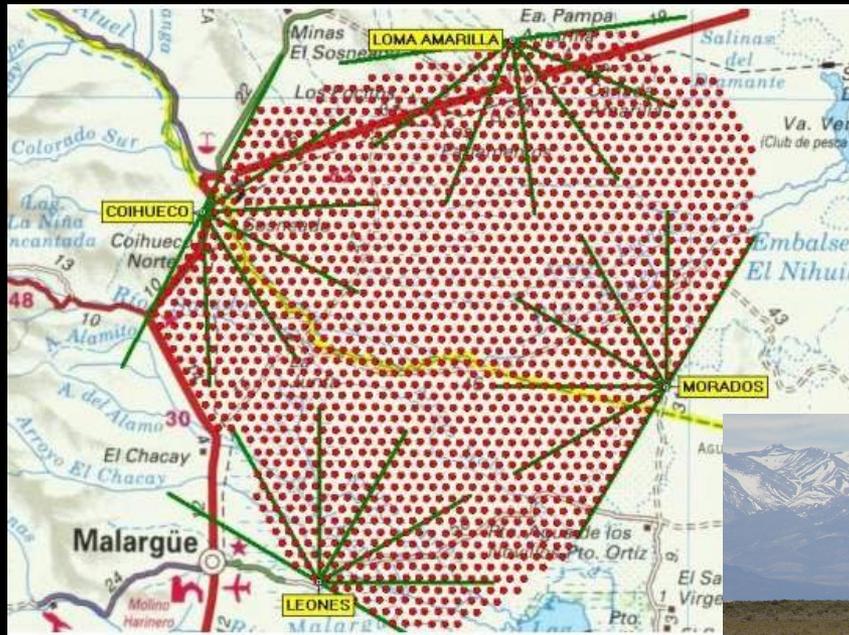
GZK cut off

Origine di gamma di alta energia
 connessa con l'emissione di neutrini

I raggi cosmici di altissima energia

19

L'Osservatorio Pierre Auger nella Pampa Argentina



Il più grande “strumento” mai realizzato

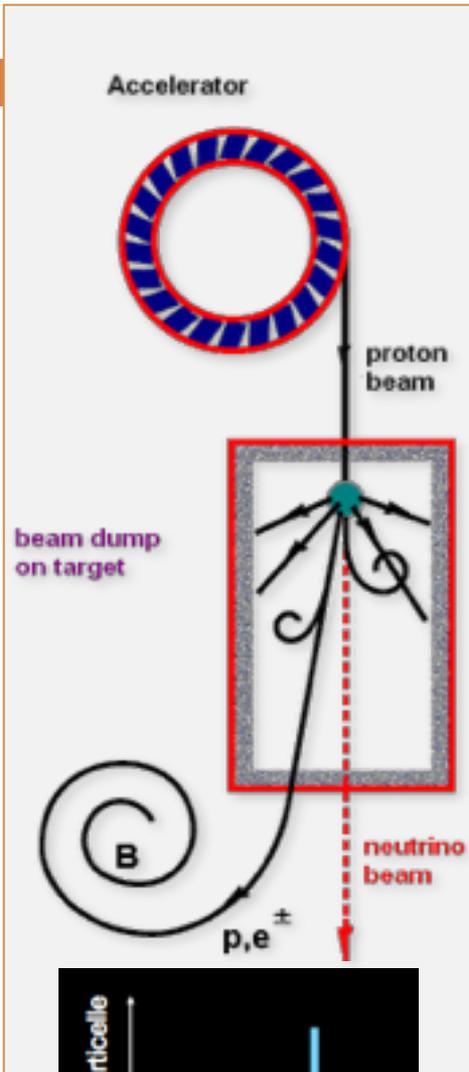
3000 km² tappezzati da 1600 tank per osservare gli sciami atmosferici estesi prodotti dai raggi cosmici di energia più elevata

Gli acceleratori cosmici

20

Particelle accelerate da sorgenti galattiche o extragalattiche possono interagire con la materia o con il campo di fotoni vicino alla sorgente e produrre neutrini e/o gamma di alta energia
(*“astrophysical beam dump”*)

The astrophysical beam dump



Produzione leptonica di γ di alta energia
 radiazione di sincrotrone seguito da
 Inverse Compton

$$e + \gamma_{\text{Synchrotron}} \rightarrow e' + \gamma'_{\text{HE}}$$

Produzione adronica di ν e γ di alta
 energia

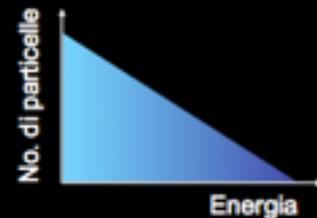
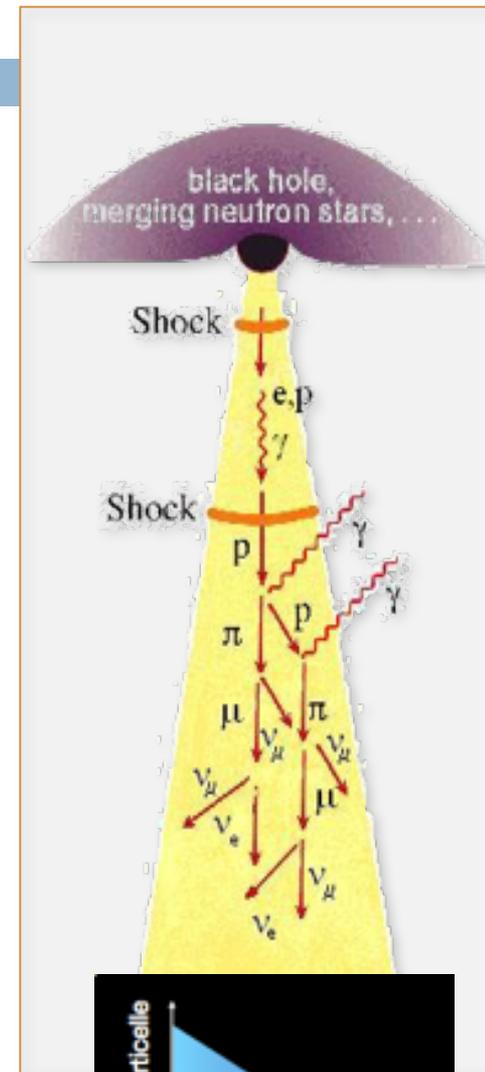
$$p + p \rightarrow X, \pi$$

$$p + \gamma \rightarrow N\pi$$

Decadimento di pioni e muoni

$$\text{neutral pions} \rightarrow \text{HE gammas}$$

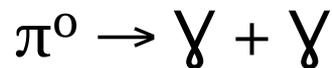
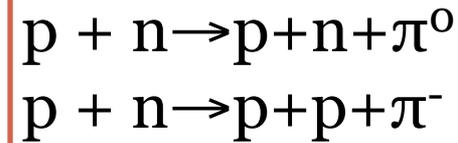
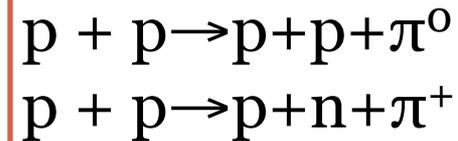
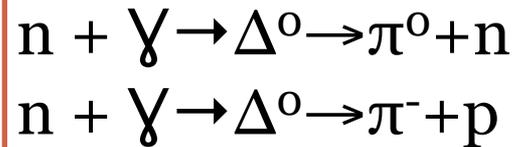
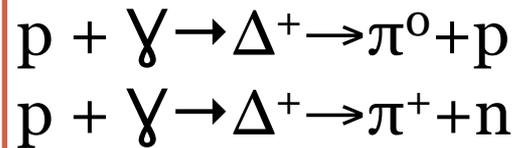
$$\text{charged pions} \rightarrow \text{HE } \nu_{\mu} \nu_e$$



Reazioni nucleari coinvolte

22

- Neutrinos only from hadronic reactions
- High energy gammas from hadronic and leptonic reactions



from $\mu^+ \mu^-$ decay



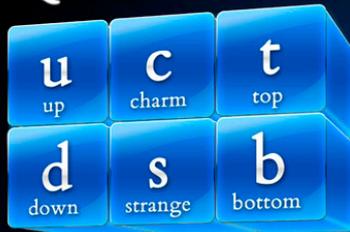
Flavour ratio at source

$$\nu_\mu : \nu_e : \nu_\tau = 2:1:0$$

I neutrini

23

Quarks

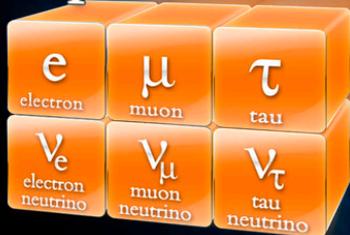


Force Carriers

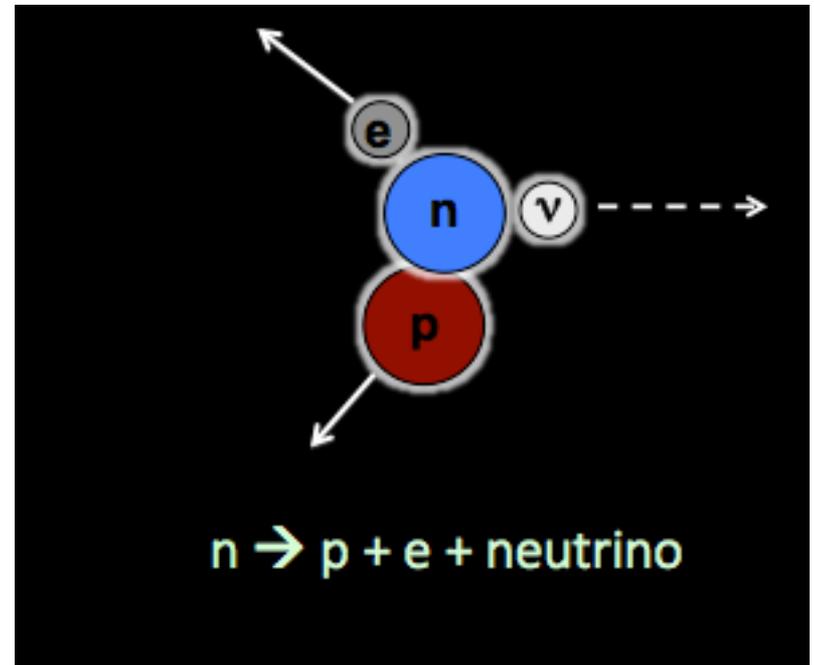


H
Higgs boson

Leptons



Il neutrino è stato postulato da W. Pauli per spiegare il decadimento beta



Sorgenti di *neutrini*

Il Big Bang

$$\rho\nu = 330 / \text{cm}^3$$

$$E_\nu = 0.0004 \text{ eV}$$

$$(1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ Joules})$$

SN1987

$$E_\nu \sim \text{MeV}$$

Il sole

$$\Phi_\nu^{Earth} = 6 \times 10^{10} \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

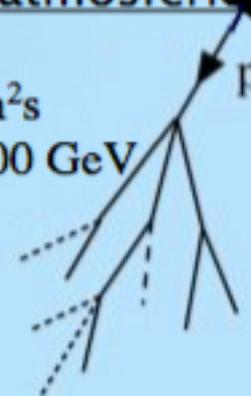
$$E_\nu \sim 0.1 - 20 \text{ MeV}$$

Neutrini atmosferici

$$\nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$$

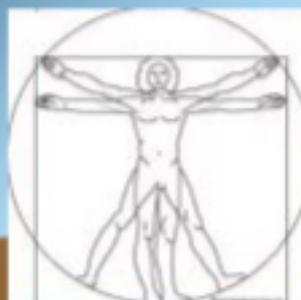
$$\Phi_\nu \sim 1 \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

$$E_\nu \sim 0.1 - 100 \text{ GeV}$$



Corpo umano

$$\Phi_\nu = 340 \times 10^6 \nu / \text{day}$$



Reattori Nucleari

$$E_\nu \sim \text{few MeV}$$



Radioattività della Terra

$$\Phi_\nu \sim 6 \times 10^6 \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

