



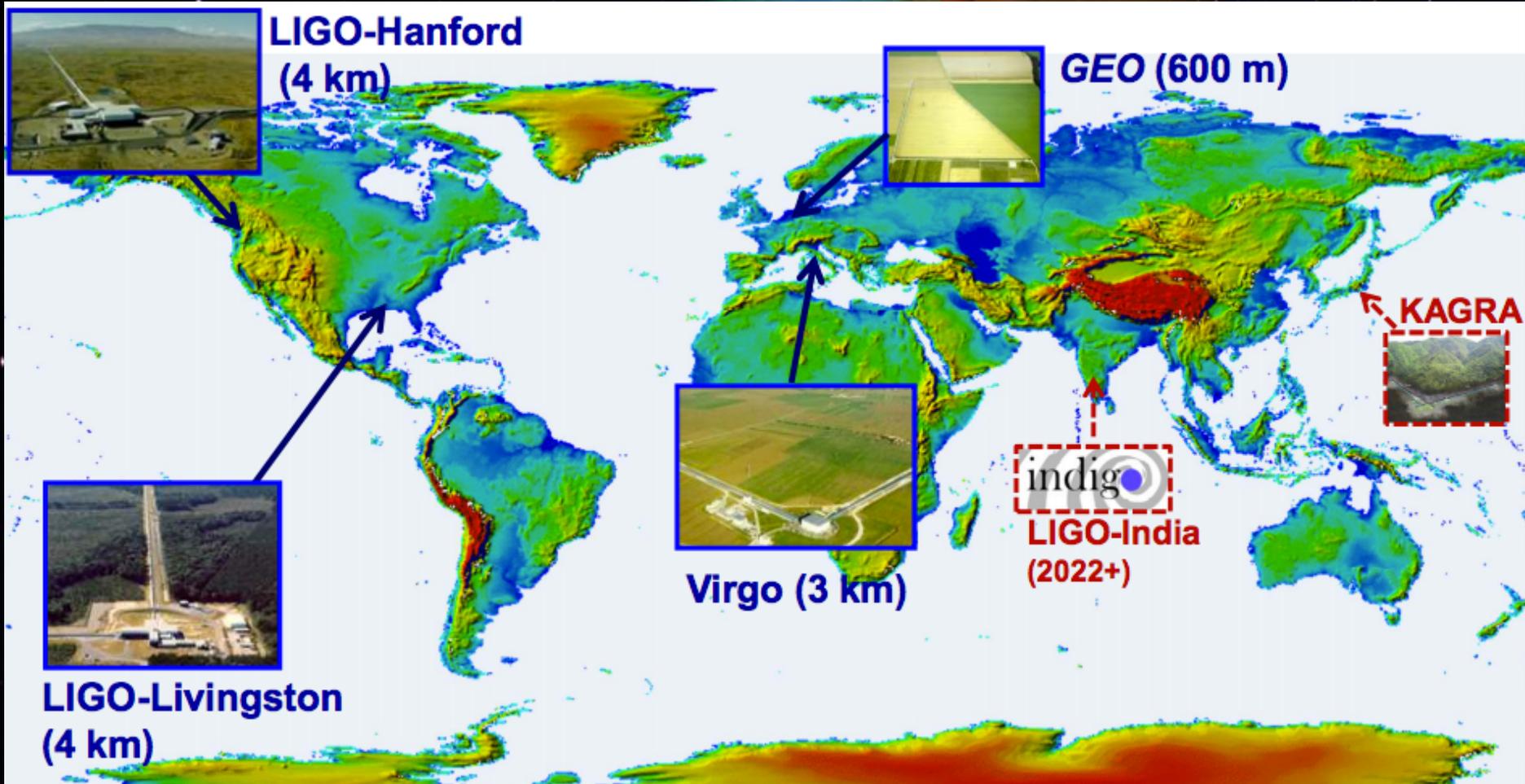
# Osservazioni nello spettro elettromagnetico delle sorgenti di onde gravitazionali ad alta frequenza e il caso di GW150914

*Università di Urbino – EM follow-up team*  
Giulia Stratta, Marica Branchesi, Giuseppe Greco



Genova, IFAE, 30 marzo – 1 aprile 2016

# I rivelatori di onde gravitazionali alle alte frequenze (10 – 1000 Hz)



# Sorgenti di onde gravitazionali

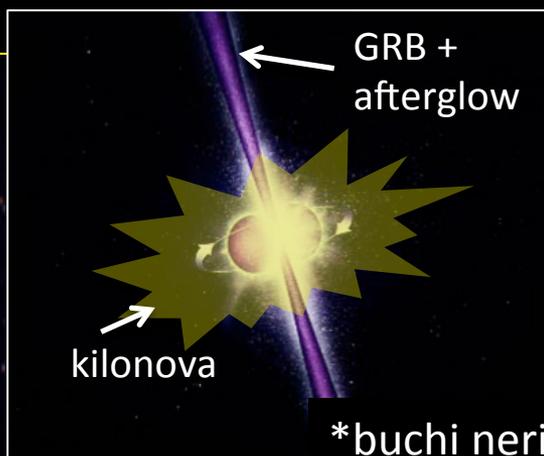


(from A. Weinstein NYU lecture, 2015)

# Controparte elettromagnetica

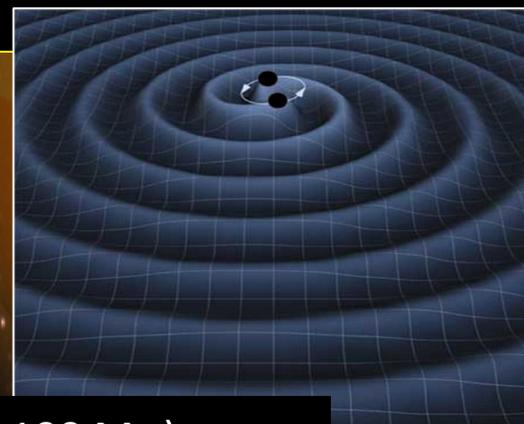
## Due stelle di neutroni o una stella di neutroni e un buco nero\*

- Numerose evidenze indirette associano questi sistemi con i progenitori degli **“Short”  $\gamma$ -ray bursts** (GRB,  $< 2$  s) + afterglow in X/VIS/radio ( $< 1$  giorno) (e.g. Eichler et al. 1989)
- Alcuni modelli prevedono una emissione termica, in banda visibile, 1-10 giorni dopo il trigger, non collimata,  $\rightarrow$  **kilonova** (e.g. Lattimer & Schramm 1976)



## Due buchi neri\*

- Non ci si aspetta emissione e.m. da questi sistemi
- Possibili eccezioni sono state esaminate e riguardano la presenza di materiale residuo dalla formazione dei due buchi neri ( e.g. Perna et al. 2016, Loeb 2016)

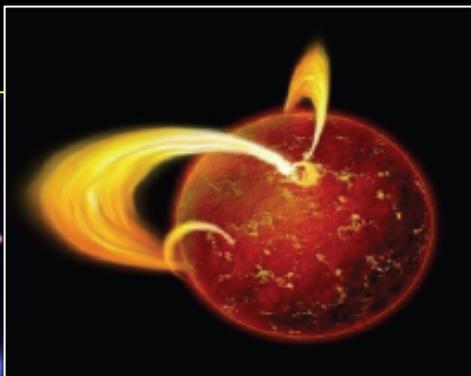


\*buchi neri “di massa stellare” (i.e.  $< 100 M_{\odot}$ )

# Controparte elettromagnetica

## Stelle di neutroni isolate

- Alle stelle di neutroni è attribuita l'origine di burst (0.1-1s, rari casi 3-4 min) osservati nella banda 40-50 keV -> **Soft Gamma Repeaters, SGR** → Lx  $\sim 10^{42-47}$  erg/s
- Effetti di attività sismiche di NS con elevati campi magnetici ( $B > 10^{14} - 10^{15}$  G, "magnetar") da cui ci si aspetta anche emissione di onde gravitazionali



## Supernovae

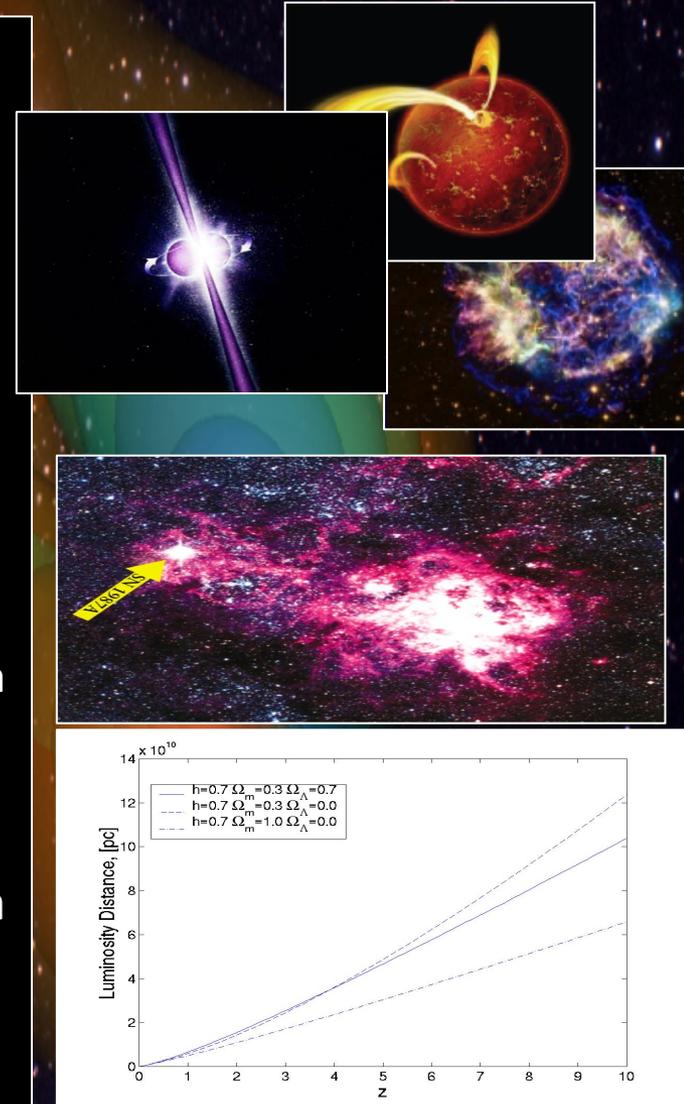
- Collasso gravitazionale di stelle di grande massa ( $> 8-10 M_{\odot}$ ): **SN II, SN Ib/c**
- Emissione in X/UV dopo ~ore dall'esplosione (**Shock Breakout**) e nel visibile dopo decine di giorni
- Emissione in gamma (0.1-100 MeV) → **"long" GRB + afterglow** per una sottoclasse di queste SNe (le più energetiche)



