

Zum Einstieg: Gammablitze und Gravitationswellen

Kosmische Evolution für Nicht-Physiker

Knud Jahnke & Markus Pössel

Max-Planck-Institut für Astronomie/Haus der Astronomie

17.10.2017

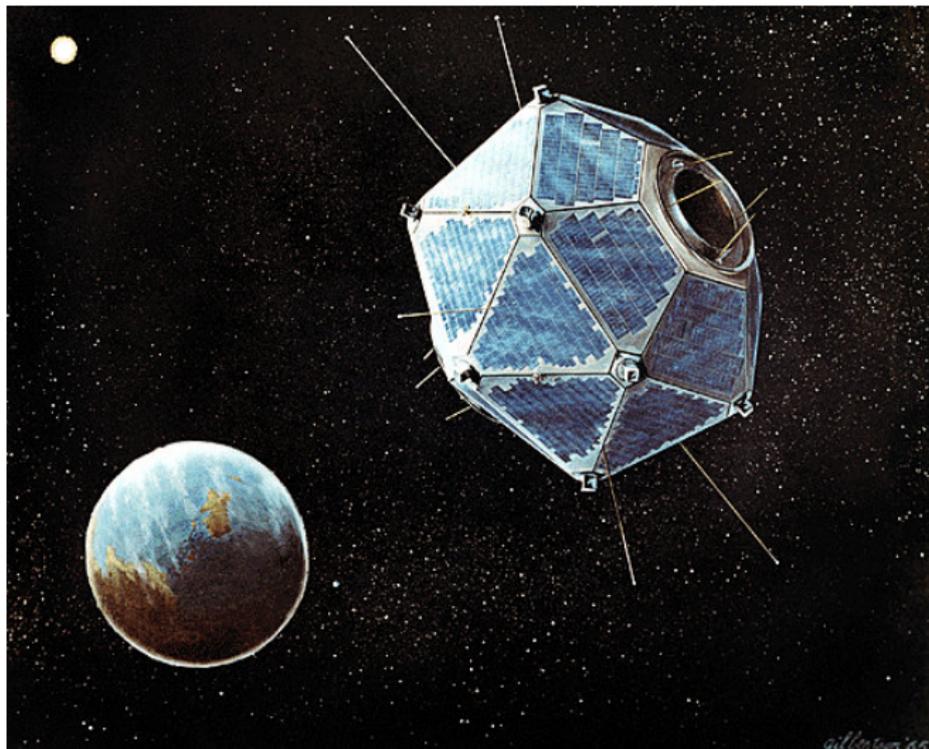
Kosmische Evolution im Kontext

Systematische Teilaspekte der Astronomie

- Beobachtungsmethoden
- Physikalische Modelle für Himmelsobjekte
- Änderungsprozesse bis hin zur kosmischen Evolution

... zur Einstimmung: aktuelles Beispiel verschmelzende Neutronensterne

Gammastrahlenausbrüche / Gammablitze



Vela-Satelliten, 1960er. Bild: NASA

Optisches Gegenstück 1997

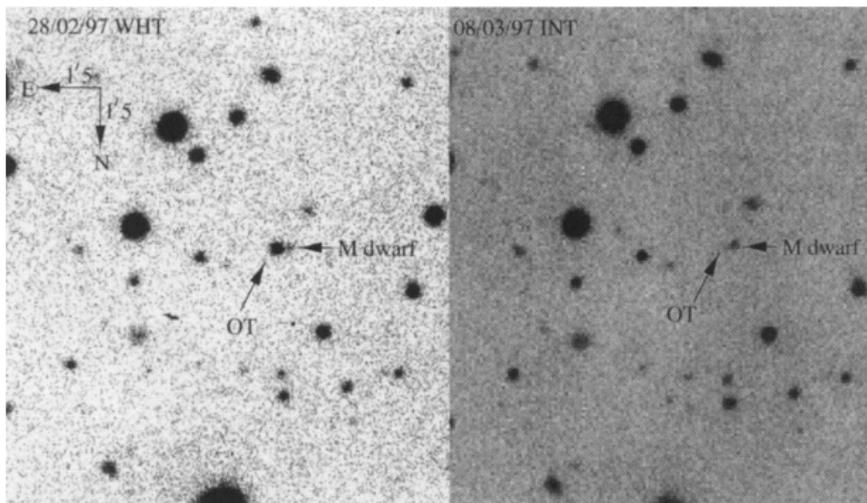


Abbildung 2 aus van Paradijs et al. 1997

GRB970228 assoziiert mit Aufleuchten in schwacher Galaxie,
nachgewiesen im sichtbaren – extragalaktisch, und damit sehr hell!

Überlegung: Gebündelte, nicht isotrope Abstrahlung?

Erste Rotverschiebung 1997

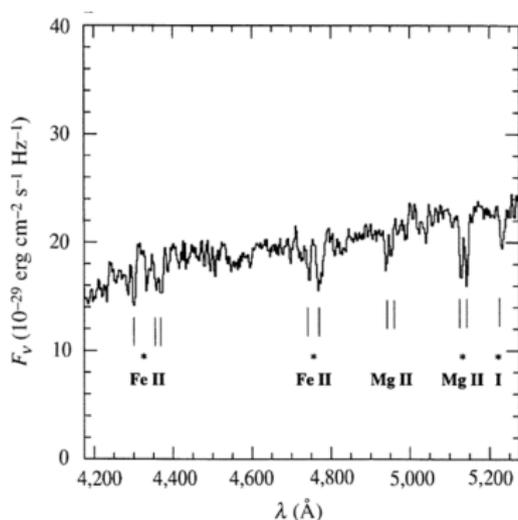


Abbildung 1b aus Metzger et al. 1997

GRB970508 – erste Spektrallinien identifiziert, Rotverschiebung gemessen, $z = 0.835$.

Entspricht Lichtlaufzeit von 7.2 Milliarden Jahren!

Systematische Suche



Bild: NASA

Beispiel: NASA's Compton Gamma Ray Observatory (1991 bis 2000)
BATSE-Instrument: Himmelsdurchmusterung nach Bursts, ca. 1 pro Tag.
Automatische Benachrichtigung zur Nachbeobachtung