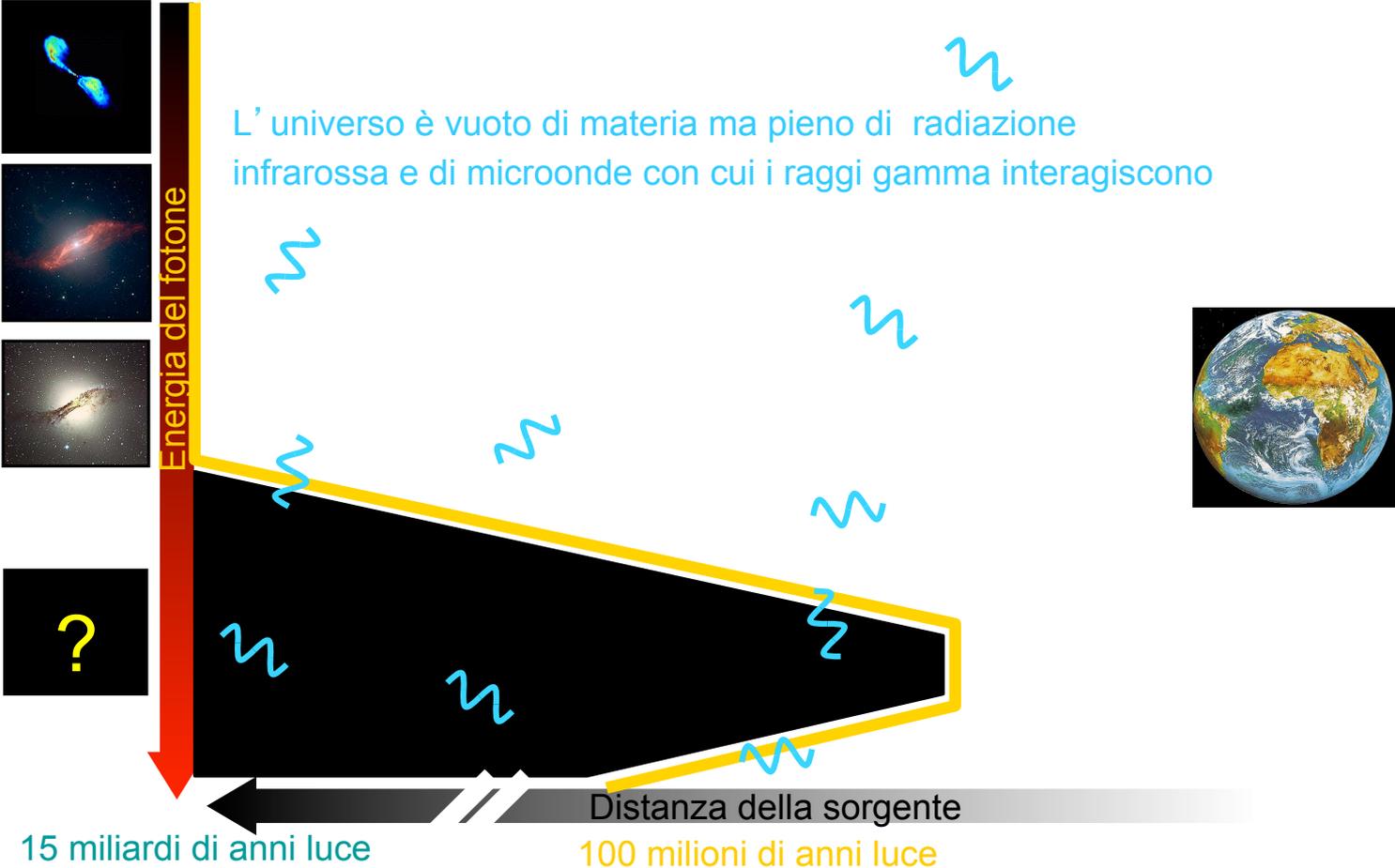
Acceleratori

$$E_\nu \sim 0.3 - 30 \text{ GeV}$$



La radiazione gamma

L'Universo che possiamo osservare dalla Terra

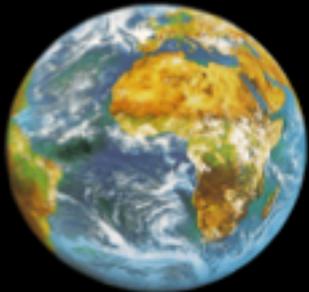


L'astronomia con gamma, ν e protoni

26

direzione apparente del protone

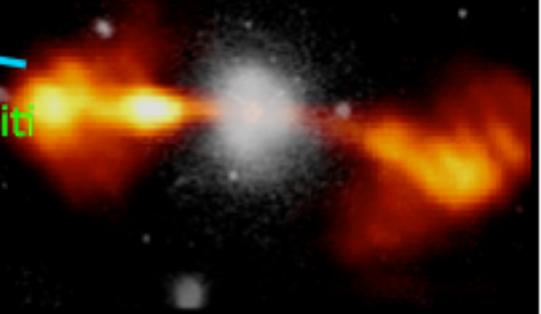
I protoni possono raggiungere la Terra ma sono deflessi dai campi magnetici galattici e intergalattici



**“acceleratore”
cosmico**

I raggi gamma di alta energia vengono assorbiti dal fondo di microonde

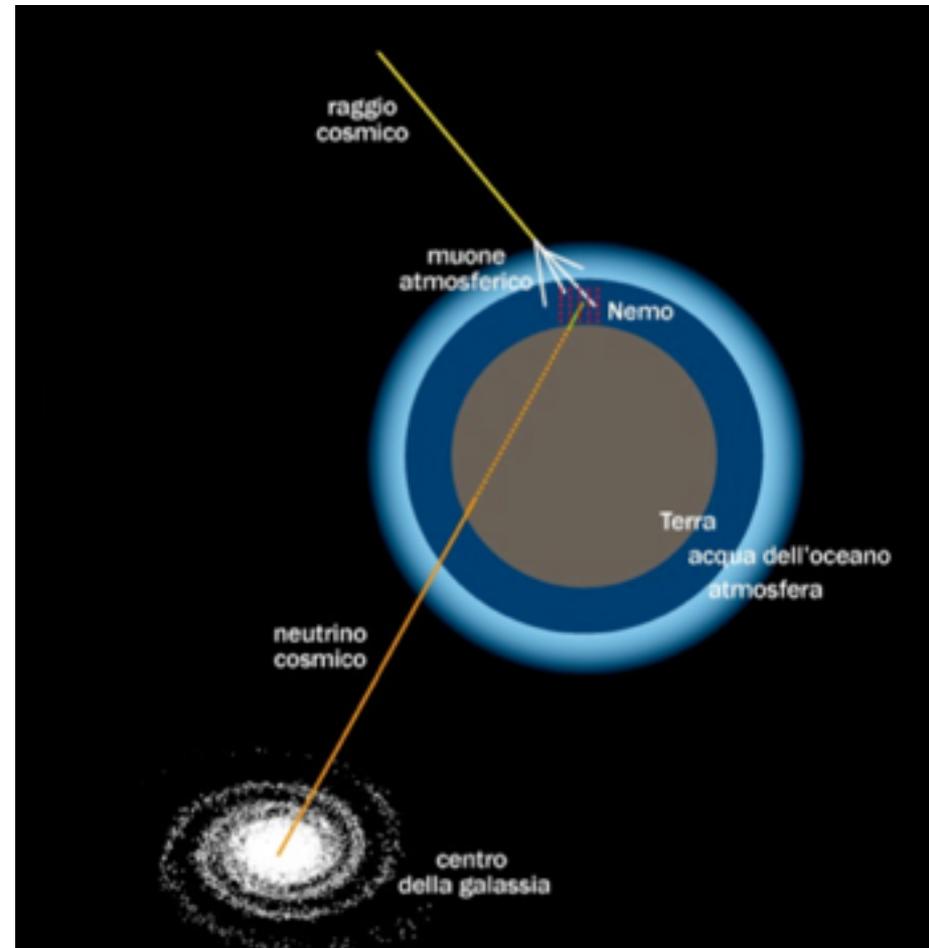
I neutrini raggiungono la Terra viaggiando in linea retta e permettono di osservare direttamente la sorgente



Principio di rivelazione di neutrini

27

- A grandi profondità marine o sotto il ghiaccio per
 - schermarsi dal fondo di muoni atmosferici
 - acqua/ghiaccio come sorgente di fotoni
- grandi volumi
 - per rivelare deboli flussi
 - di particelle che interagiscono pochissimo



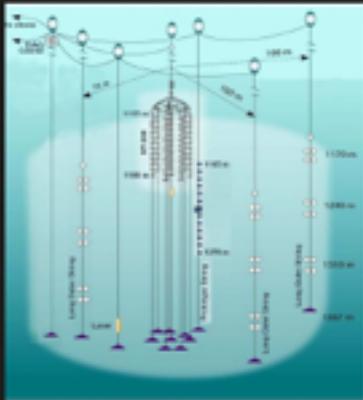
I telescopi di neutrini funzionanti

28

<http://www.inr.troitsk.ru/eng/ebgnt.html> <http://antares.in2p3.fr>

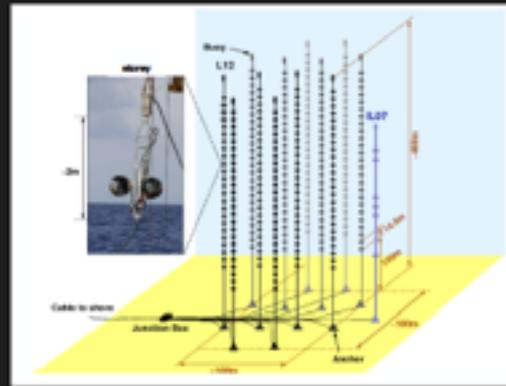
<https://icecube.wisc.edu>

NT-200+



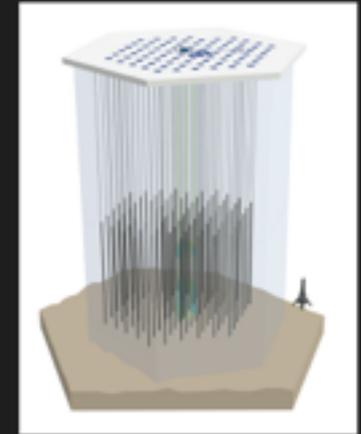
Lago Baikal
0.002 km³

Antares



Mar Mediterraneo
0.01 km³

IceCube



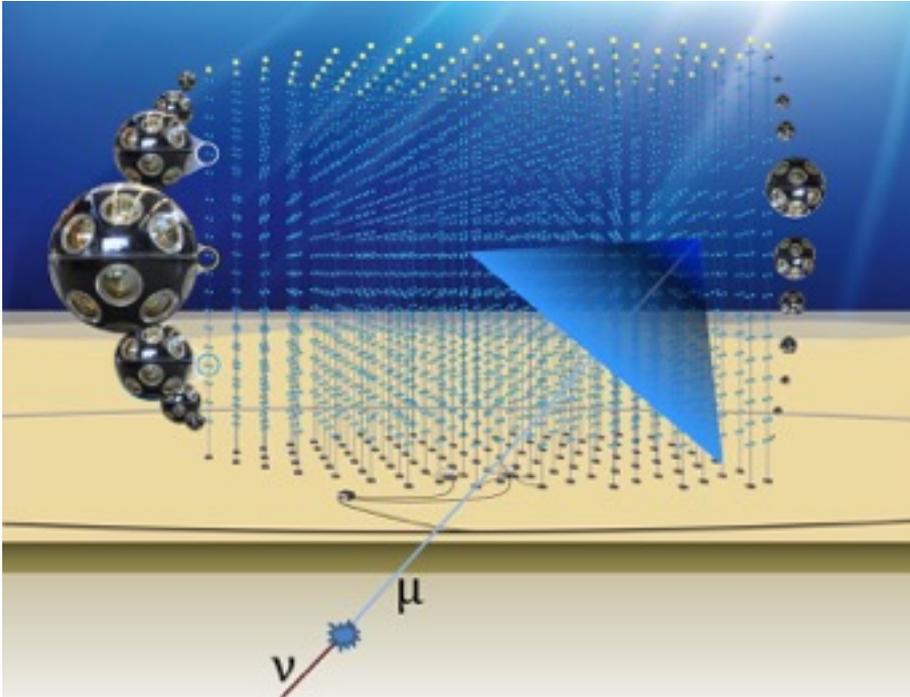
Polo Sud
1 km³

Rivelatori più grandi e meno densamente equipaggiati misurano energie più alte

I telescopi di neutrini del prossimo futuro

29

<http://www.km3net.org/home.php>



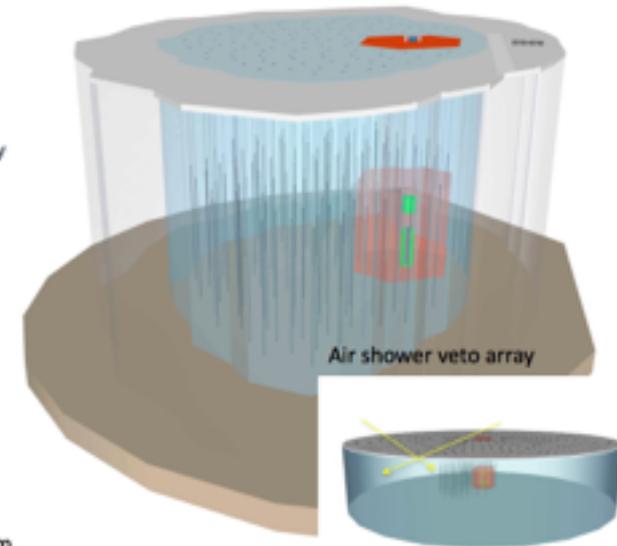
KM3NeT nel Mar Mediterraneo
1 km³

IceCube-Gen2

The next Generation IceCube: A wide band neutrino observatory (MeV – EeV) using several detection technologies – optical, radio, and surface veto.