# Astronomia “multimessaggera”

Alcuni esempi da osservazioni simultanee di onde gravitazionali ed elettromagnetiche :

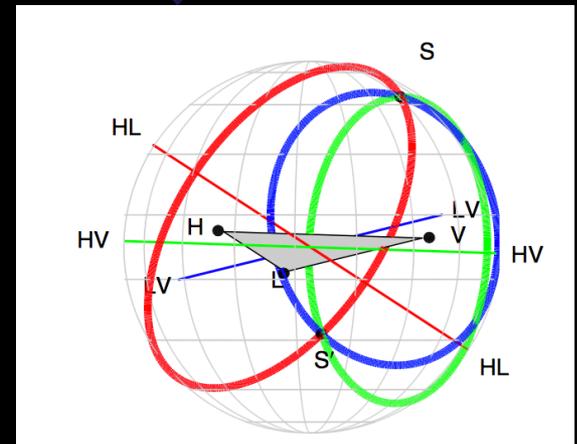
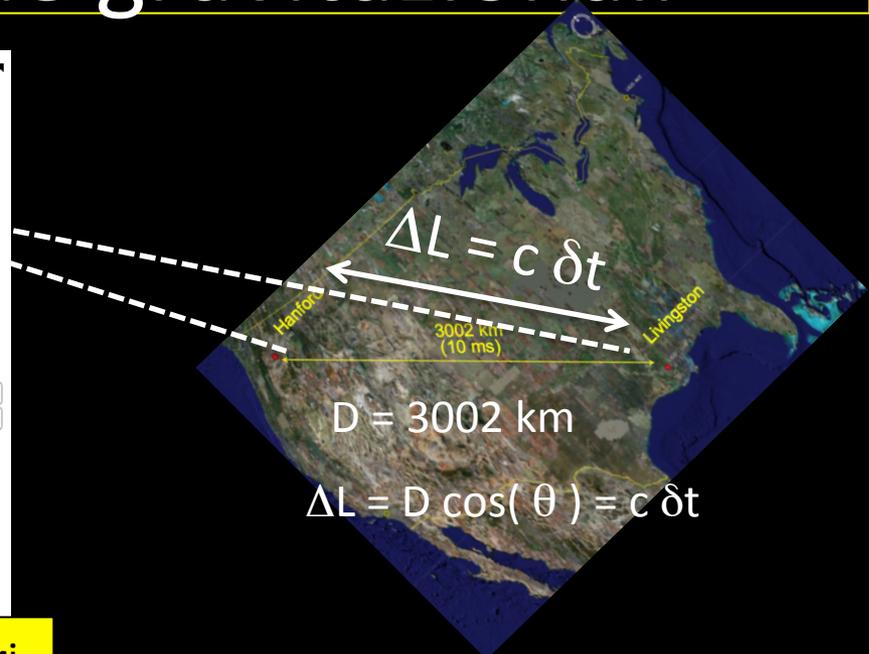
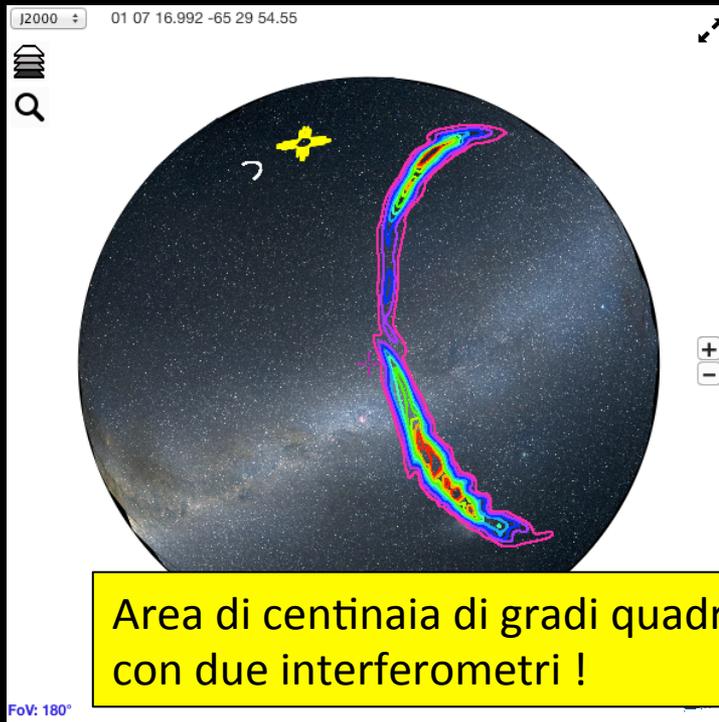
- maggiore conoscenza della fisica e della natura delle sorgenti, ad es:
  - progenitore dei GRB “corti”
  - origine dei Soft Gamma Repeaters e conferma dell’esistenza delle magnetar
- La controparte e.m. permette di individuare la galassia ospite da cui:
  - caratteristiche del mezzo interstellare -> storia della formazione della sorgente, ecc.
  - misura del redshift cosmologico
- Misure indipendenti del redshift cosmologico dalla controparte e.m. e della distanza dalle onde gravitazionali → vincolo sui parametri cosmologici





Come osservare le  
sorgenti di onde  
gravitazionali?

# La localizzazione nel cielo con i rivelatori di onde gravitazionali



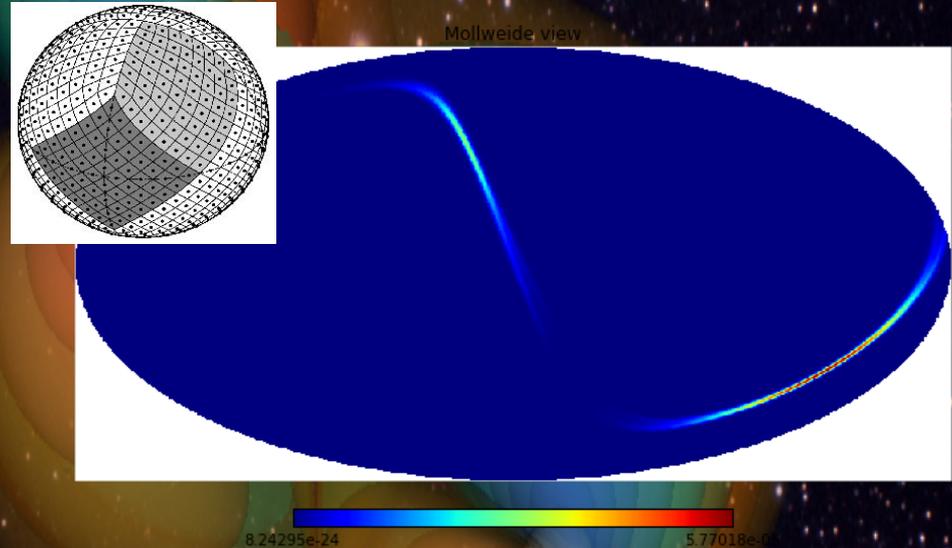
La localizzazione delle sorgenti di onde gravitazionali nel cielo, utilizza il metodo della triangolazione

→ occorrono  $\geq 2$  rivelatori

La localizzazione si traduce in “distribuzione di probabilità” nel cielo

# Le “mappe di probabilità”

- La distribuzione di probabilità viene codificata in una tassellazione della sfera celeste (Healpix) in pixel di uguali dimensioni (0.4 deg)
- Ad ogni pixel, è attribuito un valore di probabilità
- La distribuzione di probabilità è ottenuta al momento attraverso 4 differenti metodi di analisi dei dati, con livelli crescenti di assunzioni di base (e.g. forma d’onda) e tempi computazionali



