



# Cosmologia con le onde gravitazionali

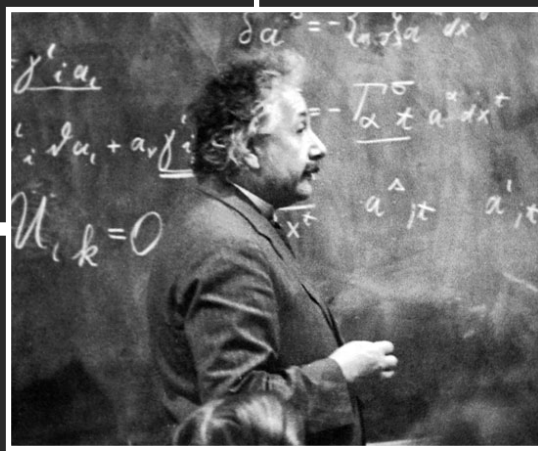
*Maria Lisa Brozzetti*

Università degli Studi di Perugia

$$\square h_{\mu\nu} = 0$$

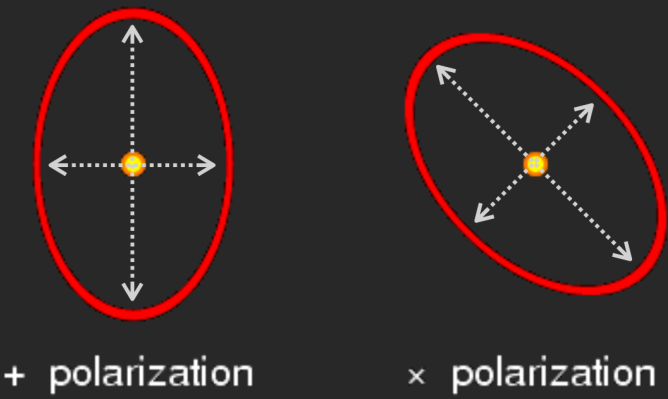
Einstein  
presenta la  
Relatività  
Generale [1]

**1915**



**1916**

Schwarzschild  
pubblica le prime  
soluzioni che  
descrivono un  
buco nero

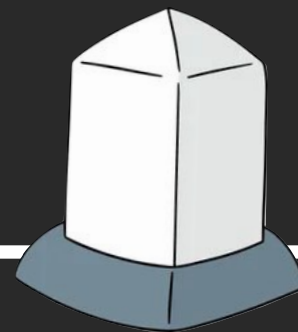


+ polarization

x polarization

**1957**

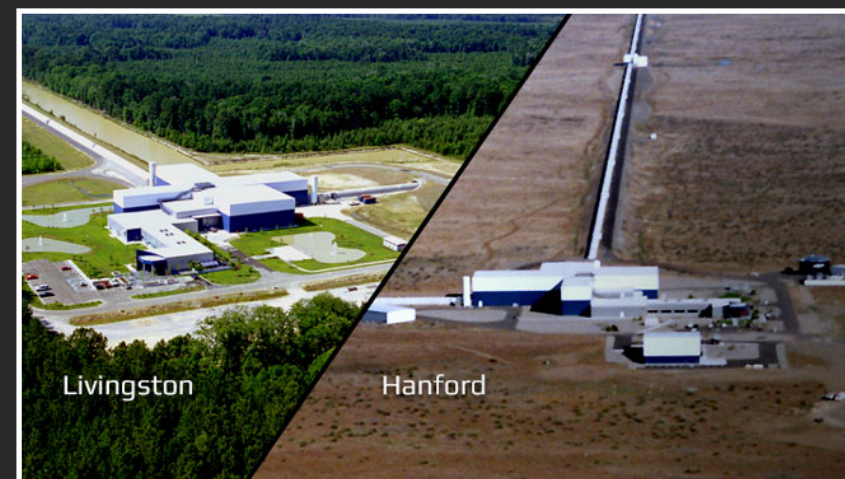
Conferenza di  
Chapel Hill [2-3]



Prima  
pietra di  
LIGO  
**1972**

**1963**

Kerr enuncia la  
soluzione per  
buchi neri  
rotanti



Livingston

Hanford

**1974**

Prima  
osservazione  
indiretta [4]



PSR1913+16

**1994**

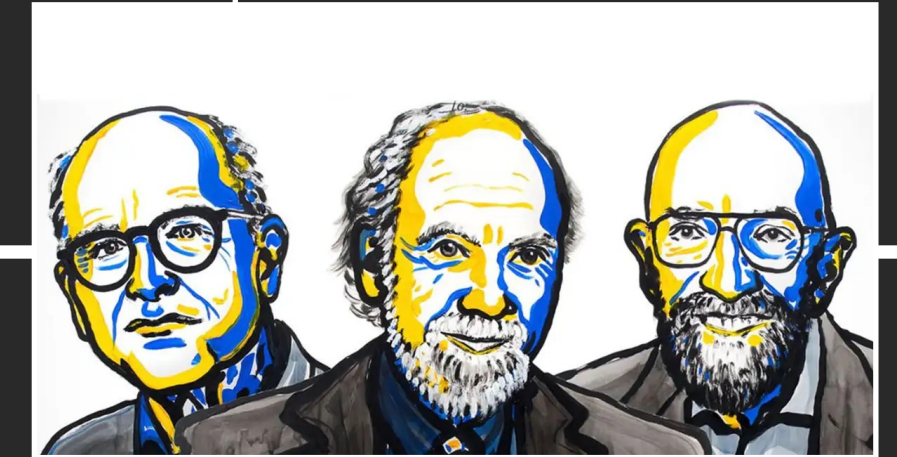
Virgo  
finanziato dal  
CNRS e  
dall'INFN



GW150914

**2015**

Prima  
osservazione  
di Onde  
Gravitazionali [5]



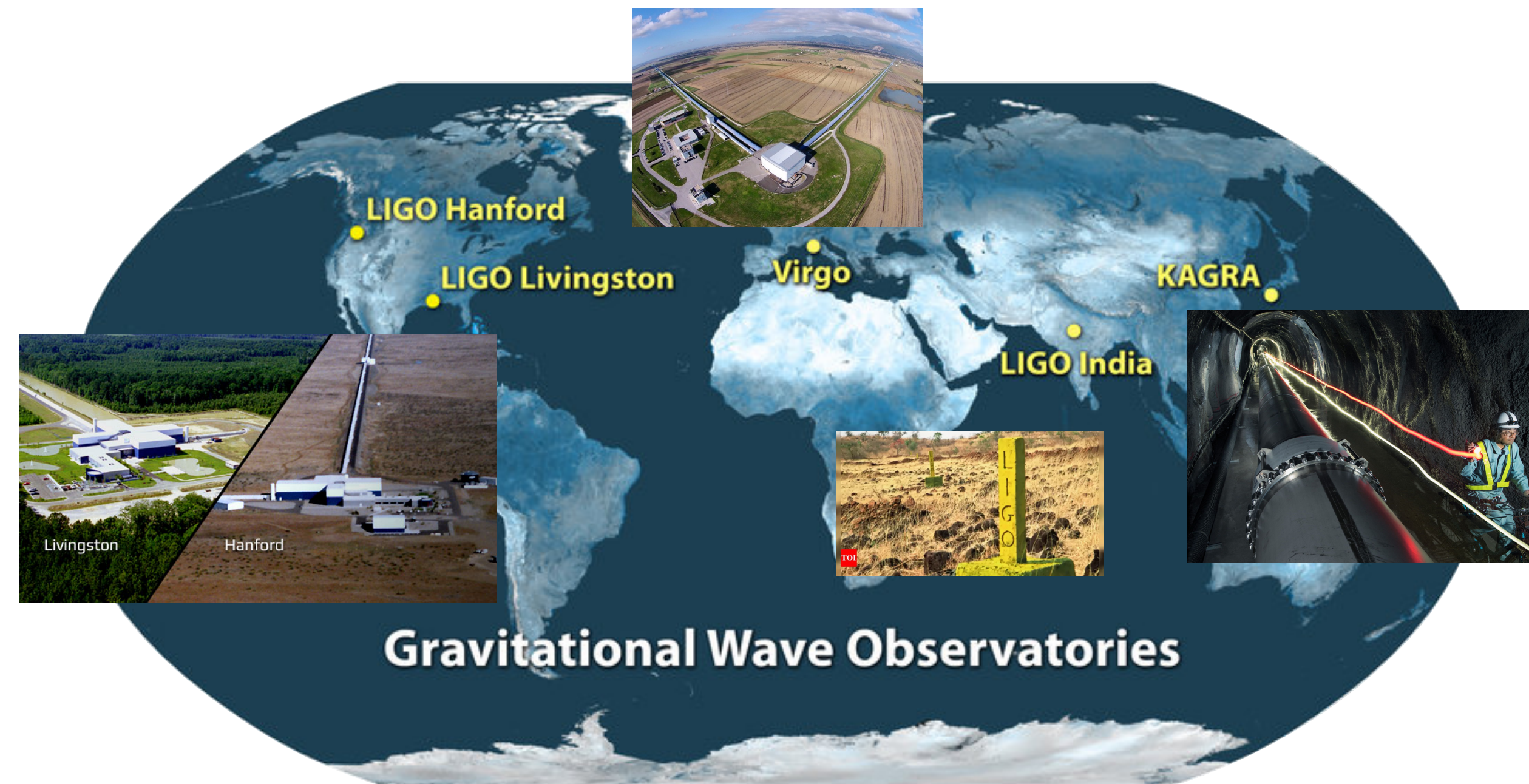
**2017**

Premio Nobel in  
Fisica a Weiss,  
Barish e Thorne

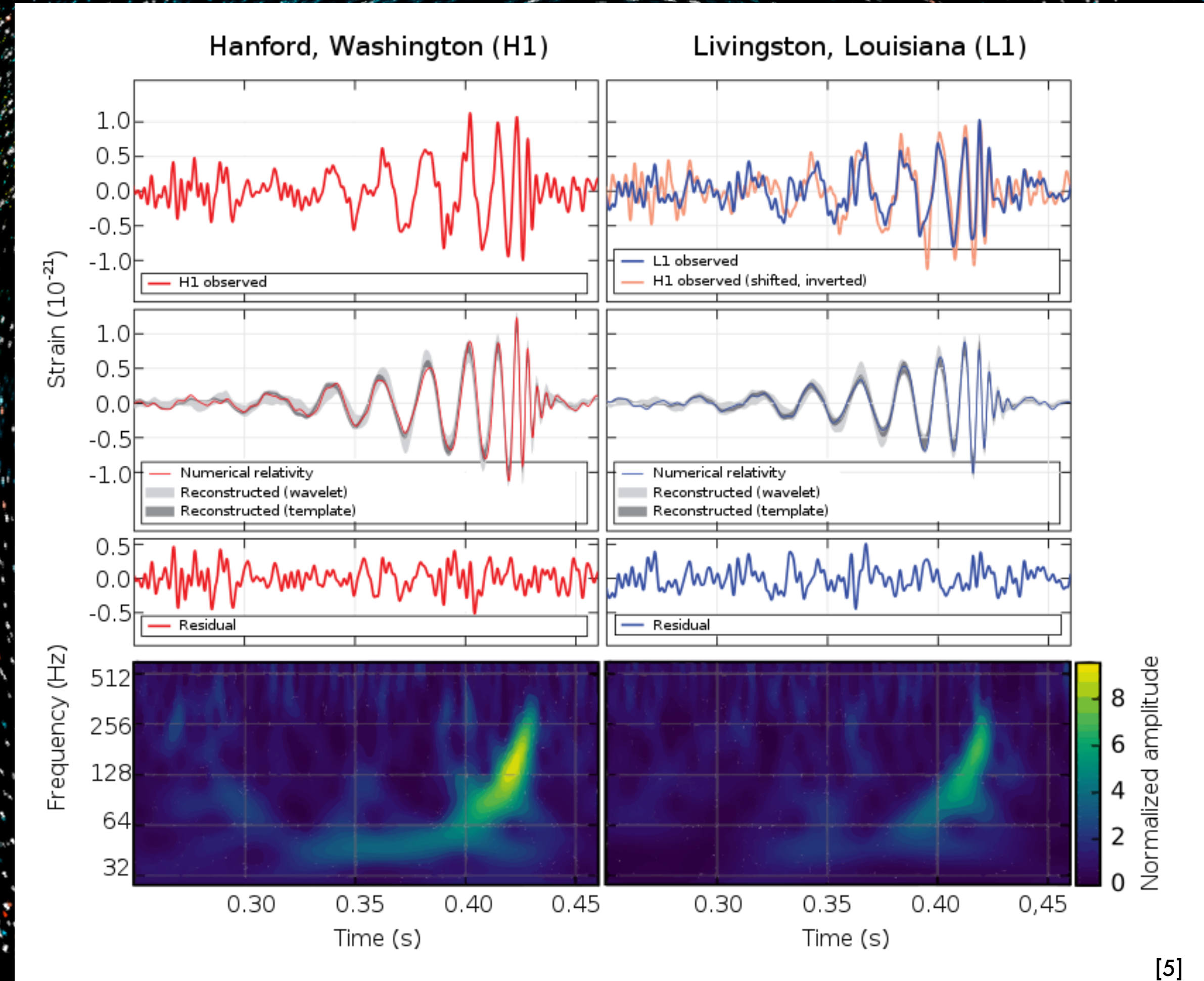
Prima stima della  
costante di Hubble  
con **GW170817** [15]

# Le onde gravitazionali

- sono increspature dello spazio-tempo ( $\sim 10^{-21}\text{m}$ )
- viaggiano alla velocità della luce
- sono generate dai fenomeni più energetici dell'Universo - merger di oggetti compatti (CBC merger), fasi primordiali, esplosioni di Supernovae



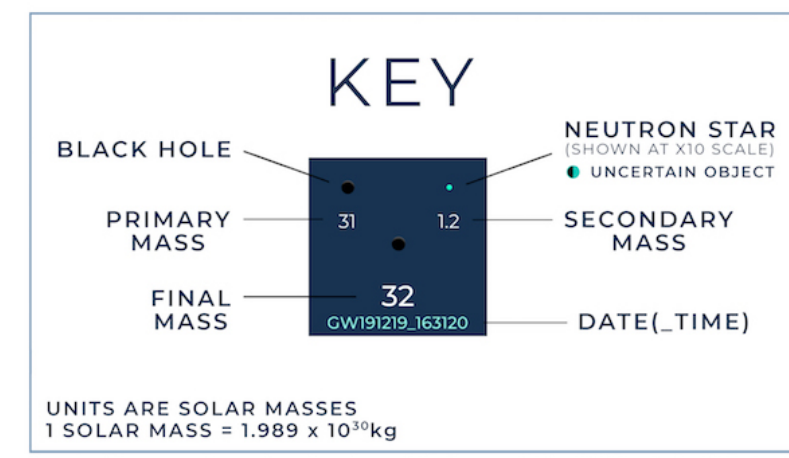
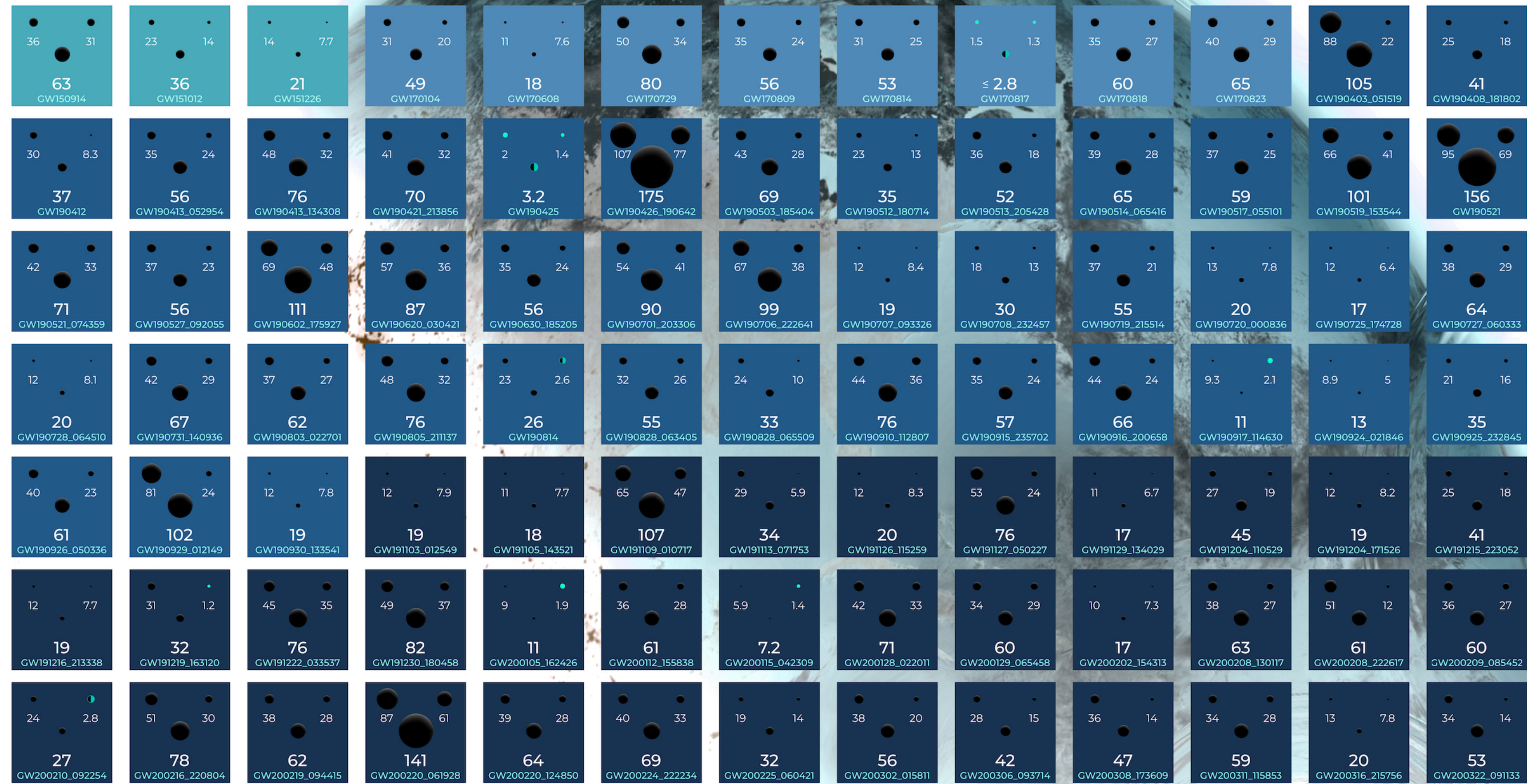
## GW150914



**OBSERVING**  
**01**  
2015 - 2016

**02**  
2016 - 2017

**03a+b**  
2019 - 2020

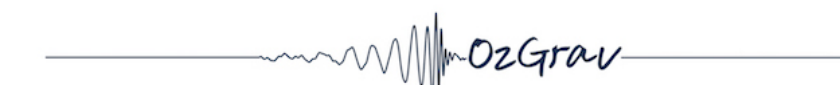


Note that the mass estimates shown here do not include uncertainties, which is why the final mass is sometimes larger than the sum of the primary and secondary masses. In actuality, the final mass is smaller than the primary plus the secondary mass.