Multi-component observatory:

- IceCube-Gen2 High-Energy Array
- Surface air shower detector(s)
- Sub-surface radio detector
- Low energy core (~PINGU like)



IceCube-Gen2 al Polo Sud
~8 km³

Rivelatori più grandi e/o con risoluzione angolare maggiore

Le sorgenti extraterrestri di neutrini

30

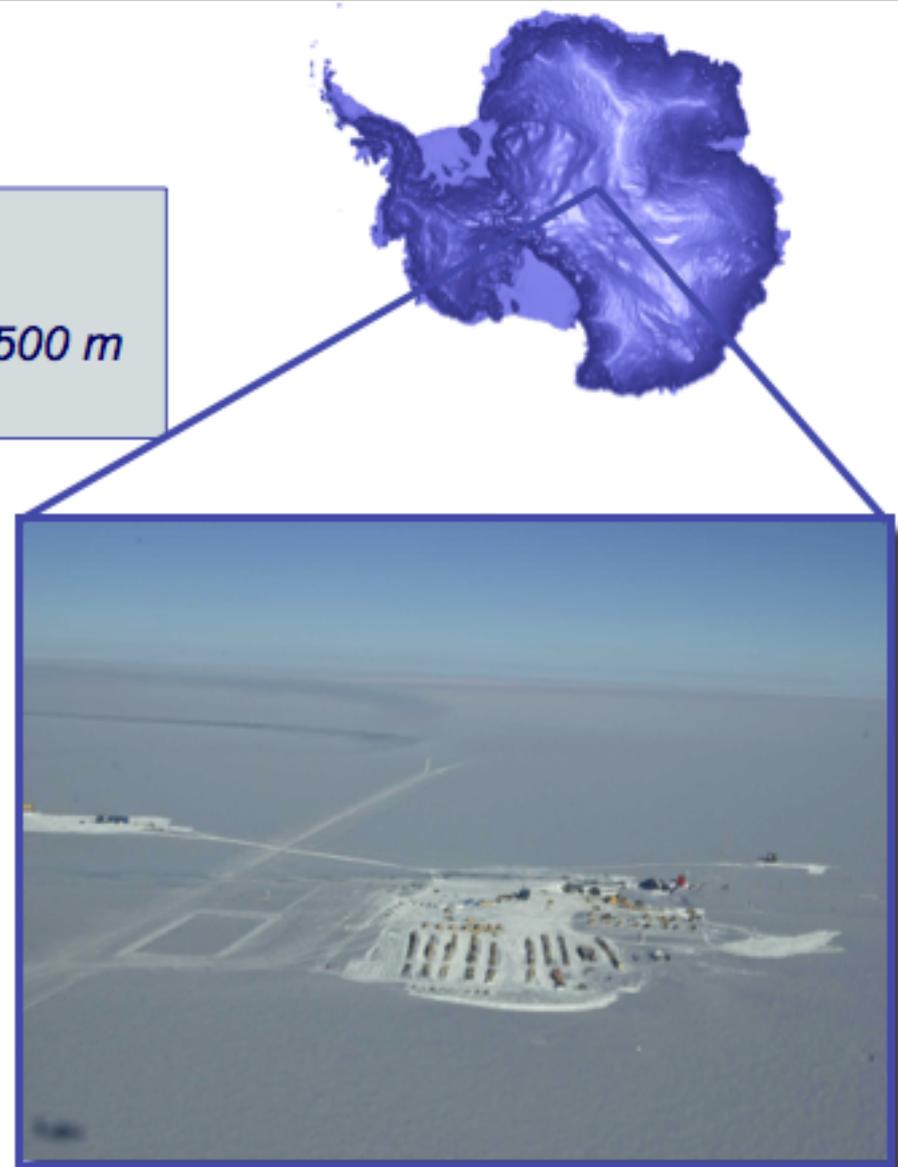
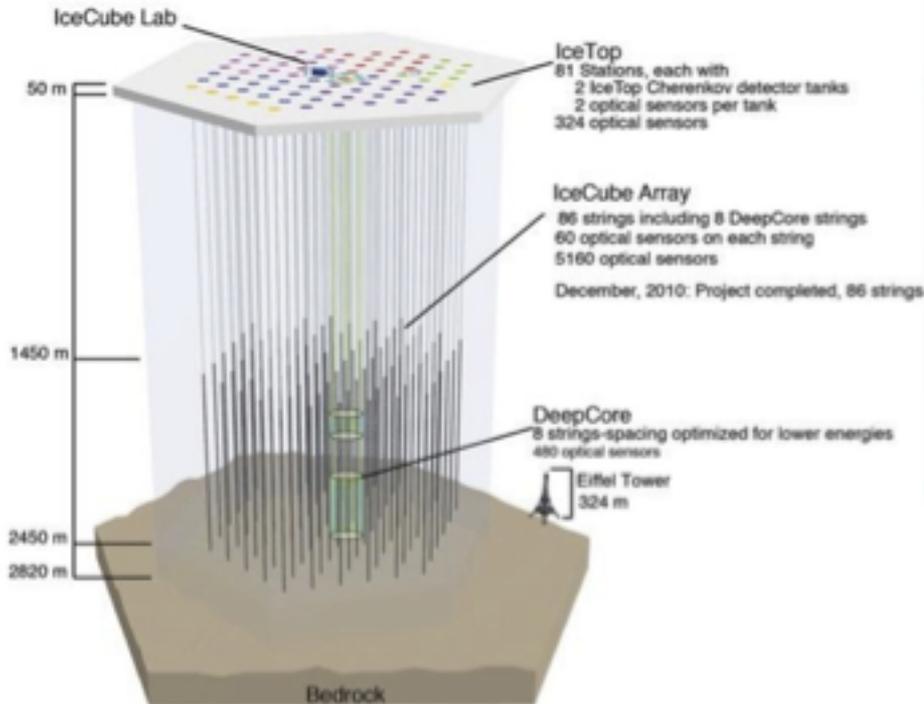
Oggi le sole sorgenti cosmiche di neutrini conosciute sono:

- il Sole 👉 fine anni '60
- la Supernova 1987A 👉 1987
- Il Nucleo di galassia attivo (AGN) TXS0506+056 👉
2018

Icecube



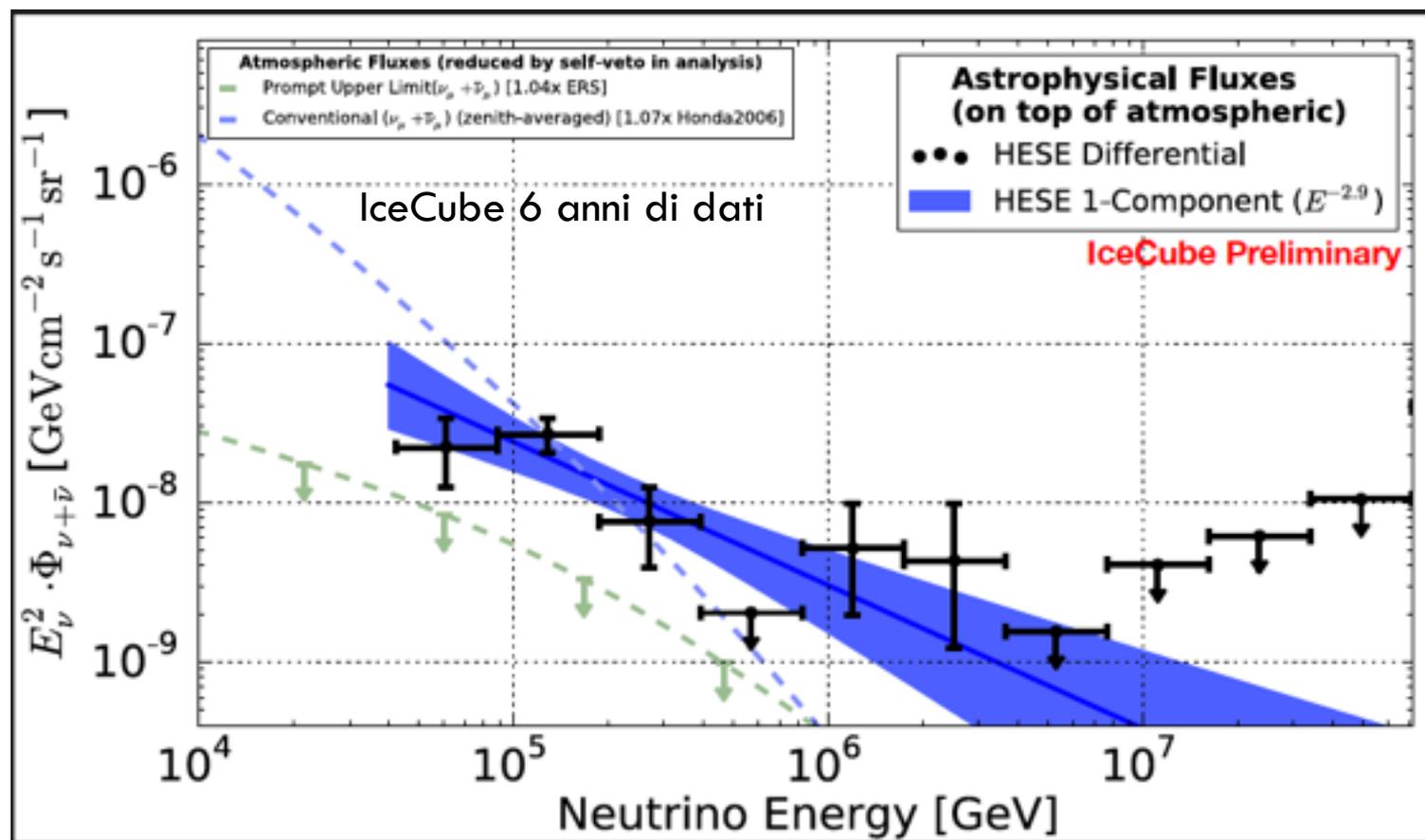
*ICECUBE è installato nel Polo Sud:
86 stringhe e circa 5000 sensori di luce.
Le stringhe sono alte circa 1 km e poste a 2500 m
di profondità.*



Flusso diffuso di neutrini

32

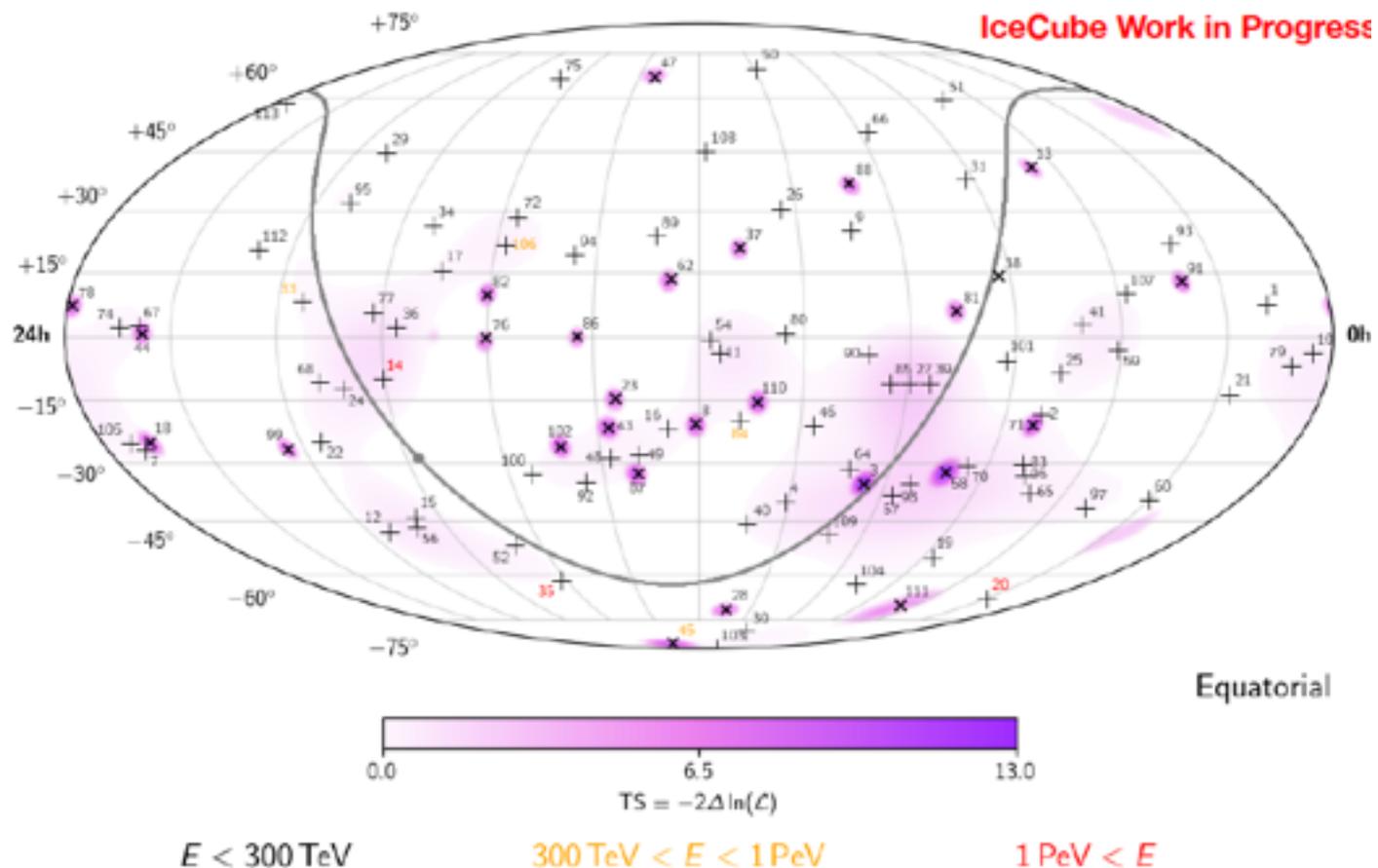
Prima evidenza di un flusso diffuso di neutrini di alta energia di origine astrofisica nel 2013
(IceCube Collaboration, Science 342, 1242856 (2013).)