**Table 1.** Description of Sky Maps

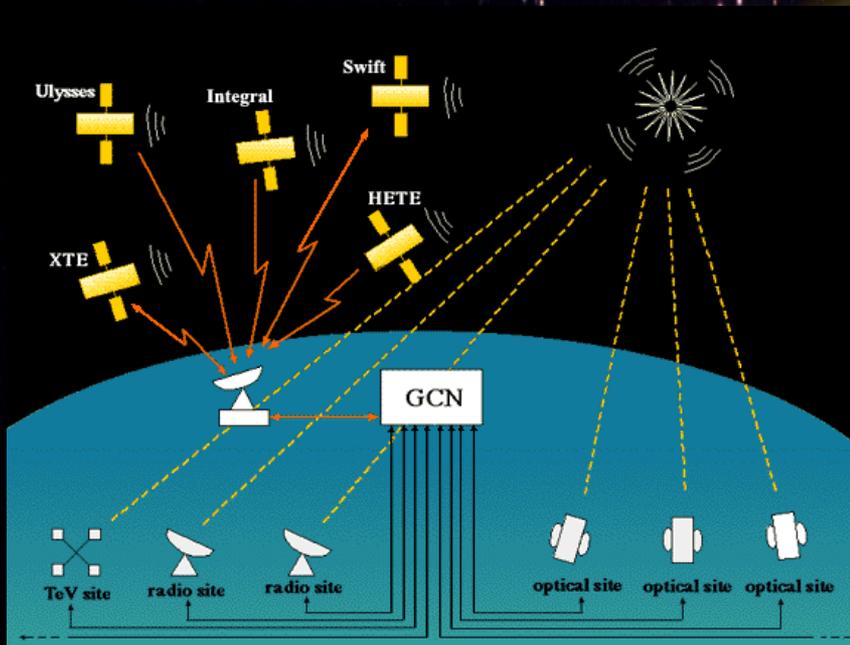
	Area <sup>a</sup>			$\theta_{HL}$ <sup>b</sup>	Comparison <sup>c</sup>			
	10%	50%	90%		cWB	LIB	BSTR	LALInf
cWB	10	100	310	$43^{+2}_{-2}$	—	190	180	230
LIB	30	210	750	$45^{+6}_{-5}$	0.55	—	220	270
BSTR	10	90	400	$45^{+2}_{-2}$	0.64	0.56	—	350
LALInf	20	150	620	$46^{+3}_{-3}$	0.59	0.55	0.90	—

<sup>a</sup> Area of credible level (deg<sup>2</sup>). Note that the LALInference area is consistent with but not equal to the number reported in [Abbott et al. \(2016e\)](#) due to minor differences in sampling and interpolation.

<sup>b</sup> Mean and 10% and 90% percentiles of polar angle in degrees.

<sup>c</sup> Fidelity (below diagonal) and the intersection in deg<sup>2</sup> of the 90% confidence regions (above diagonal).

# La procedura di “allerta”



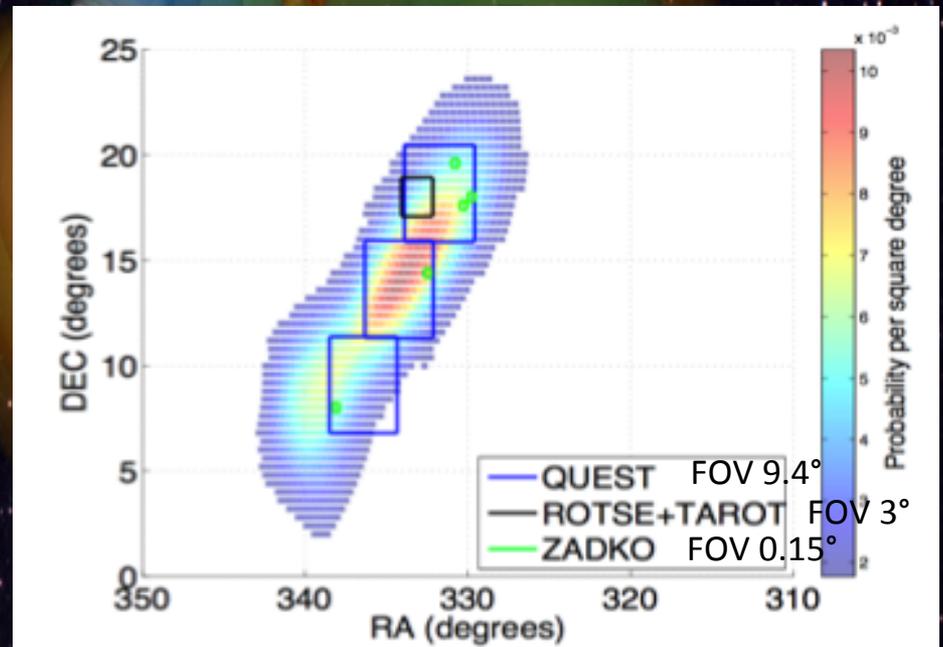
“Gamma-ray Coordinates Network”

- Le mappe di probabilità vengono trasmesse agli astronomi attraverso il sistema di circolari GCN (sistema usato per i GRB) entro pochi minuti dall’approvazione di un evento di onde gravitazionali
- Ogni gruppo di astronomi una volta ottenuta la distribuzione di probabilità, pianifica autonomamente le osservazioni, con l’obbligo di comunicare le coordinate di puntamento entro 12 ore agli altri gruppi di astronomi

# Strategie osservative

Per osservare le grandi aree di cielo individuate:

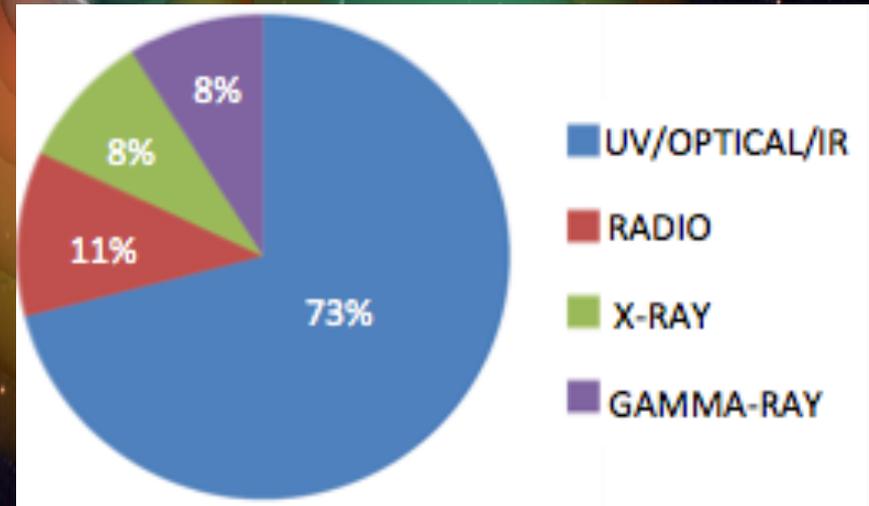
- Telescopi a grande campo di vista ( $1-100 \text{ deg}^2$ ):
  - monitoraggio dell'area di cielo individuata dai rivelatori di onde gr.  $\rightarrow$  output: migliaia di possibili candidati transienti
- Telescopi a piccolo campo ( $<1 \text{ deg}^2$ ):
  - puntamento delle singole galassie contenute nelle regioni di cielo più probabili
  - caratterizzazione dei transienti trovati nelle osservazioni a grande campo



Mapa di probabilità ed osservazioni del trigger G20190 della campagna osservativa di "initial" LIGO/Virgo nel 2010 (Aasi et al. 2014 ApJSS 211, 7)

# I telescopi per la ricerca della controparte e.m.

- Ad oggi, 74 gruppi di astronomi hanno firmato un MoU con la collaborazione LIGO/Virgo per ricevere in tempo reale le prime informazioni dagli eventi di onde gravitazionali identificati
- 160 telescopi in grado di coprire tutto lo spettro elettromagnetico
- Dopo i primi quattro eventi di onde gravitazionali pubblicati, l'allerta dei segnali saranno pubblici.



<http://www.ligo.org/scientists/GWEMalerts.php>

The background of the slide is a dark field of stars. Overlaid on this is a large, irregularly shaped region representing the localization area for the gravitational wave event GW150914. This region is filled with concentric, overlapping contours of color, ranging from dark blue in the center to yellow and orange at the edges, indicating the probability density of the source location. A black rectangular box with a thin yellow border is centered on the slide, containing the title text.

# Il caso di GW 150914

# GW 150914

GW 150914 è stato annunciato agli astronomi il 16 Settembre 2015  
(2 giorni dopo la scoperta) senza specifiche sulle masse

Dear colleagues,

We would like to bring to your attention a trigger identified by the online Burst analysis during the ongoing Engineering Run 8 (ER8). Normally, we would send this in the form of a private GCN Circular, but the LIGO/Virgo GCN Circular list is not ready yet.

The LIGO Scientific Collaboration and Virgo report that the cWB unmodeled burst analysis identified candidate G184098 during real-time processing of data from LIGO Hanford Observatory (H1) and LIGO Livingston Observatory (L1) at 2015-09-14 09:50:45 UTC (GPS time: 1126259462.3910). Alerts were not sent in real-time because the candidate occurred in ER8 data; however, we have now sent GCN notices through our normal channel.

G184098 is an unvetted event of interest, as the false alarm rate (FAR) determined by the online analysis would have passed our stated alert threshold of  $\sim 1/\text{month}$ . The event's properties can be found at this URL:

<https://gracedb.ligo.org/events/G184098>

There are important caveats associated to this event:

- \* It occurred before the initiation of the planned observing run;
- \* The detectors were not in their final O1 configuration;
- \* Calibration is not finalized.

In particular, calibration uncertainties may imply systematic errors in sky localization.