Zwei Populationen von GRBs

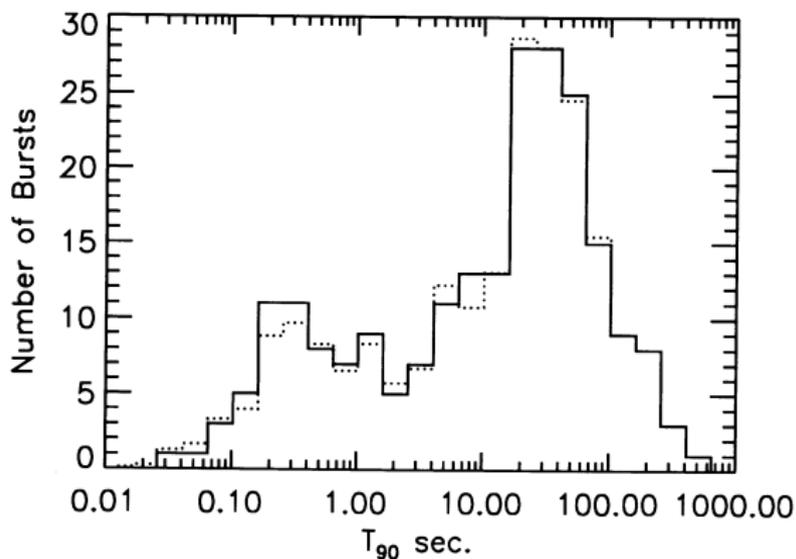


Abb. 1a in Kouveliotou et al. 1993

Kurze und lange Gammablitz

Modell: Jet, Wechselwirkung, Nachglühen

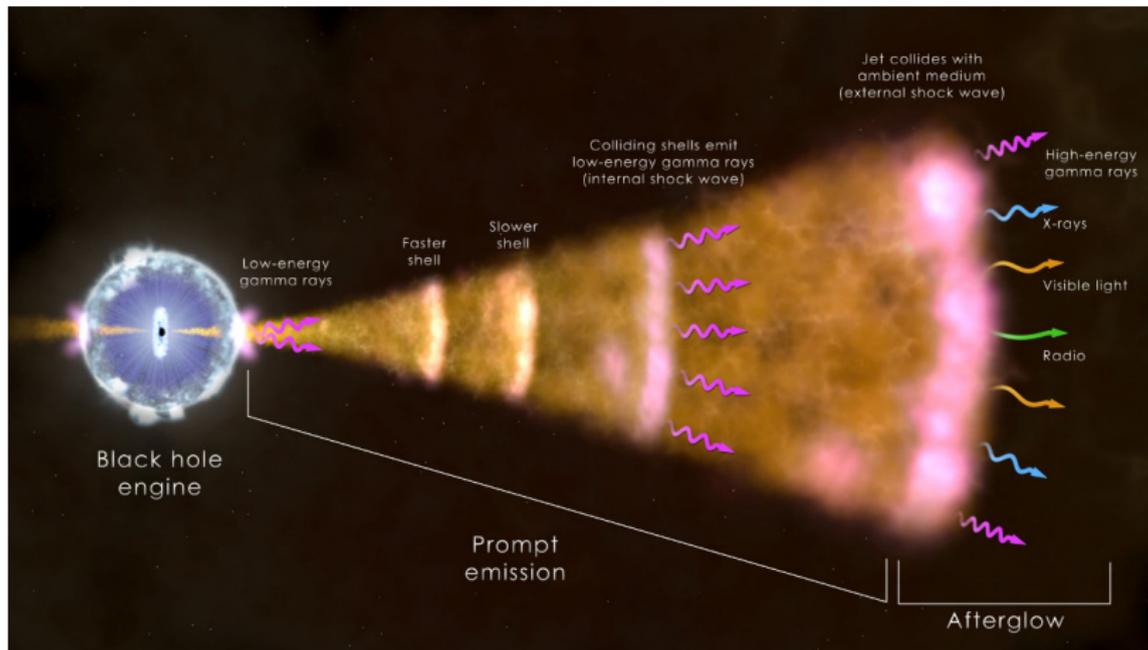


Bild: NASA

Grobes Modell eines Gammastrahlenausbruchs — aber was ist der "Antrieb"?

Lange GRBs sind Hypernovae – 2003

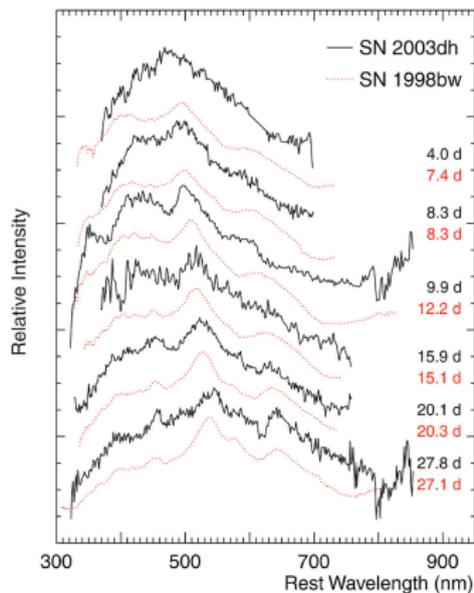


Bild: ESO

Spektren und Vergleich von SN 2003h = GRB030323 mit SN1998bw: Hypernova!
Explosion besonders massereichen Sterns $> 25 M_{\odot}$

Kurze GRBs sind keine Hyper-/Supernovae – 2005

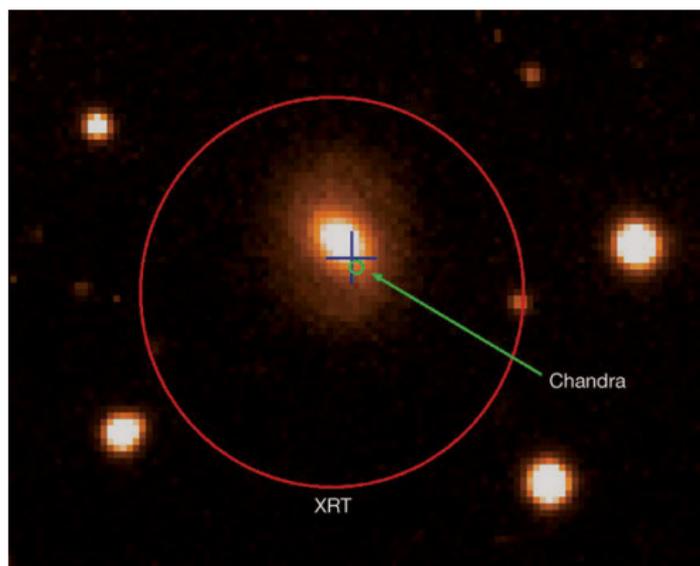


Bild: Fig. 2 aus Barthelmy et al. 2005

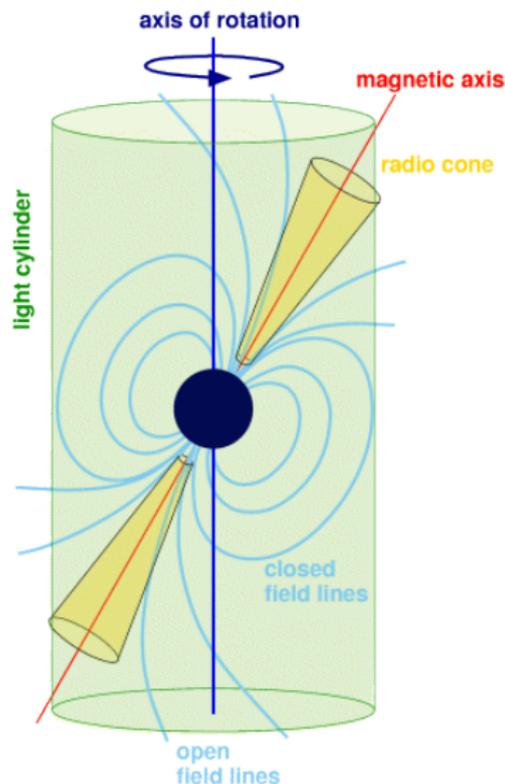
Swift, Chandra, optisch: GRB050724 in elliptischer Galaxie
keine rezente Sternentstehung \Rightarrow keine Super-/Hypernovae!

Kandidat kurze GRBs: NS-NS-Verschmelzung

Neutronensterne: extrem dichte Sternüberreste massereicher Sterne, $> 8 M_{\odot}$

Neutronenmaterie, "erdgroßer Atomkern"

Einige davon als kosmische Leuchttürme = Pulsare sichtbar



Kandidat kurze GRBs: NS-NS-Verschmelzung

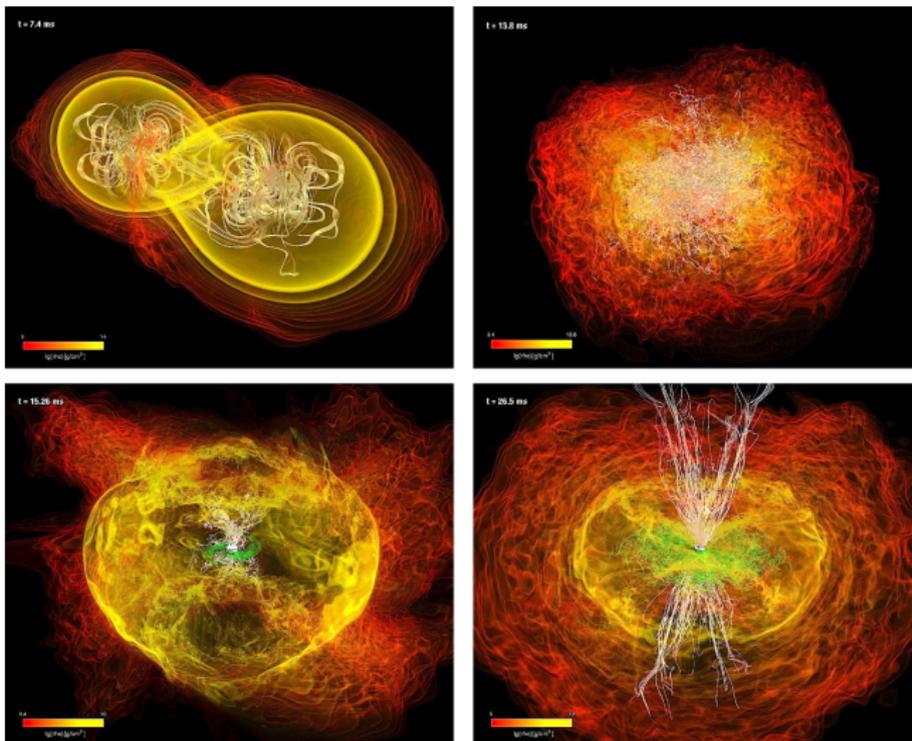


Bild: Rezzolla et al. 2011

Gravitationswellen

Wellenartige, lichtschnelle
Störungen (Analogie zu
elektromagnetischen Wellen)

Erstmals Einstein 1916 (aber:
Koordinateneffekt oder real?)