Sky map

33

IceCube 7.5 anni di dati - nessun eccesso significativo è stato trovato



Sistema di “alert”

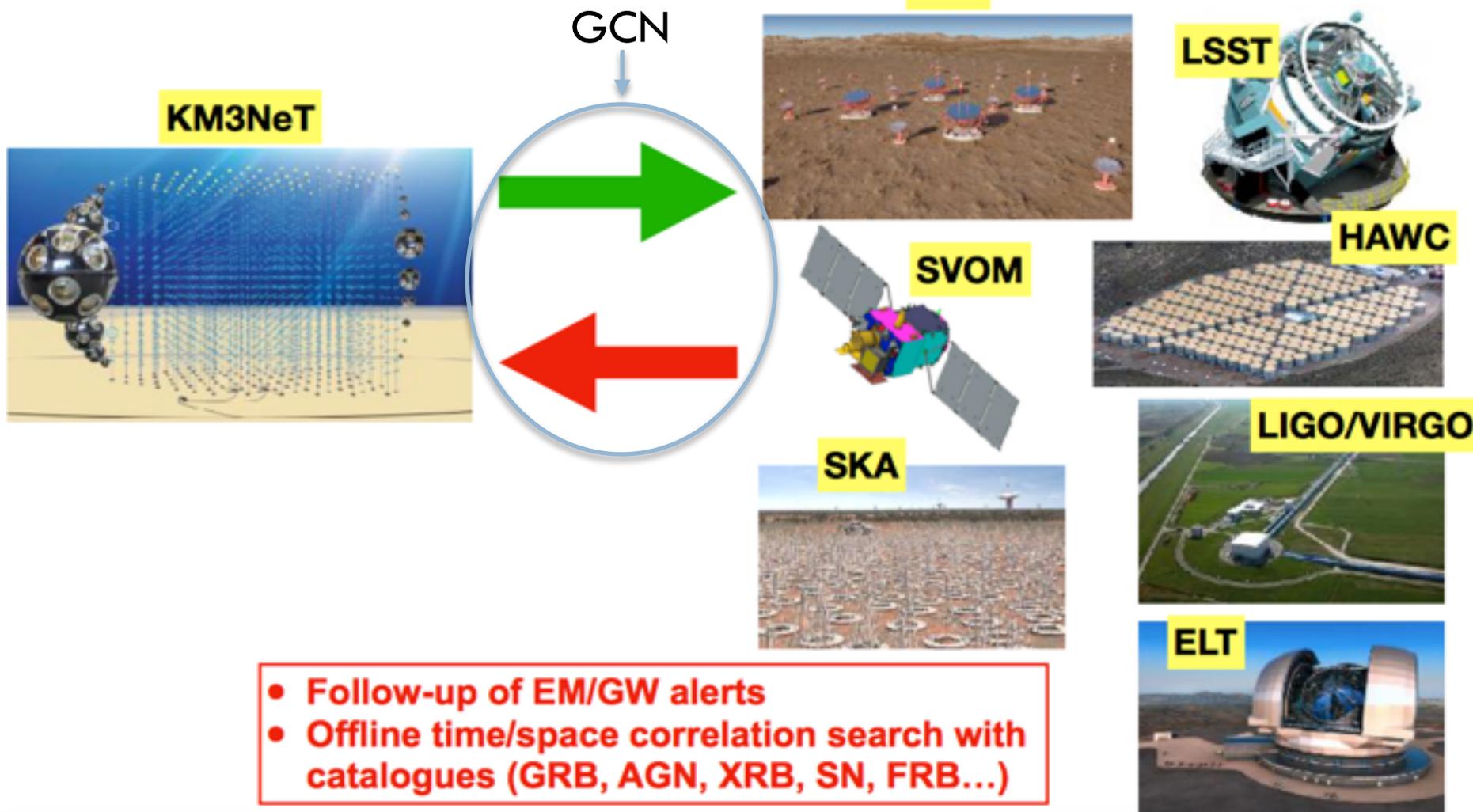
34

L'emissione di eventi di altissima energia può variare con il tempo con scale che vanno dai millisecondi ai mesi. Generalmente sono associati con l'emissione da jet compatti di AGN (nuclei galattici attivi), GRB (Gamma Ray Burst), microquasar, supernovae....

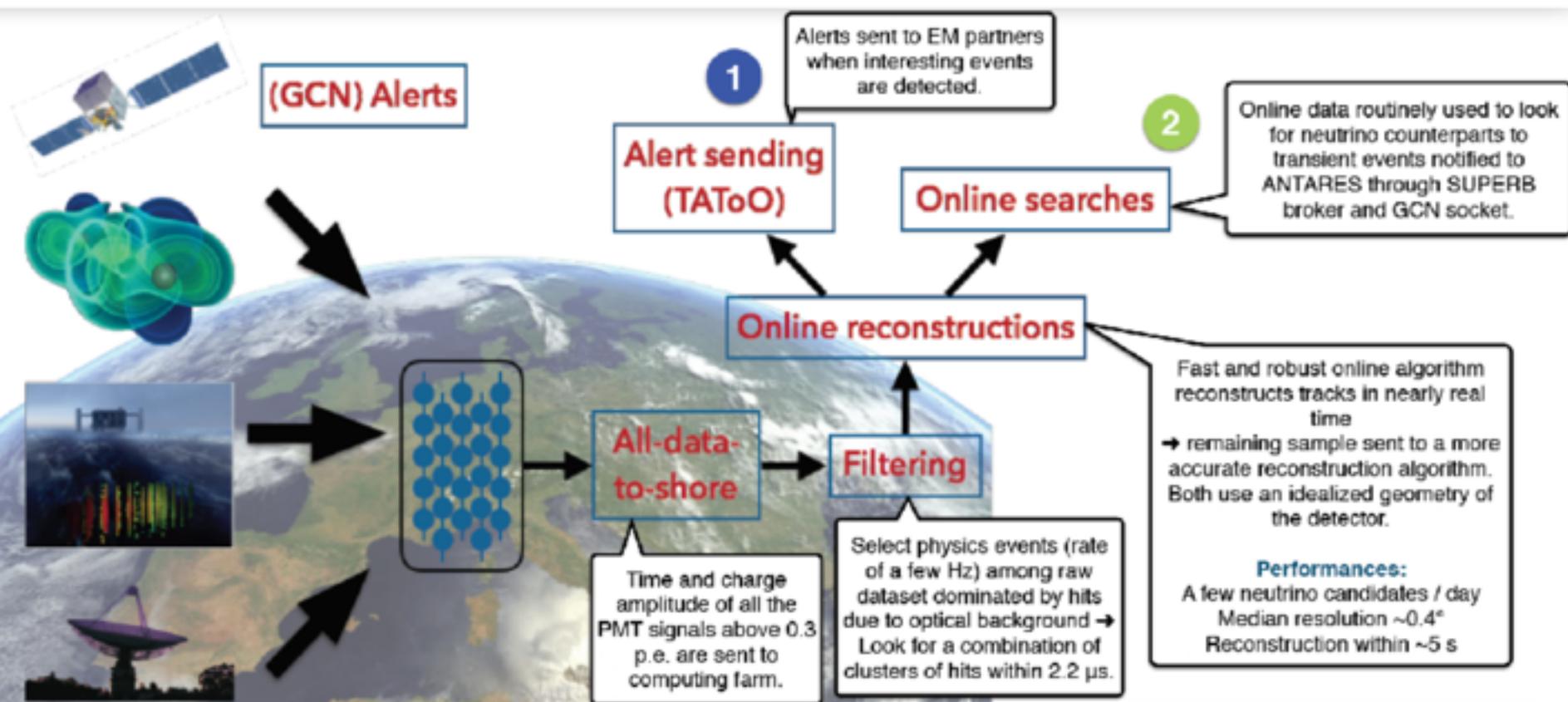
Importante è allora l'osservazione contemporanea da parte di differenti osservatori. Per i rivelatori di neutrini restringendo la finestra temporale di osservazione si riduce di molto il fondo dovuto ai neutrini atmosferici

KM3NeT multi-messenger program

- Follow-up of neutrino alerts
- Joint sub-threshold analysis



ANTARES online system

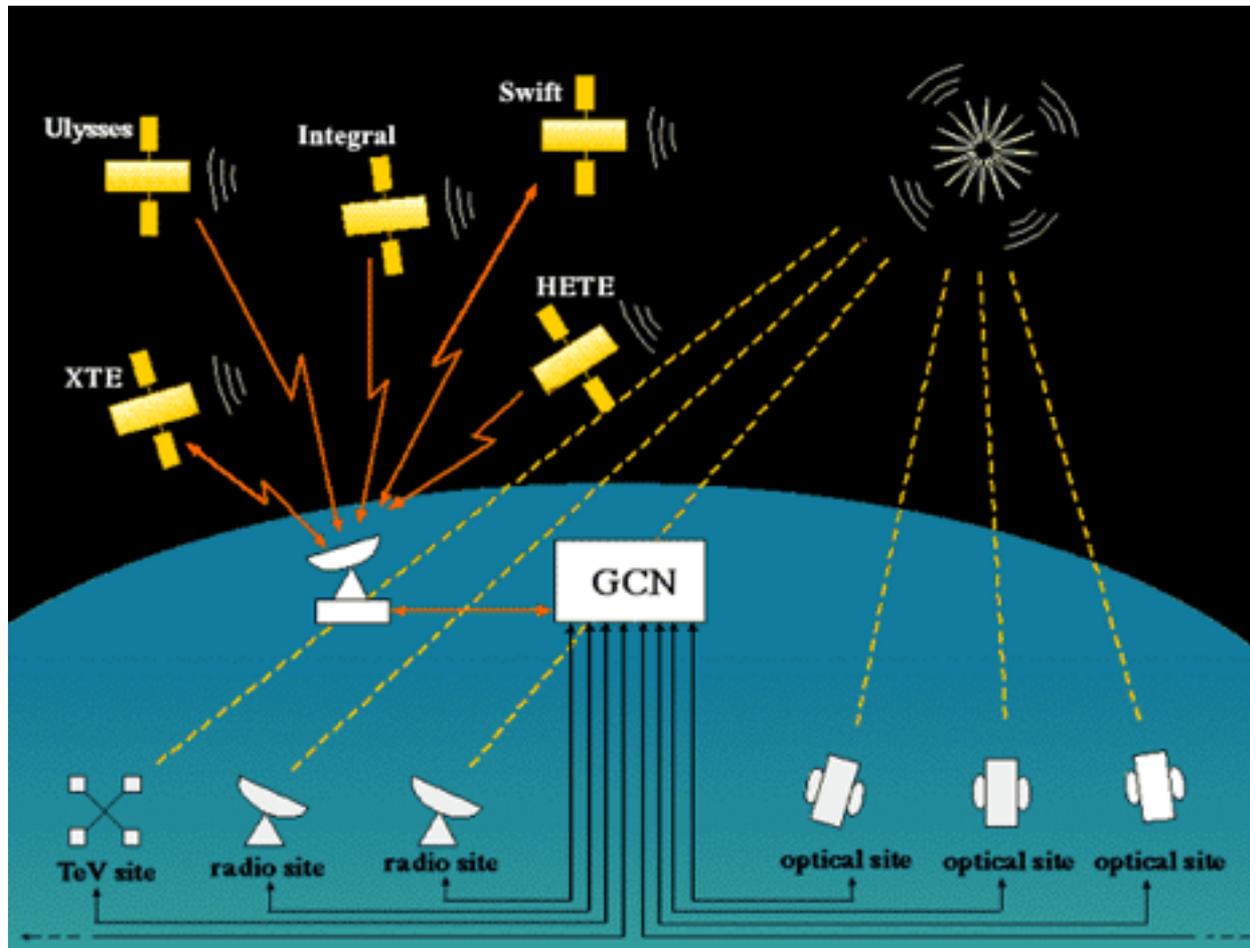


Cosa è GCN

GCN: The Gamma-ray Coordinates Network (TAN: Transient Astronomy Network)

37

<https://gcn.gsfc.nasa.gov>



GCN distribuisce in tempo reale:

- posizione di GRB ed altre sorgenti transienti
- Follow-up delle osservazioni

IceCube alert

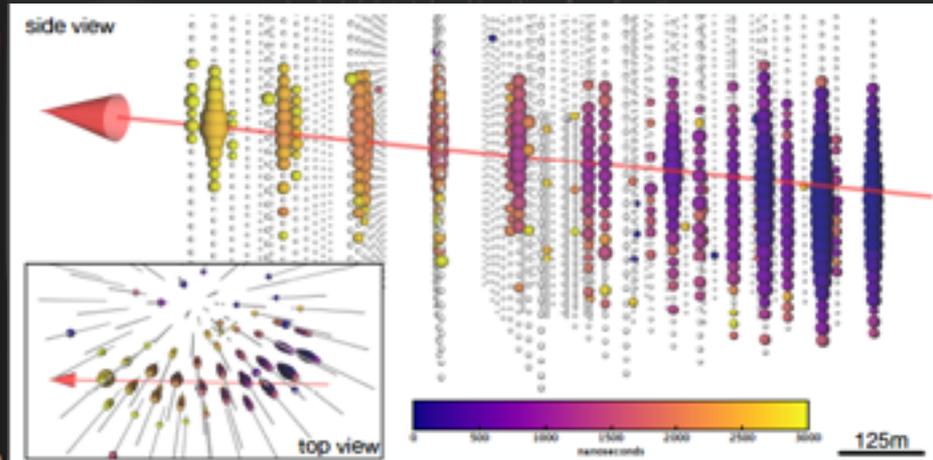
38

IceCube ha inviato il 22 settembre 2017 un “alert” di un evento di altissima energia ricostruito a declinazione $+5.6^\circ$ di circa 120 TeV

```
TITLE: GCN/AMON NOTICE
NOTICE_DATE: Fri 22 Sep 17 20:55:13 UT
NOTICE_TYPE: AMON ICECUBE EHE
RUN_NUM: 130033
EVENT_NUM: 50579430
SRC_RA: 77.2853d {+05h 09m 08s} (J2000),
77.5221d {+05h 10m 05s} (current),
76.6176d {+05h 06m 28s} (1950)
SRC_DEC: +5.7517d {+05d 45' 06"} (J2000),
+5.7732d {+05d 46' 24"} (current),
+5.6888d {+05d 41' 20"} (1950)
SRC_ERROR: 14.99 [arcmin radius, stat+sys, 50% containment]
DISCOVERY_DATE: 18018 TJD; 265 DOY; 17/09/22 (yy/mm/dd)
DISCOVERY_TIME: 75270 SOD {20:54:30.43} UT
REVISION: 0
N_EVENTS: 1 [number of neutrinos]
STREAM: 2
DELTA_T: 0.0000 [sec]
SIGMA_T: 0.0000e+00 [dn]
ENERGY : 1.1998e+02 [TeV]
SIGNALNESS: 5.6507e-01 [dn]
CHARGE: 5784.9552 [pe]
SUN_POSTN: 180.03d {+12h 00m 08s} -0.01d {-00d 00' 53"}
SUN_DIST: 102.45 [deg] Sun_angle= 6.8 [hr] (West of Sun)
MOON_POSTN: 211.24d {+14h 04m 58s} -7.56d {-07d 33' 33"}
```

Example: **IC170922A** sent on Sep 22

We automatically send **rough reconstructions first** and then **update them.**



“Follow-up” dell’evento di IceCube

39

L’evento di neutrino è stato osservato in direzione di una blazar (AGN) TXS0506+056.

Un’aumento dell’attività in quella direzione è stata vista contemporaneamente con:

- gamma di alta energia
- Raggi X
- Ottico
- Radio

Fermi-LAT detection of increased gamma-ray activity of TXS 0506+056, located inside the IceCube-170922A error region.
ATel #10791; *Yasuyuki T. Tanaka (Hirosaki University), Vera Bucina (NASA/GSFC), Daniel Kocevski (NASA/M...*
on 04 Oct 2017; 17:17 UT

Further Swift-XRT observations of IceCube 170922A
ATel #10792; *P. A. Evans (U. Leicester), A. Kelvan (PSU), J. A. Kennea (PSU), D. B. Fox (U. Leicester), C. F. Turley (PSU), M. Osborne (U. Leicester), and F. E. Marshall (U. Leicester)*
on 04 Oct 2017; 17:17 UT

ASAS-SN optical light-curve of blazar TXS 0506+056, located inside the IceCube-170922A error region, shows increased optical activity
ATel #10794; *A. Franckowiak (DESY), T. W.-S. Holoien, B. J. Shappee (OSU), and Diego Portinari (University of Illinois at Chicago)*
on 04 Oct 2017; 17:17 UT

AGILE confirmation of gamma-ray activity from the IceCube-170922A error region
ATel #10801; *F. Lacorini (SSDC/ASI and INAF/OAR), G. Piano (INAF/IAPS), C. Di Stefano (INAF/IAPS), F. Longo (INAF/IAPS), M. Tavani (INAF/IAPS and Univ. of Ferrara), P. Manar-Adrover, G. Minervini, DA-Serra, I. Donnarumma (ASI), V. Di Stefano (INAF/IAPS), M. Cardillo (INAF/IAPS), M. Trifoglio (INAF/IASF-Bo), A. Chiodini (INAF/IASF-Mi), A. Chen (Wuhan University), Y. Evangelista, M. Feroci, F. Soffitta, S. Sabatini, V. Vittorini (ENEA-Frascati), G. Di Cocco, F. Longo (INAF/IASF-Bo), A. Peillatoni, M. Rini, E. Vellazzo (INFN Trieste), F. Orselli, P. Picotta (INFN and Univ. of Ferrara), P. Lipari, D. Zanello (INFN and Univ. of Ferrara), S. Colonna (INFN and Univ. of Ferrara)*
on 04 Oct 2017; 17:17 UT

First-time detection of VHE gamma rays by MAGIC from a direction consistent with the recent EHE neutrino event IceCube-170922A
ATel #10817; *Razmik Mirzoyan for the MAGIC Collaboration*
on 4 Oct 2017; 17:17 UT

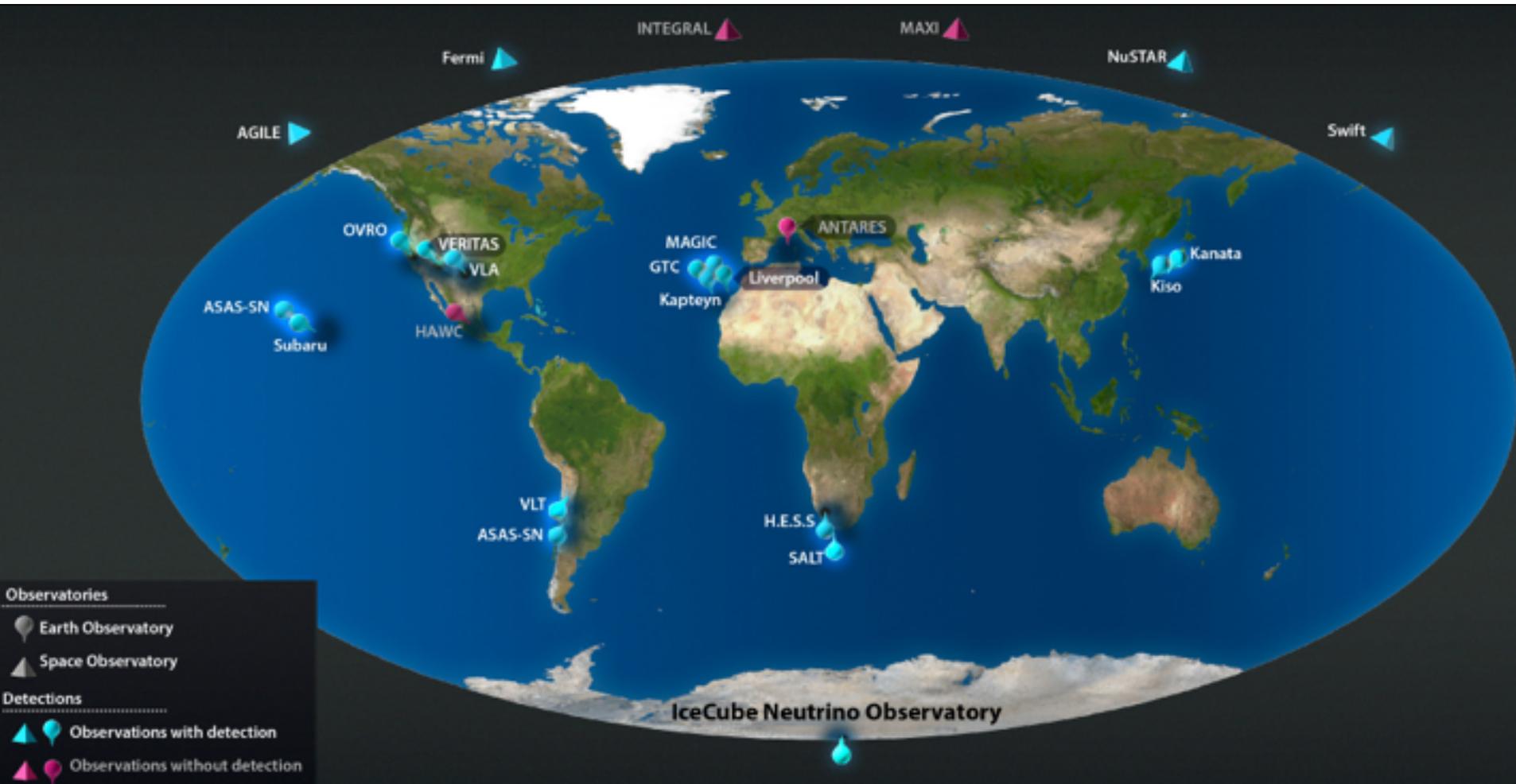
Joint Swift XRT and NuSTAR Observations of TXS 0506+056
ATel #10845; *D. B. Fox (PSU), J. J. Burke (U. Leicester), C. F. Turley (PSU), M. Osborne (U. Leicester), M. ...*
on 12 Oct 2017; 14:08 UT

MAXI/GSC observations of IceCube-170922A and TXS 0506+056
ATel #10838; *H. Negoro (Nihon U.), S. Ueno, H. Tamada, M. Ishikawa, Y. Sugawara, M. Uchiyama, B. Chikara, T. Miki, M. ...*
on 12 Oct 2017; 14:08 UT

VLA Radio Observations of the blazar TXS 0506+056 associated with the IceCube-170922A neutrino event
ATel #10861; *A. J. Tetarenko, G. R. Sivakoff (UAlbertain), A. E. Kimball (NRAO), and J. C.A. Miller-Jones (Curtin-ICRAR)*
on 17 Oct 2017; 14:08 UT