The events listed here pass one of two thresholds for detection. They either have a probability of being astrophysical of at least 99% or they have a false alarm rate threshold of less than 1 per 2 years.

# GRAVITATIONAL WAVE MERGER DETECTIONS

SINCE 2015



ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery





Il grande numero di eventi ha permesso l'applicazione di metodi statistici:

- per condurre **studi di popolazione** degli oggetti compatti
- per indagare le proprietà dello spazio - tempo nelle condizioni di campo forte e velocità relativistiche, e quindi per **testare la RG**
- per testare il modello cosmologico  $\Lambda$ CDM

Le coalescenze di oggetti compatti (CBC) rappresentano dei veri e propri **laboratori astrofisici**.

# Cosmologia con le sirene standard

Nel 1986 **Bernard Schutz** descrive un metodo determinare il tasso di espansione dell'Universo, la costante di Hubble attraverso le sorgenti gravitazionali e i cataloghi di galassie. [14]

310 LETTERS TO NATURE NATURE VOL. 323 25 SEPTEMBER 1986

**Determining the Hubble constant from gravitational wave observations**

**Bernard F. Schutz**

Department of Applied Mathematics and Astronomy, University College Cardiff, PO Box 78, Cardiff CF1 1XL, UK

the detectors to see binary neutron star sources at 100 Hz at a distance of 100 Mpc, with a mean signal-to-noise ratio (SNR) of >30. An observation will therefore determine  $\tau$  and  $h$  to perhaps 3%. The key to our method is that the stars' masses enter equations (1) and (2) in exactly the same way, so that

$$r_{100} = 7.8 f_{100}^{-2} (\langle h_{23} \rangle \tau)^{-1} \quad (3)$$

where  $\langle h_{23} \rangle = \langle h \rangle \times 10^{23}$ , independently of the masses of the stars. This result is not quite so strong as it seems, as equation (1)

$$d_l^{GW} = c(1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z)}$$

$$d_l^{GW}(z) \simeq (c/H_0)z \quad z \leq 1$$

→ Successivamente altri autori hanno reinterpretato il metodo proposto da Schutz sfruttando l'**analisi Bayesiana** includendo tutte le assunzioni e le informazioni a priori sull'origine dell'evento gravitazionale. [16,17,19-24]

Inference of the cosmological parameters from gravitational waves: application to second generation interferometers

Walter Del Pozzo<sup>1,2</sup>

<sup>2</sup>School of Physics and Astronomy

**A 2 per cent Hubble constant measurement from standard sirens within 5 years**

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 820:136 (9pp), 2016 April 1  
© 2016. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/0004-637X/820/2/136

GALAXY STRATEGY FOR LIGO-VIRGO GRAVITATIONAL WAVE COUNTERPART SEARCHES

NEIL GEHRELS<sup>1</sup>, JOHN K. CANNIZZO<sup>2,3</sup>, JONAH KANNER<sup>4</sup>, MANSI M. KASLIWAL<sup>5</sup>, SAMAYA NISSANKE<sup>6</sup>, AND LEO P. SINGER<sup>1,7</sup>

<sup>1</sup>NASA Goddard Space Flight Center, Mail Code 661, Greenbelt, MD 20771, USA  
<sup>2</sup>CRESST and Astroparticle Physics Laboratory, NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771, USA  
<sup>3</sup>Department of Physics, University of Maryland, Baltimore County, 1000 Hilltop Circle, Baltimore, MD 21250, USA

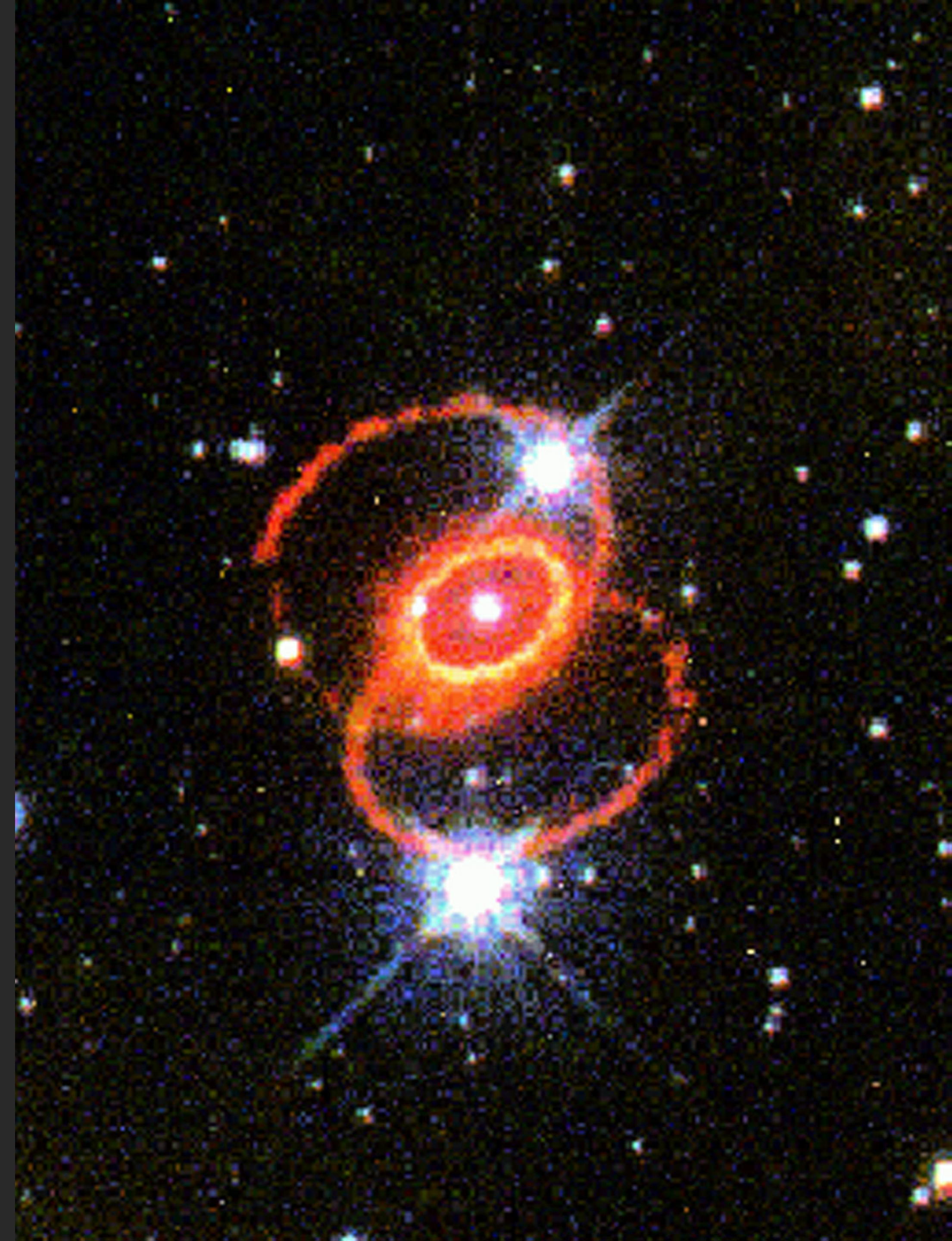
via Fishbach<sup>2</sup> and Daniel E. Holz<sup>2,3,4</sup>

# Cosmologia con le *sirene standard*

- la distanza dalle sorgenti GW può essere misurata direttamente mediante una **rete di interferometri**, come quelli della collaborazione LVK.<sup>[14]</sup>

$$A_{GW}(t) \propto \frac{M_z}{d_L} \quad M_z = (1+z) \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

Ciò consente :



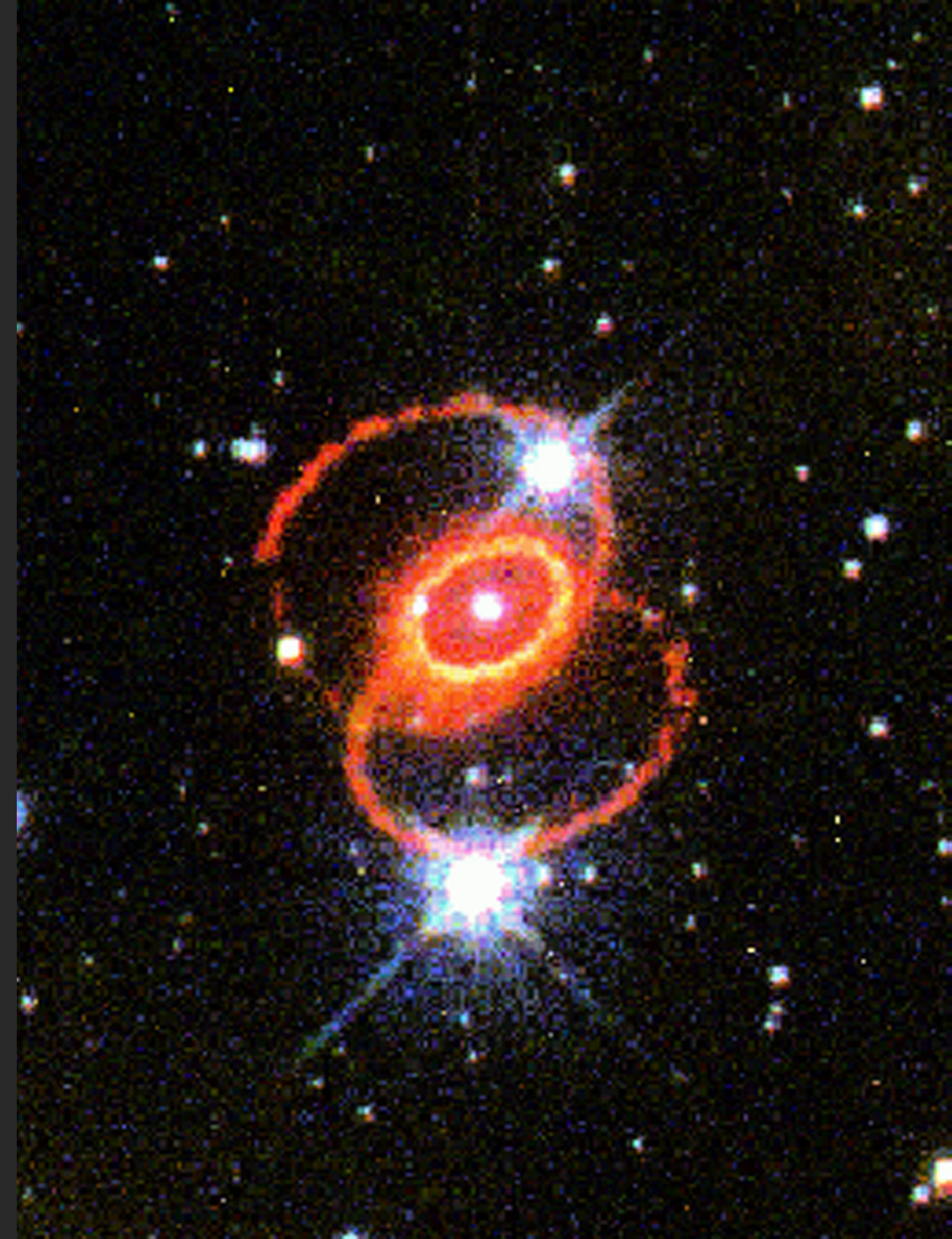
# Cosmologia con le *sirene standard*

- la distanza dalle sorgenti GW può essere misurata direttamente mediante una **rete di interferometri**, come quelli della collaborazione LVK.

$$A_{GW}(t) \propto \frac{M_z}{d_L} \quad M_z = (1+z) \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

Ciò consente :

- di stimare le distanze delle sorgenti senza l'uso di metodi astronomici detti *cosmic distance ladder*: le CBC assumono il ruolo di **sirene standard**





# Cosmologia con le sirene standard

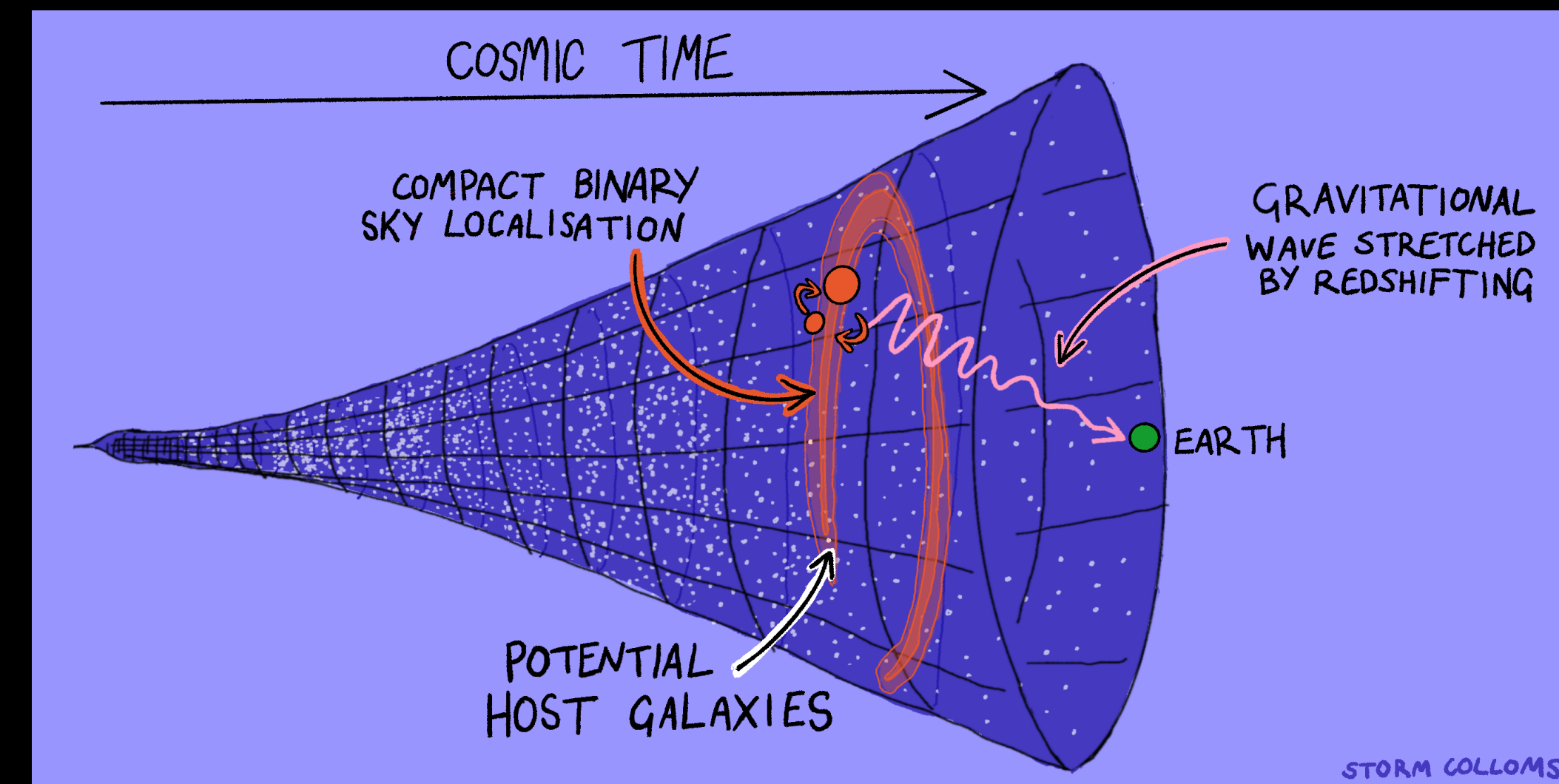
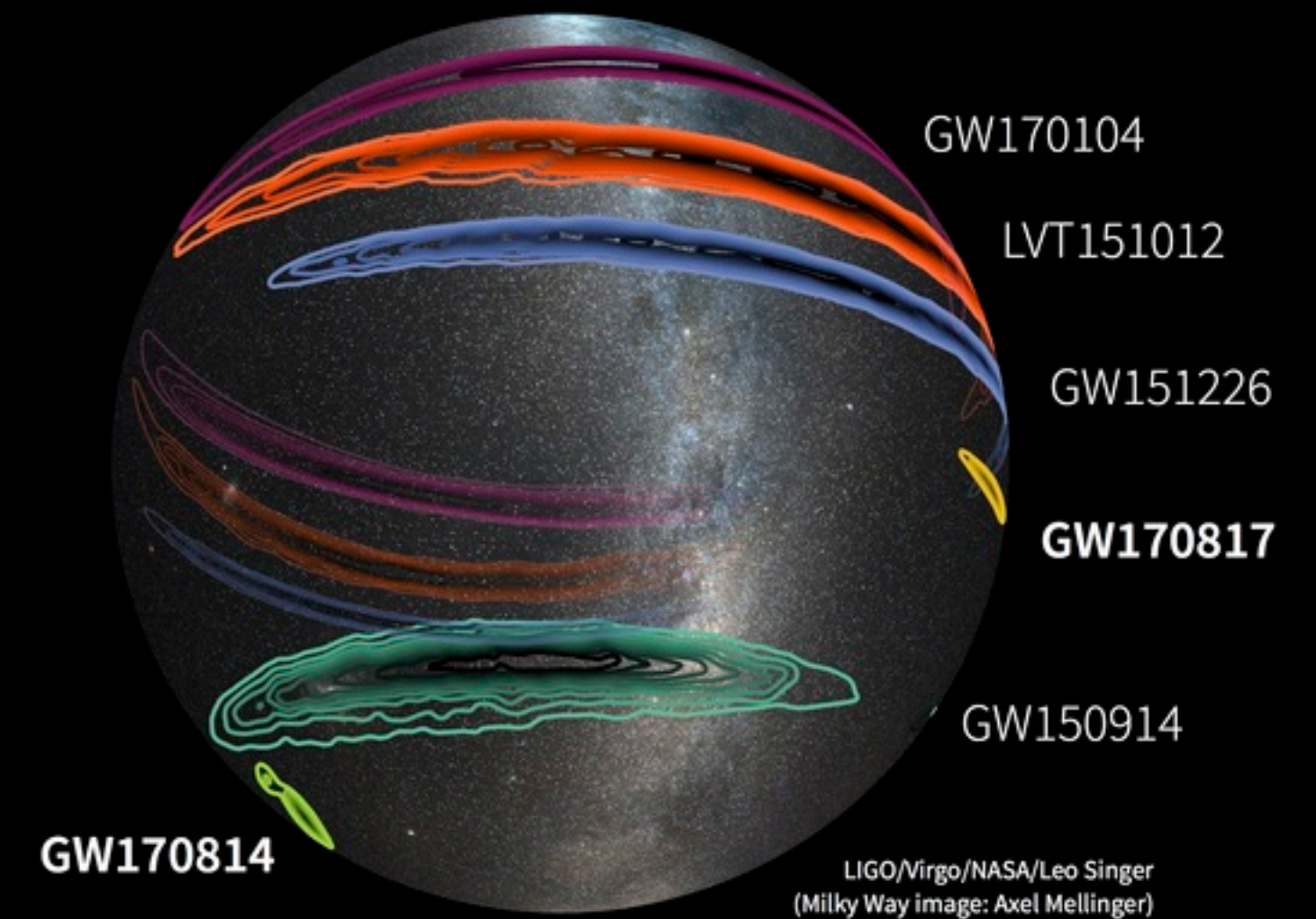
→ la distanza dalle sorgenti GW può essere misurata direttamente mediante una **rete di interferometri**, come quelli della collaborazione LVK.

$$A_{GW}(t) \propto \frac{M_z}{d_L} \quad M_z = (1+z) \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

Ciò consente :

di stimare le distanze delle sorgenti senza l'uso di metodi astronomici dette cosmic distance ladder: le CBC assumono il ruolo di **sirene standard**

di racchiudere la regione di provenienza del segnale entro un'area di cielo piccola abbastanza per selezionare al suo interno delle **potenziali galassie** in cui è avvenuta la fusione di oggetti compatti.