Nobelpreis 1993 für indirekten
Nachweis (Bild rechts)

Entstehen bei gewaltigen,
systematischen
Massenbewegungen:
„Gravitationswellen-Astronomie“!

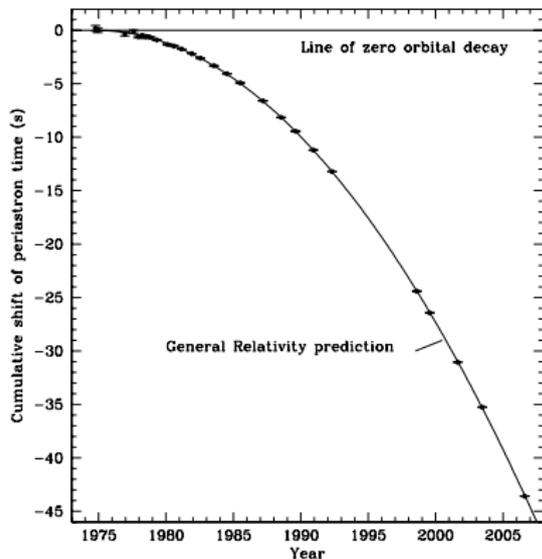


Bild: Weisberg et al. 2010

Wirkung von Gravitationswellen

Wirkung auf kräftefrei im Weltraum schwebende Teilchen (extrem stark übertrieben, tatsächliche Größenordnung relative Abstandsänderungen $h \sim 10^{-21}$):

Nachweis mit interferometrischem Detektor

Nachweis mit interferometrischem Detektor

Gravitationswellen-Nachweis



Gravitationswellen

18.9.2015 –
12.1.2016: Advanced
LIGO erster
„observing run“ (O1),
vorher „engineering
run“ für die
verbesserte Technik
u.a. aus Deutschland
(MPI für
Gravitationsphysik)

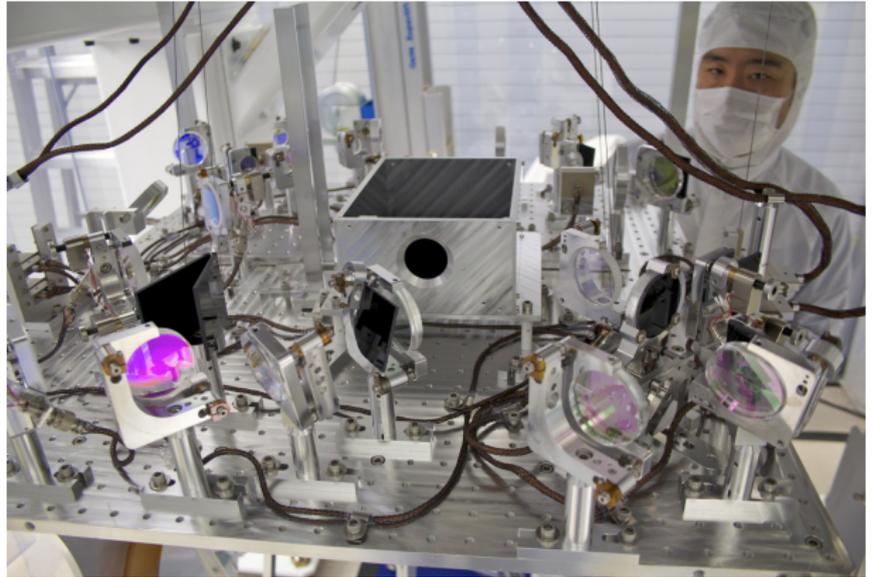


Bild: Caltech/MIT/LIGO Lab

Störquellen limitieren die Messung



Bild: Caltech/MIT/LIGO Lab

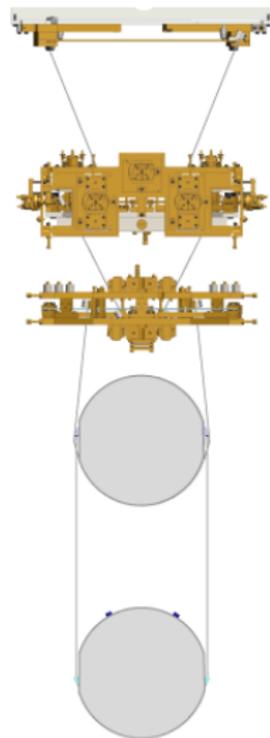


Bild: Abb. 6 in Pitkin et al. 2011
Zum Einstieg: Gammablitz und Gravitationswellen

Advanced LIGO-Detektor-Layout

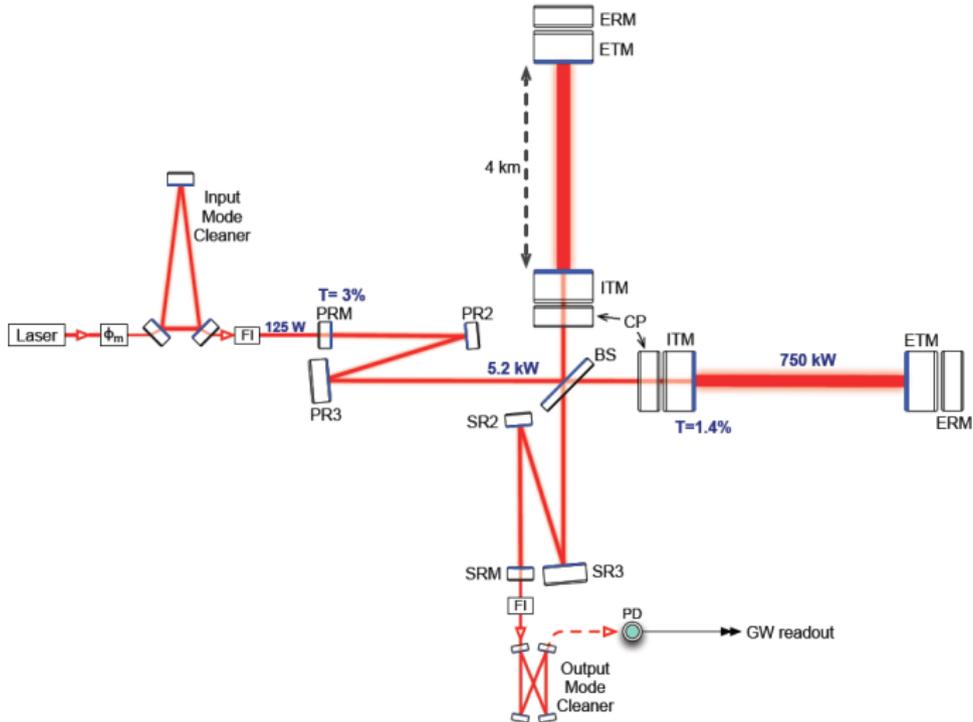


Abb. 1 in LIGO Scientific Collaboration 2014

Suchen nach bekannten Signalen

Suche nach bekannten Signalen: Verschmelzende Neutronensterne und/oder Schwarze Löcher. Problem: Vollständige Raumzeitsimulationen nötig, numerische Relativitätstheorie