# GW 150914 su GraceDB

<https://gradb.ligo.org/events/G184098>

## GraceDB – Gravitational Wave Candidate Event Database

HOME SEARCH CREATE REPORTS RSS LATEST OPTIONS DOCUMENTATION

AUTHENTICATED AS: GIULIA STRATTA

### Basic Info

UID	Labels	Group	Pipeline	Search	Instruments	Event Time <input type="button" value="UTC"/>	FAR (Hz)	Links	Submitted <input type="button" value="UTC"/>
G184098	<a href="#">H1OK</a> <a href="#">L1OK</a>	Burst	CWB	AllSky	H1,L1	2015-09-14 09:50:45 UTC	1.178e-08	<a href="#">Data</a>	2015-09-14 09:53:51 UTC

### Analysis-Specific Attributes

start_time	1126259461	central_freq	123.8285	false_alarm_rate	
start_time_ns	750000000	bandwidth	51.8386	ligo_axis_ra	130.9219
duration	2.477e-02	amplitude	1.410e+01	ligo_axis_dec	4.4808
peak_time	None	snr	23.4521	ligo_angle	None
peak_time_ns	None	confidence		ligo_angle_sig	None

Sep 14, 2015 9:02:34 AM

LIB at CIT

LIB FITS sky map [LIB\\_skymap.fits.gz](#)

Sep 14, 2015 5:07:47 AM

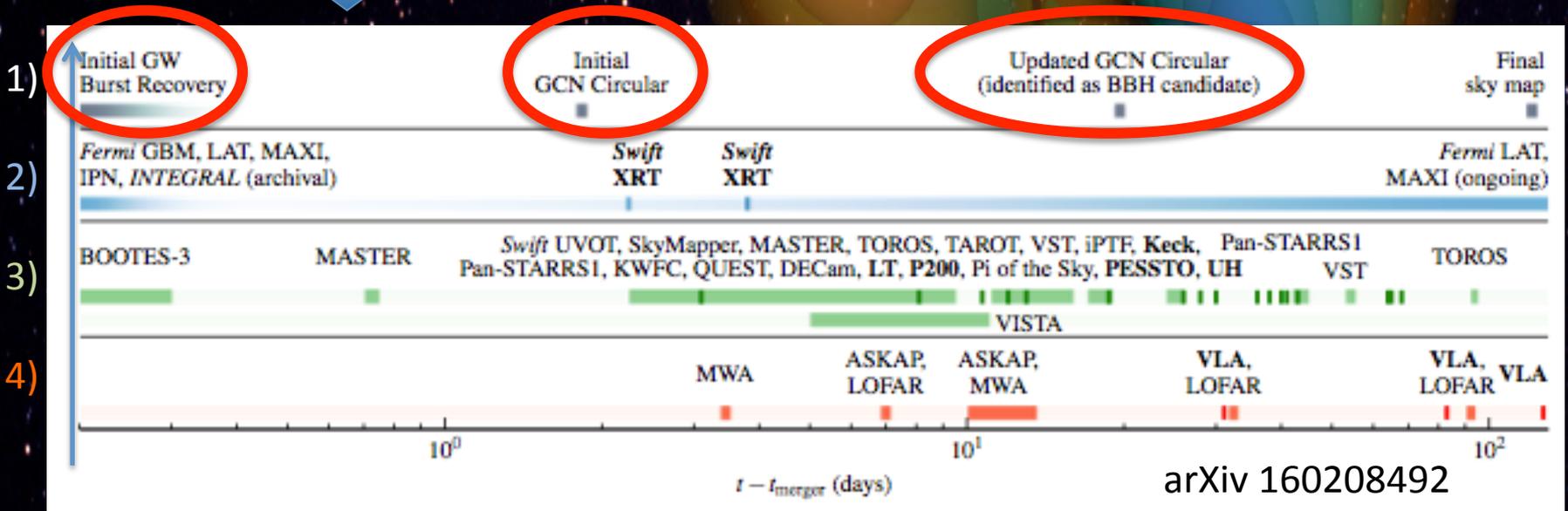
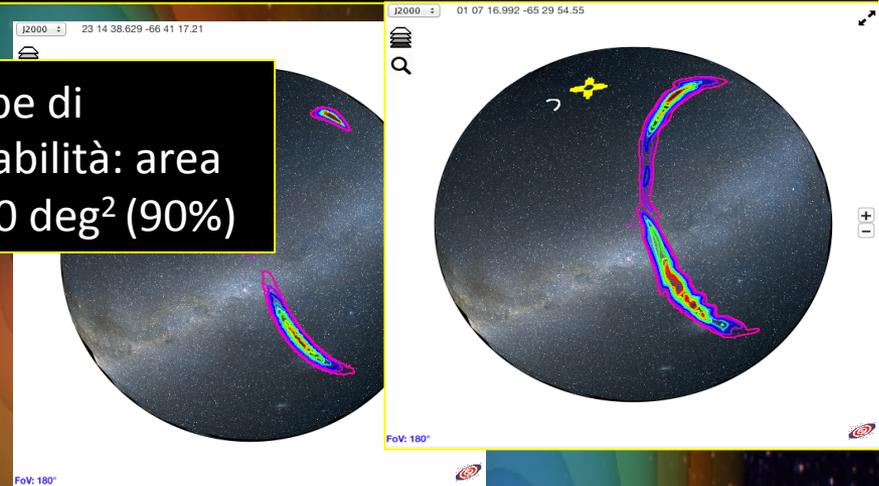
Cwb Analysis

cWB skymap fit [skyprobcc\\_cWB.fits](#)

# GW150914: le osservazioni

- 1) Annunci dall'analisi del segnale di onde gravitazionali
- 2) Osservazioni alle alte energie
- 3) Osservazioni in banda vis
- 4) **Osservazioni in banda radio**

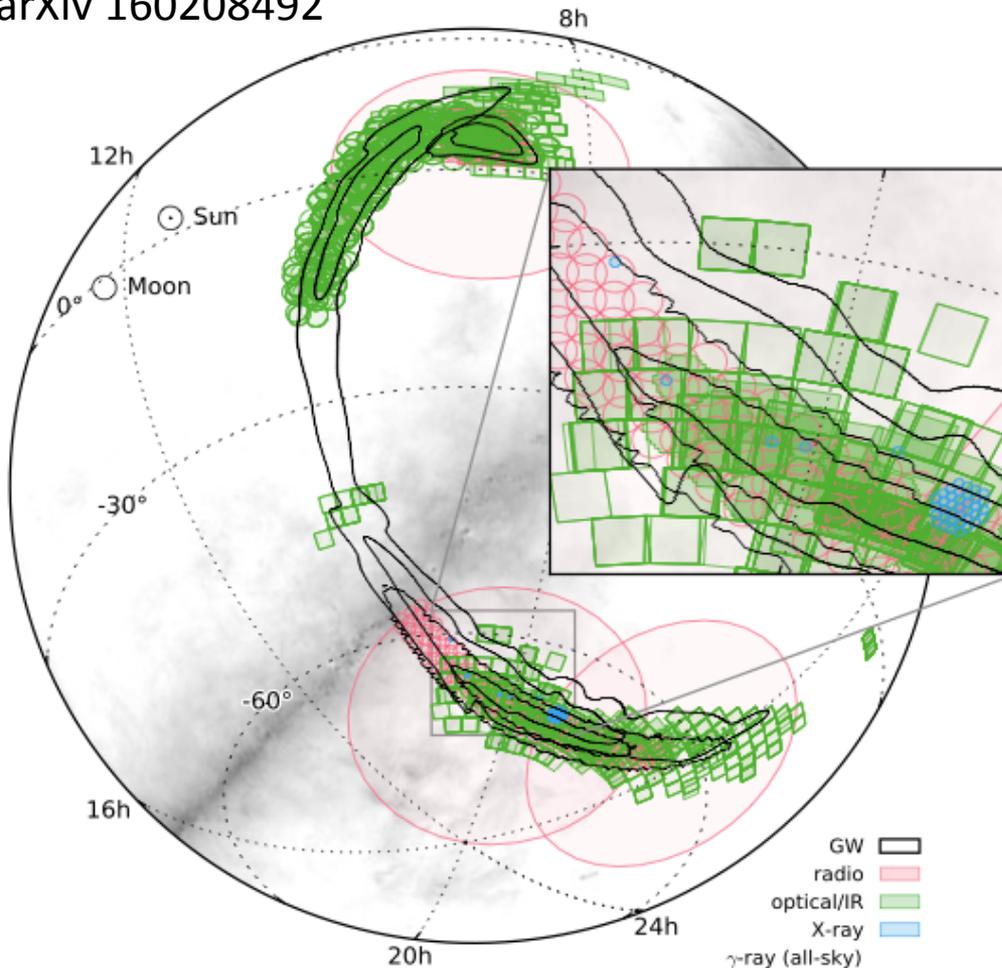
Mappe di probabilità: area di 750 deg<sup>2</sup> (90%)



arXiv 160208492

# GW150914: le osservazioni

arXiv 160208492



Copertura della regione di cielo individuata, in ~100 giorni

Telescopi utilizzati:

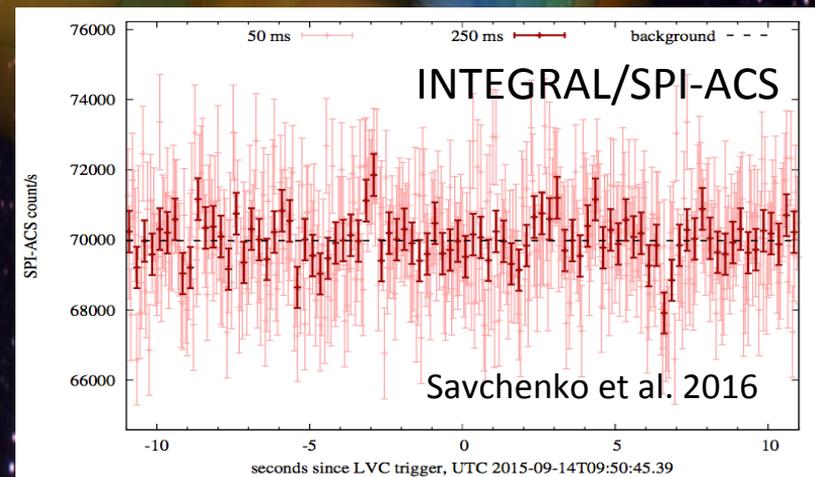
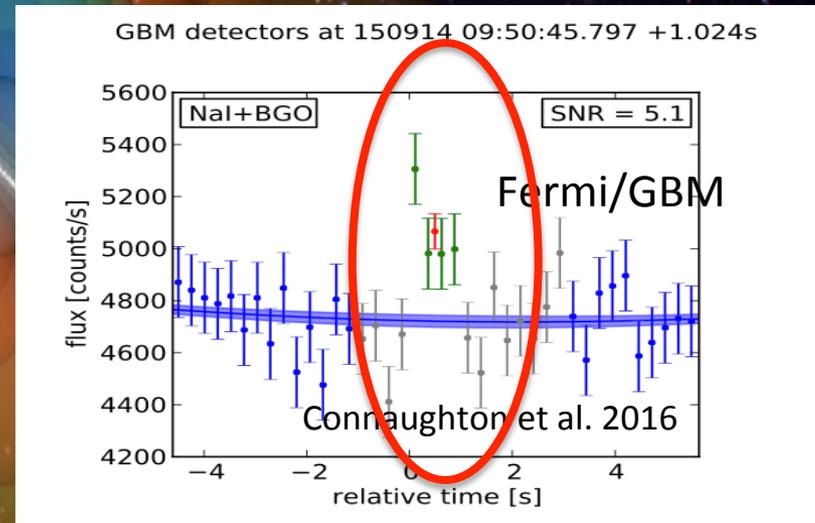
- 20 nel VIS
- 1 nel NIR
- 4 nel radio
- 7 nei raggi X e gamma

30 sorgenti transienti potenzialmente interessanti → classificazione spettrale:

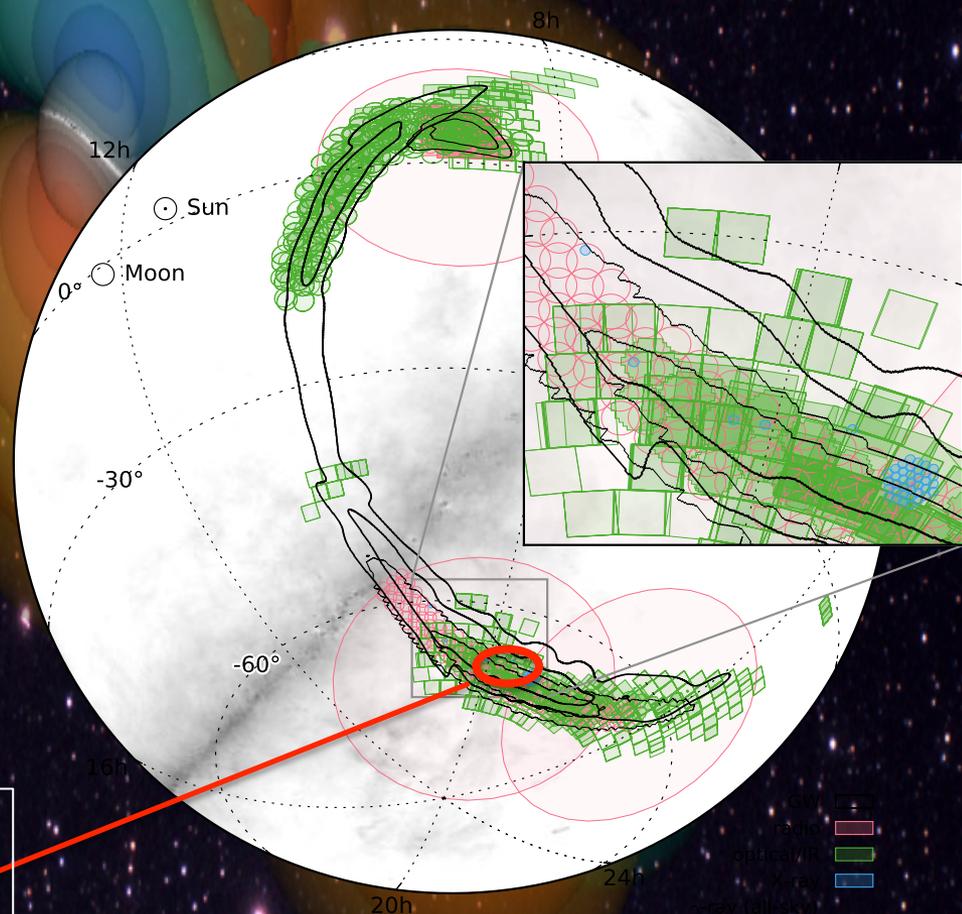
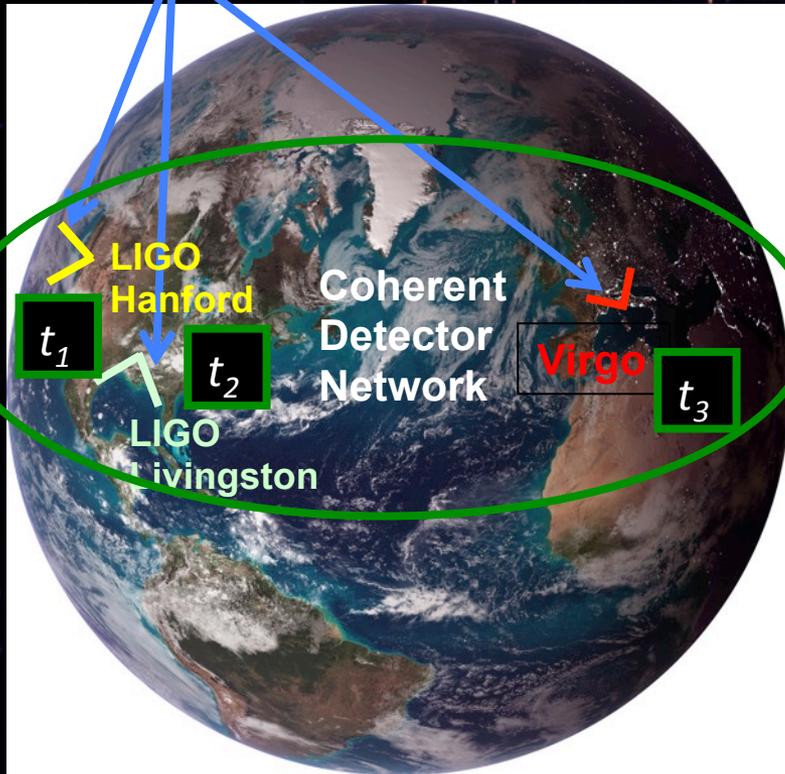
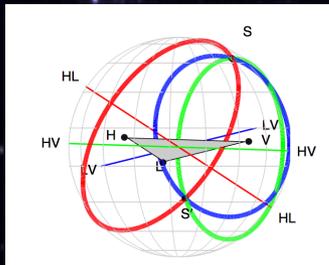
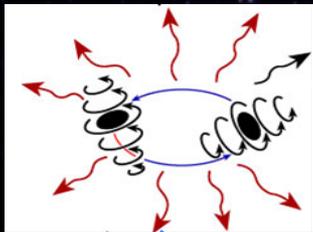
- Nuclei Galattici Attivi
- Novae
- Supernovae

# Una controparte alle alte energie?

- Fermi/Gamma Ray Burst Monitor ha osservato un debole segnale ad energie  $>50$  keV di durata  $\sim 1$  s, a 0.4 s dall'evento
- Non confermato da:
  - INTEGRAL/SPI-ACS nella banda 75 keV-2 MeV (Savchenko et al. 2016)
  - MAXI/GSC (2-20 keV) (Serino et al. 2016, GCN#19013)
  - Konus/Wind, Odyssey HEND, RHESSI (IPN)
- Nessun candidato dalle osservazioni simultanee di IceCube e ANTARES (Adrian-Martinez et al. 2016)