# Cosmologia con le sirene standard

→ la distanza dalle sorgenti GW può essere misurata direttamente mediante una **rete di interferometri**, come quelli della collaborazione LVK.

$$A_{GW}(t) \propto \frac{M_z}{d_L}$$

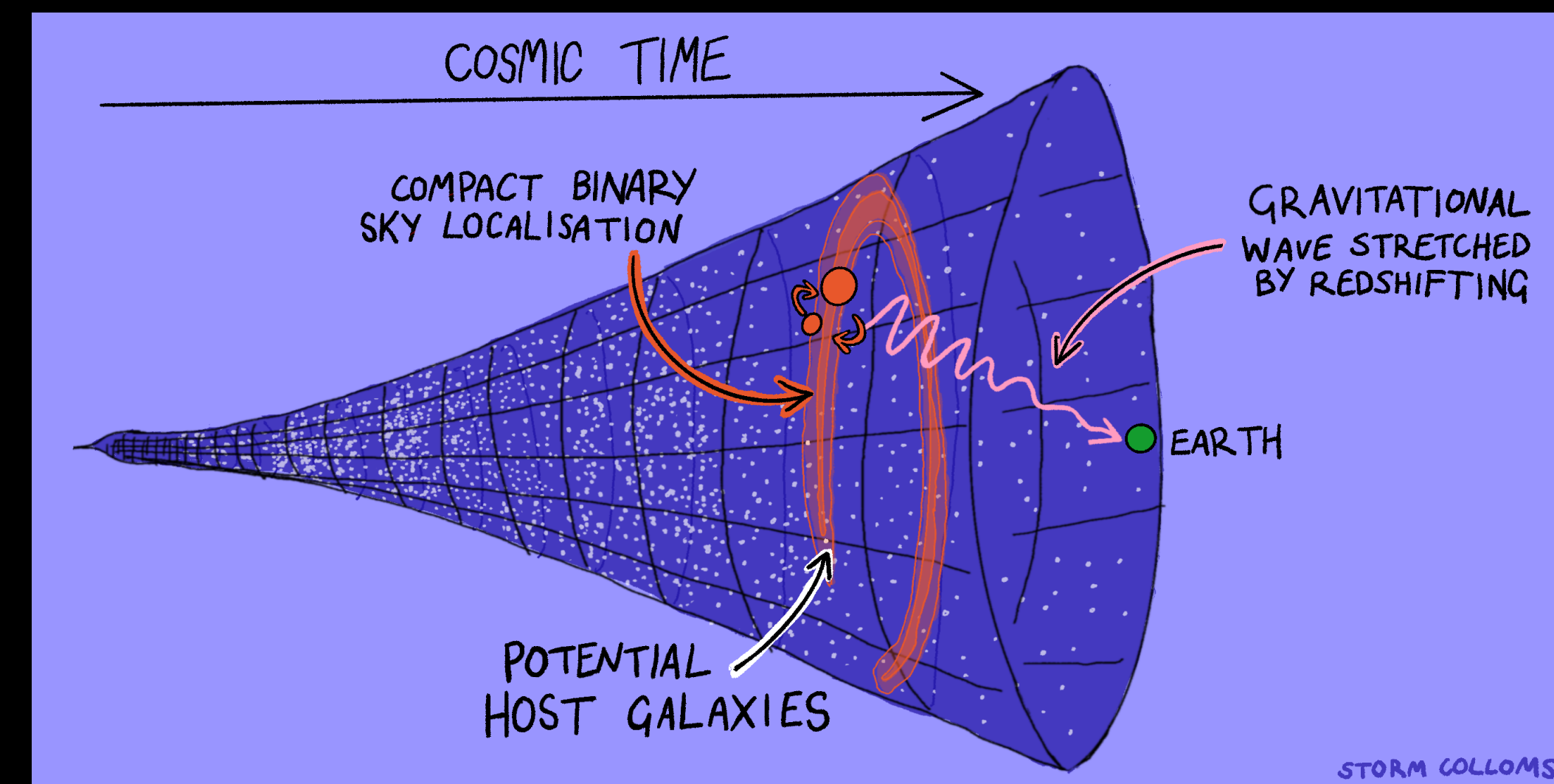
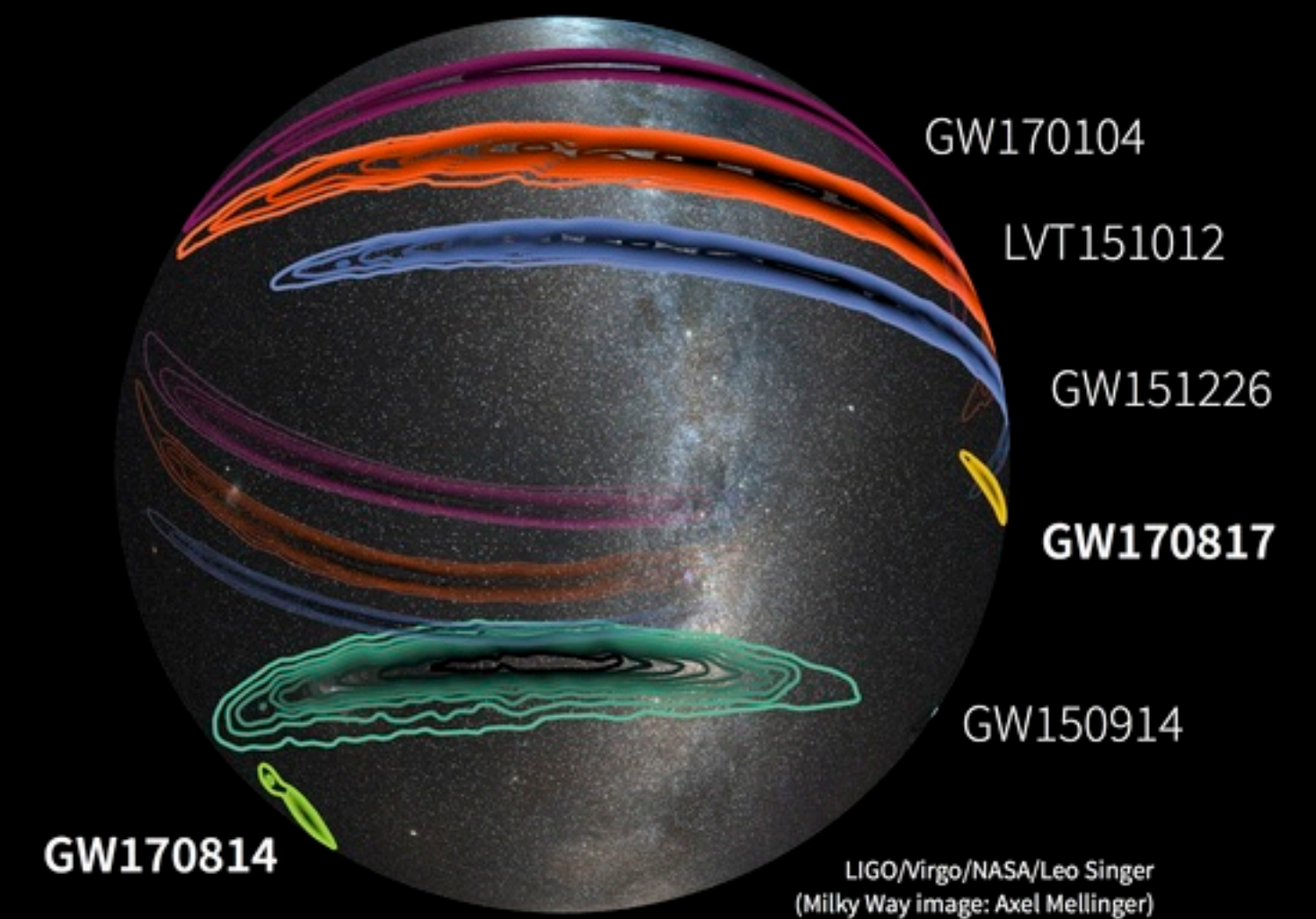
$$M_z = (1+z) \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

Degenerazione massa-z

Ciò consente :

di stimare le distanze delle sorgenti senza l'uso di metodi astronomici dette cosmic distance ladder: le CBC assumono il ruolo di **sirene standard**

di racchiudere la regione di provenienza del segnale entro un'area di cielo piccola abbastanza per selezionare al suo interno delle **potenziali galassie** in cui è avvenuta la fusione di oggetti compatti.

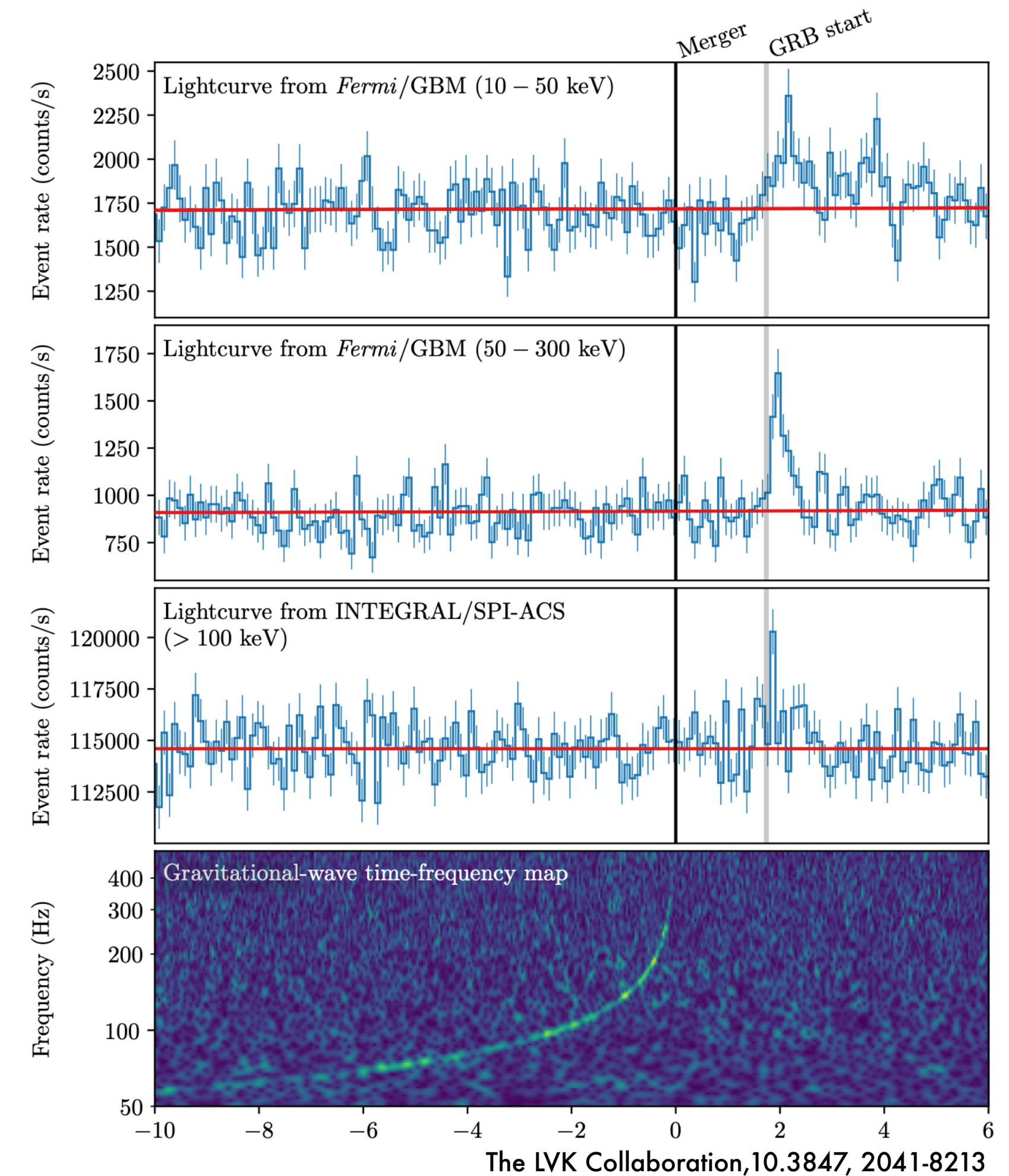
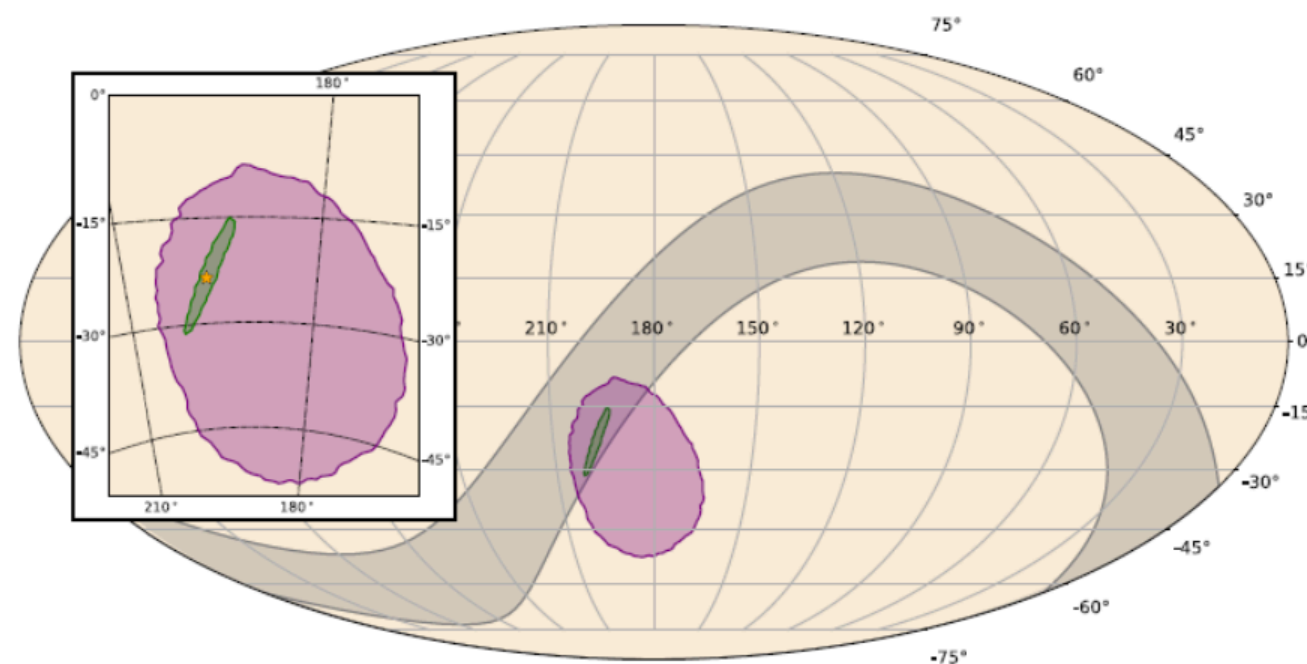


# Metodi d'inferenza cosmologica

## Bright sirens : metodo con controparte EM

### GW170817 + GRB170817A + transienti EM

- ▶ Coalescenza di due stelle di neutroni in un sistema binario, BNS
- ▶  $m_{\text{tot}} = 2.74_{-0.01}^{+0.04} M_{\odot}$  [Low-spin] -  $2.82_{-0.09}^{+0.40} M_{\odot}$  [High-spin]
- ▶  $d_l^{GW} = 40_{-14}^{+8}$  Mpc , cr. region 90% = 28 deg<sup>2</sup>
- ▶ short  $\gamma$ -ray :  $t_c + 1.7s$