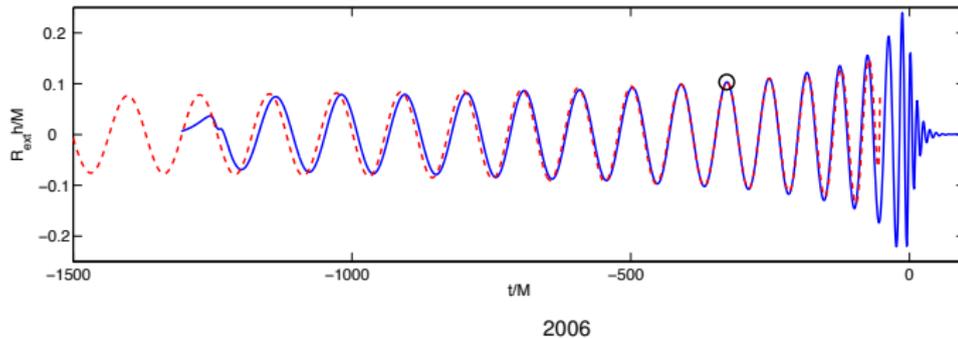
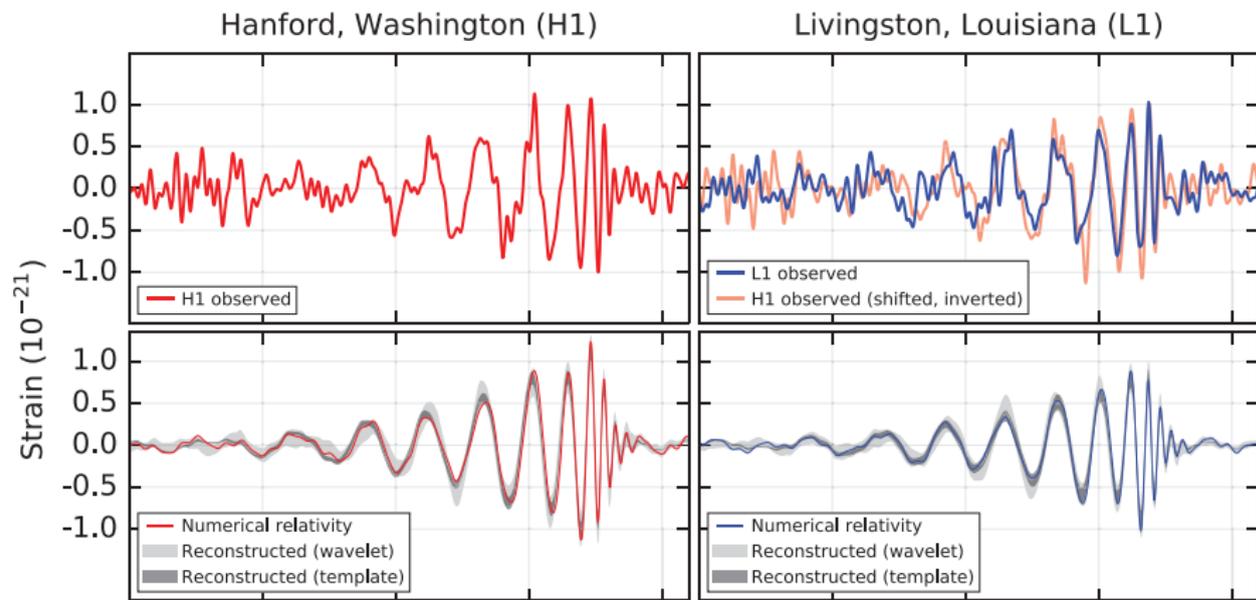


Bild: Baker et al.

Simulationen erst ab 2005 stabil! (Frans Pretorius)

Gravitationswellen-Nachweis

Signal vom 14.9.2015, veröffentlicht 11.2.2016.



Gravitationswellen-Nachweis

Interpretation (Vergleich mit Modellen): Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher

Schwarzloch-Masse 1	$32 - 41 M_{\odot}$
Schwarzloch-Masse 2	$25 - 33 M_{\odot}$
Endmasse	$58 - 67 M_{\odot}$
Energie Gravitationswellen	$2.5 - 3.5 M_{\odot} c^2$
Abstand von uns	$0.75 - 1.9 \text{ GLj}$

Gravitationswellen-Nachweis

Seither:

- 12.10.2015 Kandidat, nicht sicher nachgewiesen
- 26.12.2015 GW151226, zwei Schwarze Löcher
- 30.11.2016 LIGO-Detektoren starten O2
 - 4.1.2017 GW170104, zwei Schwarze Löcher
 - 1.8.2017 Virgo schließt sich O2 an
- 14.8.2017 GW170814, Schwarze Löcher, 3 Detektoren
- 25.8.2017 Ende Beobachtungsdurchgang O2
- 3.10.2017 Physik-Nobelpreis für Weiss, Barish, Thorne



12. August 2017



Bild: NASA

Fermi Gamma-Ray Space Telescope
(seit 2008)

Gamma Ray Burst Monitor überwacht
(sichtbaren) Himmel

17. August 2017, 12:41:06 UTC: kurzer
Gammablitz!

GCN Notice

```

////////////////////////////////////
TITLE:          GCN/FERMI NOTICE
NOTICE_DATE:    Thu 17 Aug 17 12:41:20 UT
NOTICE_TYPE:    Fermi-GBM Alert
RECORD_NUM:     1
TRIGGER_NUM:    524666471
GRB_DATE:       17982 TJD; 229 DOY; 17/08/17
GRB_TIME:       45666.47 SOD (12:41:06.47) UT
TRIGGER_SIGNIF: 4.8 [sigma]
TRIGGER_DUR:    0.256 [sec]
E_RANGE:        3-4 [chan] 47-291 [keV]
ALGORITHM:      8
DETECTORS:     0,1,1, 0,0,1, 0,0,0, 0,0,0, 0,0,
LC_URL:         http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/gbm/triggers/2017/bn170817529/quicklook/glg_lc_medres34_bn170817529.gif
COMMENTS:       Fermi-GBM Trigger Alert.
COMMENTS:       This trigger occurred at longitude,latitude = 321.53,3.90 [deg].
COMMENTS:       The LC_URL file will not be created until -15 min after the trigger.

```

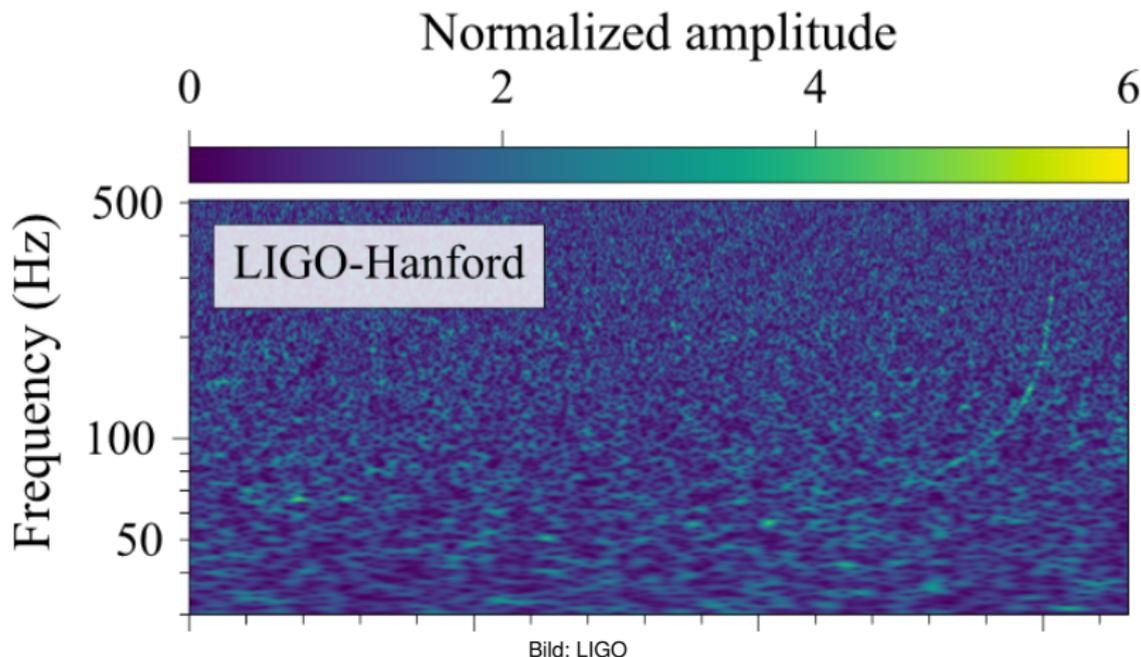
```

////////////////////////////////////
TITLE:          GCN/FERMI NOTICE
NOTICE_DATE:    Thu 17 Aug 17 12:41:31 UT
NOTICE_TYPE:    Fermi-GBM Flight Position
RECORD_NUM:     47
TRIGGER_NUM:    524666471
GRB_RA:         172.017d {+11h 28m 04s} (J2000),
                172.233d {+11h 28m 56s} (current),
                171.404d {+11h 25m 37s} (1950)
GRB_DEC:        -34.783d {-34d 46' 59"} (J2000),
                -34.881d {-34d 52' 49"} (current),
                -34.508d {-34d 30' 27"} (1950)
GRB_ERROR:      32.65 [deg radius, statistical plus systematic]
GRB_INTEN:      162 [cnts/sec]
DATA_SIGNIF:    6.20 [sigma]
INTEG_TIME:     0.512 [sec]
GRB_DATE:       17982 TJD; 229 DOY; 17/08/17
GRB_TIME:       45666.47 SOD (12:41:06.47) UT
GRB_PHI:        20.00 [deg]
GRB_THETA:      85.00 [deg]
DATA_TIME_SCALE: 0.5120 [sec]
HARD_RATIO:     0.79
LOC_ALGORITHM:  3 (version number of)
MOST_LIKELY:    97% GRB
2nd_MOST_LIKELY: 2% Generic Transient
DETECTORS:     0,1,1, 0,0,1, 0,0,0, 0,0,0, 0,0,0,
SUN_POSTN:     147.09d {+09h 48m 22s} +13.25d {+13d 15' 09"}
SUN_DIST:      53.72 [deg]  _Sun_angle= -1.7 [hr] (East of Sun)