Follow up dell'evento di IceCube

40

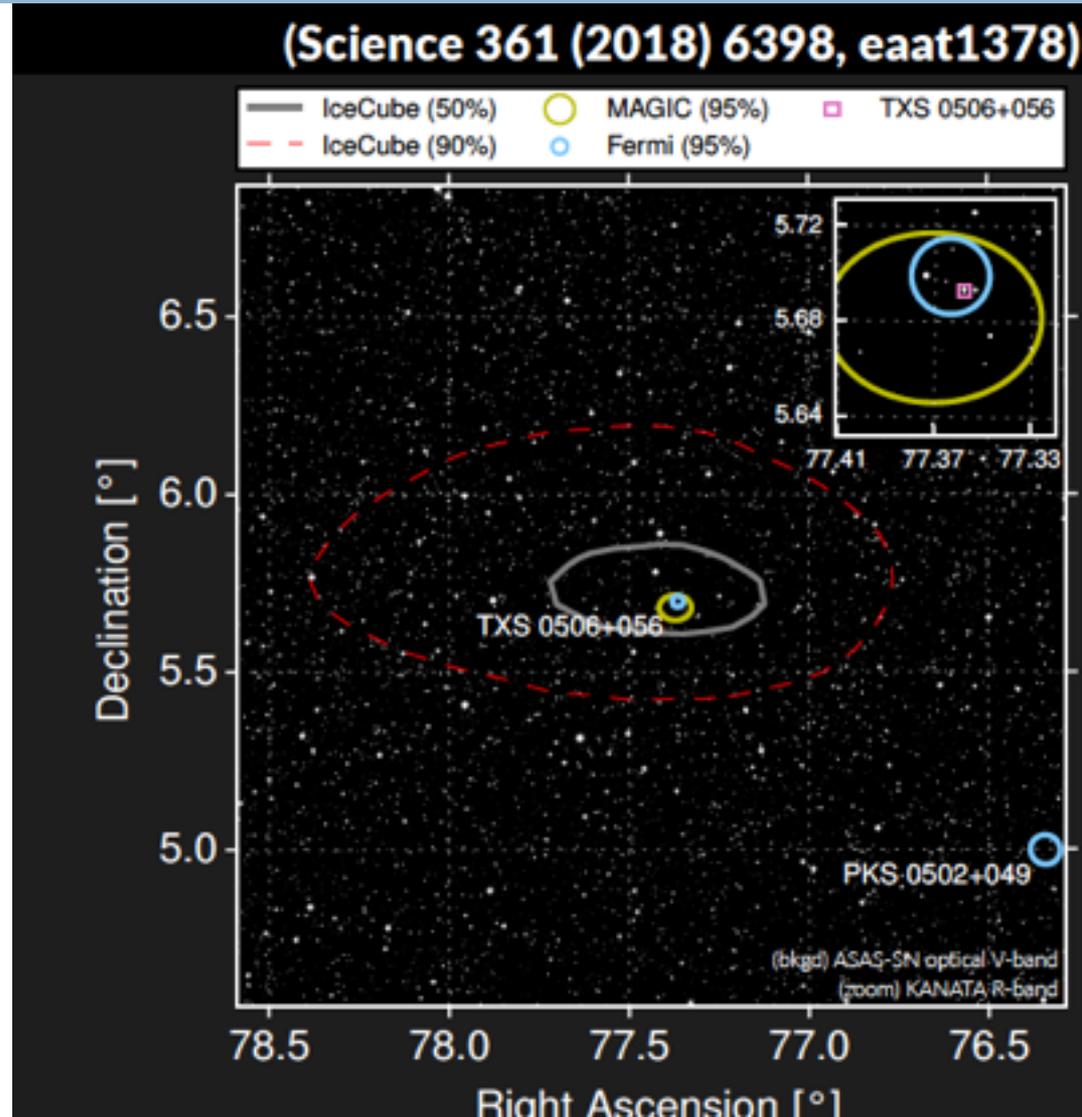


TXS0506+056

41

Spettro in energia proporzionale a $E^{-2.1}$

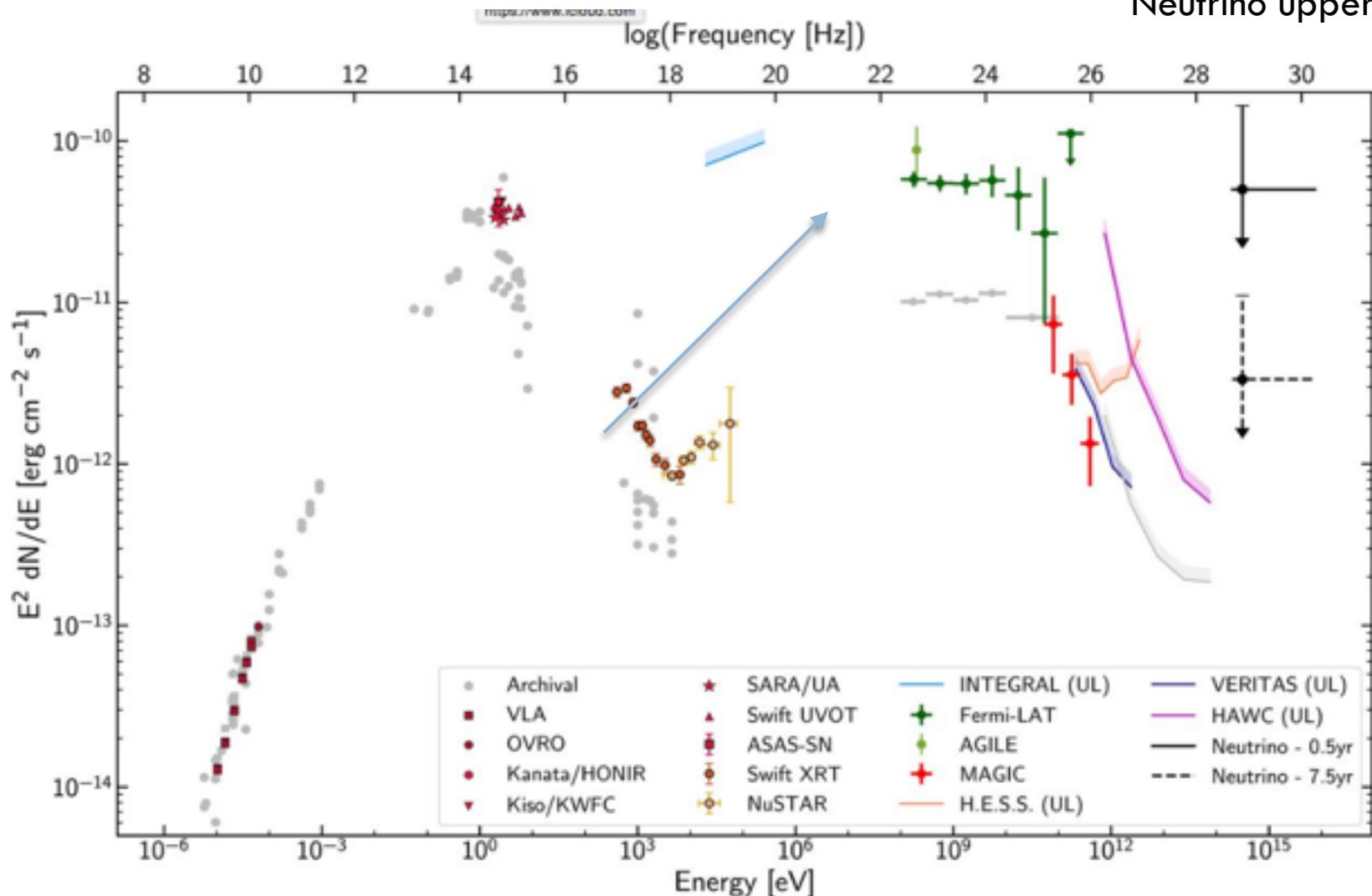
Probabilità di osservazione casuale di coincidenza fra IceCube e Fermi minore di 3σ ($2.7 \cdot 10^{-3}$)



Distribuzione in energia della TXS0506+056

42

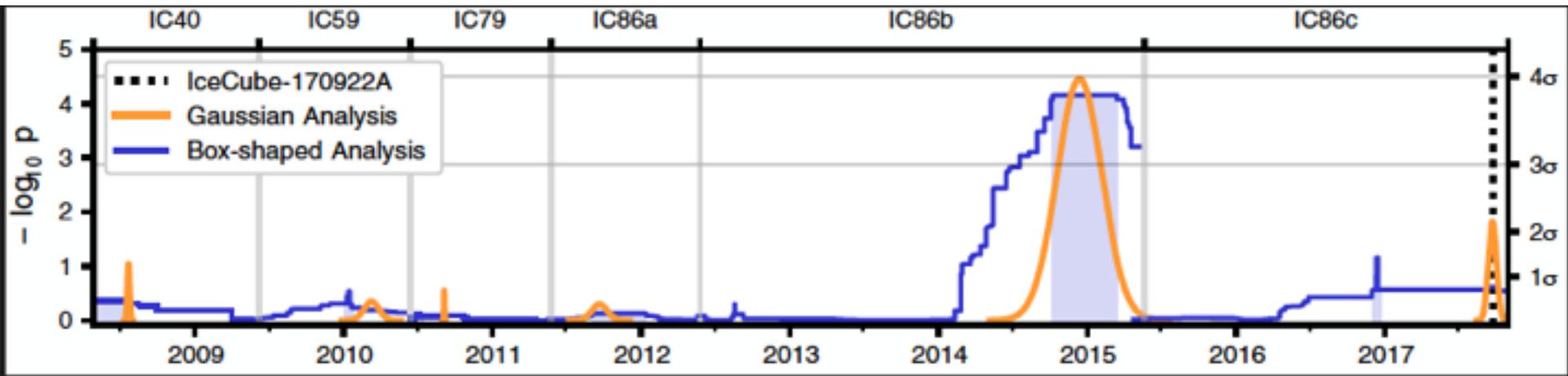
Neutrino upper limits



TXS0506+056

43

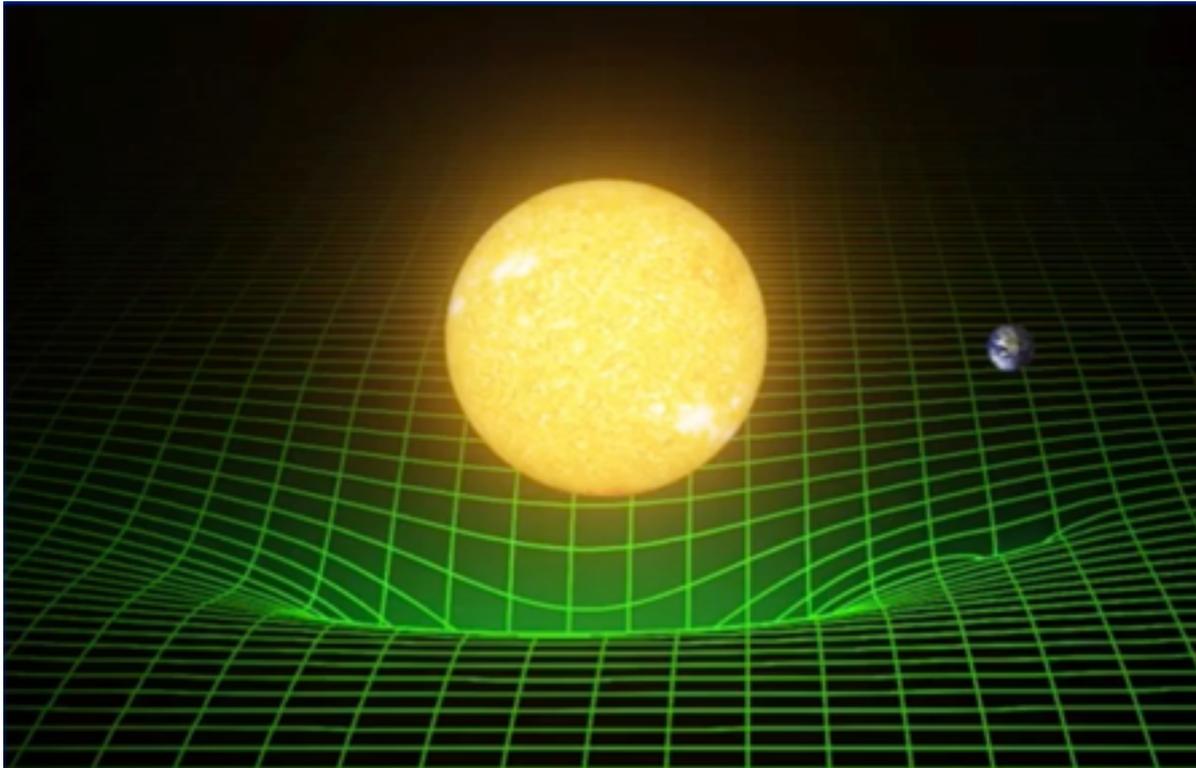
Osservazione da parte di IceCube di un eccesso eventi di neutrini dalla direzione della TXS0506+056 anche nel periodo Settembre 2014 - Marzo 2015



Onde gravitazionali: l'universo che si ascolta

44

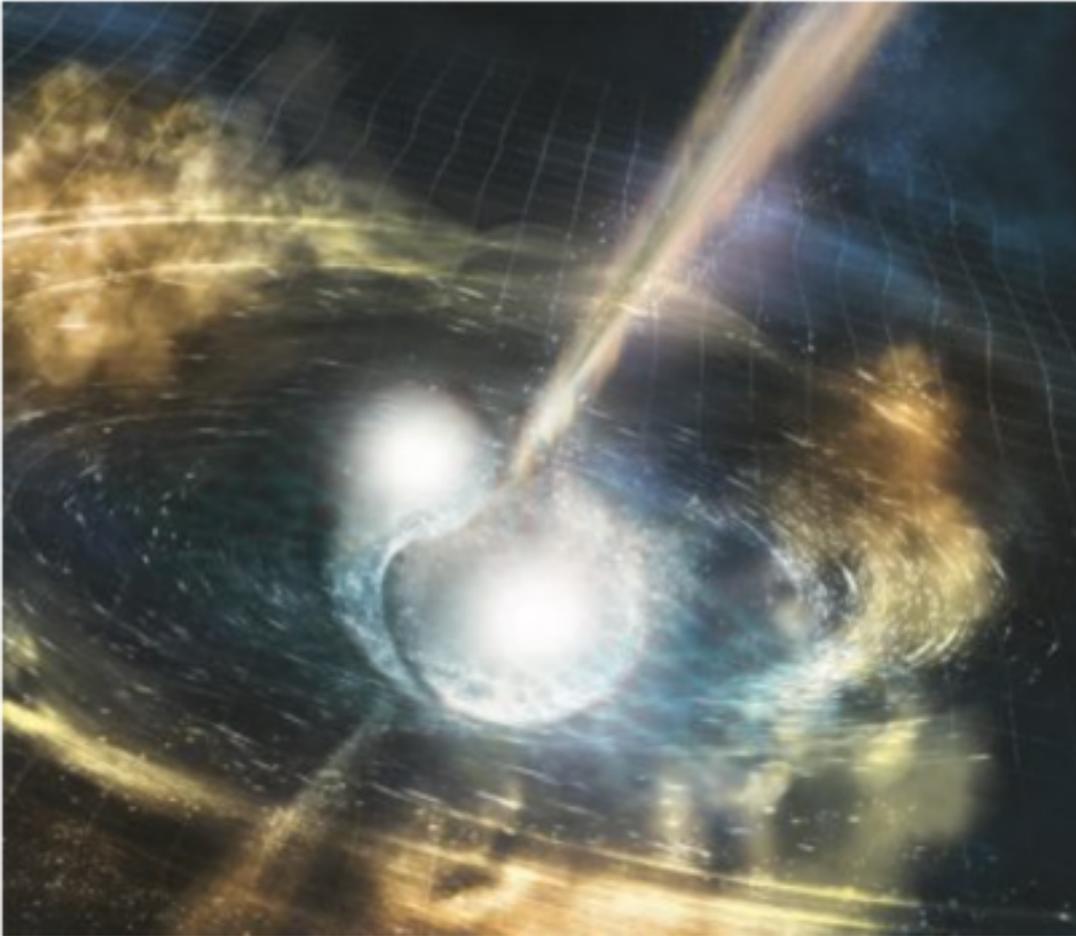
Onde gravitazionali dovute a deformazione dello spazio-tempo osservabile solo in presenza di un oggetto massivo.
Effetto previsto da Einstein nel 1915



Onde gravitazionali: l'universo che si ascolta

45

Così come una carica elettrica in movimento genera un'onda elettromagnetica (antenne) un oggetto massivo in movimento genera un'onda gravitazionale.