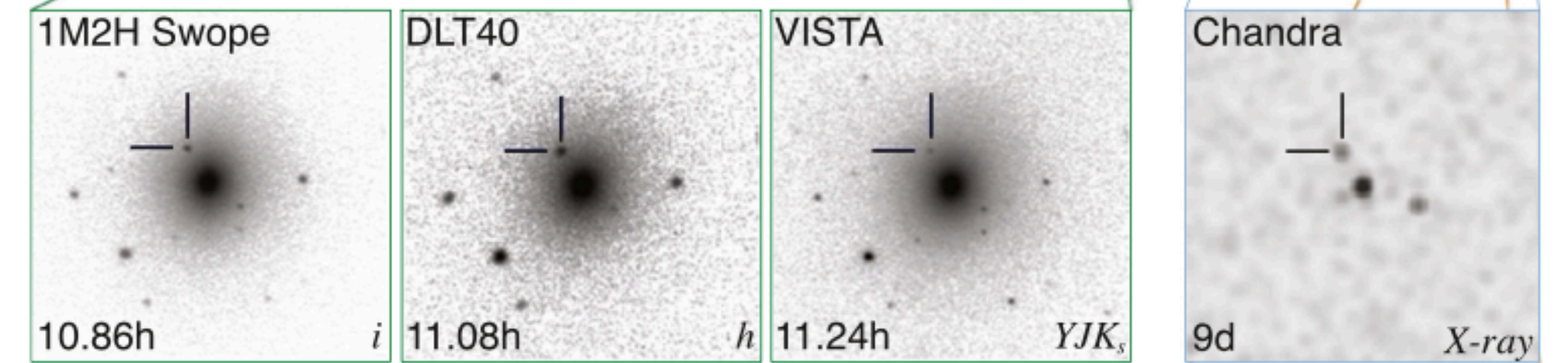
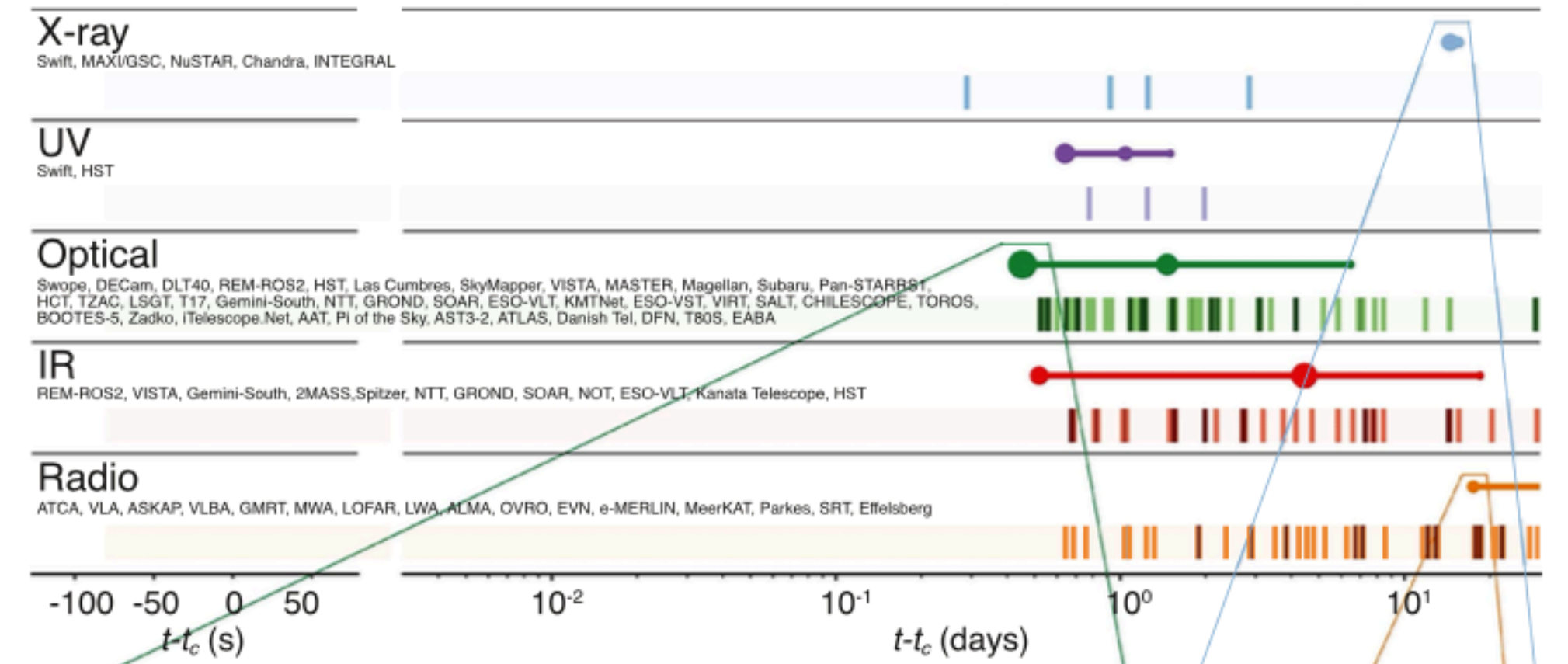
L'INIZIO DELL'ASTRONOMIA MULTI-MESSAGGERA  
CON ONDE GRAVITAZIONALI

# Metodi d'inferenza cosmologica

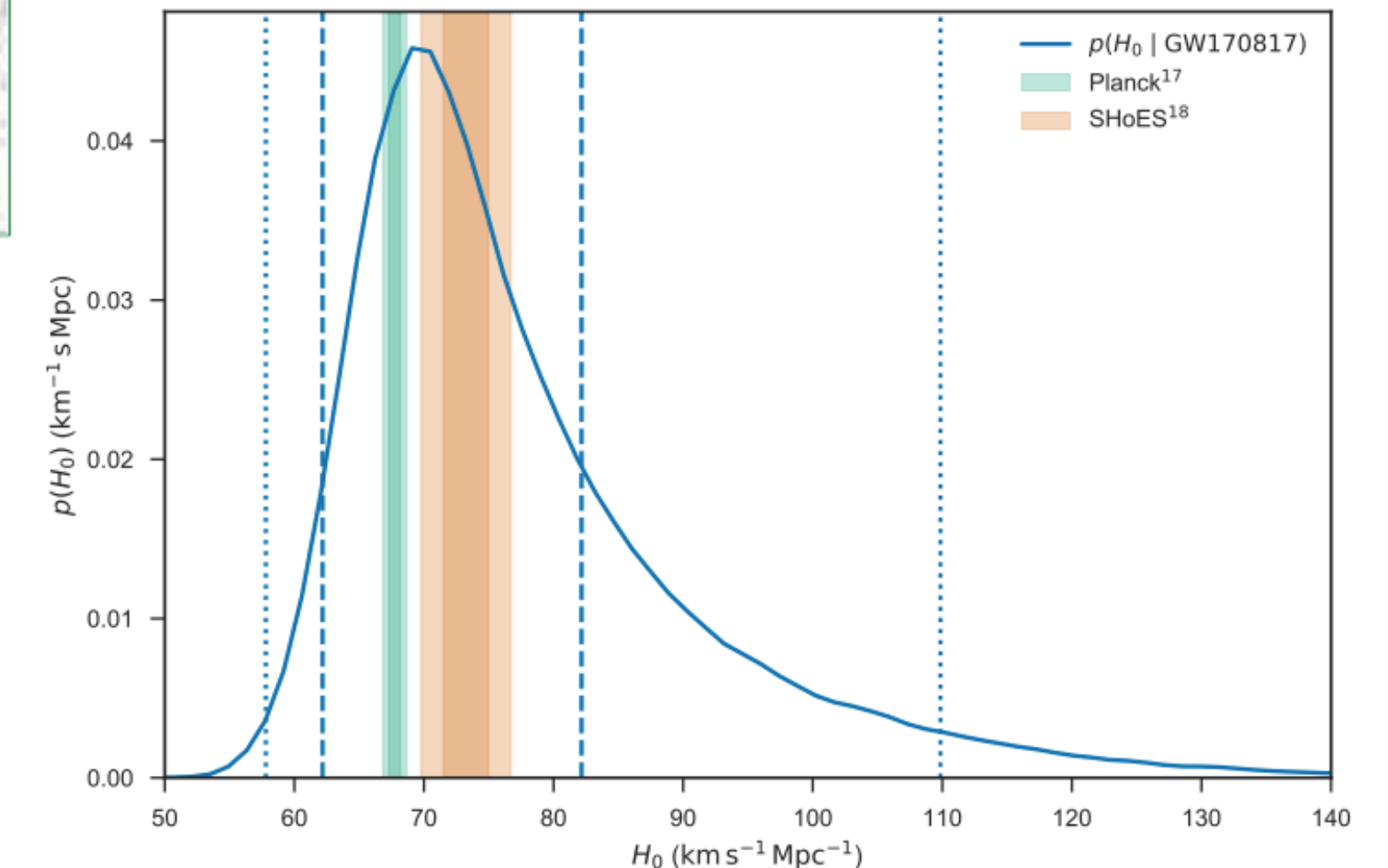
## Bright sirens : metodo con controparte EM

### GW170817 + GRB170817A + transienti EM

- ▶ Coalescenza di due stelle di neutroni in un sistema binario, BNS
- ▶  $m_{\text{tot}} = 2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$  [Low-spin] -  $2.82^{+0.40}_{-0.09} M_{\odot}$  [High-spin]
- ▶  $d_l^{GW} = 40^{+8}_{-14}$  Mpc , cr. region 90% = 28 deg<sup>2</sup>
- ▶ short  $\gamma$ -ray :  $t_c + 1.7s$
- ▶  $t_c + 10h \rightarrow$  UV;
- ▶  $t_c + 10h \rightarrow$  kilonova/macronova : Ottico, IR
- ▶  $t_c + 10gg \rightarrow$  X-ray, Radio



[20]



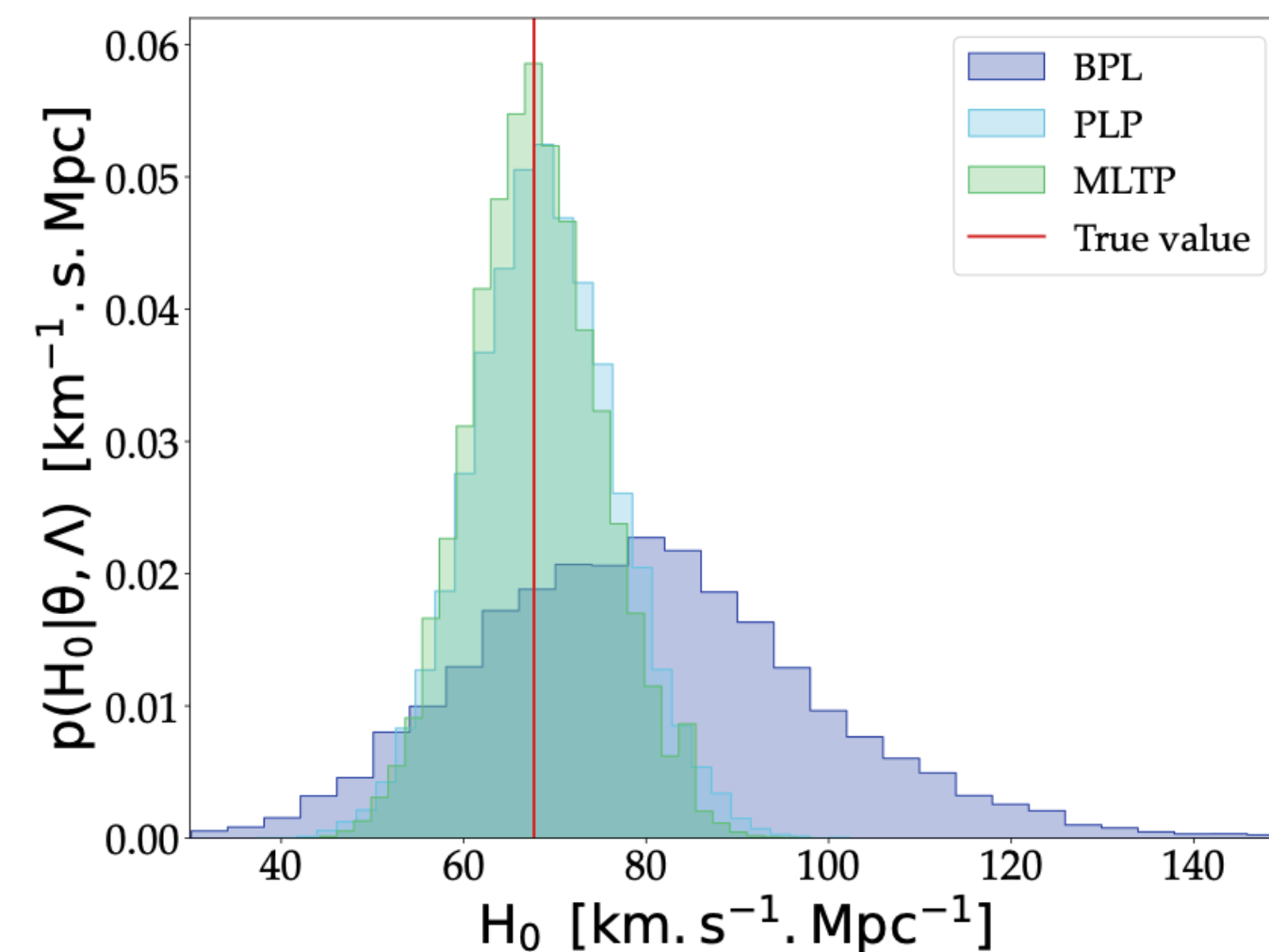
**NGC4993**  
**RICAVO IL REDSHIFT DELLA GALASSIA**

**prima misura di H0 con GW**

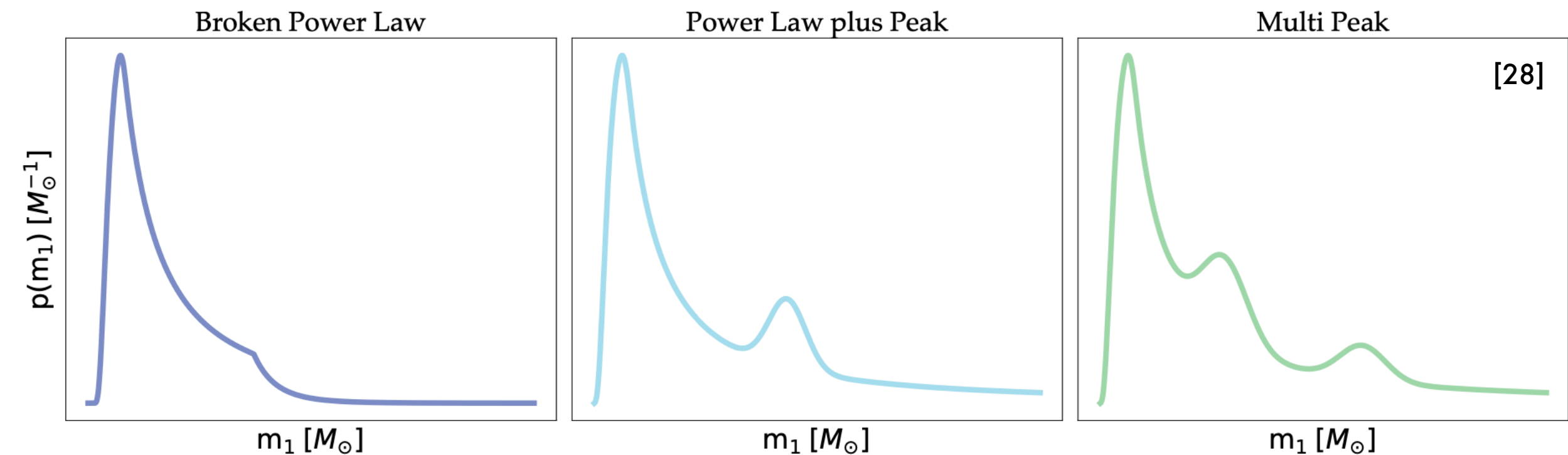
# Metodi d'inferenza cosmologica

## Spectral sirens

Basato sullo studio delle proprietà della distribuzione delle masse di sorgenti di GW che rompono la degenerazione massa-redshift.



Distribuzione a posterior di H0 marginalizzando su diversi modelli di massa : broken power law (BPL), power law + peak (PLP), e multi peak (MP). In rosso il valore iniettato pari al valore di Planck15 H0= 67.7km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup> [28]



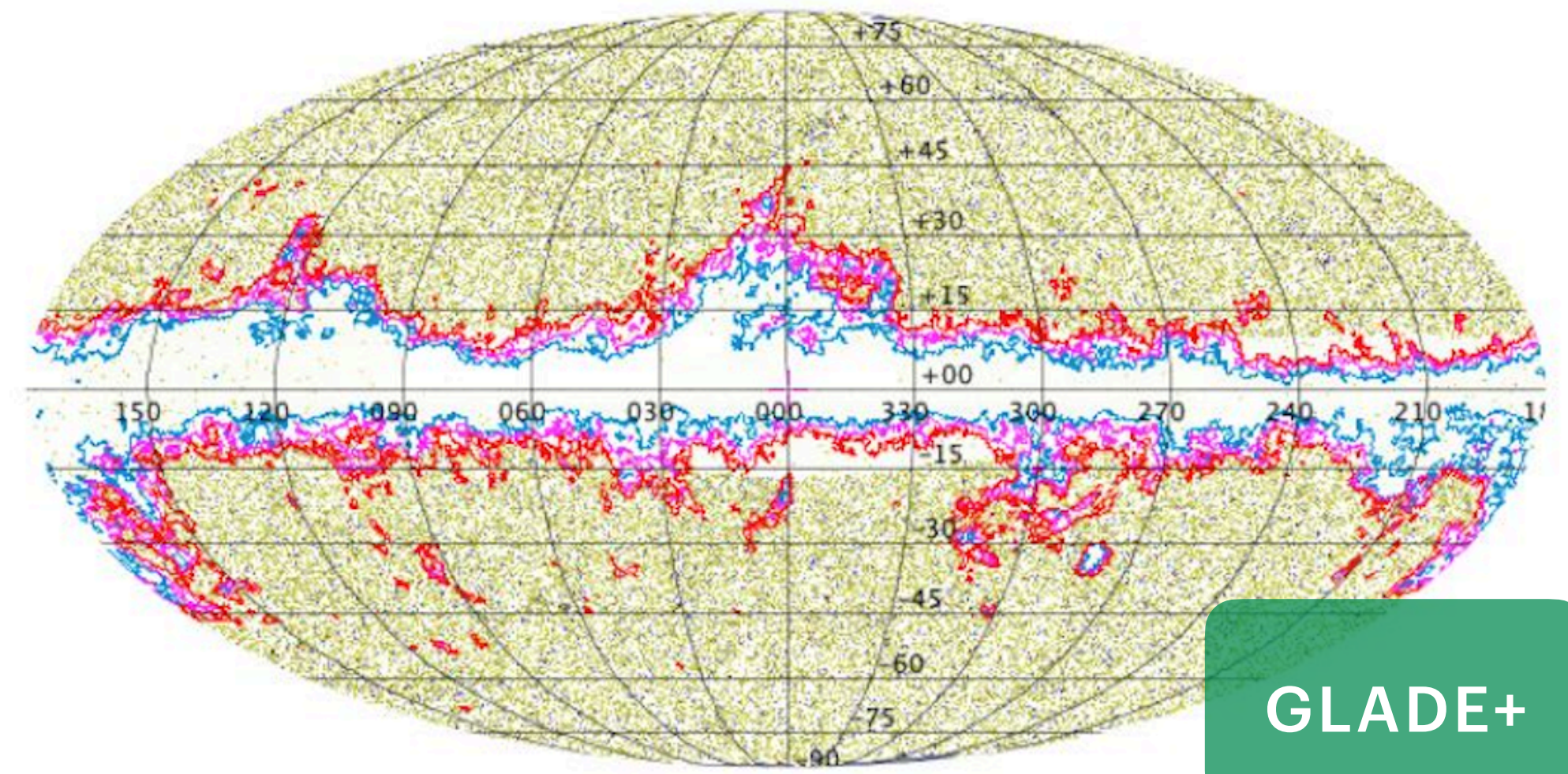
L'INFORMAZIONE DEL REDSHIFT DERIVA DAL TASSO DI COALESCENZE FATTORIZZATO NEL VOLUME COMMOVENTE

$$\frac{dN_{CBC}}{d\vec{m}_s d\theta d\Omega dz dt_s} = R_0 \psi(z; \Lambda) p_{pop}(\vec{m}_s \theta | z, \Lambda) \frac{dV_c}{dz d\Omega}$$

# Metodi d'inferenza cosmologica

## Dark sirens + Cataloghi di Galassie

Si utilizzano i cataloghi di galassie per assegnare statisticamente una galassia ospite, quindi ricavare le informazioni come luminosità, localizzazione e quindi redshift, che possiamo associare all'evento GW.