```

https://gcn.gsfc.nasa.gov/fermi_grbs.html

Gravitationswellen-Nachweis



Gravitationswellen-Nachweis

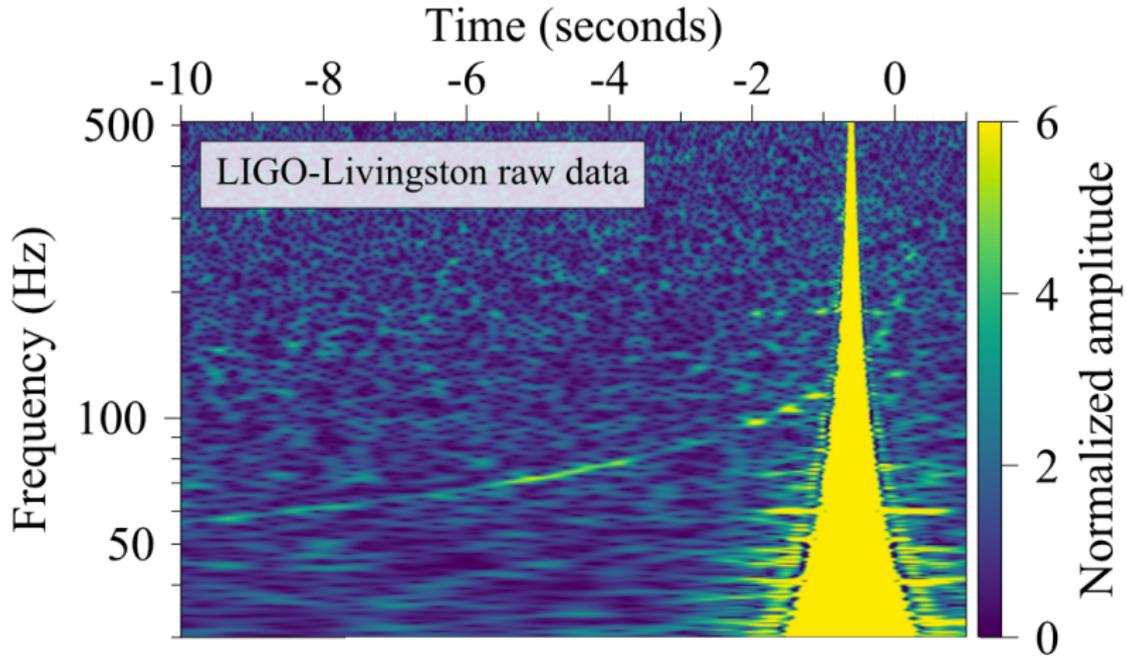
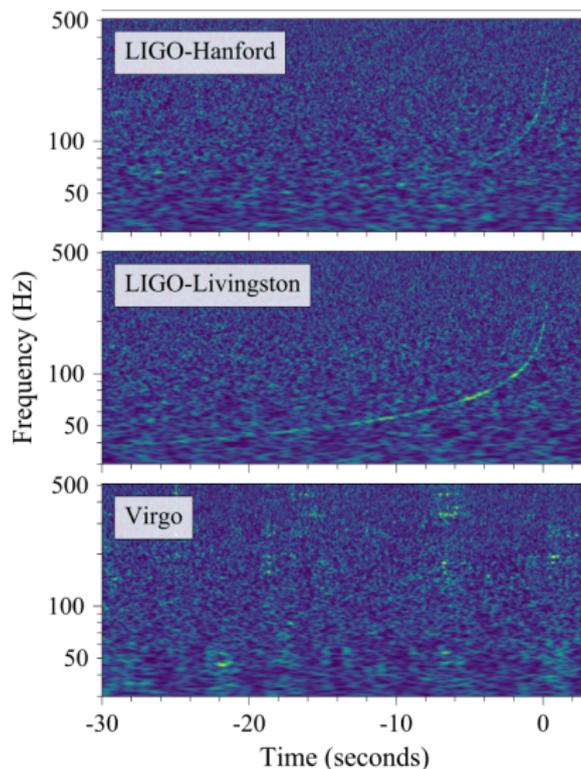


Bild: LIGO

Gravitationswellen-Nachweis



GCN Circular

TITLE: GCN CIRCULAR
NUMBER: 21505
SUBJECT: LIGO/Virgo G298048: Fermi GBM trigger 524666471/170817529: LIGO/Virgo Identification of a possible gravitational-wave counterpart
DATE: 17/08/17 13:21:42 GMT
FROM: Reed Clasey Essick at MIT <ressick@mit.edu>

The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration report:

The online CBC pipeline (gstlal) has made a preliminary identification of a GW candidate associated with the time of Fermi GBM trigger 524666471/170817529 at gps time 1187008884.47 (Thu Aug 17 12:41:06 GMT 2017) with RA=186.62deg Dec=-48.84deg and an error radius of 17.45deg.

The candidate is consistent with a neutron star binary coalescence with False Alarm Rate of $\sim 1/10,000$ years.

An offline analysis is ongoing. Any significant updates will be provided by a new Circular.

[GCN OPS NOTE(17aug17): Per author's request, the LIGO/VIRGO ID was added to the beginning of the Subject-line.]

https://gcn.gsfc.nasa.gov/fermi_grbs.html

Quelle lokalisieren

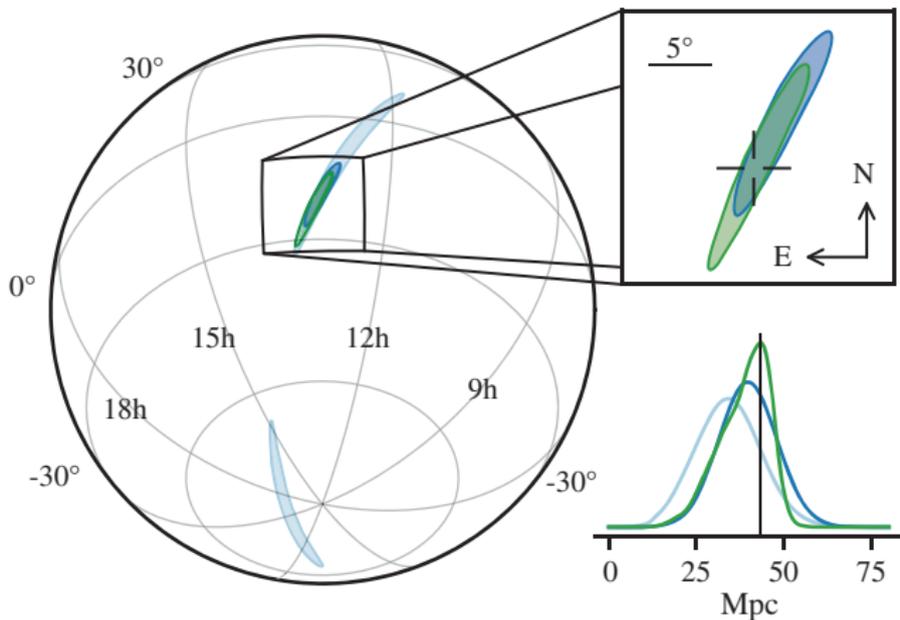


Bild: LIGO/Virgo, PRL 119 (2017)

Entdeckt!