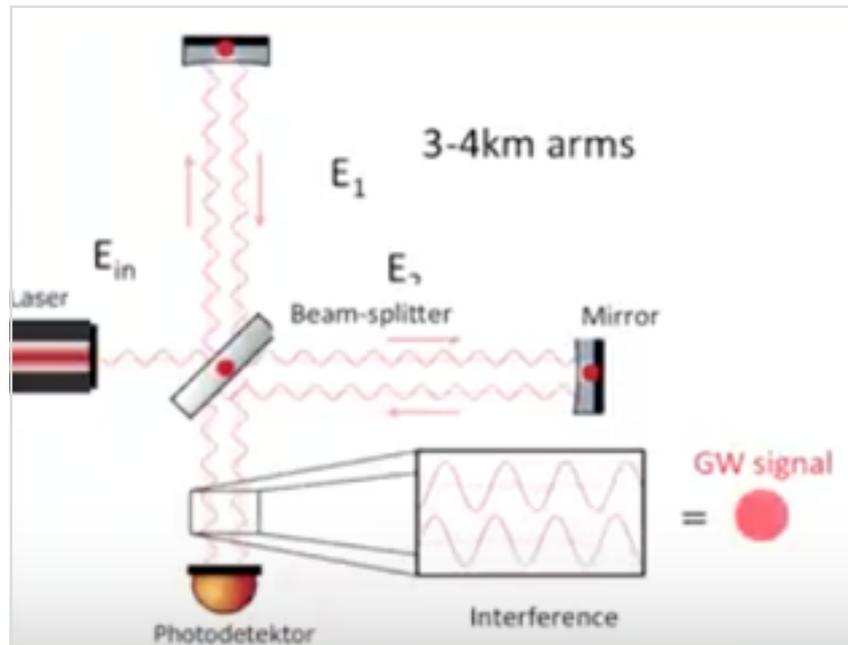


Visualizzazione artistica della fusione di due buchi neri

Onde gravitazionali: cosa si ascolta

46

- Il passaggio di un'onda gravitazionale deforma le distanze fra due oggetti
 - L'onda gravitazionale generata dalla fusione di due buchi neri vicini alla nostra galassia varierà la distanza sole-terra (150 milioni di km) di circa 10^{-10} m (misura di un atomo).
- Strumenti 🖐 Interferometri di Michelson per misurare distanze con estrema precisione



LIGO and VIRGO

47

Stesso principio dell'interferometro di Michelson

Ligo in U.S.A.
Hanford and Livingston



VIRGO
Cascina (Pi) Italy



Bracci di alcuni chilometri 🖐️ variazioni di distanze da misurare dell'ordine di 10^{-18} - 10^{-19} m

<https://www.ligo.caltech.edu>

<http://www.virgo-gw.eu>

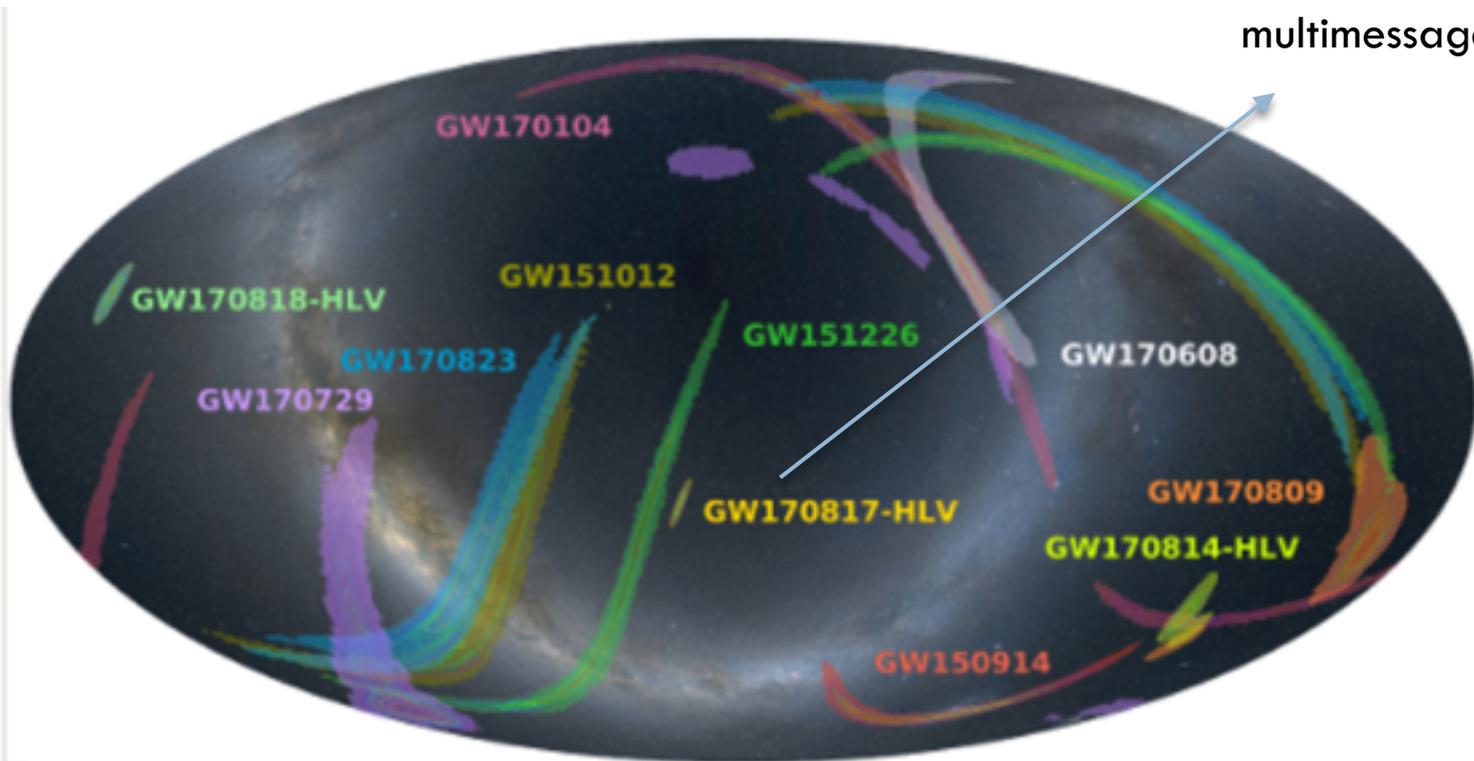
Onde Gravitazionali

48

11 Febbraio 2016 è stata annunciata l'osservazione della prima onda gravitazionale dall'esperimento LIGO.

Il primo evento GW150914 è stato osservato in Settembre 2015. Da allora 10 eventi di GW sono stati osservati da VIRGO + LIGO

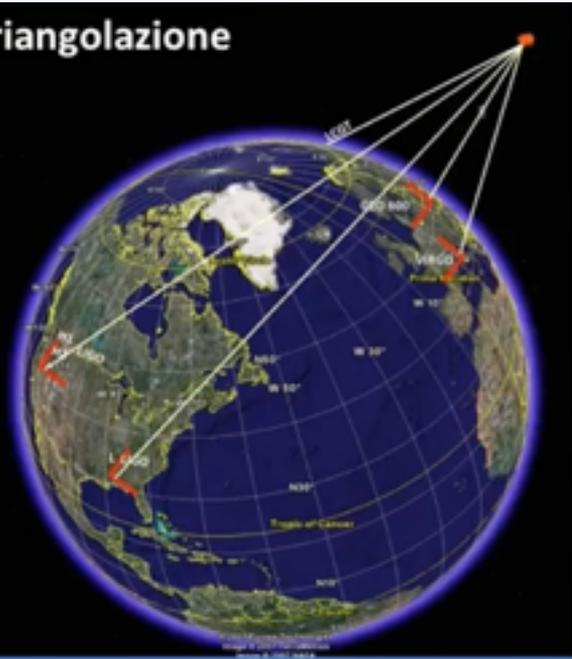
Il primo evento che ha segnato l'esordio dell'astronomia multimessaggera



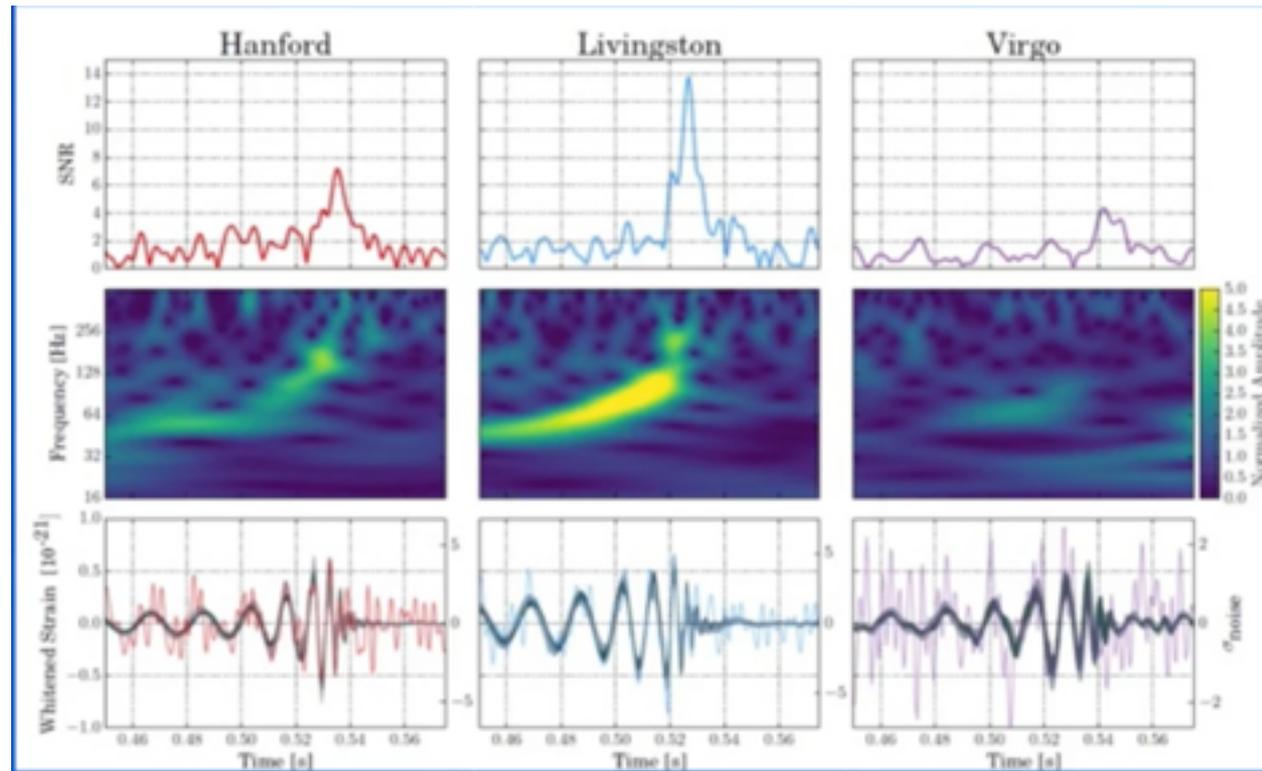
Direzione di provenienza

49

Triangolazione



Con i tre rivelatori si riesce a definire con migliore precisione la regione di provenienza del segnale



