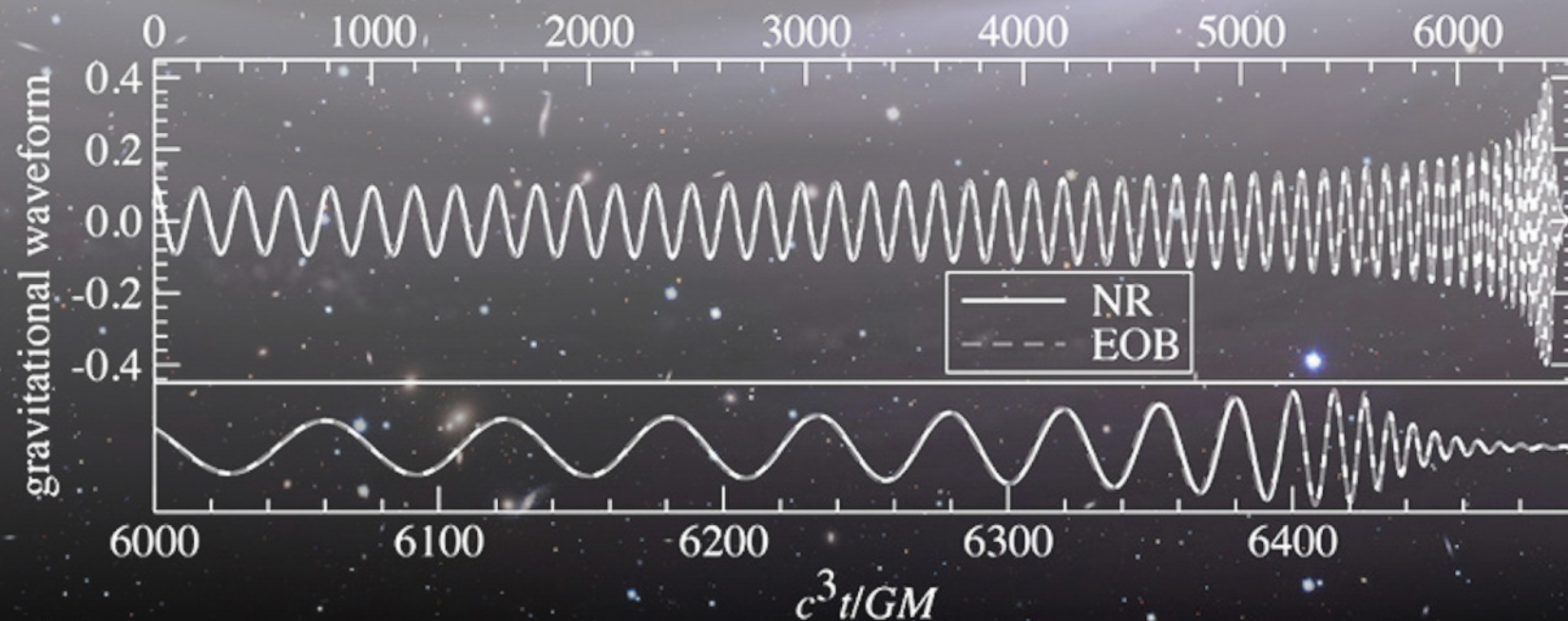


# Direkter Nachweis von Gravitationswellen mit dem LIGO Experiment

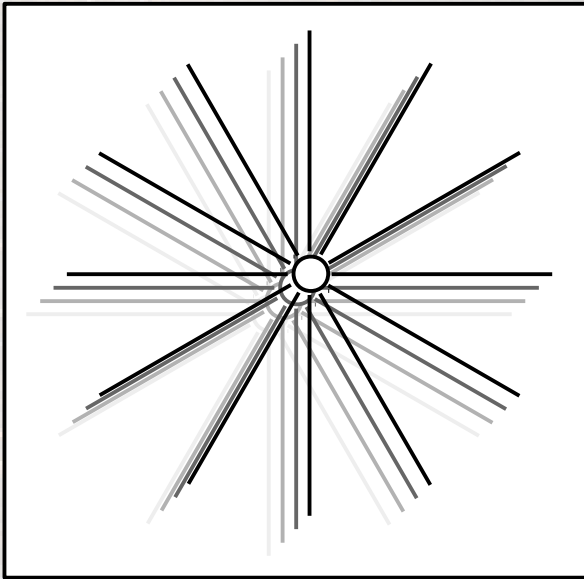
Roger Wolf  
29. June 2016



# Was sind Gravitationswellen?

- Wellen in der Raumzeit, die durch eine beschleunigte Masse ausgelöst werden.

## Newtonsche Mechanik:



Instantane Ausbreitung – Feld bewegt sich starr mit Masse mit.

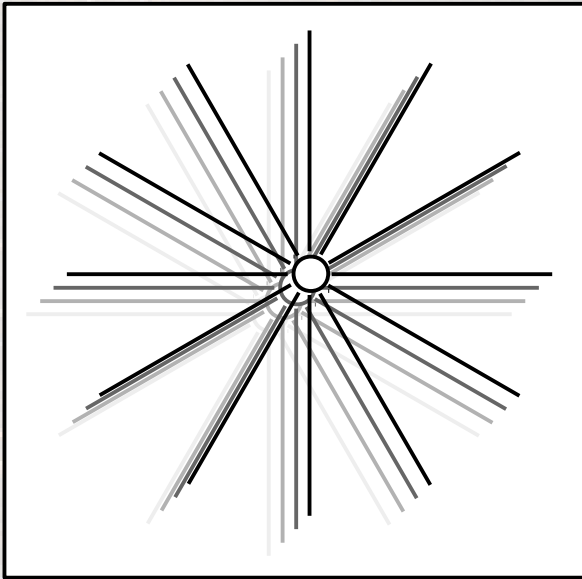
## Allgemeine Relativitätstheorie:

- Informationen (Felder) breiten sich mit endlicher Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ) aus.
- Wo sich eine Masse in der Raumzeit bewegt löst sich ihr Gravitationsfeld in Wellen ab und kann frei durch den Raum propagieren.
- Verzerrungen des Raumes (zwischen zwei Testmassen).

# Was sind Gravitationswellen?

- Wellen in der Raumzeit, die durch eine beschleunigte Masse ausgelöst werden.

## Newtonsche Mechanik:



Instantane Ausbreitung – Feld bewegt sich starr mit Masse mit.

## Allgemeine Relativitätstheorie:

- Informationen (Felder) breiten sich mit endlicher Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ) aus.
- Wo sich eine Masse in der Raumzeit bewegt löst sich ihr Gravitationsfeld in Wellen ab und kann frei durch den Raum propagieren.
- Verzerrungen des Raumes (zwischen zwei Testmassen).

### Mathematische Beschreibung:

$$T_{\mu\nu} = \frac{c^4}{8\pi G} G_{\mu\nu} \quad G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

$T_{\mu\nu}$  : Energie-Impuls-Tensor

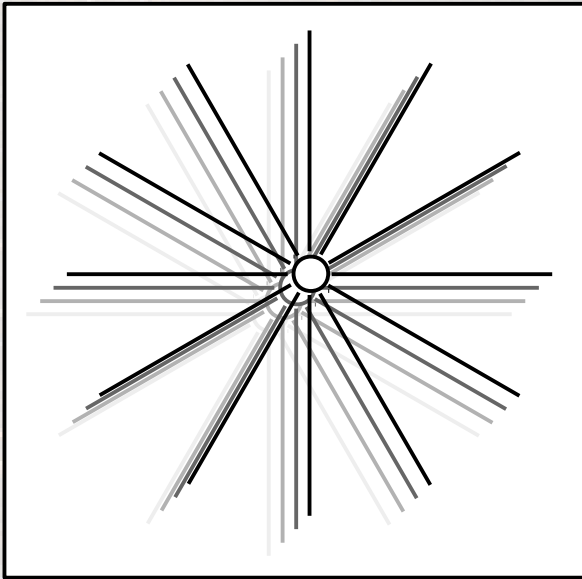
$G_{\mu\nu}$  : Krümmung des Raumes

$$\frac{c^4}{8\pi G} = 4.83 \times 10^{42} \text{N}$$

# Was sind Gravitationswellen?

- Wellen in der Raumzeit, die durch eine beschleunigte Masse ausgelöst werden.