Bild: 1M2H Collaboration/UC Santa Cruz/Carnegie Observatories

Quelle lokalisieren

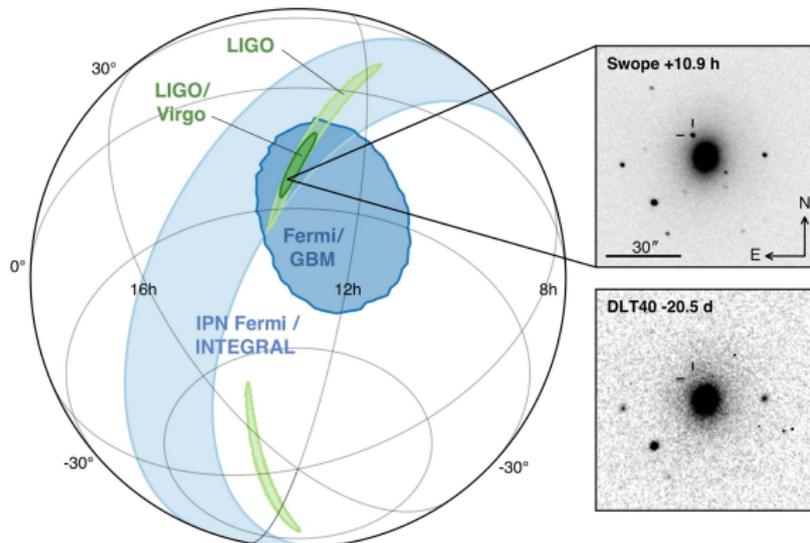


Bild: Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, Ap J, 2017

Zeitleiste der GCN Circulars

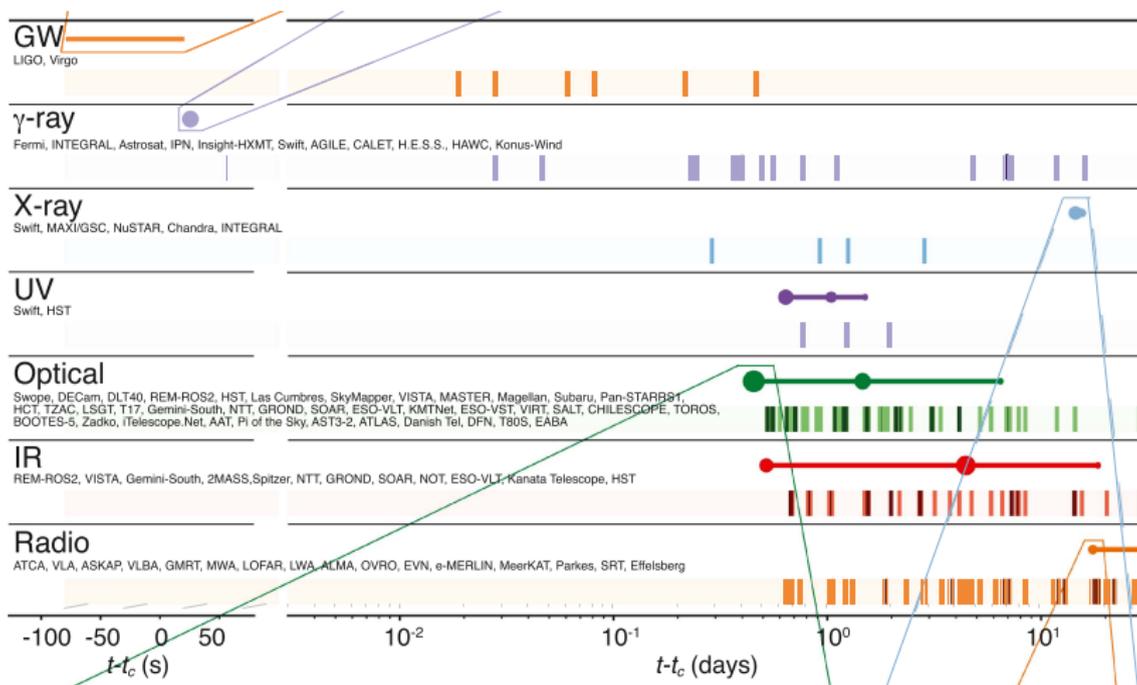


Bild: Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, Ap J, 2017

Weltweit 70 Teleskope

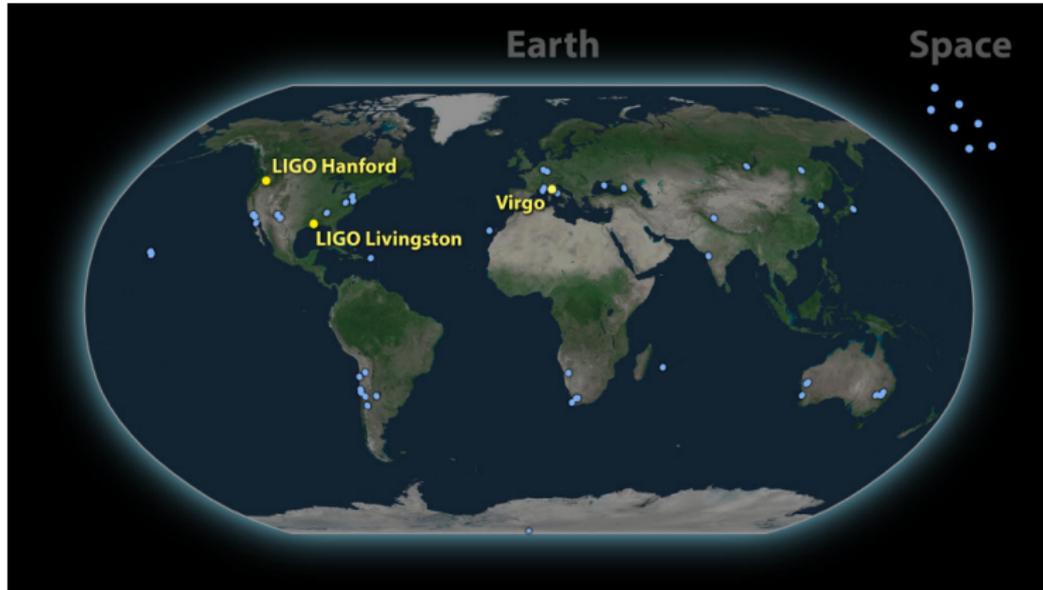
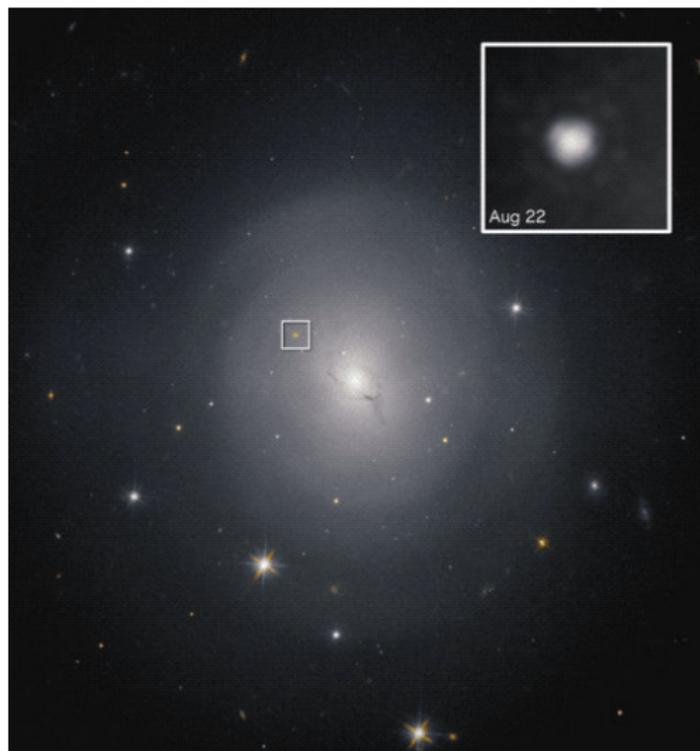