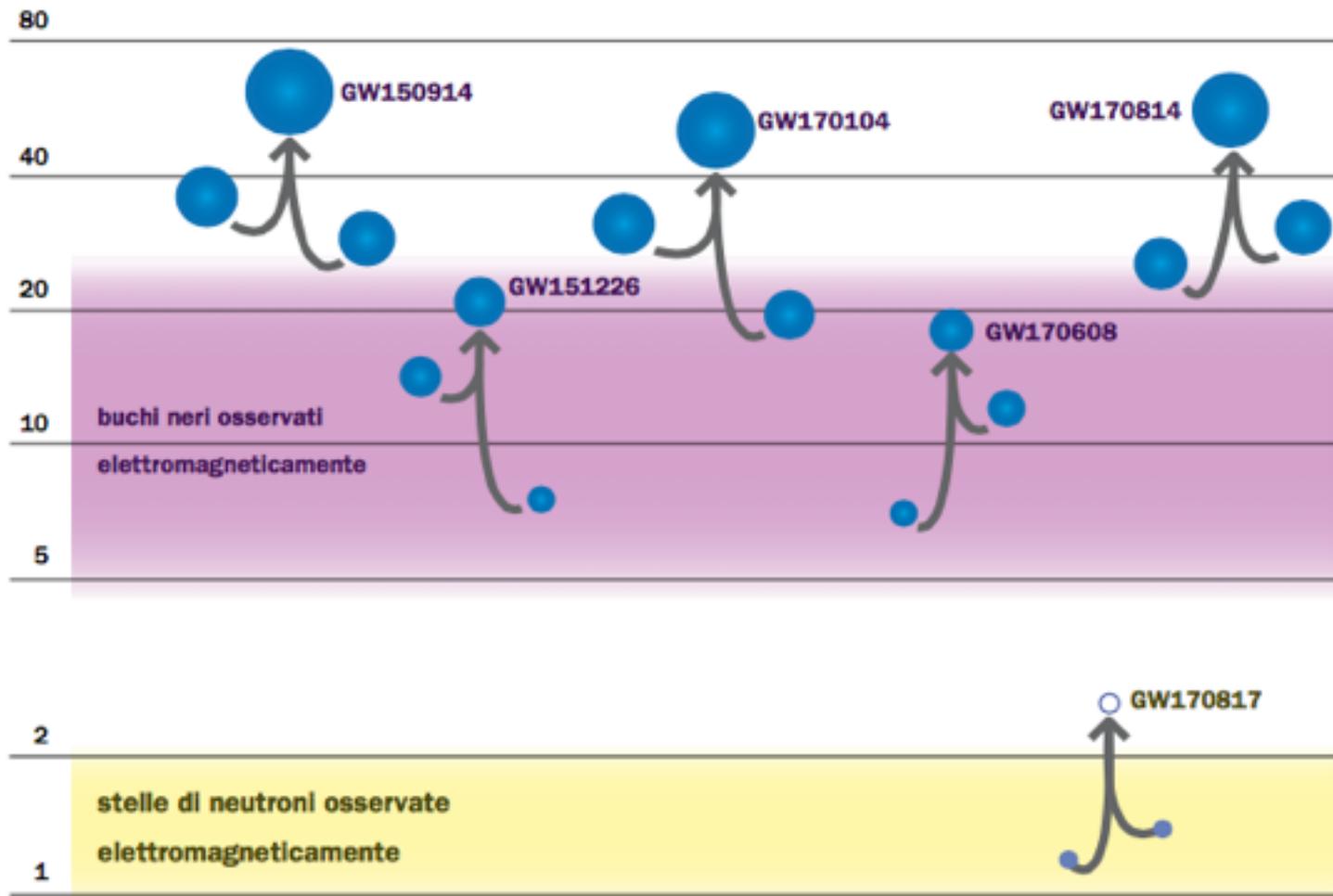
10:30:43 UTC

+8ms

+6ms

Eventi di onde gravitazionali

50



L'evento GW170817

51

- Evento osservato contemporaneamente da VIRGO e LIGO ➡ ottima localizzazione nel cielo
- Regione di provenienza posta nell'emisfero sud vicino la costellazione dell'Idra.
- Dopo 2 sec dalla stessa direzione osservazione da parte di INTEGRAL e FERMI (gamma di alta energia) provenienti da un GRB.
- Dopo ore, giorni e settimana altre osservazioni nell'X, nel radio e nell'ottico

GW170817
Coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni

Rivelazione di un'onda gravitazionale da parte di Ligo e Virgo, con associati eventi elettromagnetici rivelati da oltre 70 osservatori

Map showing the locations of LIGO (Hanford, Livingston) and VIRGO (Cascina).

12:41:04 UCT
Il 17 agosto 2017 viene rivelata un'onda gravitazionale dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni avvenuto a 130 mln di anni luce, in un'area di 28 gradi quadrati nel cielo australe.

+2 secondi
Osservazione di un lampo di raggi gamma.
Un lampo gamma (gamma ray burst) è un'intensa emissione di radiazione gamma prodotto immediatamente dopo la coalescenza.

+10 ore e 52 minuti
Una nuova e brillante sorgente di luce visibile viene osservata sempre nell'emisfero australe, in una galassia nota come NGC 4993 nella costellazione dell'Idra.
Il decadimento di materia ricca di neutroni genera un'emissione elettromagnetica di grande luminosità (detta kilonova) producendo metalli pesanti come oro e platino.

+11 ore e 36 minuti
Osservazione di radiazione infrarossa.

+15 ore
Osservazione di intensa radiazione ultravioletta.

+9 giorni
Osservazione di raggi X.

+16 giorni
Osservazione di onde radio.
Allontanandosi dalla coalescenza, i residui producono un'onda d'urto nel mezzo interstellare, cioè la materia rarefatta tra le stelle. Questo produce emissioni che possono durare per anni.

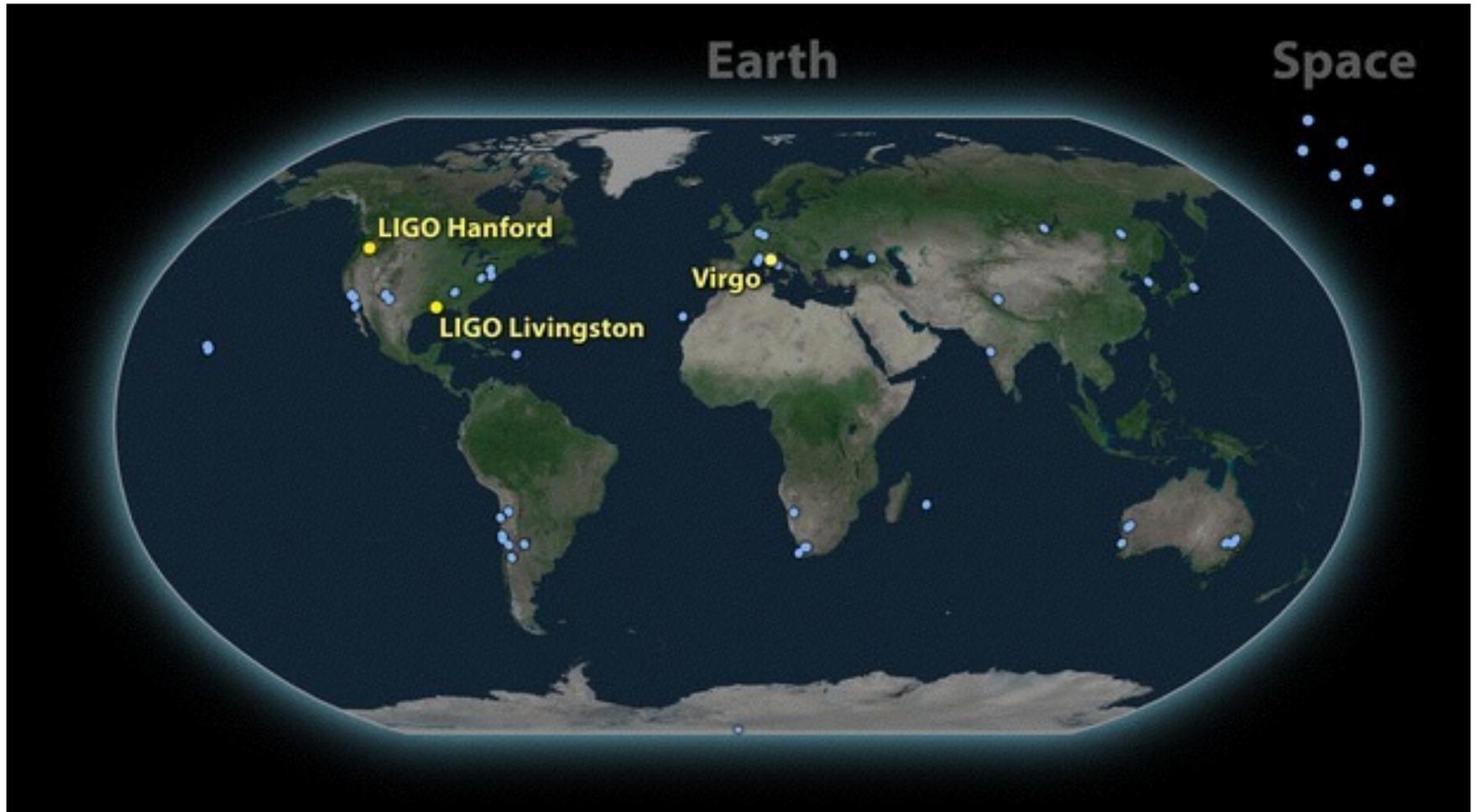
Illustrations: 1. Two blue spheres merging into one. 2. A yellow starburst with red wavy lines. 3. A bright orange starburst. 4. A clock face with text: "Osservare contemporaneamente onde gravitazionali ed elettromagnetiche generate dallo stesso evento è una prova molto convincente che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce." 5. Concentric orange circles.

38 > 38

Mappa delle osservazioni di GW170817

52

oltre 70 osservatori hanno visto il segnale



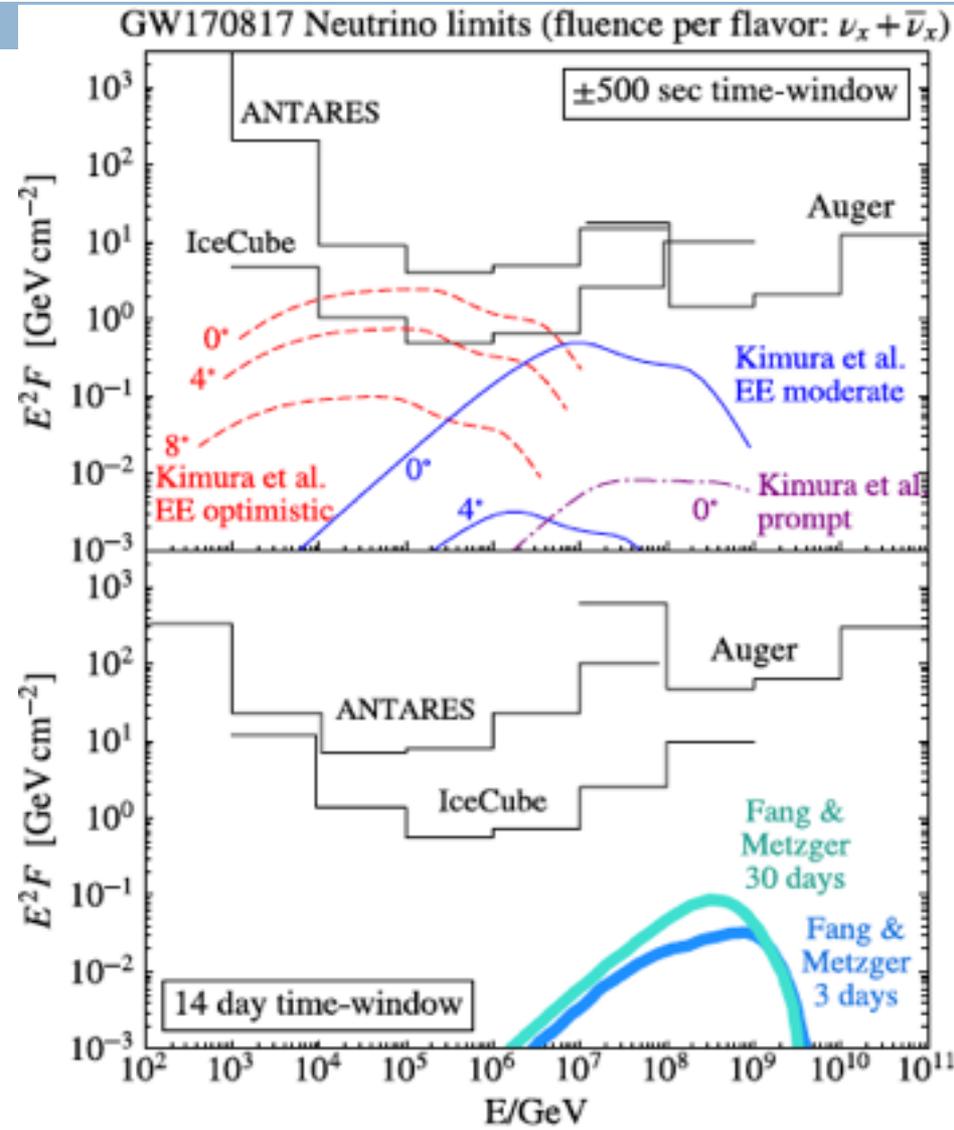
GW e neutrini

53

La sorgente di onde gravitazionali GW170817 è in una galassia lontana 130 milioni di anni luce, conosciuta come NGC 4993. Il segnale proviene dalla fusione di due stelle dei neutroni che hanno dato origine ad una stella super massiva ed alla formazione di jet (GRB)

Non sono stati visti neutrini in coincidenza con l'evento di GW 170817 sia da parte di IceCube che di ANTARES. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aa91c9>

upper limits



Onde gravitazionali

54

- seminario divulgativo di Michele Punturo: "Le onde gravitazionali, una nuova finestra sull'Universo" <https://www.youtube.com/watch?v=wFYFaYjqOcM>
- articoli divulgativi <https://www.asimmetrie.it/travolti-dalle-onde> e <https://www.asimmetrie.it/con-gli-occhi-puntati>

L'astronomia multimessaggera

55

Una nuova era è nata

**Il vero viaggio di scoperta non
consiste nel cercare nuove terre,
ma nell'aver nuovi occhi**

M. Proust