## Newtonsche Mechanik:



Instantane Ausbreitung – Feld bewegt sich starr mit Masse mit.

## Allgemeine Relativitätstheorie:

- Informationen (Felder) breiten sich mit endlicher Lichtgeschwindigkeit ( $c$ ) aus.
- Wo sich eine Masse in der Raumzeit bewegt löst sich ihr Gravitationsfeld in Wellen ab und kann frei durch den Raum propagieren.
- Verzerrungen des Raumes (zwischen zwei Testmassen).

### Mathematische Beschreibung:

$$T_{\mu\nu} = \frac{c^4}{8\pi G} G_{\mu\nu} \quad G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

### Näherung für kleine Auslenkungen (ohne Quellen):

$$g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\partial_t^2) h_{\mu\nu} = 0$$

$$h_{\mu\nu}(x, t) = h_+(t - z/c) + h_\times(t - z/c)$$

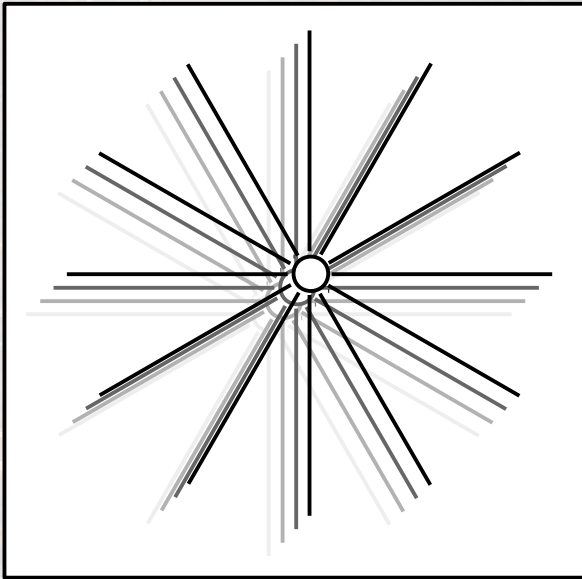
$$h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \dots & & \\ & \ddots & \\ \vdots & & \ddots \end{pmatrix}$$

10 gekoppelte lineare Differentialgleichungen zweiten Grades.

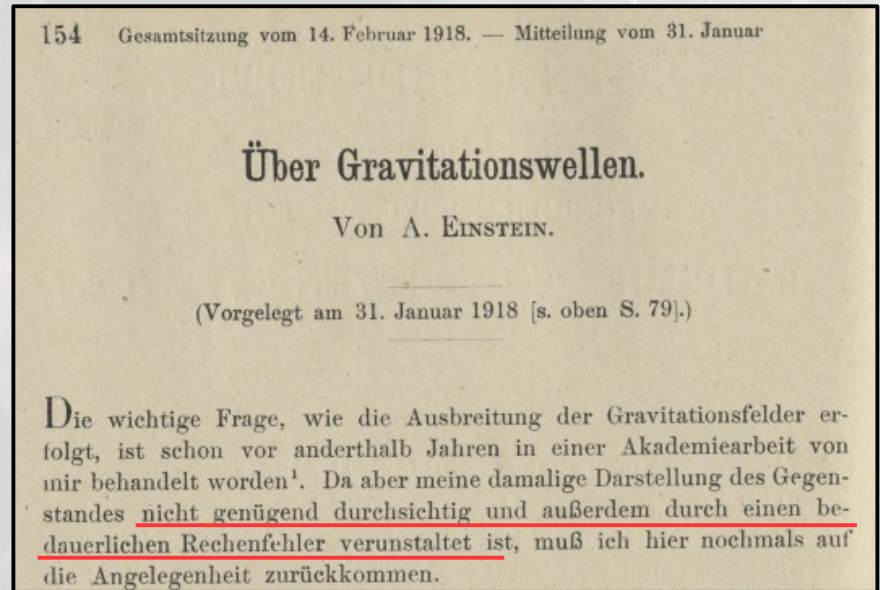
# Was sind Gravitationswellen?

- Wellen in der Raumzeit, die durch eine beschleunigte Masse ausgelöst werden.

## Newtonsche Mechanik:



Instantane Ausbreitung – Feld bewegt sich starr mit Masse mit.



Königl.-Preuß. Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte (1918)

## Mathematische Beschreibung:

$$T_{\mu\nu} = \frac{c^4}{8\pi G} G_{\mu\nu} \quad G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

## Näherung für kleine Auslenkungen (ohne Quellen):

$$g_{\mu\nu} \approx \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\partial_t^2) h_{\mu\nu} = 0$$

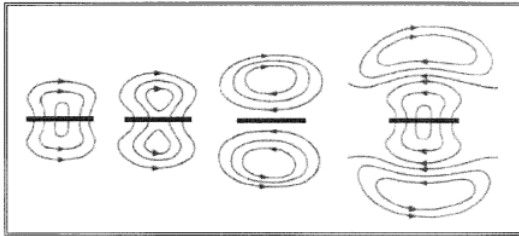
$$h_{\mu\nu}(x, t) = h_+(t - z/c) + h_\times(t - z/c)$$

$$h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \dots & & \\ & \ddots & \\ \vdots & & \ddots \end{pmatrix}$$

10 gekoppelte lineare Differentialgleichungen zweiten Grades.

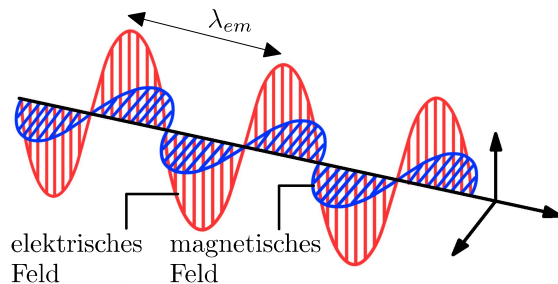
# Elektrodynamik

- Ladung: elektrisch (”+” und ”-”).
- Abstrahlung: in führender Ordnung Dipol.



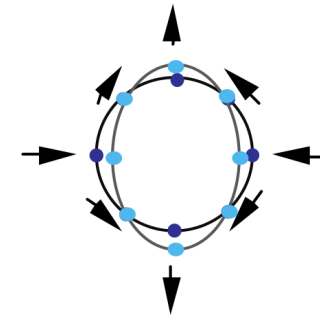
keine elektrischen Monopole

- Transversalwelle mit Phasengeschwindigkeit  $c$ .
- Zwei Polarisationsfreiheitsgrade um  $90^\circ$  gegeneinander rotiert.



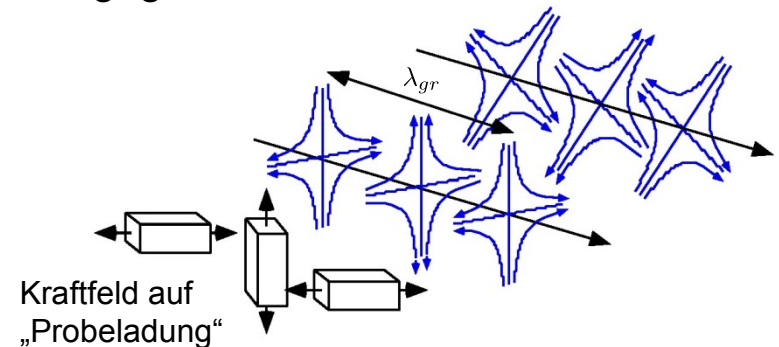
# Gravitation

- Ladung: Masse (keine neg. Masse).
- Abstrahlung: in führender Ordnung Quadrupol.