[18]

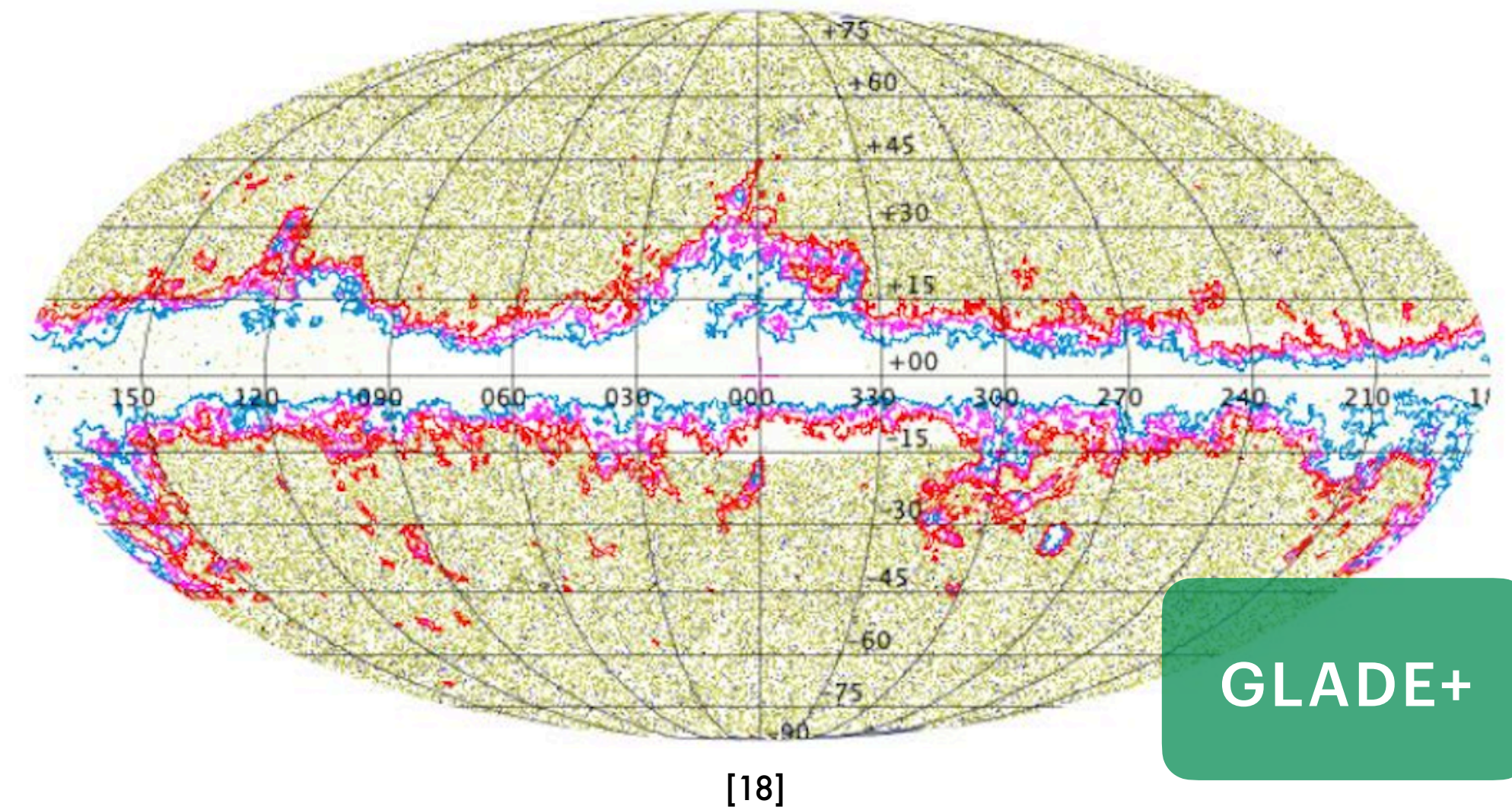
La probabilità per un singolo evento verrà marginalizzata sulla probabilità che la galassia ospite sia contenuta ( $G$ ) o non contenuta ( $\bar{G}$ ) all'interno del catalogo preso in considerazione

$$p(x_{GW} | D_{GW}, H_0, I) = p(x_{GW} | G, D_{GW}, H_0, I)p(G | D_{GW}, H_0) + p(x_{GW} | \bar{G}, D_{GW}, H_0, I)p(\bar{G} | D_{GW}, H_0, I)$$

# Metodi d'inferenza cosmologica

## Dark sirens + Cataloghi di Galassie

Si utilizzano i cataloghi di galassie per assegnare statisticamente una galassia ospite, quindi ricavare le informazioni come luminosità, localizzazione e quindi redshift, che possiamo associare all'evento GW.

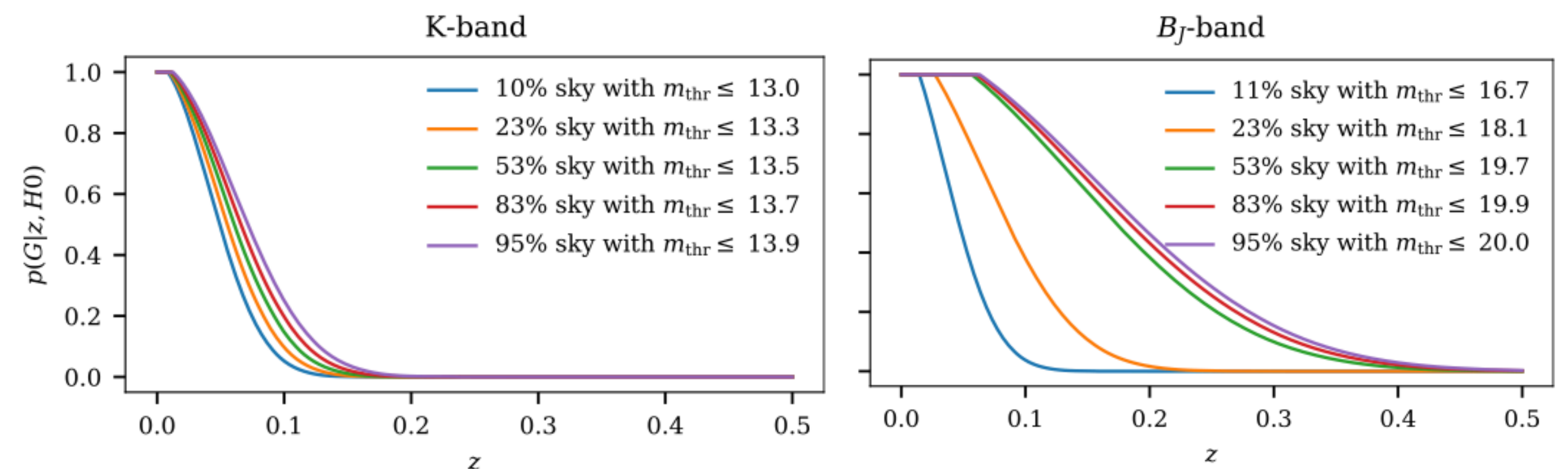


La probabilità per un singolo evento verrà marginalizzata sulla probabilità che la galassia ospite sia contenuta ( $G$ ) o non contenuta ( $\bar{G}$ ) all'interno del catalogo preso in considerazione

$$p(x_{GW} | D_{GW}, H_0, I) = p(x_{GW} | G, D_{GW}, H_0, I)p(G | D_{GW}, H_0) + p(x_{GW} | \bar{G}, D_{GW}, H_0, I)p(\bar{G} | D_{GW}, H_0, I)$$

### Problemi da affrontare

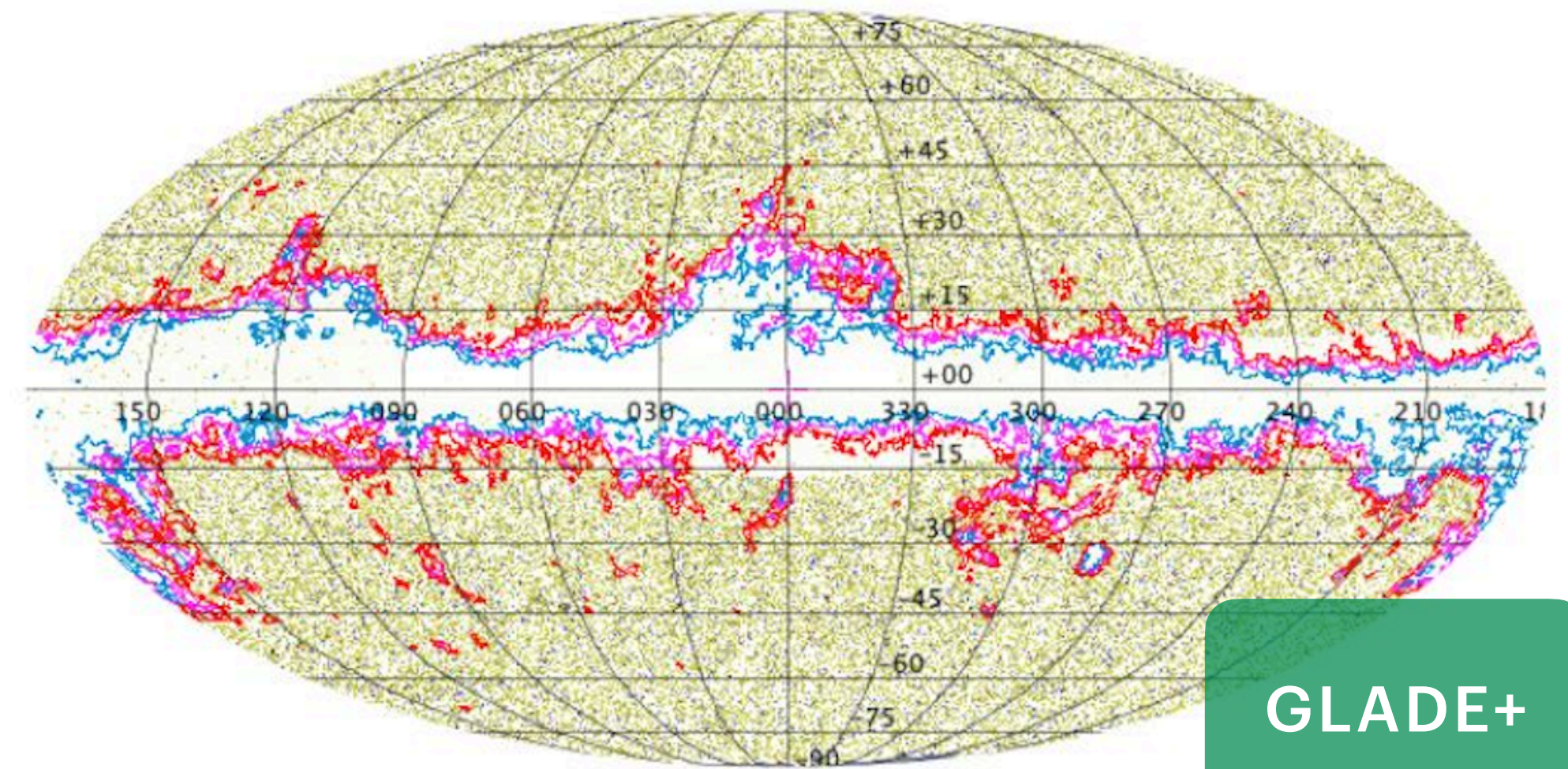
- **INCOMPLETEZZA DEI CATALOGHI GALASSIE**



# Metodi d'inferenza cosmologica

## Dark sirens + Cataloghi di Galassie

Si utilizzano i cataloghi di galassie per assegnare statisticamente una galassia ospite, quindi ricavare le informazioni come luminosità, localizzazione e quindi redshift, che possiamo associare all'evento GW.



[18]

La probabilità per un singolo evento verrà marginalizzata sulla probabilità che la galassia ospite sia contenuta ( $G$ ) o non contenuta ( $\bar{G}$ ) all'interno del catalogo preso in considerazione

$$p(x_{GW} | D_{GW}, H_0, I) = p(x_{GW} | G, D_{GW}, H_0, I)p(G | D_{GW}, H_0) + p(x_{GW} | \bar{G}, D_{GW}, H_0, I)p(\bar{G} | D_{GW}, H_0, I)$$

Problemi da affrontare

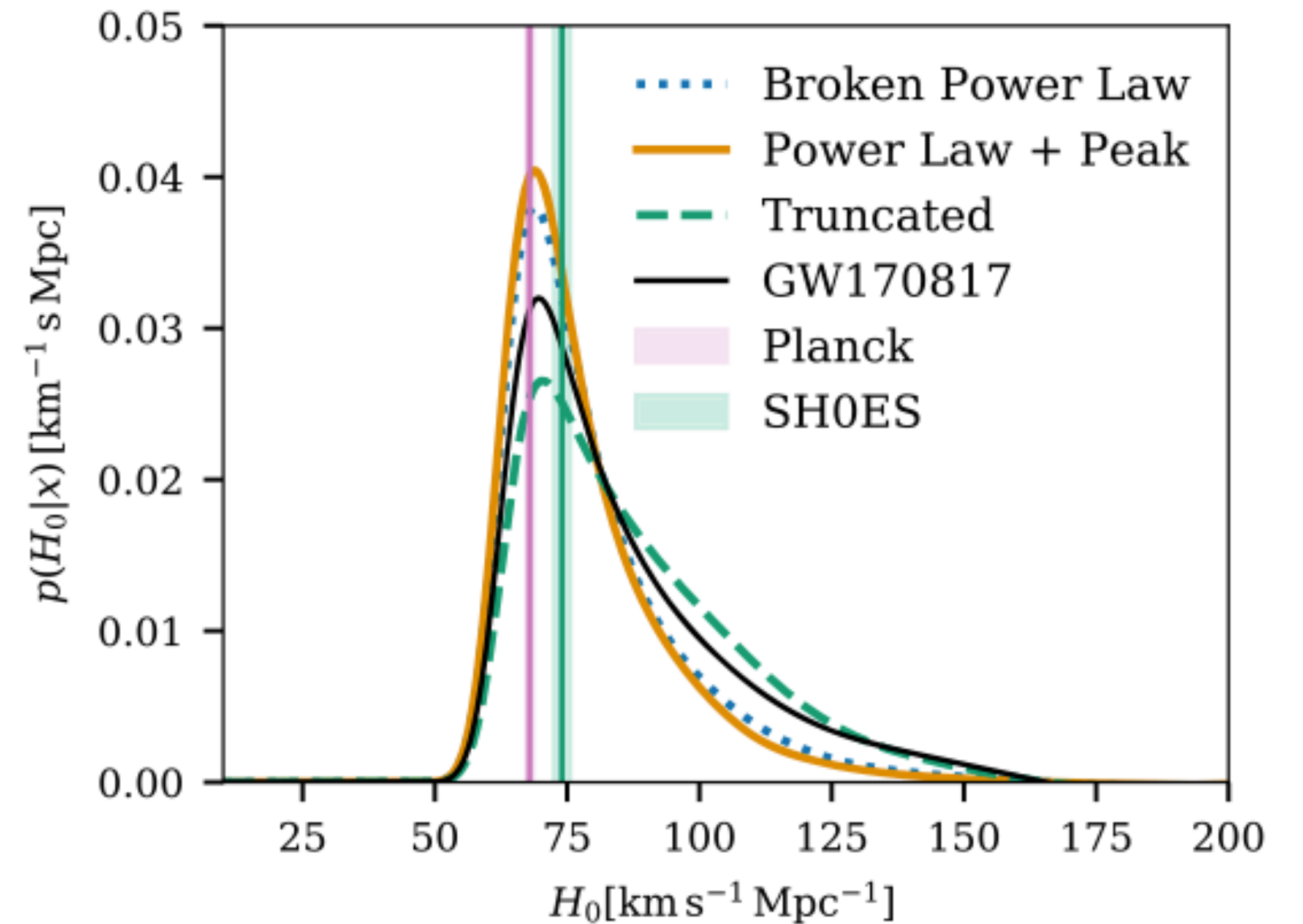
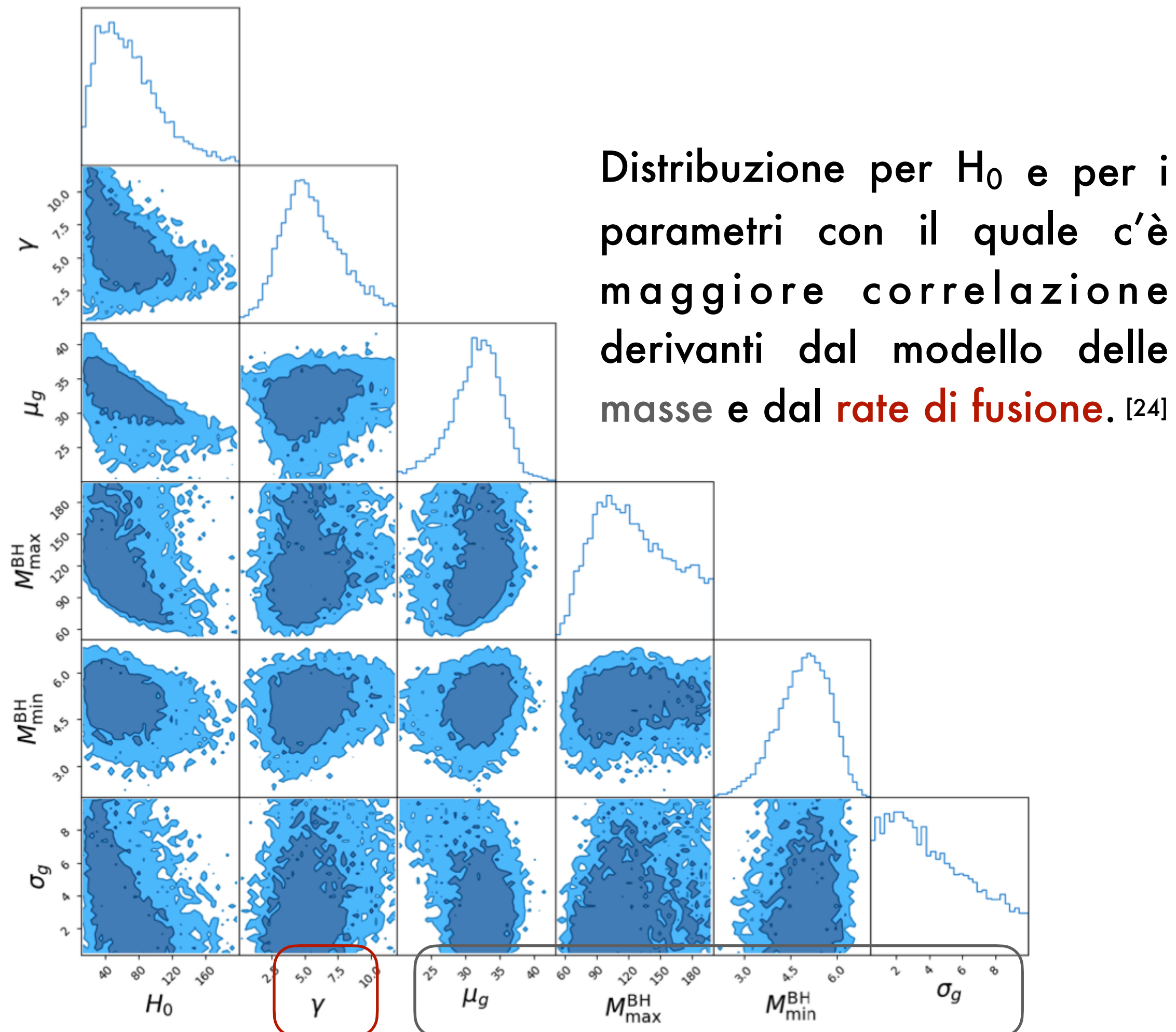
- INCOMPLETEZZA DEI CATALOGHI GALASSIE
- BIAS DELLA POPOLAZIONE DI CBC