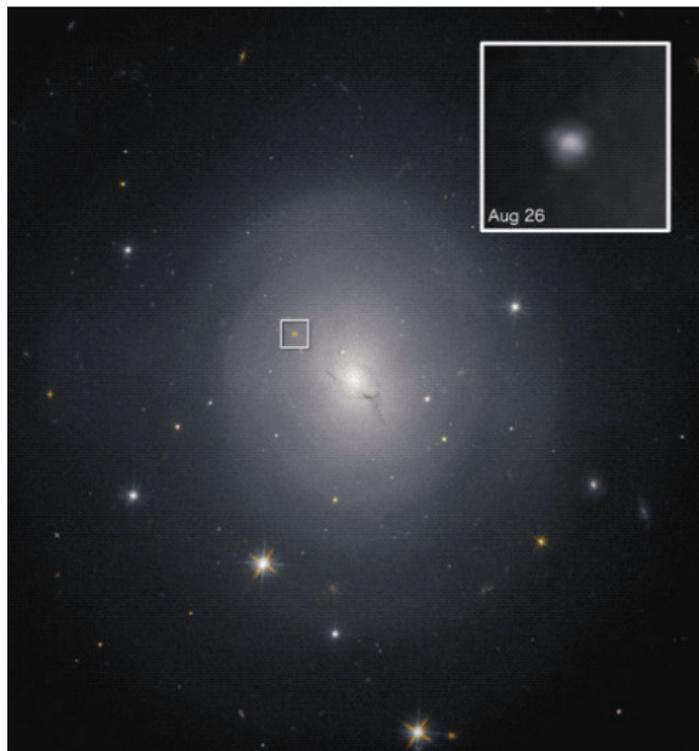
Bild: LIGO

Die Quelle verblasst



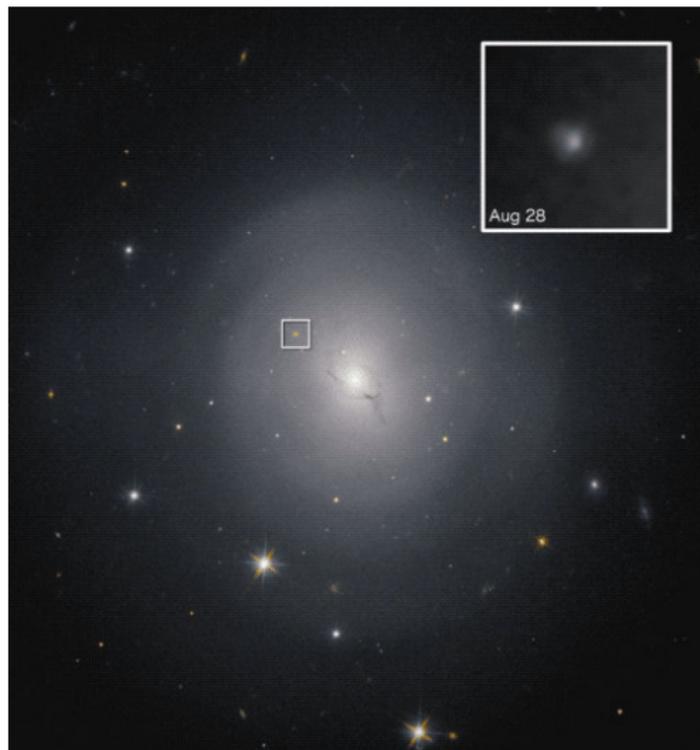
Hubble-Weltraumteleskop – Bild: NASA/ESA

Die Quelle verblasst



Hubble-Weltraumteleskop – Bild: NASA/ESA

Die Quelle verblasst



Hubble-Weltraumteleskop – Bild: NASA/ESA

Die Quelle verblasst

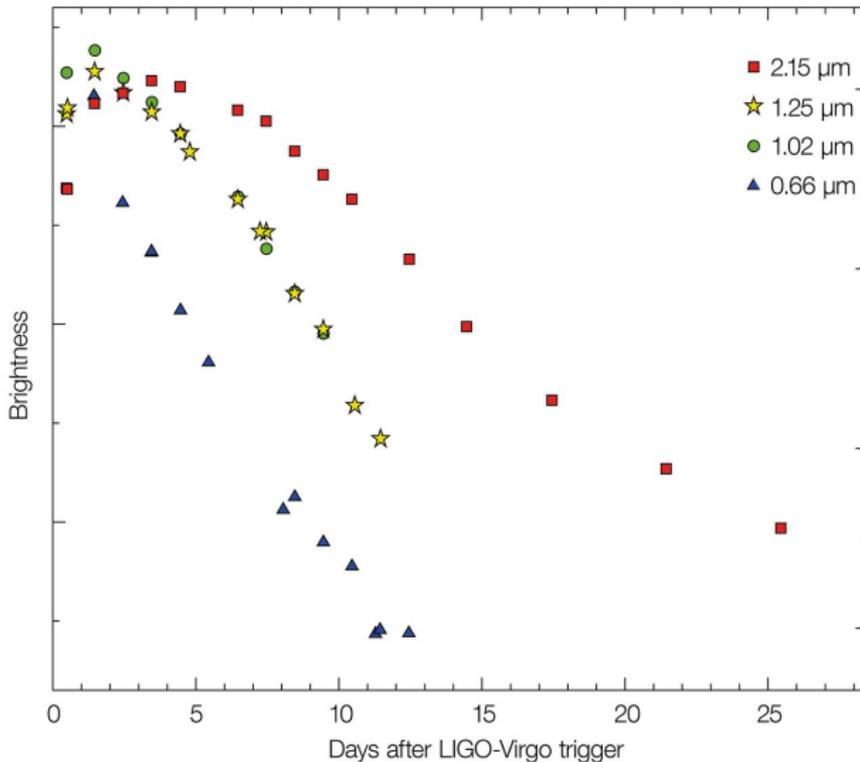


Bild: Tanvir et al.

Zum Einstieg: Gammablitz und Gravitationswellen

Von Blau zu Rot

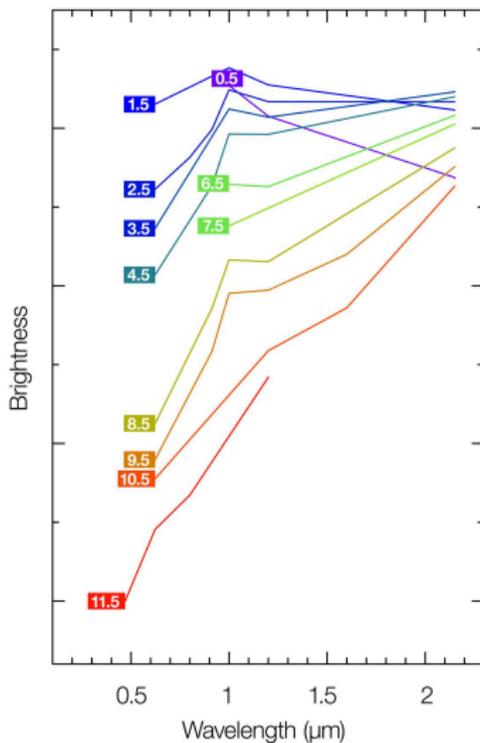


Bild: Tanvir et al.