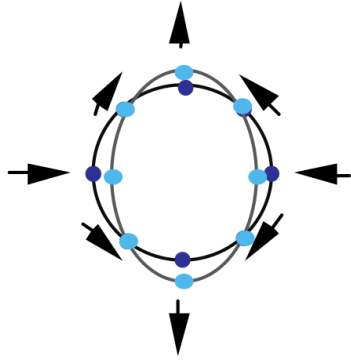
keine variierenden Monopole oder Dipole

- Transversalwelle mit Phasengeschwindigkeit  $c$  ( $\rightarrow$  Gezeitenwellen).
- Zwei Polarisationsfreiheitsgrade um  $45^\circ$  gegeneinander rotiert.

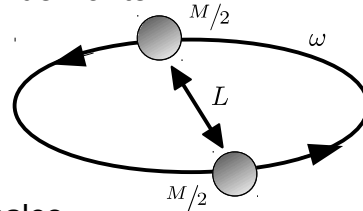


# Erzeugung und Nachweis

Erzeugung: Zeitl. variierende Massenverteilung

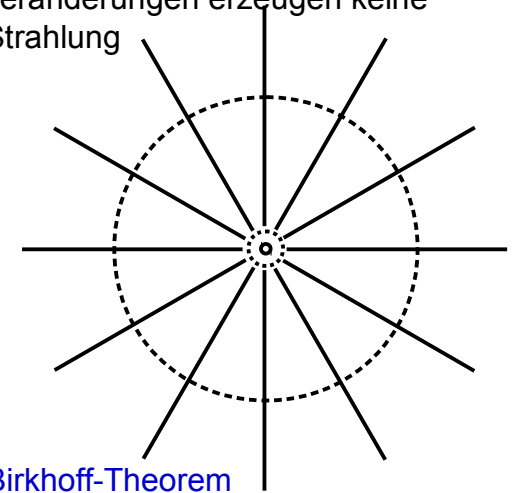


Einfachstes Beispiel:  
rotierende Hantel



Maximales  
Quadrupolmoment:  $ML^2$

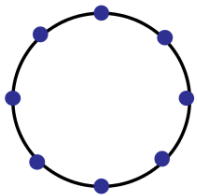
Sphärisch-symmetrische Ladungsveränderungen erzeugen keine Strahlung



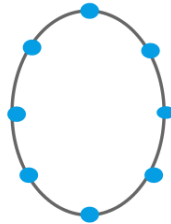
Birkhoff-Theorem

Nachweis:

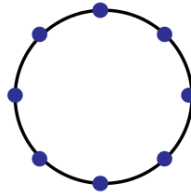
$h_+$



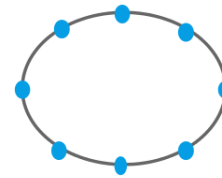
0



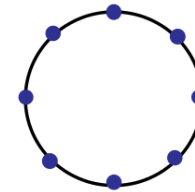
$\pi/2$



$\pi$



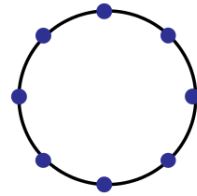
$3\pi/2$



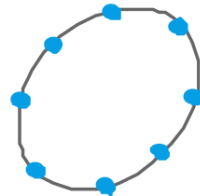
$2\pi$

Resonante  
Schwingung: zeit-  
inverser Prozess  
der Erzeugung

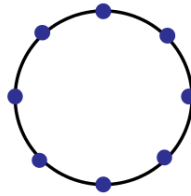
$h_\times$



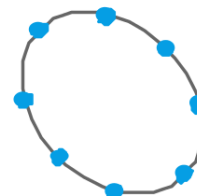
0



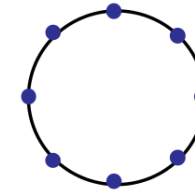
$\pi/2$



$\pi$



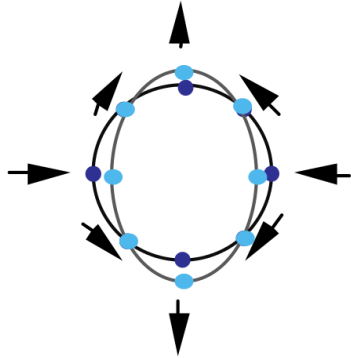
$3\pi/2$



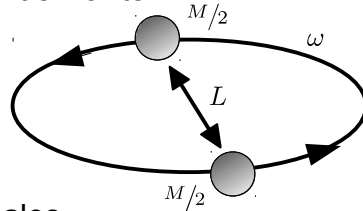
$2\pi$

# Erzeugung und Nachweis

Erzeugung: Zeitl. variierende Massenverteilung



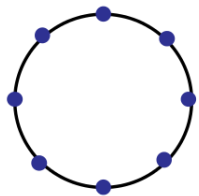
Einfachstes Beispiel:  
rotierende Hantel



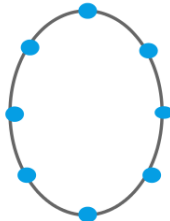
Maximales  
Quadrupolmoment:  $ML^2$

Nachweis:

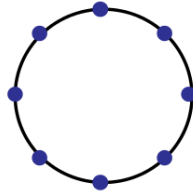
$h_+$



$0$

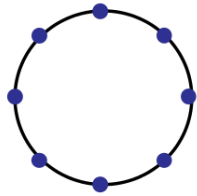


$\pi/2$

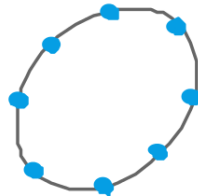


$\pi$

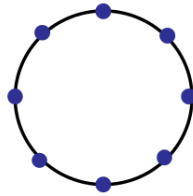
$h_\times$



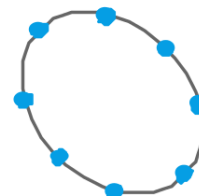
$0$



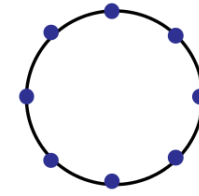
$\pi/2$



$\pi$



$3\pi/2$



$2\pi$

Energieabstrahlung ( $\rightarrow$  Luminosität):

$$L_{gr} = \frac{G}{5c^5} \sum_{jk} \left| \frac{d^3 D_{jk}}{dt^3} \right|^2 \approx \frac{G}{5c^5} M^2 L^4 \omega^6$$

$D_{jk}$ : Quadrupolmoment der  
Massenverteilung

$$\frac{G}{5c^5} = 5.49 \times 10^{-54} \text{ sJ}^{-1}$$

Relative Verzerrung des Raumes im Abstand  $r$ :

$$h \approx \frac{GM R^2 \omega^2}{c^4 r}$$

$$M = 1000 \text{ kg}$$

$$\omega = 1 \text{ kHz}$$

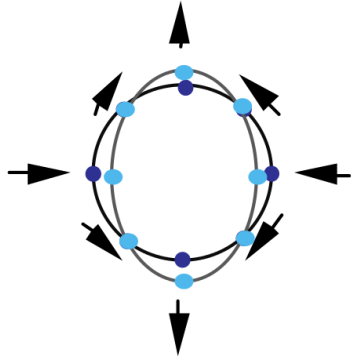
$$R = 1 \text{ m}$$

$$r = 300 \text{ m}$$

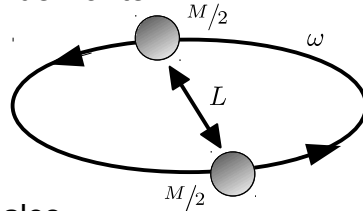


# Erzeugung und Nachweis

Erzeugung: Zeitl. variierende Massenverteilung



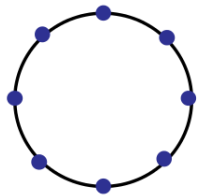
Einfachstes Beispiel:  
rotierende Hantel



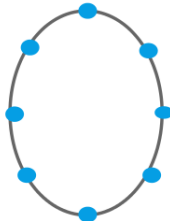
Maximales  
Quadrupolmoment:  $ML^2$

Nachweis:

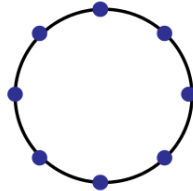
$h_+$



0

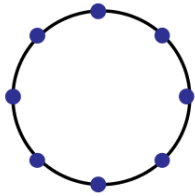


$\pi/2$

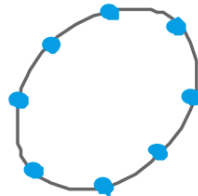


$\pi$

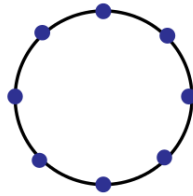
$h_\times$



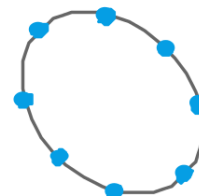
0



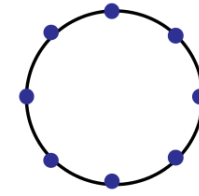
$\pi/2$



$\pi$



$3\pi/2$



$2\pi$

Energieabstrahlung ( $\rightarrow$  Luminosität):

$$L_{gr} = \frac{G}{5c^5} \sum_{jk} \left| \frac{d^3 D_{jk}}{dt^3} \right|^2 \approx \frac{G}{5c^5} M^2 L^4 \omega^6$$

$D_{jk}$ : Quadrupolmoment der Massenverteilung

$$\frac{G}{5c^5} = 5.49 \times 10^{-54} \text{ sJ}^{-1}$$

Relative Verzerrung des Raumes im Abstand  $r$ :

$$h \approx \frac{GM R^2 \omega^2}{c^4 r}$$

$$M = 1000 \text{ kg}$$

$$\omega = 1 \text{ kHz}$$

$$R = 1 \text{ m}$$

$$r = 300 \text{ m}$$

$$L_{gr} \approx 10^{-30} \text{ J/s}$$

$$h \approx 10^{-35}$$

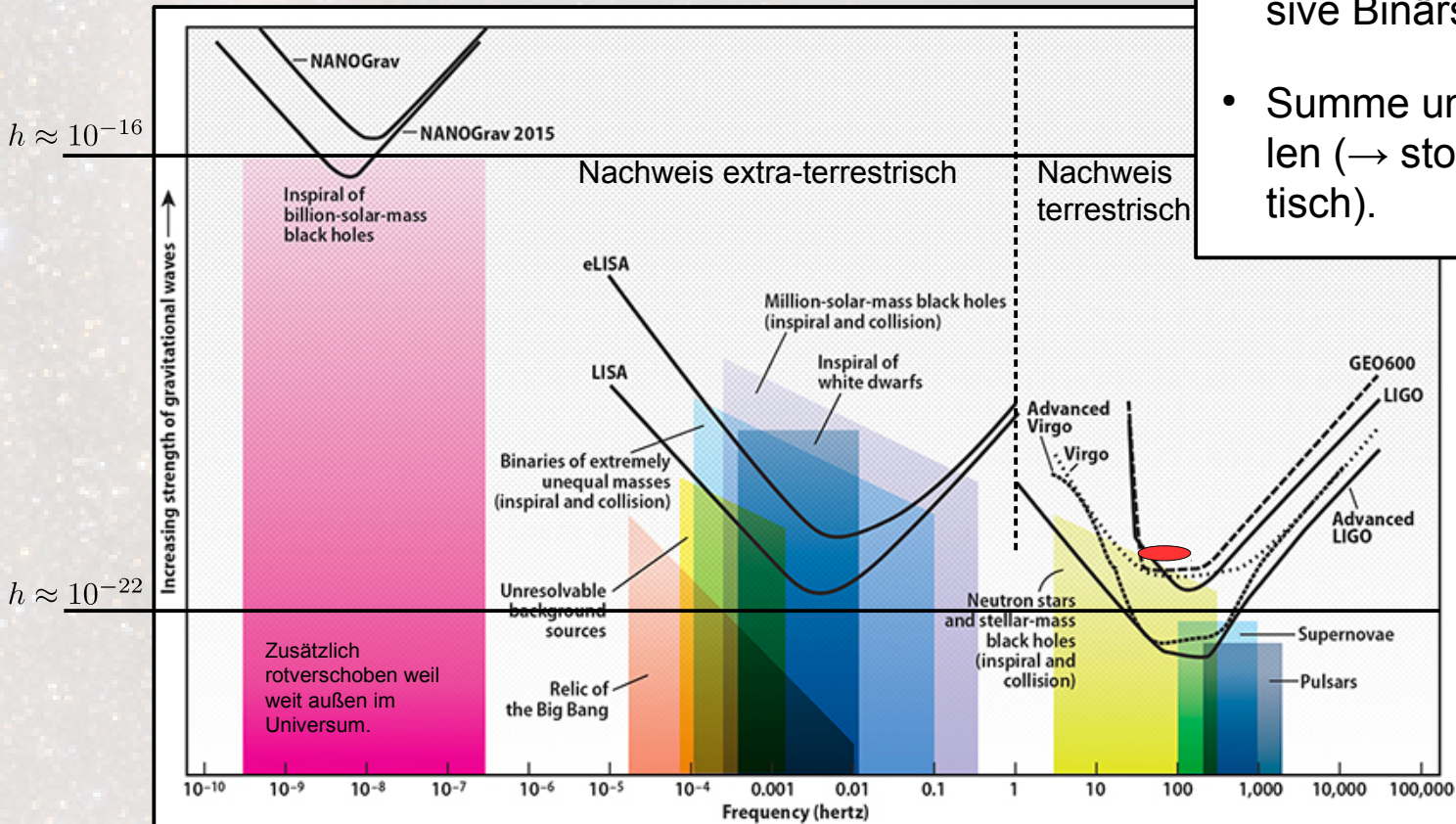
Erzeugung im Labor mit irdischen Mitteln nicht möglich ( $\rightarrow$  astronomische Quellen, Schwarze Löcher).

# Quellen im Universum

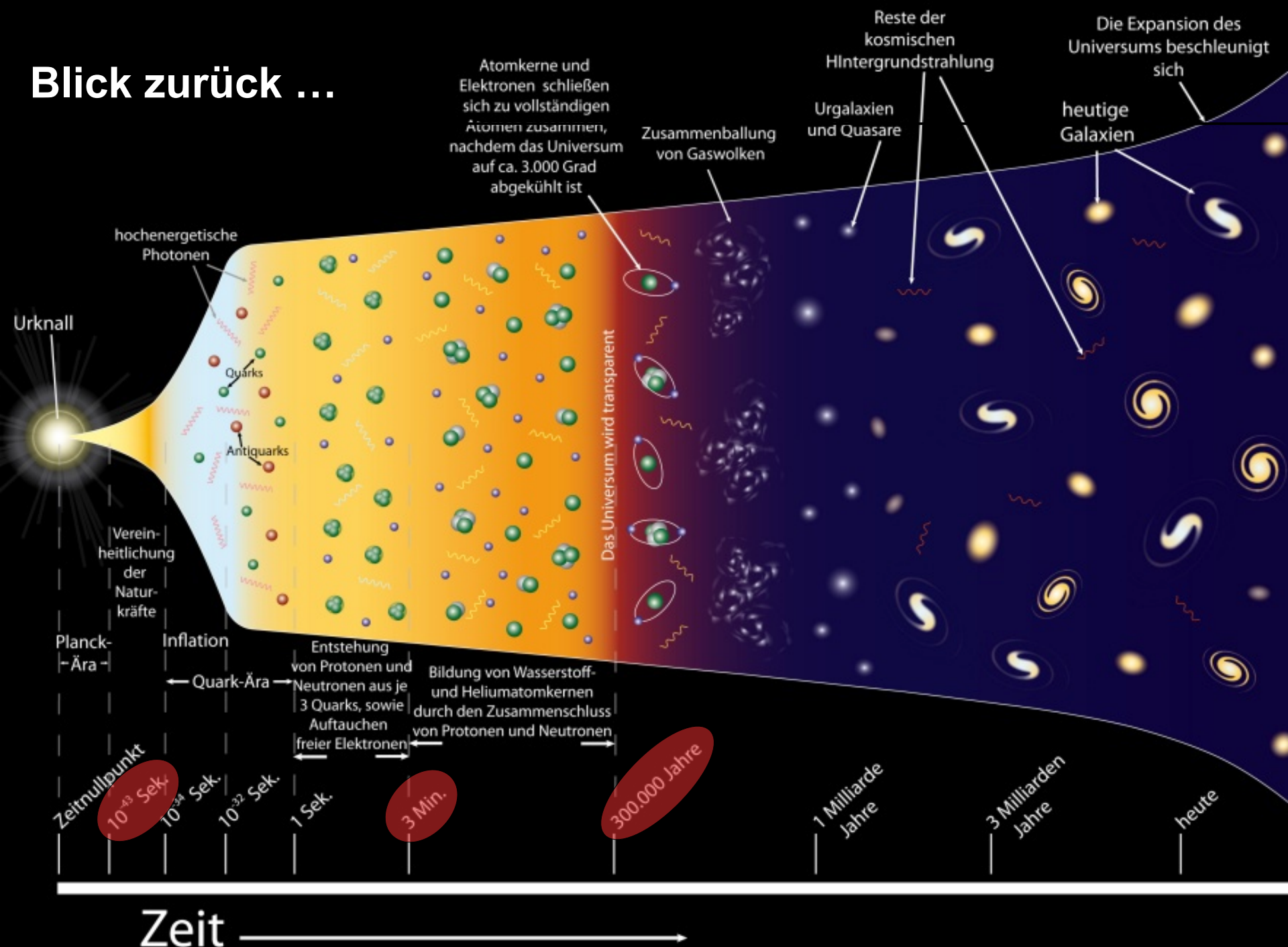
- Frequenz und Intensitätsvorhersagen schwierig (→ starke Felder bei Erzeugung).
- Allgemein: große Masse → niedrige Frequenz.