# Metodi d'inferenza cosmologica

## Spectral sirens + Cataloghi di Galassie

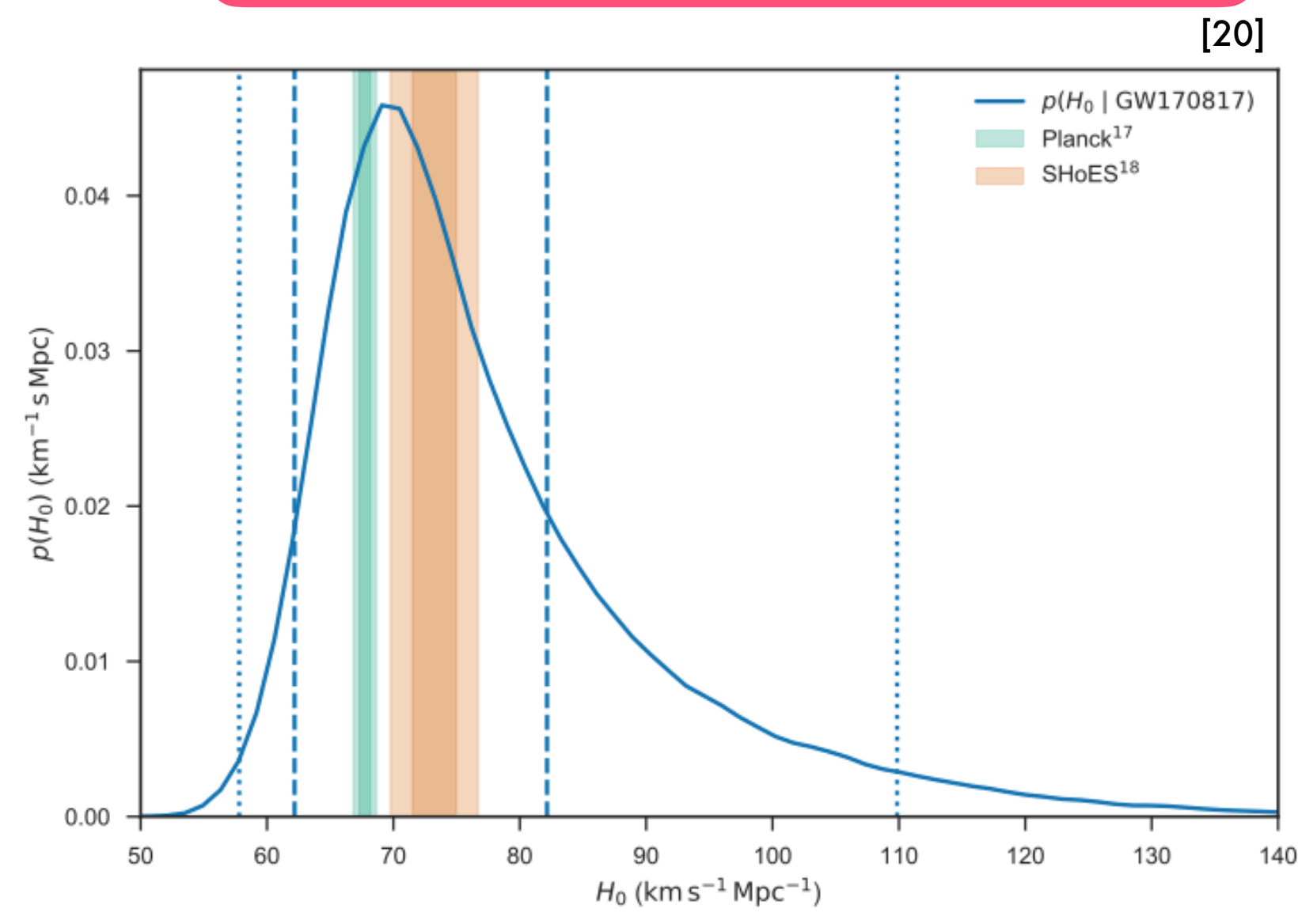
Variano i parametri cosmologici e di popolazione



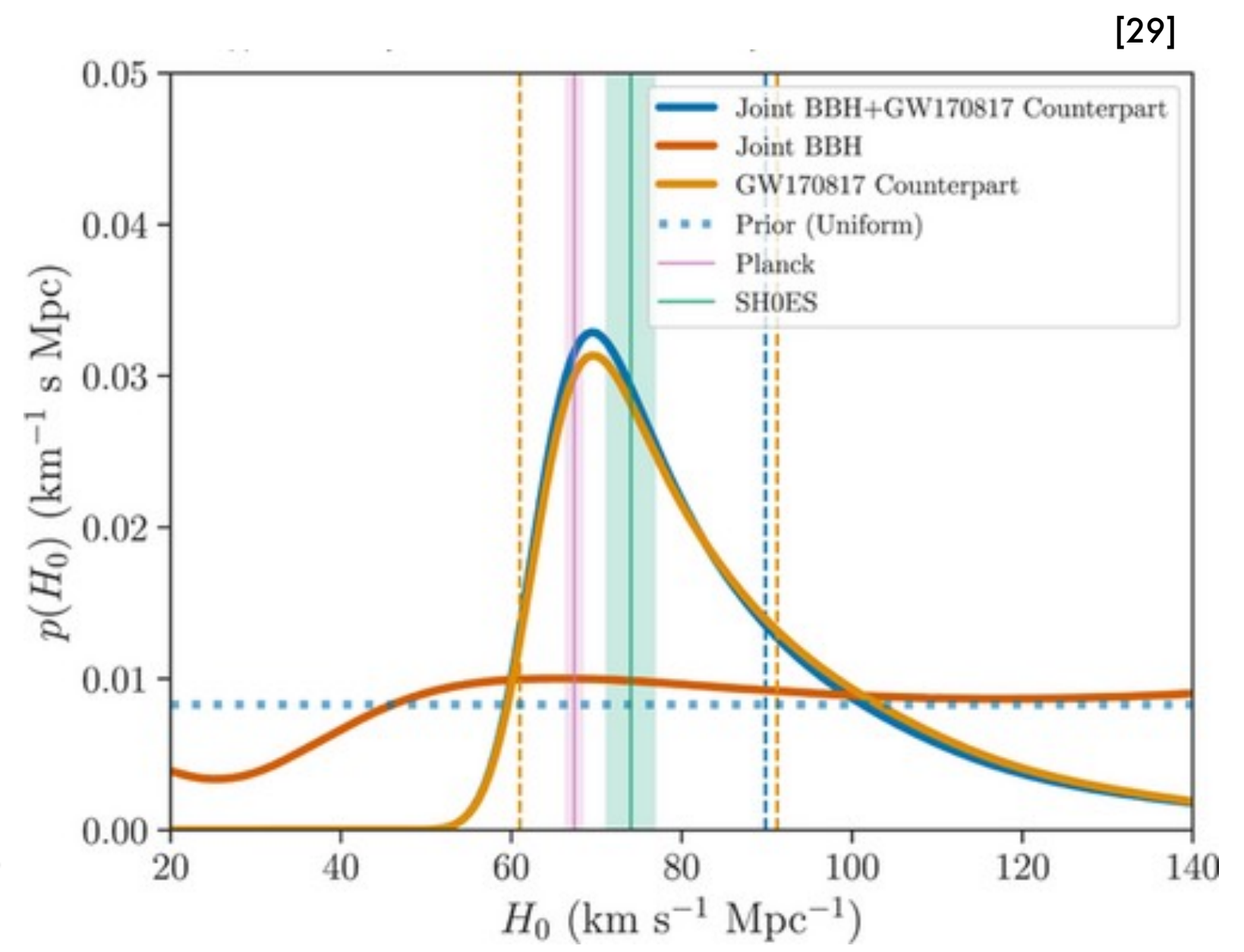
Distribuzione di  $H_0$  ottenuta combinando 42 eventi di BBH del catalogo GWTC-3 con diversi modelli di distribuzione delle masse degli oggetti compatti.

**Precisione migliorata del 17% rispetto all'analisi GWTC-2**

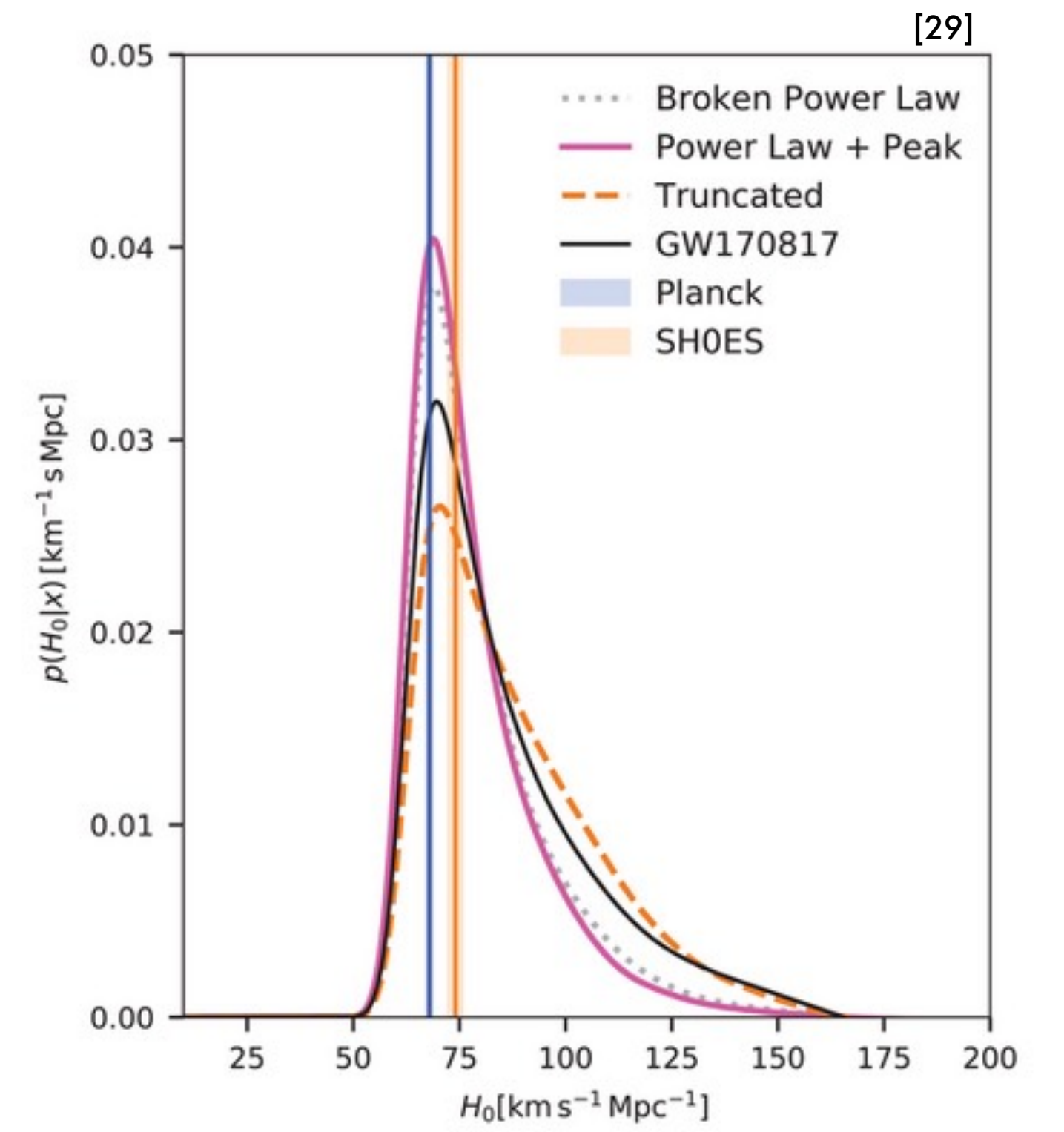
$$H_0 = 70^{+19}_{-8} \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$



$$H_0 = 68.7^{+17.0}_{-7.8} \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$



$$H_0 = 68^{+12}_{-8} \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$



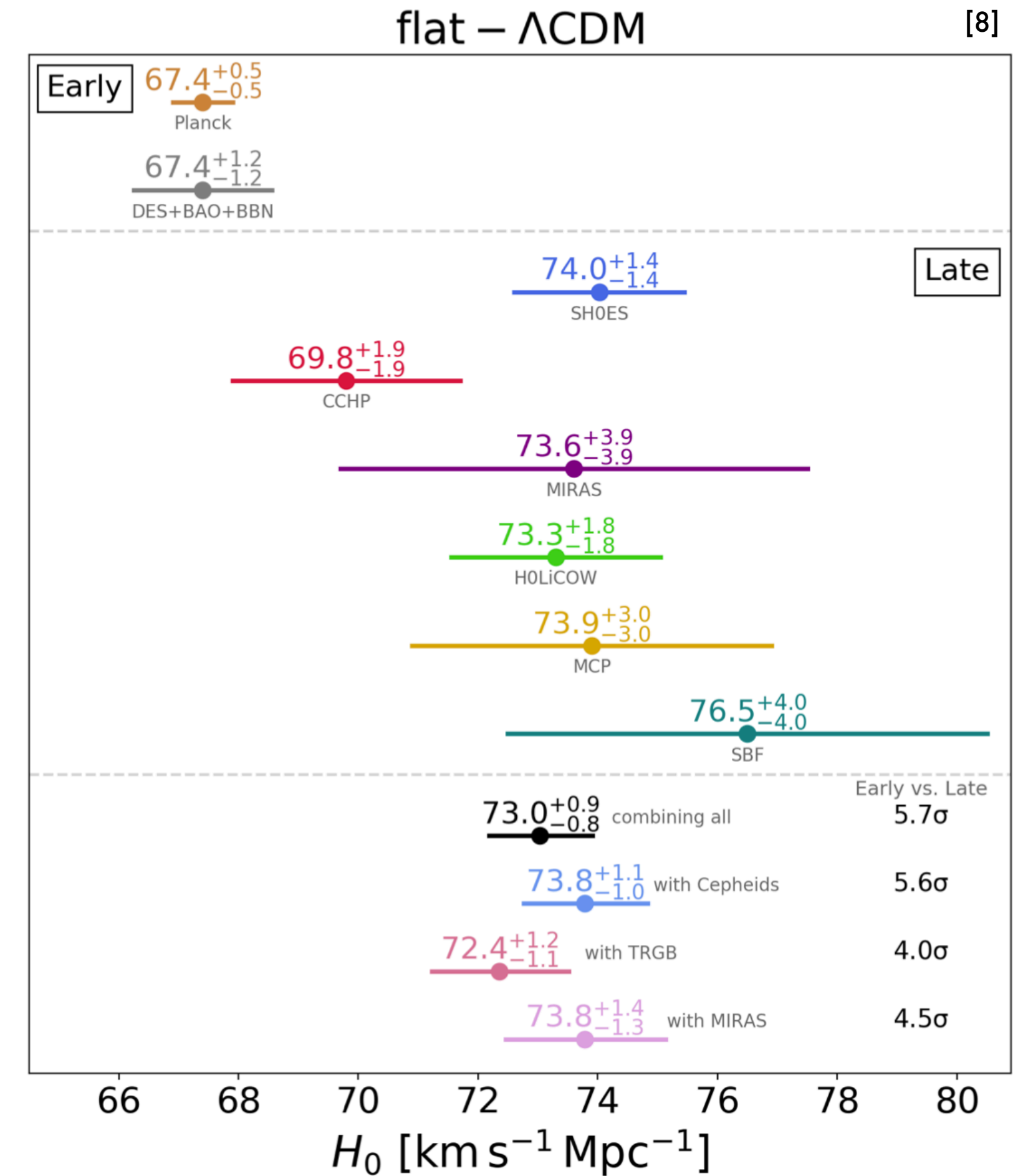
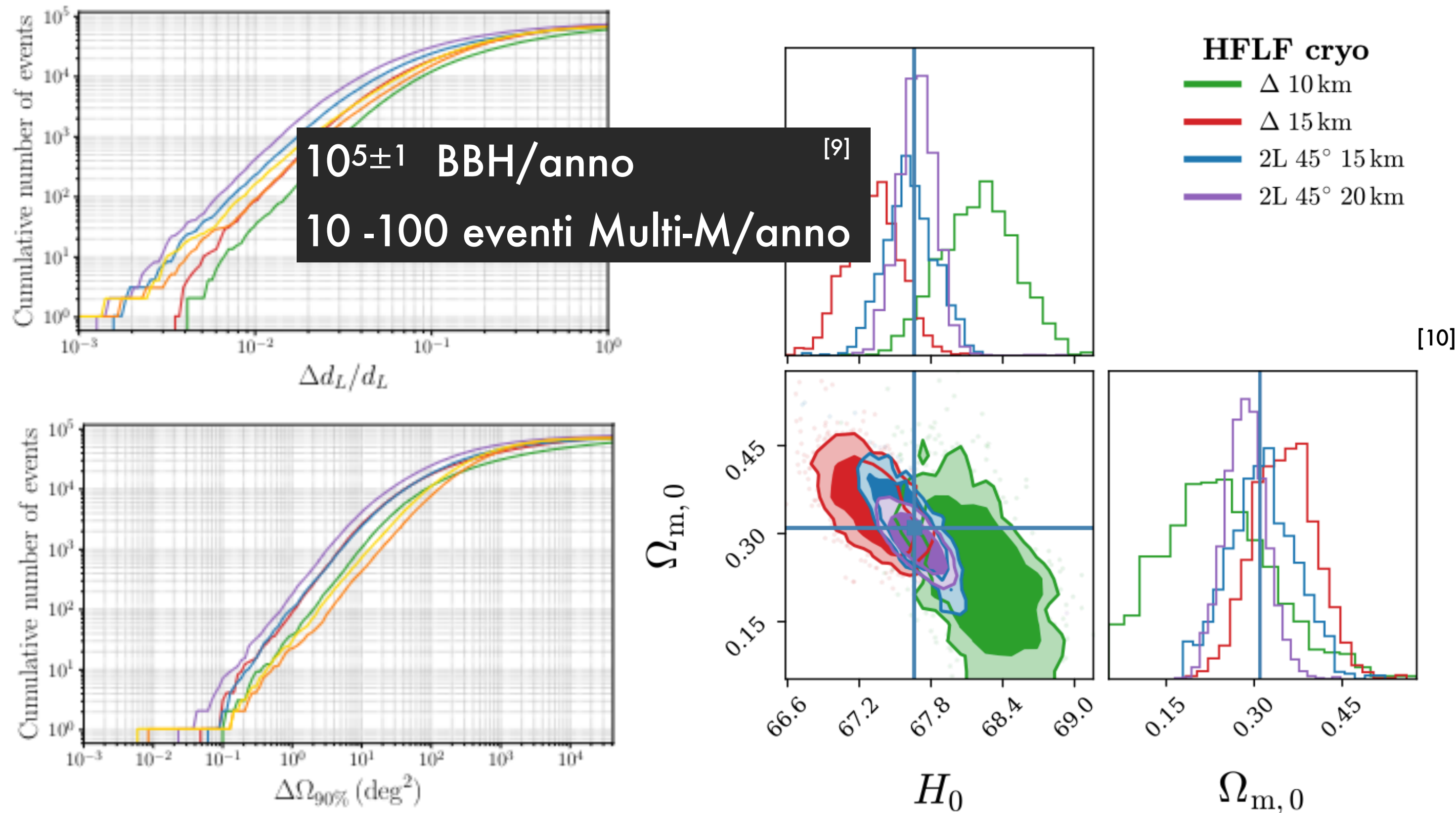
**GW170817 come BRIGHT SIREN**

**42 STANDARD SIRENS + GALAXY CATALOG**

**STUDI di POPOLAZIONE + GALAXY CATALOG**

# Prospettive future

La **tensione di Hubble** sembra più facile da risolvere grazie ai futuri eventi dei run O4 e O5, per non parlare dei dati che gli interferometri di terza generazione, come l'Einstein Telescope (ET), potrebbero raccogliere.