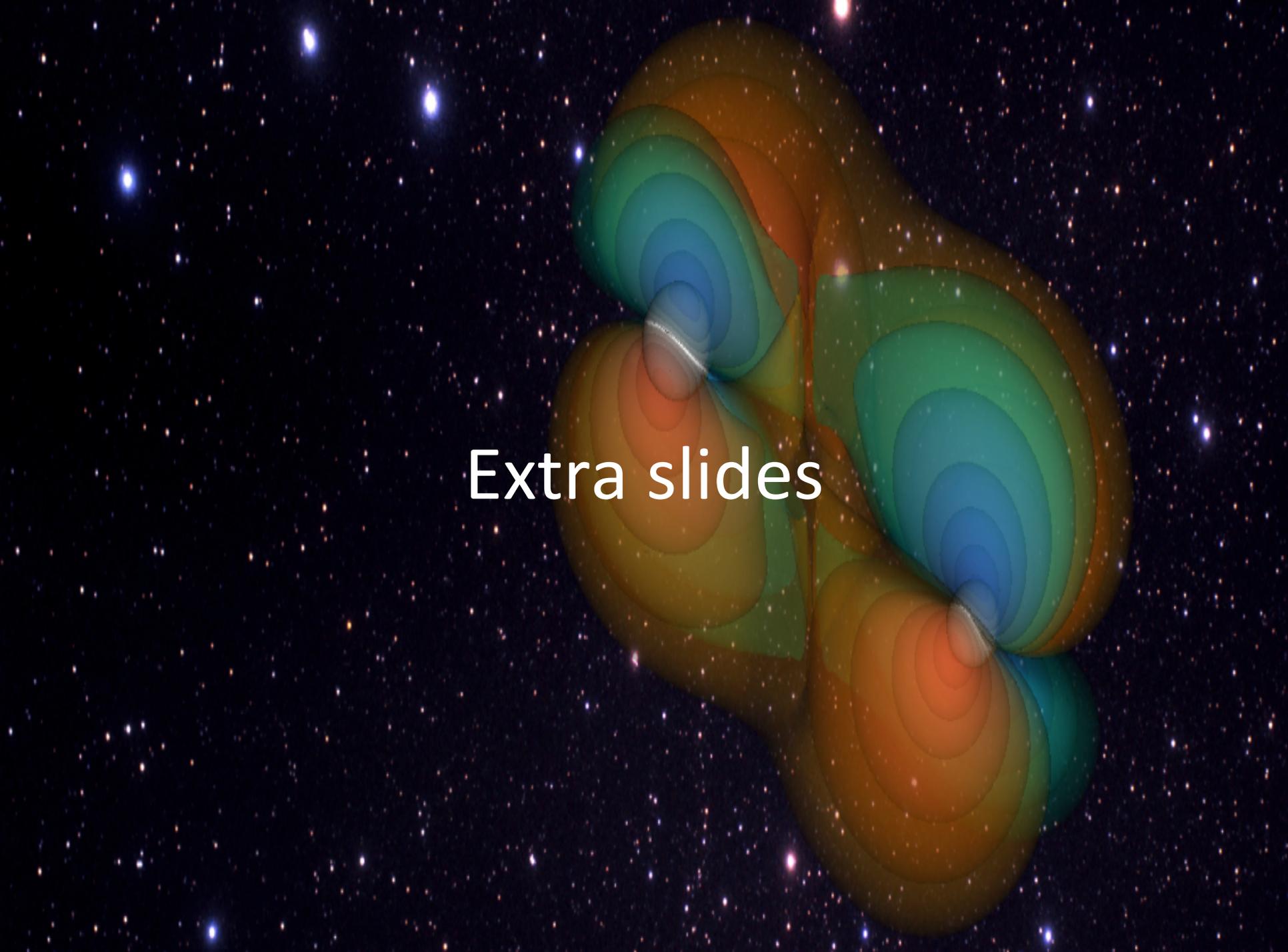
# Con Virgo...



Localizzazione di GW150914 con Virgo sarebbe stata di **alcune decine di gradi quadrati**

# Conclusioni

- Dalle sorgenti transienti di onde gravitazionali ad alte frequenze ci aspettiamo emissioni simultanee nello spettro elettromagnetico (e.g. GRB, SNs, SGR, ecc.)
- Osservazioni congiunte permetteranno ad esempio di:
  - Conoscere i progenitori dei GRB “corti”
  - Confermare il modello di “magnetar” per i Soft Gamma Repeaters
  - Identificare la sorgente/galassia ospite e misurare il redshift cosmologico
  - vincoli sui parametri cosmologici
- La natura transiente dell’emissione e.m. e la localizzazione delle sorgenti di onde gravitazionali in grandi aree di cielo richiedono un alto grado di coordinamento sia tra i vari gruppi di astronomi che tra gli astronomi e la comunità delle onde gravitazionali → Campagna osservativa di GW150914 è considerata un successo
- La presenza di un possibile controparte di GW150914 alle alte energie osservato con Fermi, non sembra essere confermata da altre missioni, in accordo con la maggior parte dei modelli di emissione e.m. da BBH

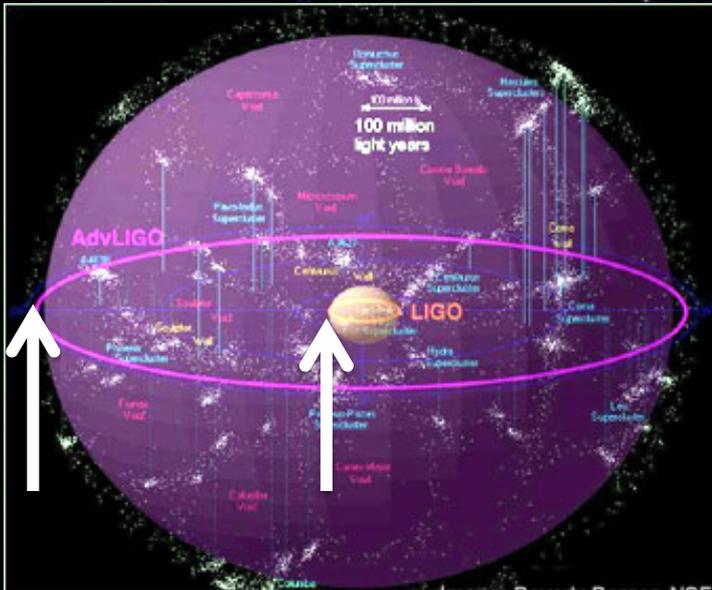


Extra slides

# Quanti eventi ci aspettiamo di osservare nelle onde grav. + e.m.?

Con Advanced LIGO/Virgo (2019+):

- **Coalescenza di oggetti compatti:**  
0.2-400 /yr  $\rightarrow$  0.4%-12% potrebbe avere come controparte uno short GRB  $\rightarrow$   $< 1-2$  /yr
- **Supernovae** nelle onde gr.  $< 20$  Mpc  
 $\rightarrow$  dato un rate di SNe:  $10^{-4} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$   
 $\rightarrow \sim 3$  /yr
- **Stelle di neutroni** nelle onde gr. potranno essere osservate nella nostra Galassia o galassie molto vicine  
 $\rightarrow$  Soft Gamma Repeters:  $\sim 20$  osservate in  $\sim 50$  yr  $\rightarrow \sim 0.5$ /yr

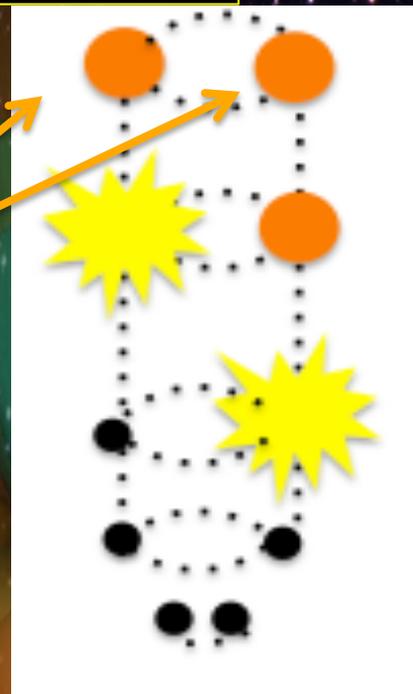


Confine di Universo osservabile dalla prima e seconda generazione di interferometri (x 10 in distanza  $\rightarrow$  1000 in volume)

# Come si formano sistemi binari di buchi neri così massivi (30 M solari)?

Ipotesi n.1

Sistema binario isolato di 2 stelle di grande massa  
+  
debole vento stellare



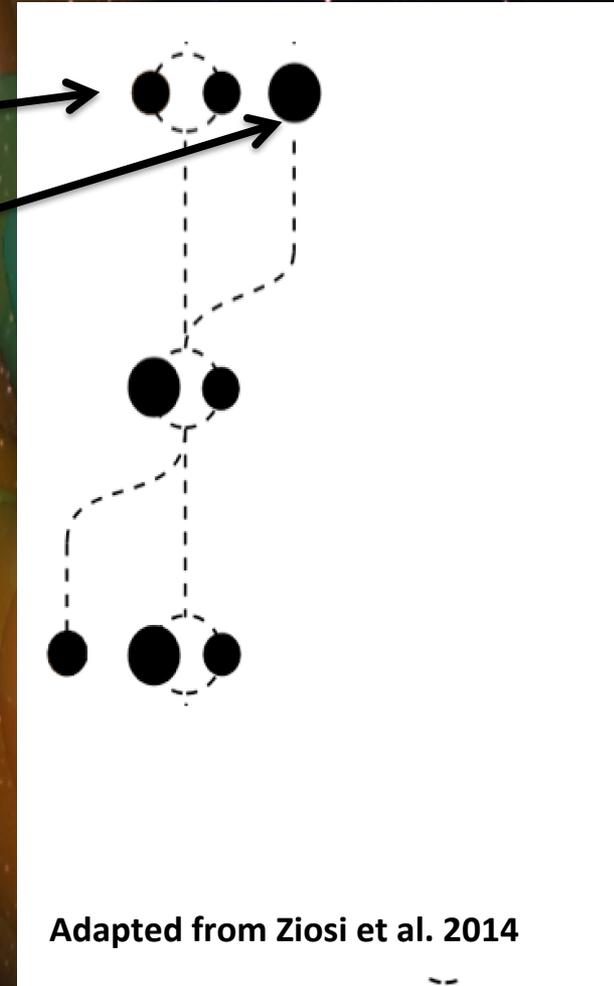
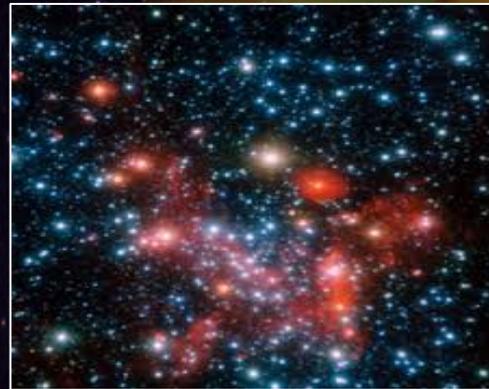
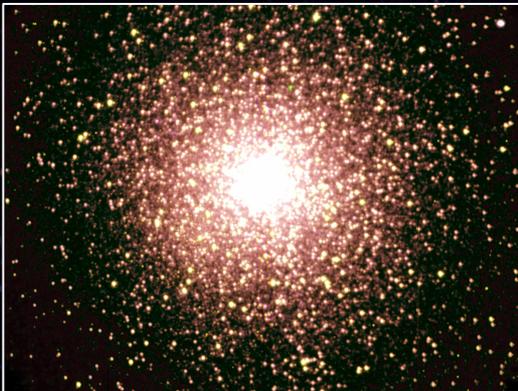
← Piano galattico