## Klassifikation:

- *Catastrophic burst* (→ Verschmelzung von Schwarzen Löchern / Neutronensternen, Supernovae).
- Monochromatisch / periodisch (→ quasistabile massive Binärsysteme).
- Summe unaufgelöster Quellen (→ stochastisch, exotisch).

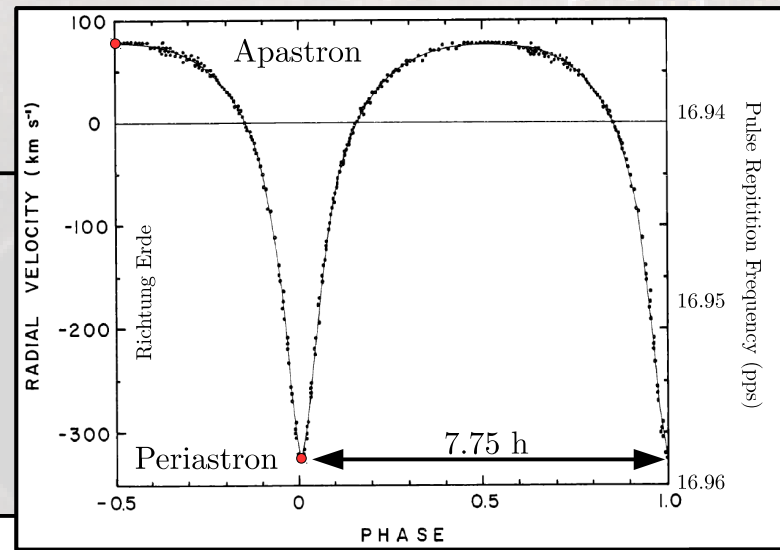


# Blick zurück ...

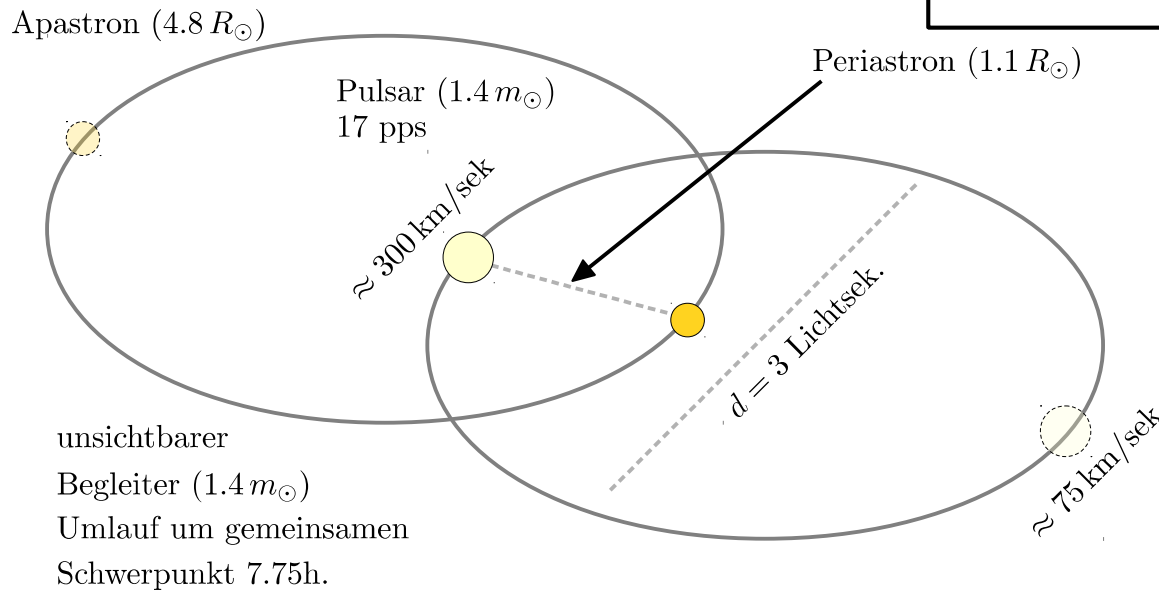


# Indirekter Nachweis

- Entdeckung des Pulsars **PSR1913+16** (Hulse & Taylor Univ. of Massachusetts).
- Periodisches Signal unterliegt charakteristischer Modulation.



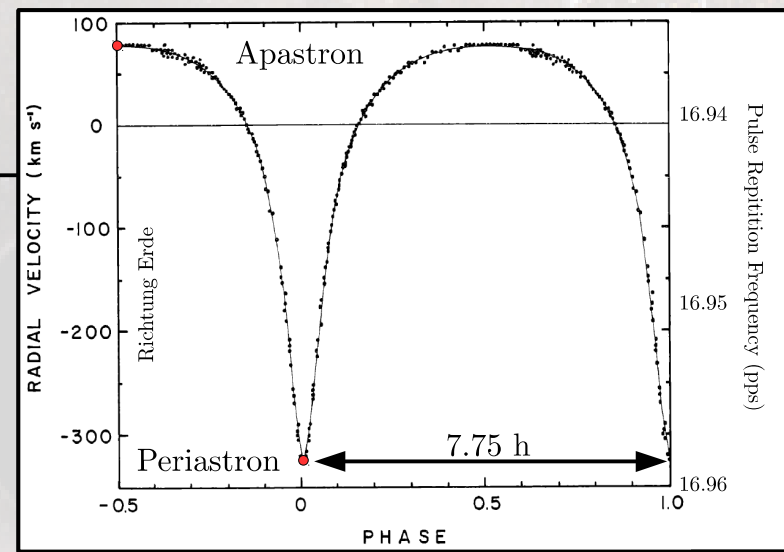
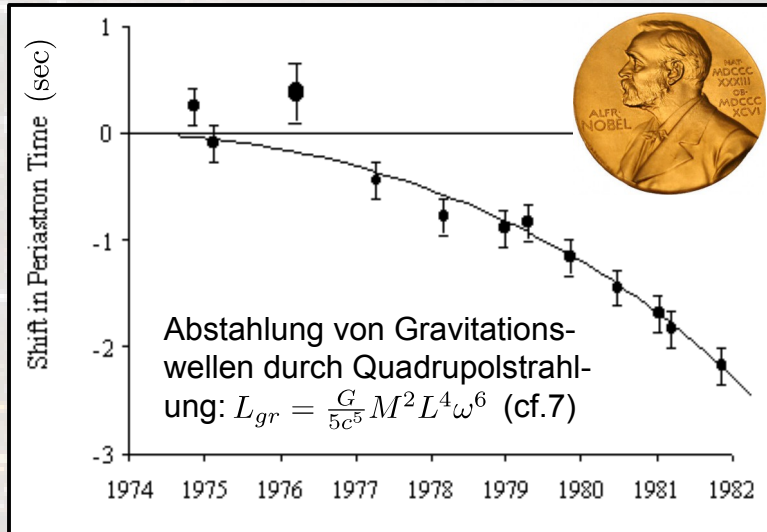
[Astrophys. J. 195 \(1975\) L51-53](#)



Präzise Vermessung der Modulation erlaubt Tests der allgemeinen Relativitätstheorie:

- (1) Zeitdilatation in Periastron rel. zu Apastron (→ Form der Modulation innerhalb einer Periode).
- (2) Doppelsternsystem strahlt Gravitationswellen ab und verliert dadurch Energie (→ Umlaufzeit nimmt ab)!