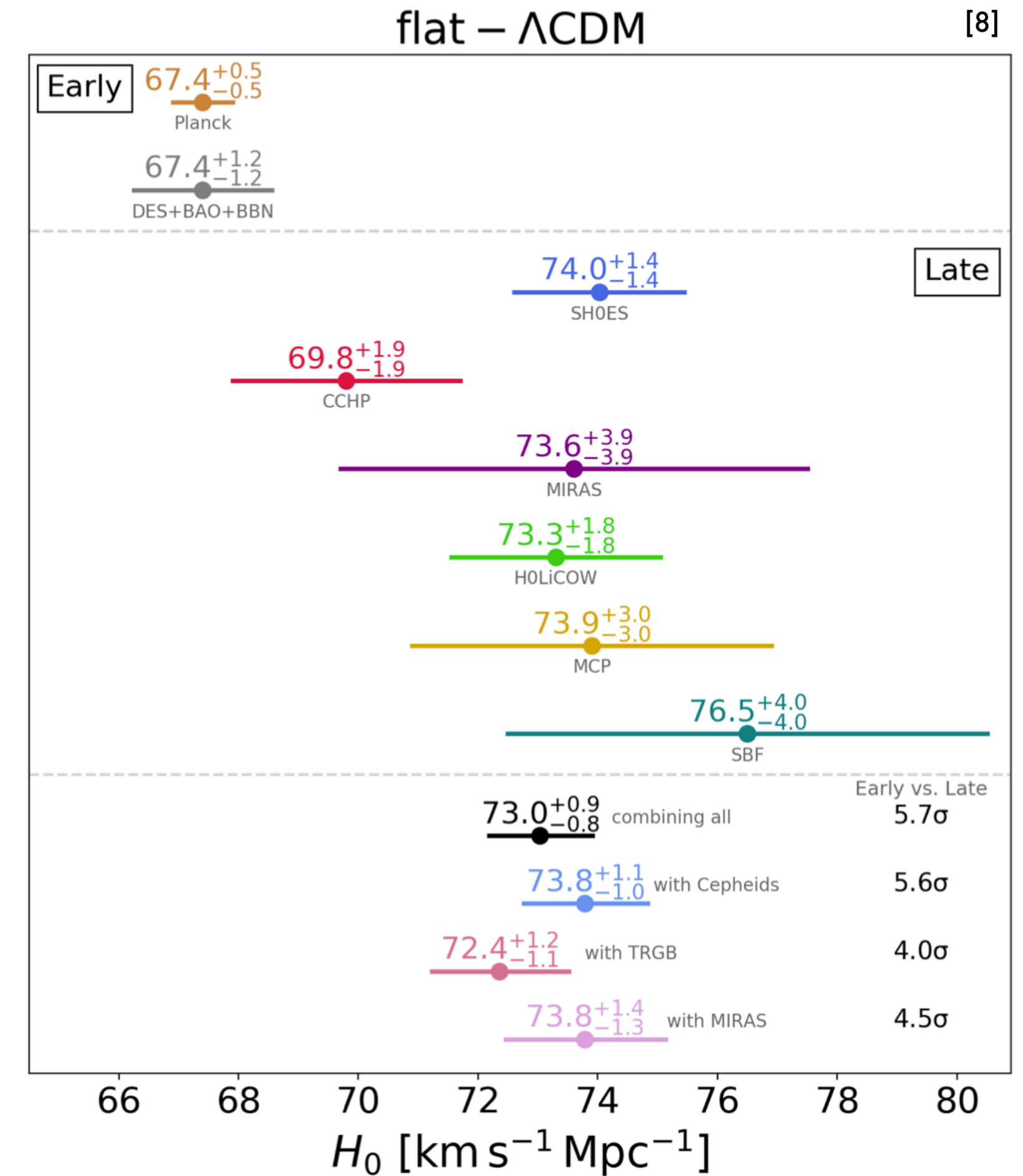
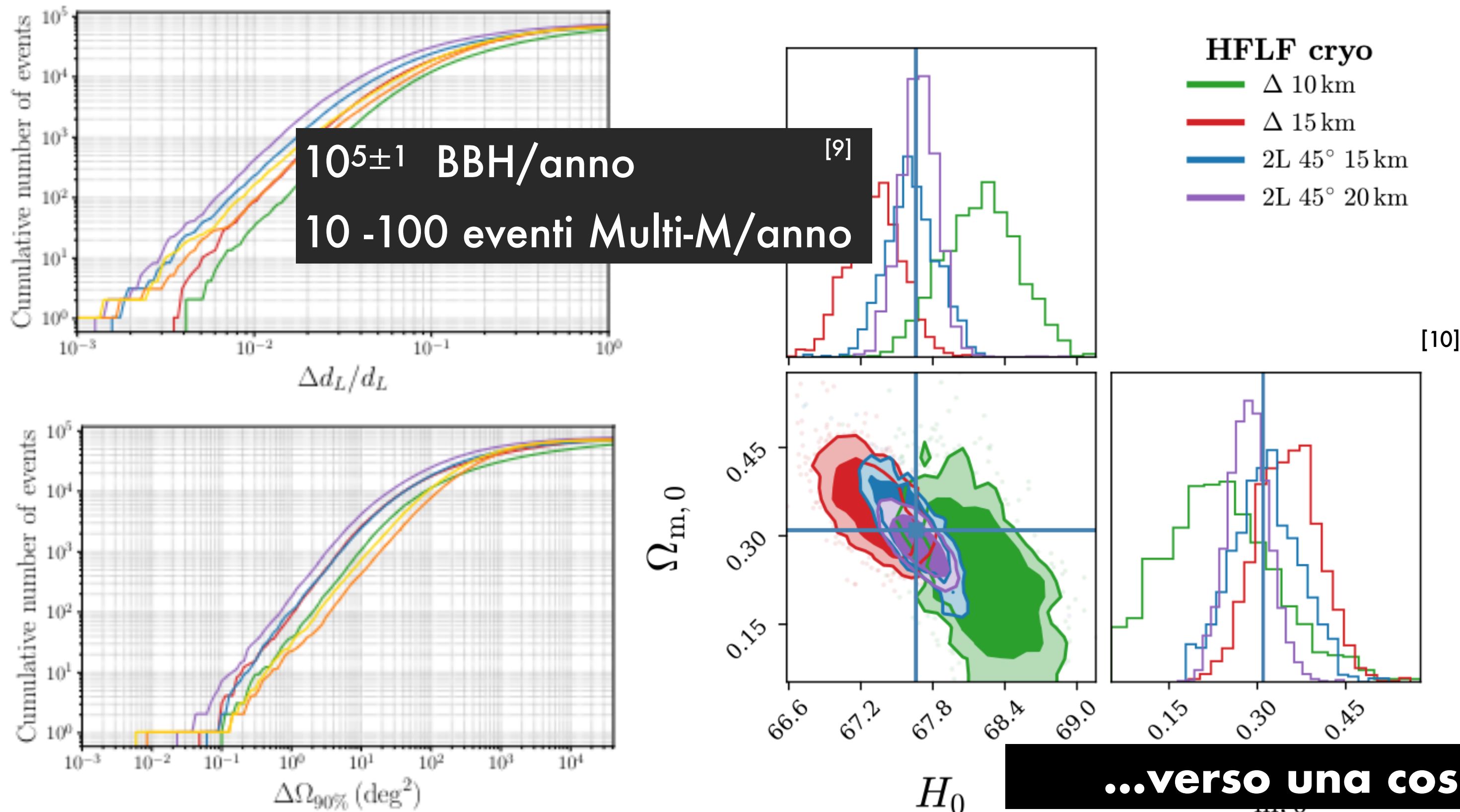


**[10]**

HFLF cryogenic		
Configuration	$\Delta H_0/H_0$	$\Delta \Omega_M/\Omega_M$
$\Delta$ -10km	0.009	0.832
$\Delta$ -15km	0.007	0.303
2L-15km-45°	0.006	0.370
2L-20km-45°	0.004	0.243

# Prospettive future

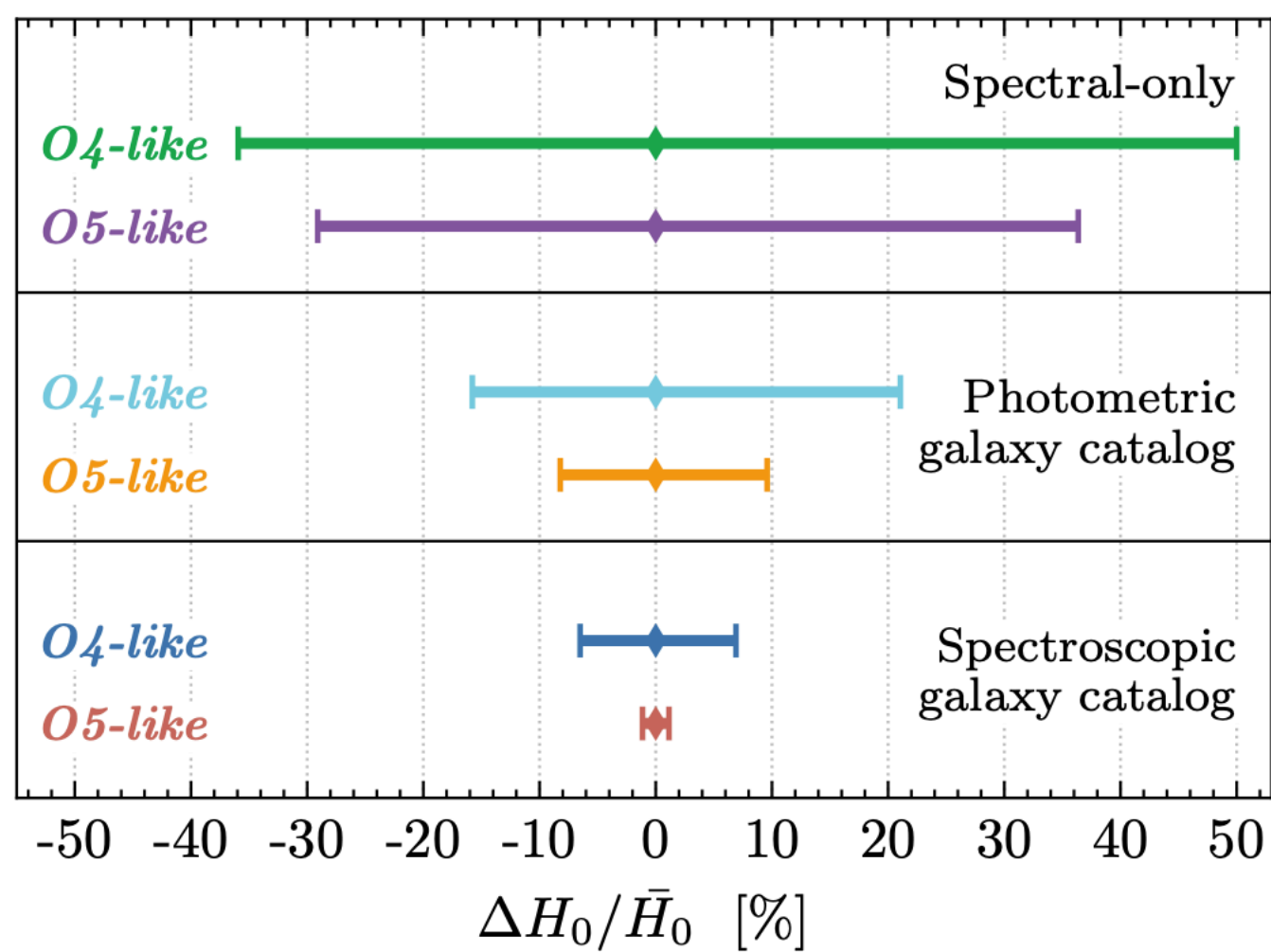
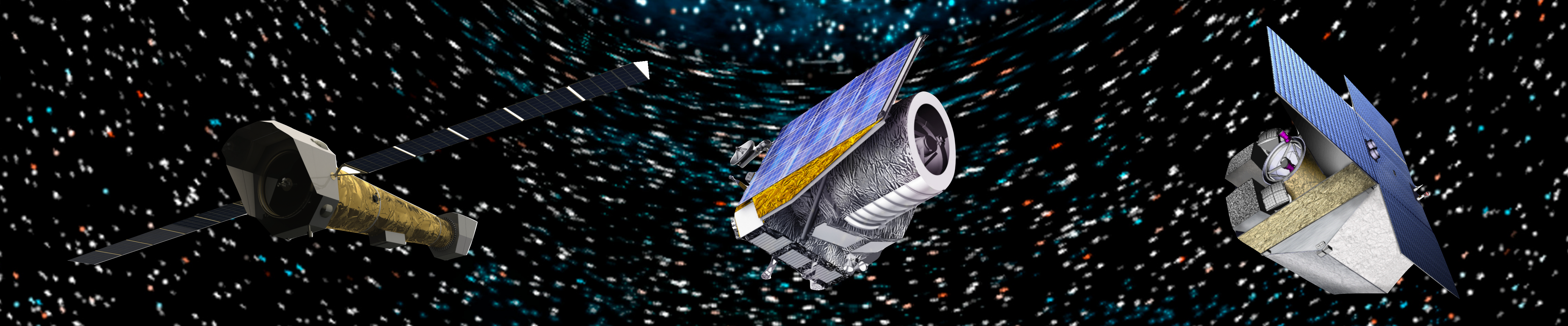
La **tensione di Hubble** sembra più facile da risolvere grazie ai futuri eventi dei run O4 e O5, per non parlare dei dati che gli interferometri di terza generazione, come l'Einstein Telescope (ET), potrebbero raccogliere.



HFLF cryogenic		
Configuration	$\Delta H_0/H_0$	$\Delta\Omega_M/\Omega_M$
$\Delta$ -10km	0.009	0.832
$\Delta$ -15km	0.007	0.303
2L-15km-45°	0.006	0.370
2L-20km-45°	0.004	0.243

[10]

**...verso una cosmologia GW più accurata e precisa**

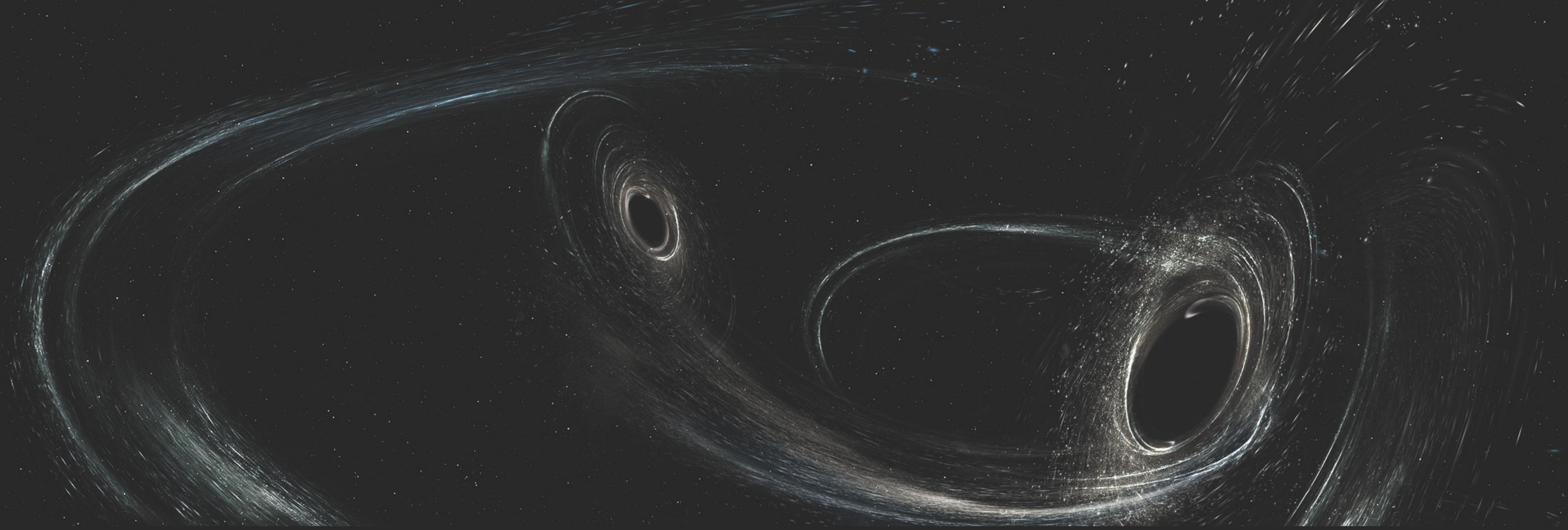


[27]

... ma resta necessario il supporto dai dati provenienti dal mondo EM.