# Come si formano sistemi binari di buchi neri così massivi (30 M solari)?

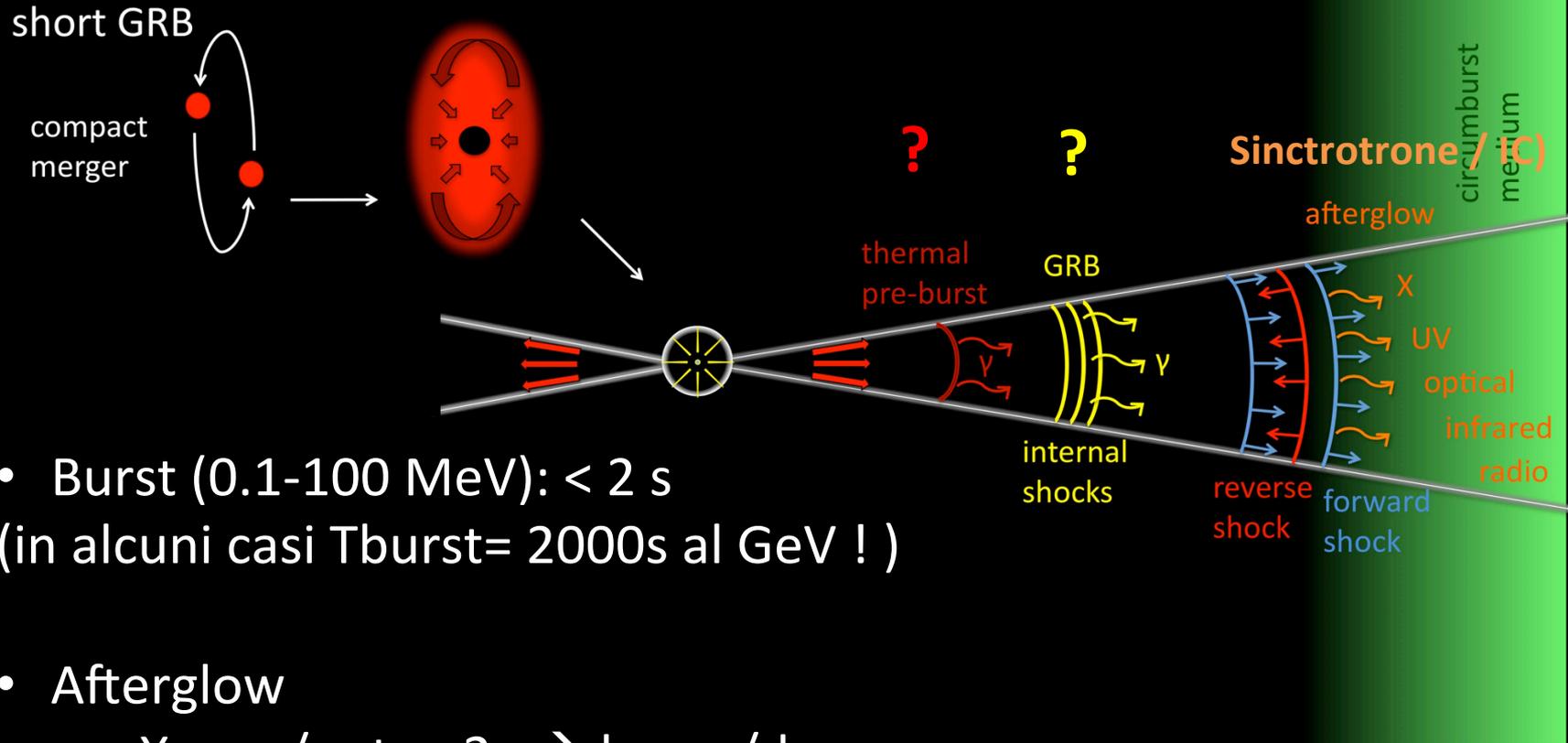
## Ipotesi n.2

Da ripetuti "incontri" di un sistema binario di buchi neri piccoli con altri buchi neri più massivi (tendono a trattenere nel sistema i buchi neri più massivi)

→ Questo può avvenire solo in ambienti molto densi di stelle



# Short GRB e l'afterglow



- Burst (0.1-100 MeV):  $< 2$  s  
(in alcuni casi  $T_{burst} = 2000$ s al GeV !)

- Afterglow

- X-rays/opt:  $> 2$ s  $\rightarrow$  hours/days
- radio: weeks

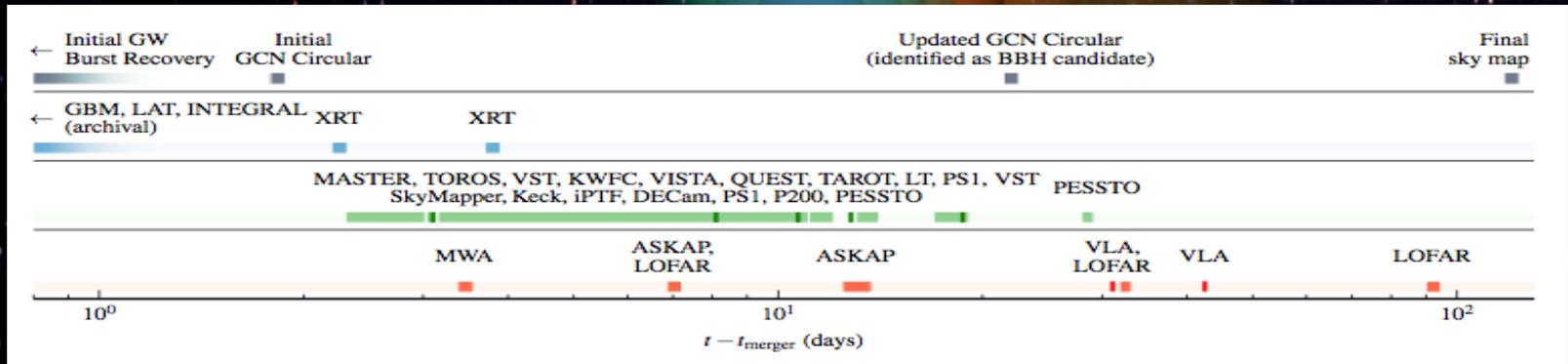
“Internal-external” shock model  
(e.g. Kobayashi et al. 1998)

# Il follow-up di GW150914

**Table 2.** Summary of Tiled Observations

Instrument	Band <sup>a</sup>	Depth <sup>b</sup>	Time <sup>c</sup>	Area (deg <sup>2</sup> )	Contained probability (%)				GCN
					cWB	LIB	BSTR.	LALInf.	
Gamma-ray									
<i>Fermi</i> LAT	20 MeV–300 GeV	$1.7 \times 10^{-9}$	(every 3 hr)	—	100	100	100	100	18709
<i>Fermi</i> GBM	8 keV–40 MeV	$0.7\text{--}5 \times 10^{-7}$ (0.1–1 MeV)	(archival)	—	100	100	100	100	18339
INTEGRAL	75 keV–1 MeV	$1.3 \times 10^{-7}$	(archival)	—	100	100	100	100	18354
IPN	15 keV–10 MeV	$1 \times 10^{-9}$	(archival)	—	100	100	100	100	—
X-ray									
MAXI/GSC	2–20 keV	$1 \times 10^{-9}$	(archival)	17900	95	89	92	84	19013
<i>Swift</i> XRT	0.3–10 keV	$5 \times 10^{-13}$ (gal.)	2.3, 1, 1	0.6	0.03	0.18	0.04	0.05	18331
		$2\text{--}4 \times 10^{-12}$ (LMC)	3.4, 1, 1	4.1	1.2	1.9	0.16	0.26	18346
Optical									
DECam	<i>i, z</i>	$i < 22.5, z < 21.5$	3.9, 5, 22	100	38	14	14	11	18344, 18350
iPTF	<i>R</i>	$R < 20.4$	3.1, 3, 1	140	3.1	2.9	0.0	0.2	18337
KWFC	<i>i</i>	$i < 18.8$	3.4, 1, 1	24	0.0	1.2	0.0	0.1	18361
MASTER	<i>C</i>	$< 19.9$	-1.1, 7, 7	590	56	35	55	49	18333, 18390, 18903, 19021
Pan-STARRS1	<i>i</i>	$i < 19.2\text{--}20.8$	3.2, 21, 42	430	28	29	2.0	4.2	18335, 18343, 18362, 18394
La Silla-QUEST	<i>g, r</i>	$r < 21$	3.8, 5, 0.1	80	23	16	6.2	5.7	18347
SkyMapper	<i>i, v</i>	$i < 19.1, v < 17.1$	2.4, 2, 3	30	9.1	7.9	1.5	1.9	18349
<i>Swift</i> UVOT	<i>u</i>	$u < 19.8$ (gal.)	2.3, 1, 1	3	0.7	1.0	0.1	0.1	18331
	<i>u</i>	$u < 18.8$ (LMC)	3.4, 1, 1						18346
TAROT	<i>C</i>	$R < 18$	2.8, 5, 14	30	15	3.5	1.6	1.9	18332, 18348
TOROS	<i>C</i>	$r < 21$	2.5, 7, 90	0.6	0.03	0.0	0.0	0.0	18338
VST	<i>r</i>	$r < 22.4$	2.9, 6, 50	90	29	10	14	10	18336, 18397
Near Infrared									
VISTA	<i>Y, J, K<sub>S</sub></i>	$J < 20.7$	4.8, 1, 7	70	15	6.4	10	8.0	18353
Radio									
ASKAP	863.5 MHz	5–15 mJy	7.5, 2, 6	270	82	28	44	27	18363, 18655
LOFAR	145 MHz	12.5 mJy	6.8, 3, 90	100	27	1.3	0.0	0.1	18364, 18424, 18690
MWA	118 MHz	200 mJy	3.5, 2, 8	2800	97	72	86	86	18345

# Skymap e timeline del follow-up di GW150914



**Table 1.** Description of Sky Maps

	Area <sup>a</sup>			$\theta_{\text{HL}}$ <sup>b</sup>	Comparison <sup>c</sup>			
	10%	50%	90%		cWB	LIB	BSTR	LALInf
cWB	10	100	310	$43^{+2}_{-2}$	—	190	180	230
LIB	30	210	750	$45^{+6}_{-5}$	0.55	—	220	270
BSTR	10	90	400	$45^{+2}_{-2}$	0.64	0.56	—	350
LALInf	20	150	620	$46^{+3}_{-3}$	0.59	0.55	0.90	—

<sup>a</sup> Area of credible level ( $\text{deg}^2$ ). Note that the LALInference area is consistent with but not equal to the number reported in [Abbott et al. \(2016e\)](#) due to minor differences in sampling and interpolation.