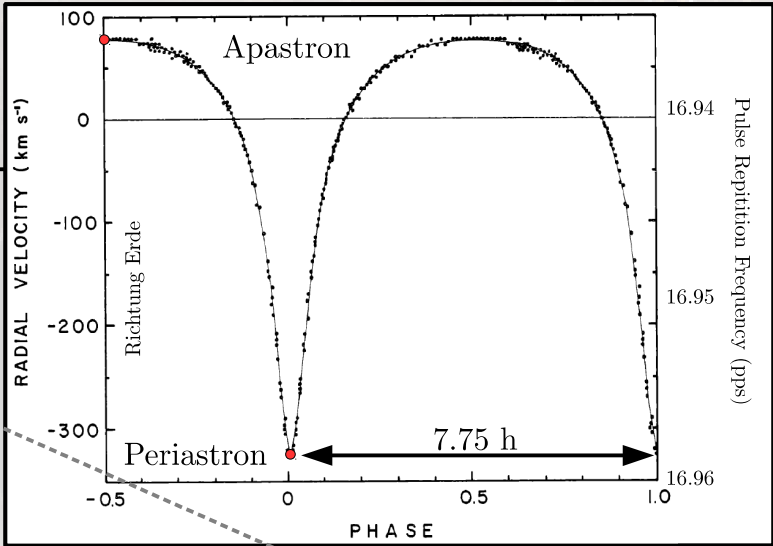
# Indirekter Nachweis



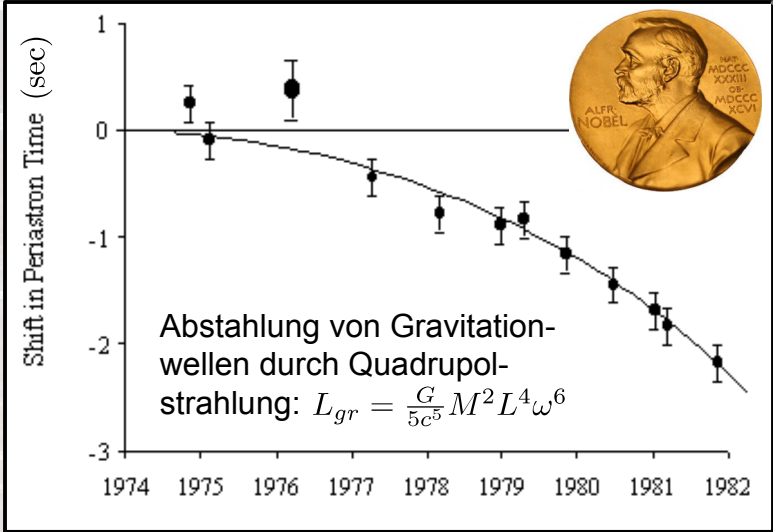
[Astrophys. J. 195 \(1975\) L51-53](#)

- Abnahme der Umlaufzeit 76 ms pro Jahr.
- Umlaufbahn schrumpft um 3mm pro Jahr.
- Kollision in etwa 300 Millionen Jahren.

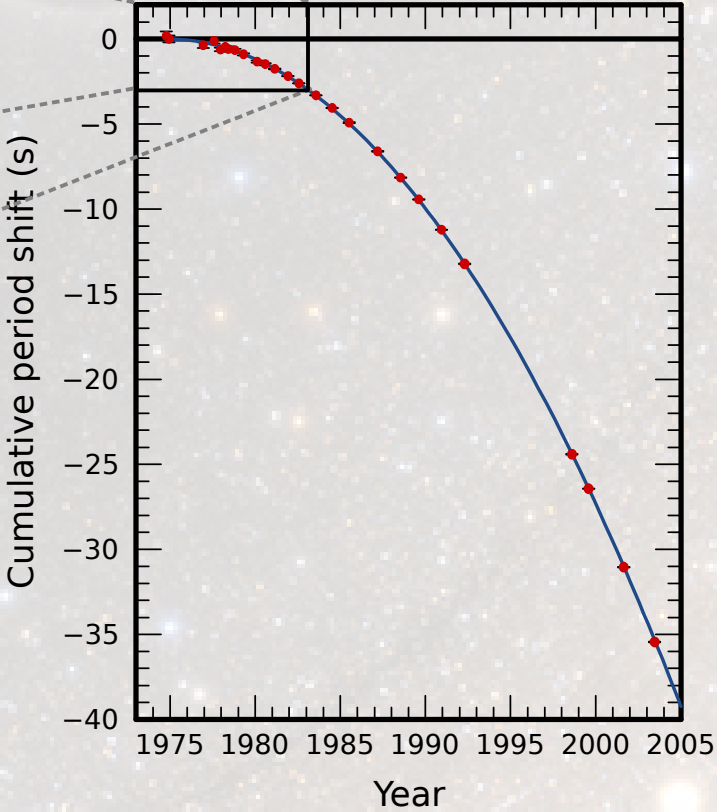
# Indirekter Nachweis



Astrophys. J. 195 (1975) L51-53



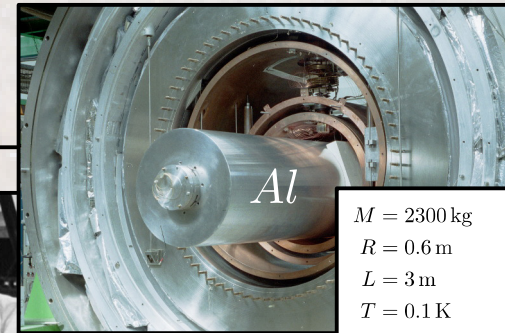
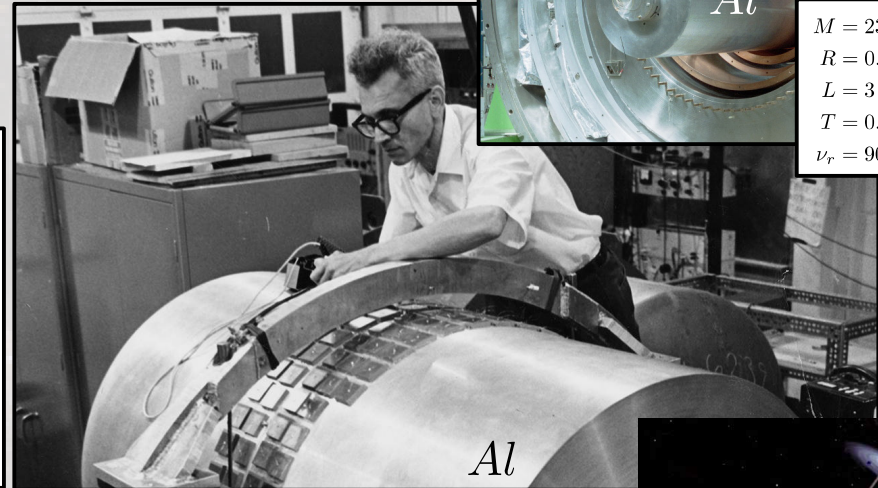
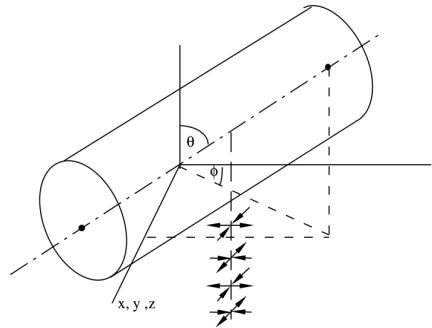
- Abnahme der Umlaufzeit 76 ms pro Jahr.
- Umlaufbahn schrumpft um 3mm pro Jahr.
- Kollision in eta 300 Millionen Jahren.