L'aggiunta di altre galassie ai nostri cataloghi, sarà la principale forza trainante dietro i miglioramenti nella cosmologia GW. Strumenti come **Euclid**, **Theseus**, **Athena**, ci offriranno dati di **redshift spettroscopico** che sono fondamentali nel contesto cosmologico. [9,10, 27]

Naturalmente, questo comporta nuove importanti sfide: affinare i nostri metodi analitici e le pipeline di analisi, gestione dell'elevato numero di dati ed eventi, così come il crescente numero di galassie rilevate...



**Grazie per l'attenzione**

## Stato dell'arte

1. Einstein, A. (1915) On the General Theory of Relativity. Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.), 1915, 778-786.
2. Hill, C. D., & Nurowski, P. (2016). How the green light was given for gravitational wave search. *ArXiv*. /abs/1608.08673
3. Bondi, H. and Pirani, F.A.E. and Robinson, I., "Gravitational Waves in General Relativity. III. Exact Plane Waves", Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1959, 10.1098/rspa.1959.0124
4. Hulse, R.A. and Taylor, J.H., "Discovery of a pulsar in a binary system.", *apjl*, 1975, 10.1086/181708
5. The LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger" ,2016, 10.1103, PhysRevLett.116.061102
6. Friedman A., "Über die Krümmung des Raumes", Zeitschrift für Physik,1,377--386,1922,10.1007/BF01332580
7. Lemaitre G., "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques", Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, 47,49–59, January, 1927
8. Verde, L., Treu, T. & Riess, A.G. Tensions between the early and late Universe. *Nat Astron* **3**, 891–895 (2019).

## Il futuro della cosmologia con le Onde Gravitazionali

9. Branchesi M. et al. Science with the Einstein Telescope: a comparison of different designs, 2023, 110.1088/1475-7516/2023/07/068, 07, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics
10. Belgacem E. et al., "Cosmology and dark energy from joint gravitational wave-GRB observations" , [arxiv,1907.01487](#)
11. [EUCLID mission web page](#)
12. THESEUS mission [webpage](#)
13. ATHENA mission [webpage](#)

## Cosmologia con le Onde Gravitazionali

14. B. F. Schutz, "Determining the hubble constant from gravitational wave observations," Letters to Nature, 1986.
15. The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration, 'A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant', Nature, 7678, 85–88, 551, 2017
16. Gray R. et al. , 'Cosmological inference using gravitational wave standard sirens: A mock data analysis'}, Physical Review D, 2020, June, APS, 101, 12, 10.1103/physrevd.101.122001
17. The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration, The 1M2H Collaboration, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration et al. Nature 551, 85–88 (2017). Riess, Adam G. et al., A 2.4% DETERMINATION OF THE LOCAL VALUE OF THE HUBBLE CONSTANT, The Astrophysical Journal, 1, 826, 1538-4357, <http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/56>, Jul
18. Brozzetti M.L. et al., GLADEnet: A progressive web app for multi-messenger cosmology and electromagnetic follow-ups of gravitational-wave sources, in production on A&A, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348073>
19. Abbot et. Al, "A gravitational-wave standard siren measurement of the hubble constant," Nature, vol. 551, no. 7678, pp. 85–88, 2017
20. M. Soares-Santos, et al., THE ELECTROMAGNETIC COUNTERPART OF THE BINARY NEUTRON STAR MERGER LIGO/VIRGO GW170817. I. DISCOVERY OF THE OPTICAL COUNTERPART USING THE DARK ENERGY CAMERA , The Astrophysical Journal, 1710.05459v1, 2017
21. W. Del Pozzo, "Inference of cosmological parameters from gravitational waves: Applications to second generation interferometers," Phys. Rev. D vol. 86, p. 043011, Aug 2012.
22. R. Gray, et al., "Cosmological inference using gravitational wave standard sirens: A mock data analysis," Phys. Rev. D, vol. 101, no. 12, p. 122001, jun 2020
23. H.-Y. Chen, M. Fishbach, and D. E. Holz, "A two per cent hubble constant measurement from standard sirens within five years," Nature, vol. 562, no. 7728, pp. 545–547, Oct. 2018.
24. "Joint cosmological and gravitational-wave population inference using dark sirens and galaxy catalogues", Rachel Gray et al. ,2023, 2308.02281
25. GLADE+: An Extended Galaxy Catalogue for Multimessenger Searches with Advanced Gravitational-wave Detectors G. Dály et. Al
26. Mastrogiovanni S., et al. "Joint population and cosmological properties inference with gravitational waves standard sirens and galaxy surveys", 2023, 10.1103, PhysRevD.108.042002
27. Borghi N. Et al., "Cosmology and Astrophysics with Standard Sirens and Galaxy Catalogs in View of Future Gravitational Wave Observations ", 2023, 10.48550, arXiv.2312.05302
28. Pierra, Grègoire and Mastrogiovanni, et al. "A Study of Systematics on the Cosmological Inference of the Hubble Constant from Gravitational Wave Standard Sirens", 2312.11627", 2023
29. Mastrogiovanni et al. Cosmology with Gravitational Waves: A Review 2022 <https://doi.org/10.1002/andp.202200180>

## antenna pattern

Un dato rivelatore, nonostante sia in ascolto rispetto a tutto il cielo, è notoriamente sensibile solo ad uno dei due stati di polarizzazione.

Può determinare solo una componente tra le due: l'antenna pattern.

Quest'ultima non dipenderà dalla cosmologia o dalla distanza o dalle masse coinvolte, né dal rumore ... ma dipenderà dal tipo di detector, dal numero di interferometri a disposizione, dall'orientazione di questi (altra differenza con il mondo EM) -

$$h(t) = h_+(t)F_+ (1 + \cos^2 \theta) + h_\times(t)F_\times (2 \cos \theta) .$$

Quindi la probabilità di una detection dipenderà dalla localizzazione nel cielo rispetto al rivelatore.

La sensibilità è in funzione di due parametri: proprietà del detector e proprietà della sorgente.

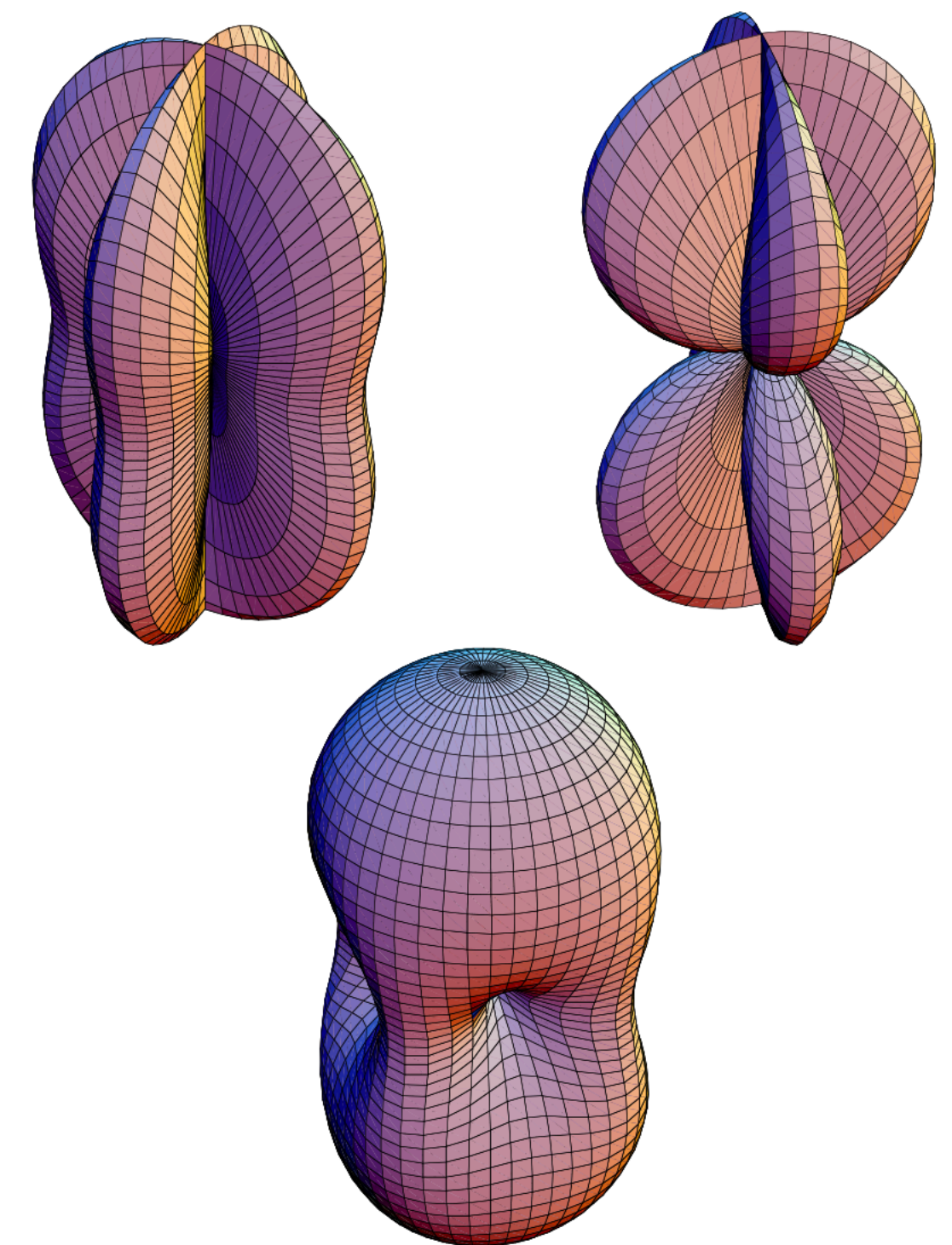
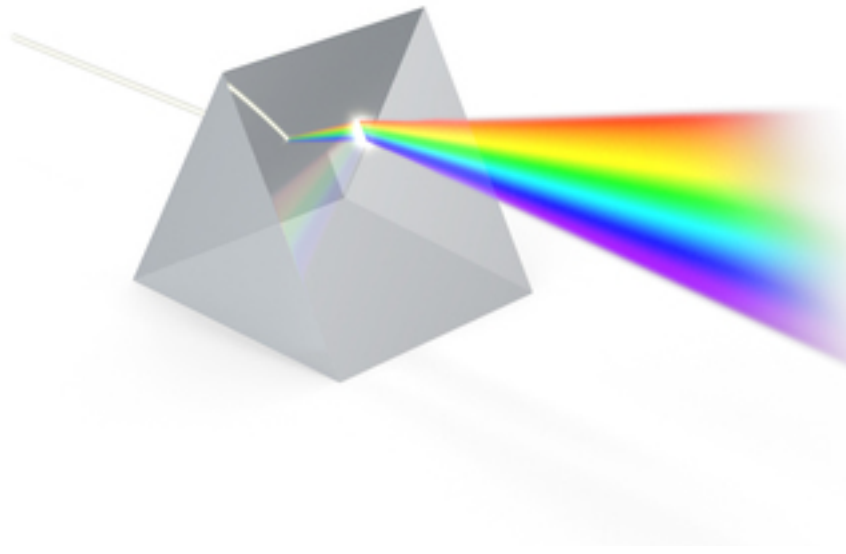


Figure 3.5: Detector Antenna Patterns  
The antenna patterns for interferometer detectors for plus (top left), cross (top right), and combined (bottom) polarizations with polarization angle  $\psi = 0$ . For this figure, the detectors arms are oriented such that the first node in the bottom plot is found at  $45^\circ$  between the two arms of the detector and subsequent nodes occur every  $90^\circ$  as you rotate around the vertical axis.



# onde a confronto



Sono oscillazioni dei campi elettrici e magnetici che si propagano attraverso lo spaziotempo

Sono quasi sempre il risultato della sovrapposizione incoerente dei contributi provenienti da milioni di elettroni, atomi o molecole.

Soffrono di fenomeni di assorbimento, deviazione e dispersione ad opera del materiale che incontrano nel loro percorso.

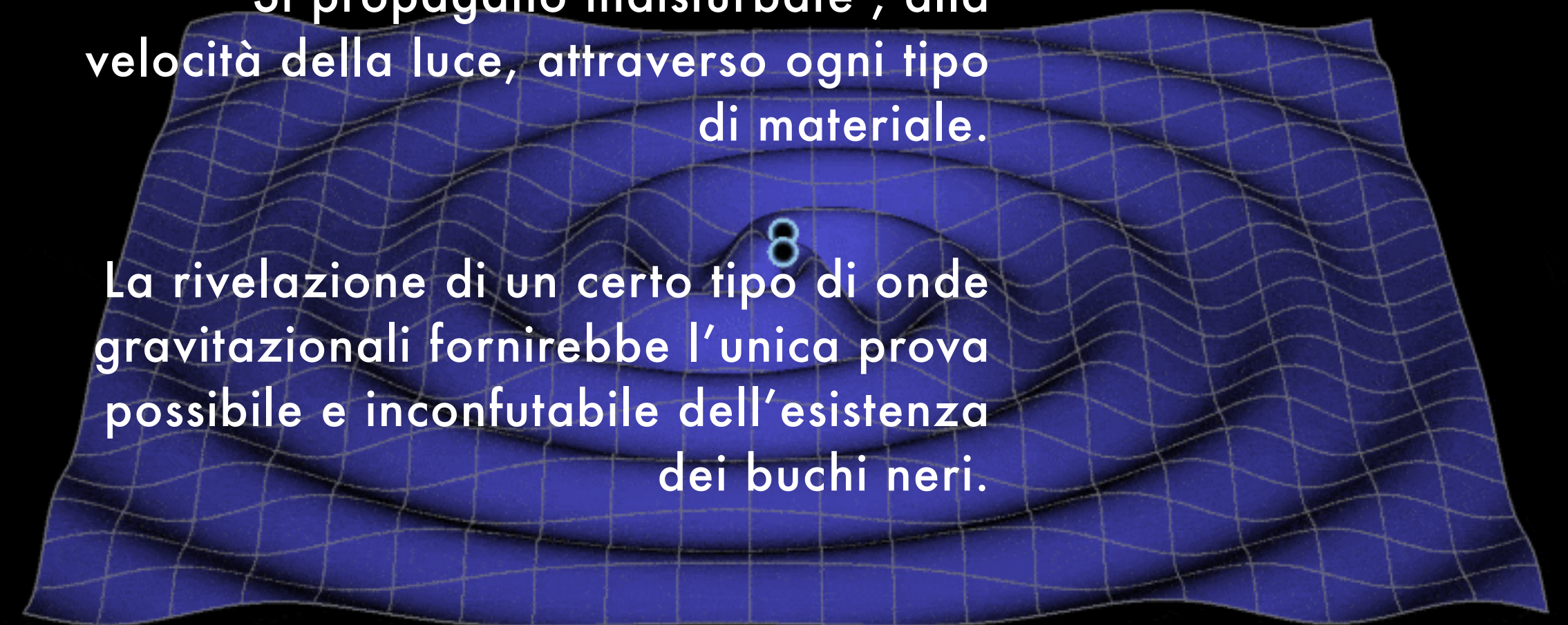
Non possono contribuire a verificare l'esistenza dei buchi neri, in prossimità dei quali rimarrebbero intrappolate a causa del redshift gravitazionale.

Sono oscillazioni dello spaziotempo stesso.

Sono quasi sempre il risultato della sovrapposizione incoerente dei contributi provenienti da milioni di elettroni, atomi o molecole.

Si propagano indisturbate, alla velocità della luce, attraverso ogni tipo di materiale.

La rivelazione di un certo tipo di onde gravitazionali fornirebbe l'unica prova possibile e inconfutabile dell'esistenza dei buchi neri.



# virtual observatory

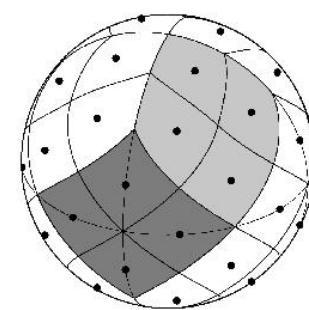
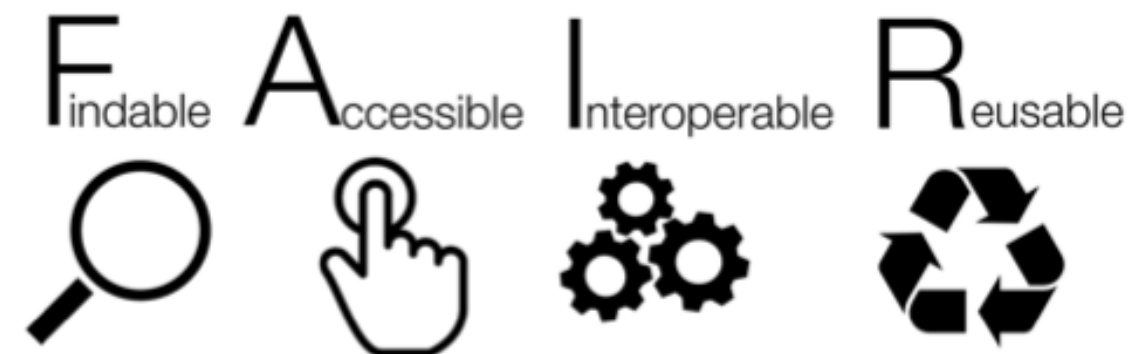
The International Virtual Observatory Alliance (**IVOA**) was born in June 2002 .



It is composed of 22 international members to

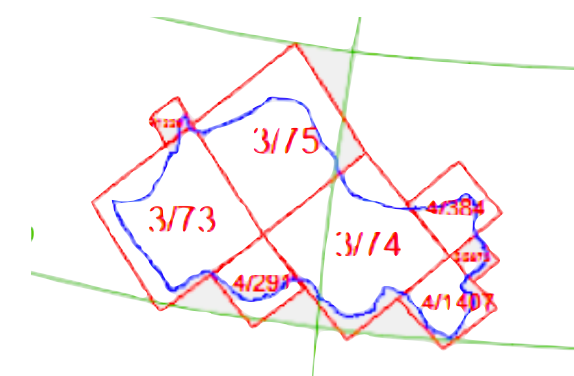
“facilitate the international coordination and collaboration necessary for the *development and deployment of the **tools, systems and organisational structures** necessary to enable the international utilisation of astronomical archives as an integrated and interoperating Virtual Observatory (VO)*”

→ standards that are compliant with



HEALPix

Data Analysis, Simulations and  
Visualisation on the Sphere



Multi-Order Coverage  
maps (**MOC**)



> 20 000 catalogues