Zum Einstieg: Gammablitz und Gravitationswellen

Vergleich mit Modell

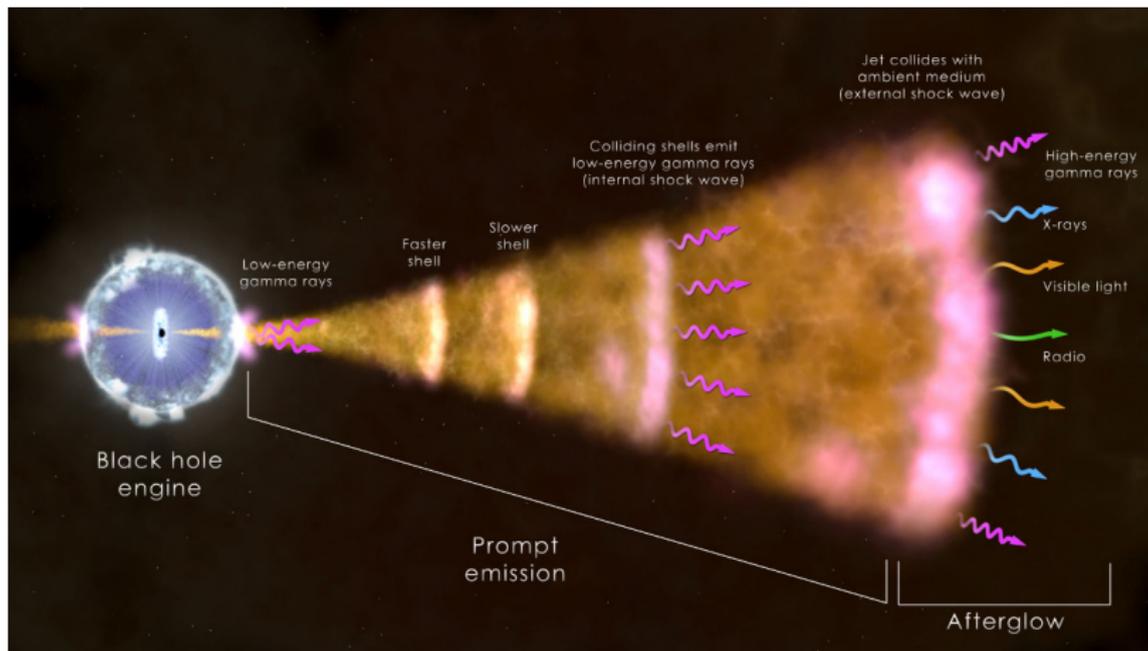


Bild: NASA

Vergleich Modell und Beobachtungen

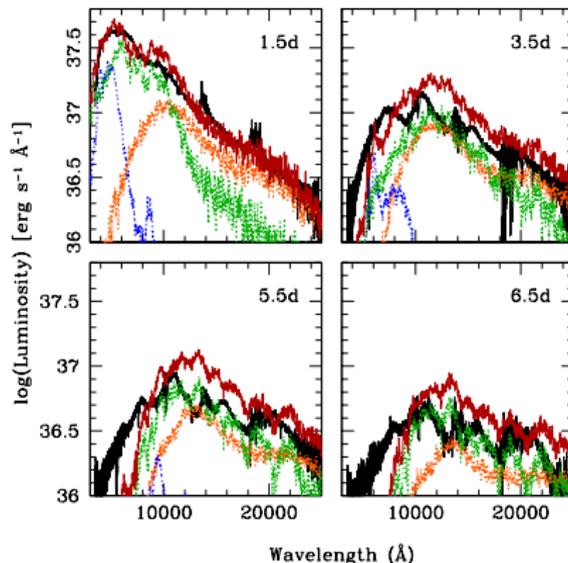
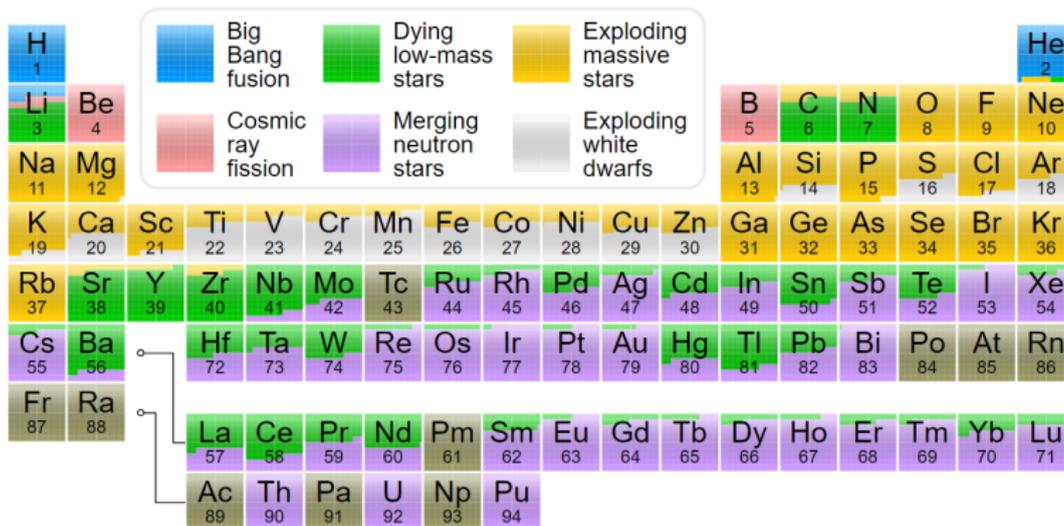


Bild: Abb. 3 aus Pian et al. 2017

Modell ist Summe von: herausgeschleuderte Teilchen (orange), Wind mit höherem (blau) und niedrigerem (grün) Protonenanteil, im Vergleich mit X-SHOOTER (VLT/ESO, schwarz)

Erzeugung schwerer Elemente



Periodic table showing origin of elements in the Solar System, based on data by Jennifer Johnson at Ohio State University via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 4.0

Gesamtproduktion: 16 000 Erdmassen schwere Elemente, ca. 10 Erdmassen Gold/Platin

Massenabschätzung

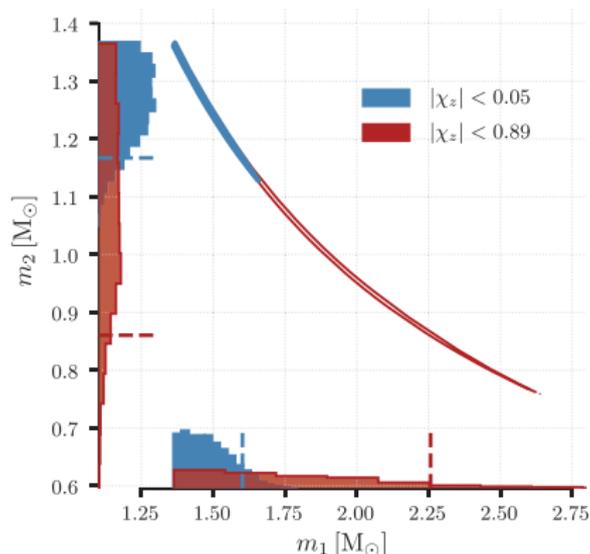


Bild: LIGO/Virgo, PRL 119 (2017)

Spin-Parameter $\chi = cJ/GM$, mit J Drehimpuls, M Masse, G Gravitationskonstante, c Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Schnellster bekannter NS: $\chi < 0.4$.

Eigenschaften Neutronenmaterie

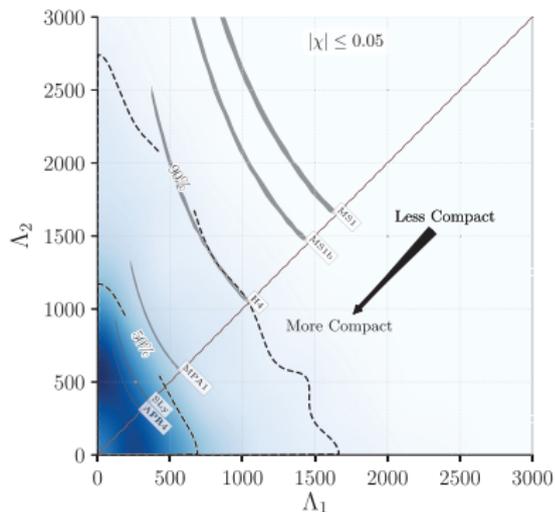
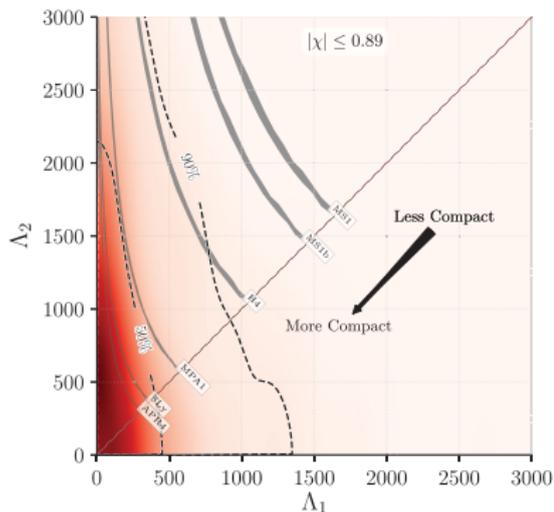


Bild: LIGO/Virgo, PRL 119 (2017)

Einschränkungen an die Zustandsgleichung (Abhängigkeit Druck von Dichte)

Hubble-Konstante

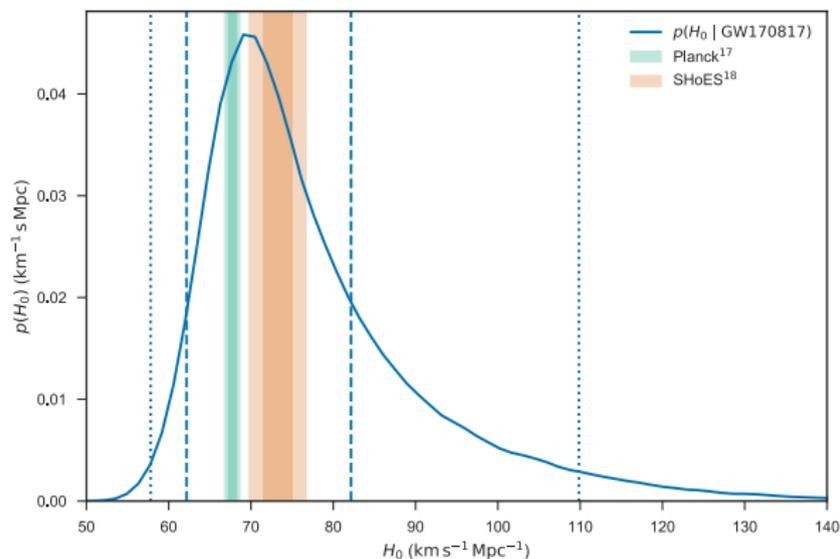


Bild: LIGO/Virgo, A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant, Nature 2017

Gravitationswellen-Verschmelzungen sind “Standardsirenen” — Entfernung direkt ermittelbar! Unabhängiger Test der kosmischen Entfernungsleiter

Zusammenfassung

- kurze Gammablitz sind verschmelzende Neutronensterne!
- verschmelzende Neutronensterne verantwortlich für schwere Elemente
- Gravitationswellen haben in der Tat Lichtgeschwindigkeit
- Kosmische Entfernungsleiter ist OK
- Neutronensterne am kompakten Ende der Skala (Zustandsgleichung)

Unerwartet:

- Gammablitz schräg von der Seite
- Absorptionseigenschaften der Kernmaterie?

Die Rolle der kosmischen Evolution

- GRB970508: Hubble-Relation erlaubt Rückschluss von Rotverschiebung auf Entfernung
- GRB030323: Super-/Hypernovae als Stern-Endzustände
- GRB050724: Wichtig, dass keine Sternentstehung in elliptischen Galaxien
- Doppel-Neutronensterne: wie häufig?
- Neues zur chemischen Evolution im Universum!
- NSNS-Verschmelzungen erlauben Bestimmung der Hubblekonstante