# Direkter Nachweis

- Erste Versuche in den 1960er Jahren ([Joseph Weber](#), Univ. Maryland).

Gravitationswelle regt (high-Q) Antenne auf Resonanzfrequenz an.  
 Resonantes Schwingen wird exakt vermessen.  
 Antenne schwingt nach (→ Hysterese)!



$M = 2300 \text{ kg}$   
 $R = 0.6 \text{ m}$   
 $L = 3 \text{ m}$   
 $T = 0.1 \text{ K}$   
 $\nu_r = 908, 924 \text{ Hz}$

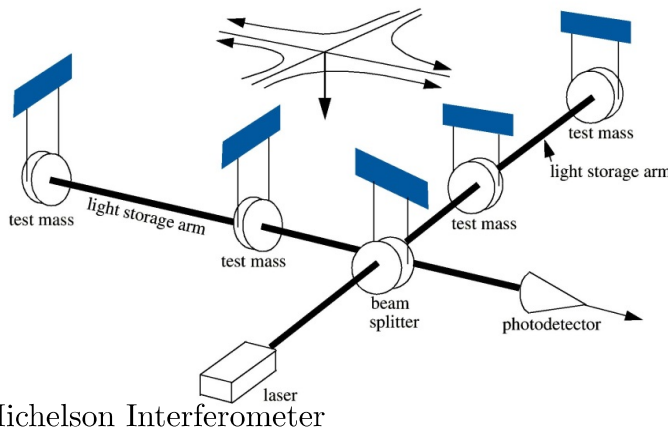
[Phys. Rev. 117 306 \(1960\)](#)

[Phys. Rev. Lett. 22 1320 \(1969\)](#)

[Phys. Rev. Lett. 25 180 \(1970\)](#)

- Interferometrische Messungen:

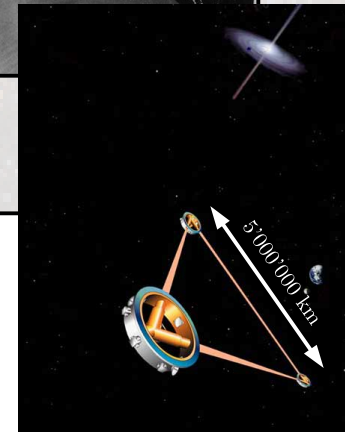
Durchgang der Gravitationswelle wird (nicht-resonant) interferometrisch vermessen.



Michelson Interferometer

[Phys. Rev. D 379 \(1978\)](#)

- Terrestrische Experimente (LIGO, VIRGO, GEO, TAMA, ... ).
- Satellitenbasierte Experimente (LISA, eLISA/NGO, Start: 2034).
- Zeitinformation für Modulationsmessungen von Pularen!

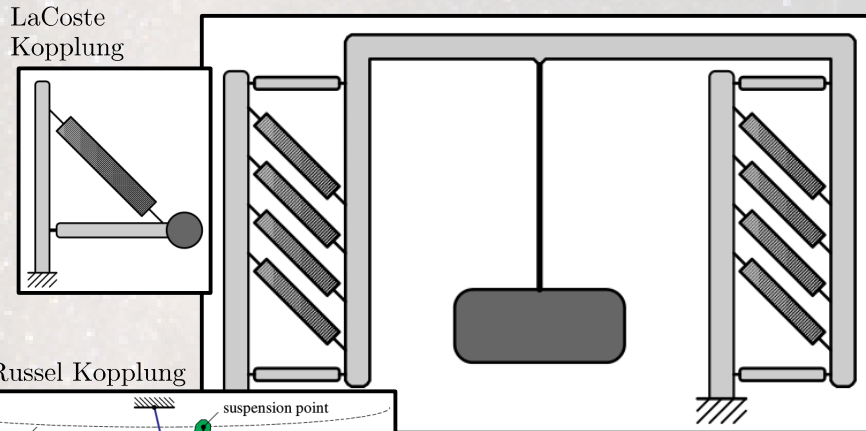


Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

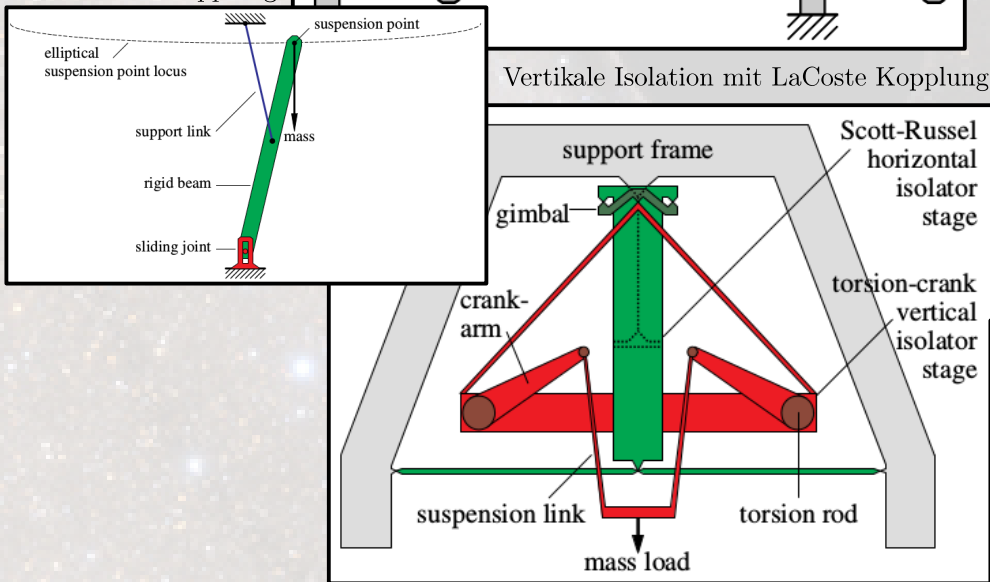
# Technologische Herausforderungen

- Suche nach kleinsten Signalen in einer Umgebung voller Störungen!

Isolation der Testmassen von äußeren Vibrationen:

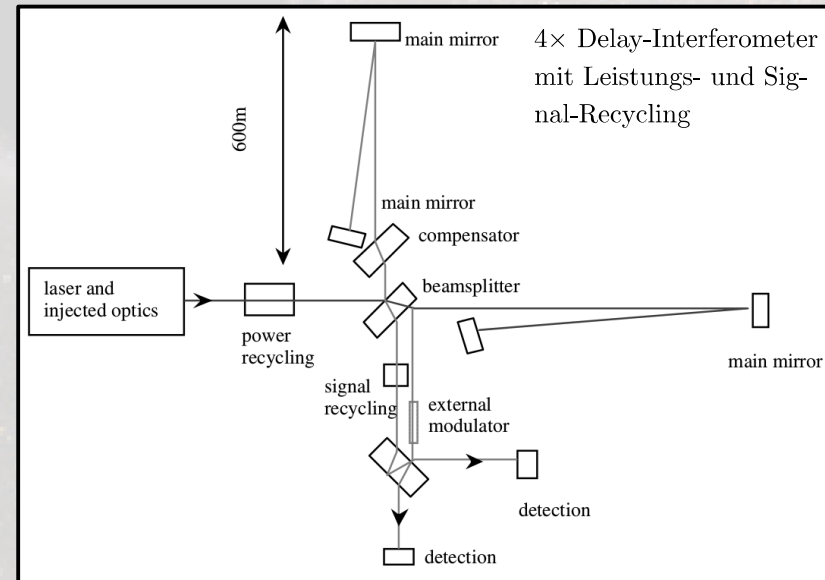


Vertikale Isolation mit LaCoste Kopplung

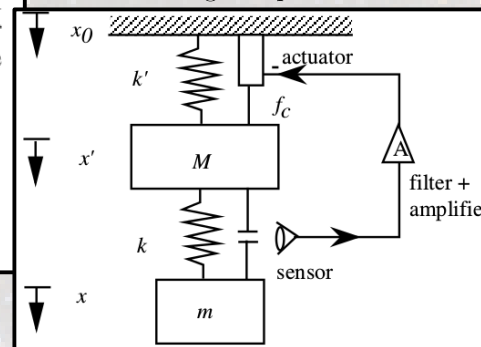


3-d Isolationsstufe Rotationskurbel, vertikaler Isolation und horizontaler Scott-Russell Isolationsstufe