<sup>b</sup> Mean and 10% and 90% percentiles of polar angle in degrees.

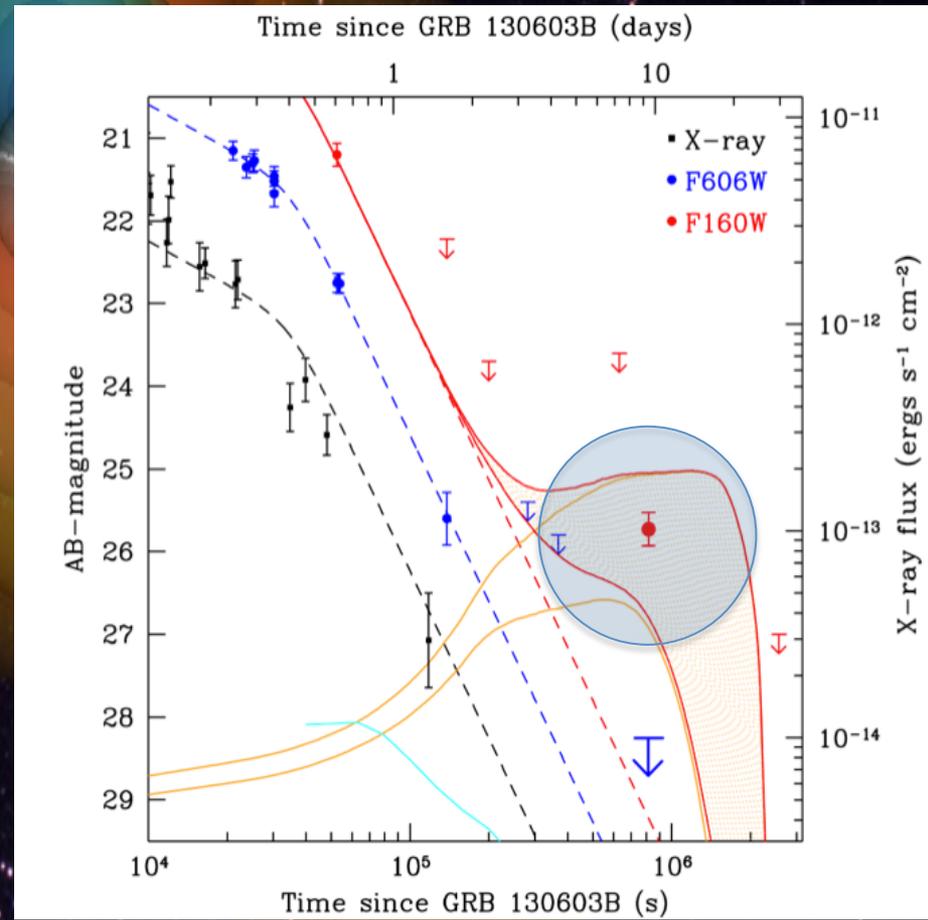
<sup>c</sup> Fidelity (below diagonal) and the intersection in  $\text{deg}^2$  of the 90% confidence regions (above diagonal).

# INAF VST

- 4 epoche di osservazione: T0+4, 8, 11 e 17 giorni dopo il trigger
- <23 mag
- $\sim 100 \text{ deg}^2$
- Milioni di sorgenti, varie centinaia di transienti, qualche centinaio di possibili candidati
- Analisi ancora in corso...!

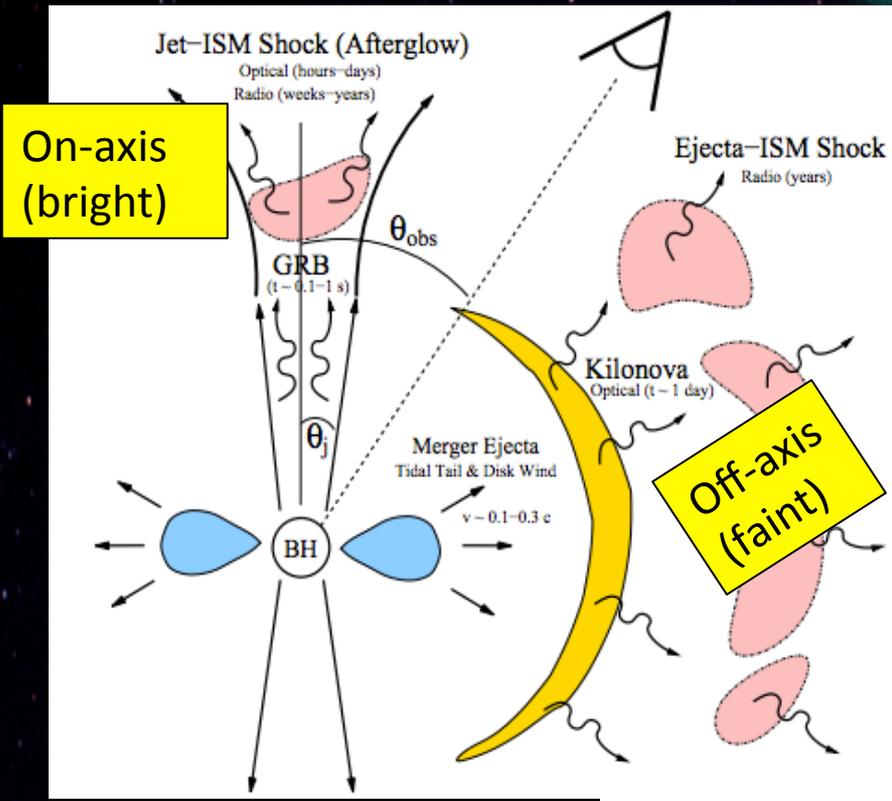
# The short GRB 130603B

- Discovered by Swift on June 3, 2013
- Prompt multiwavelength follow-up → afterglow and distance ( $z=0.356$ )
- Kilonova emission 7 days after the burst  
→ the only evidence of kilonova so far!

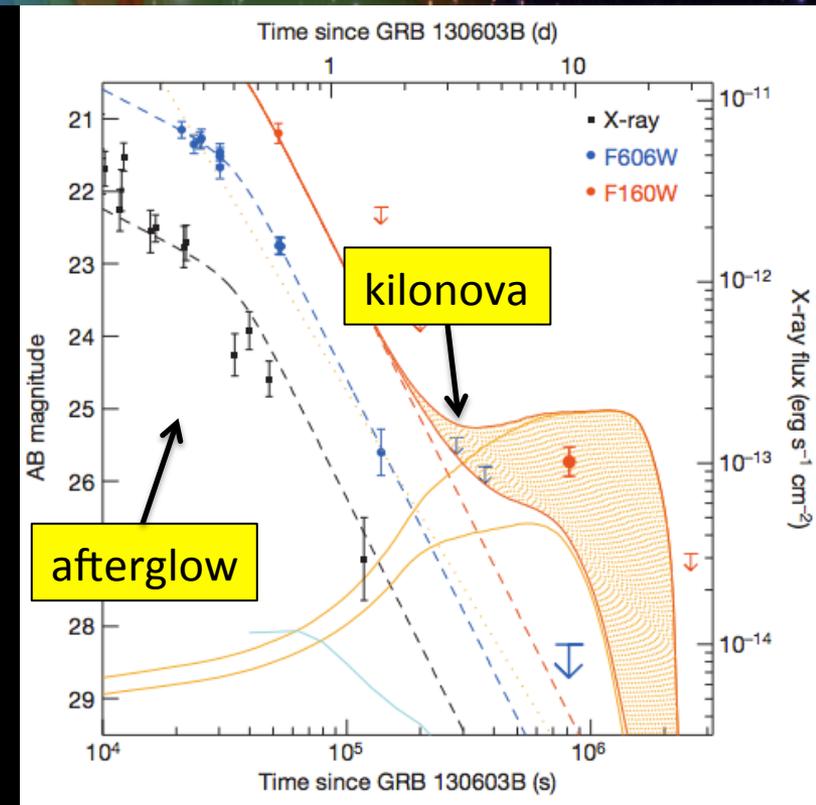


# Cosa possiamo imparare dall'osservazione simultanea di onde gravitazionali?

- Natura dei progenitori degli "short GRBs" (ad oggi solo evidenze indirette)
- Stima dell'angolo di collimazione dal confronto dei rate
- Conferma del meccanismo di emissione della kilonova



Metzger and Berger 2012



Tanvir et al. Nature 2013