Frequenzstabile Hochleistungslaser:



Aktive Störungskompensation

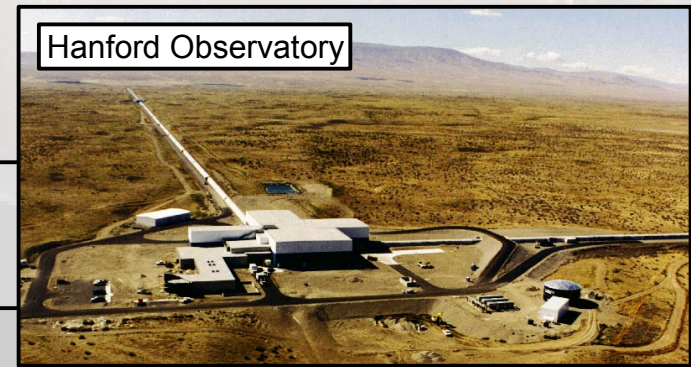




# Das LIGO Experiment



- Zwei Interferometer im Abstand von 3002 km.



Hanford Observatory



Caltech

MIT

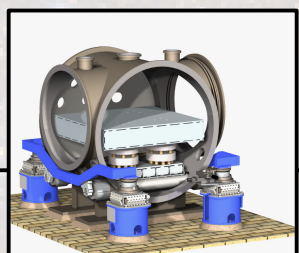
3002 km ( $L/c = 10$  ms)



Livingston Observatory

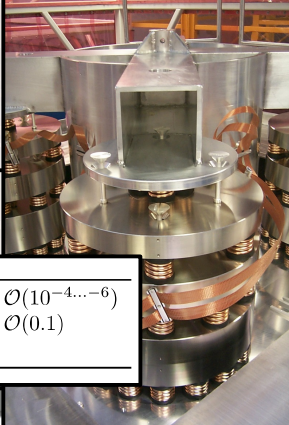
- Zwei lotrechte Interferometerarme.
- Jeder Arm 4 km lang.
- Ziel: beobachte rel. Längenänderung von  $10^{-21}$  ( $\rightarrow$  absolute Änderung von  $10^{-18}$  m).

# Das Interferometer



Unterdrückung seismischer Bew.  $\mathcal{O}(10^{-4} \dots -6)$   
 Mikroseismische Bew. (0.15 Hz)  $\mathcal{O}(0.1)$   
 Tw. Unterdrückung der Erdtide

Pre-stabilized laser

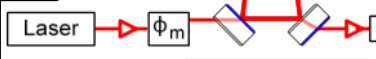


Active seismic isolation



Input optics

Nb:YAG  $\lambda = 1064 \text{ nm}$

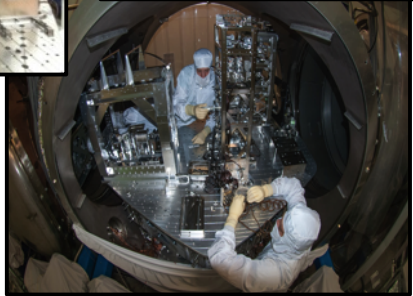
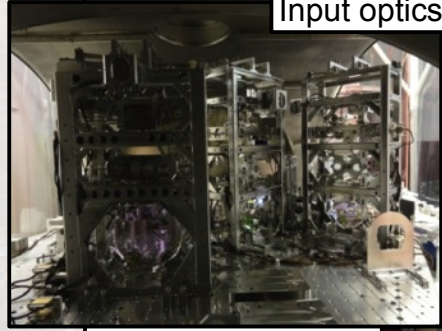


Input Mode Cleaner

125 W  
 T= 3% PRM  
 5.7 kW

Input optics

Output mode cleaner

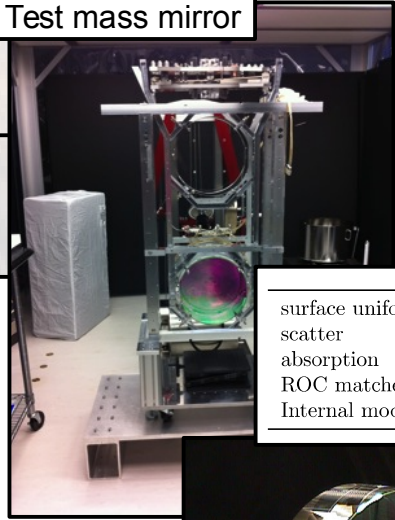


T= 20% SRM  
 FI

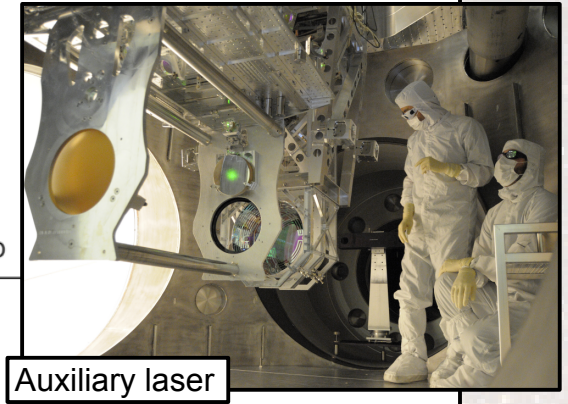
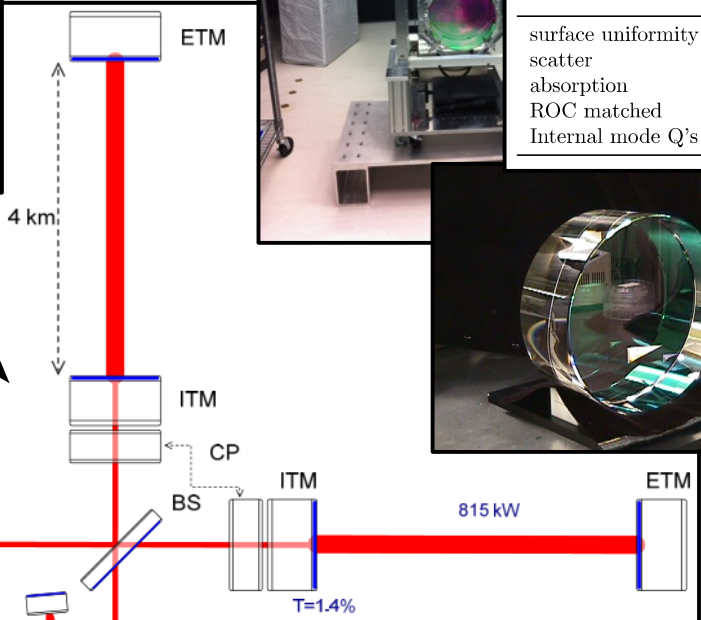
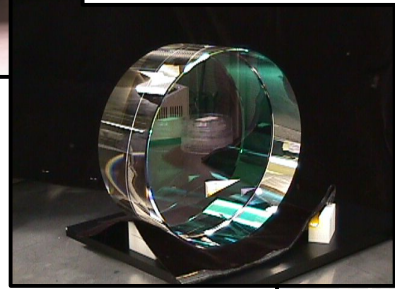
PD

Output Mode Cleaner

Test mass mirror



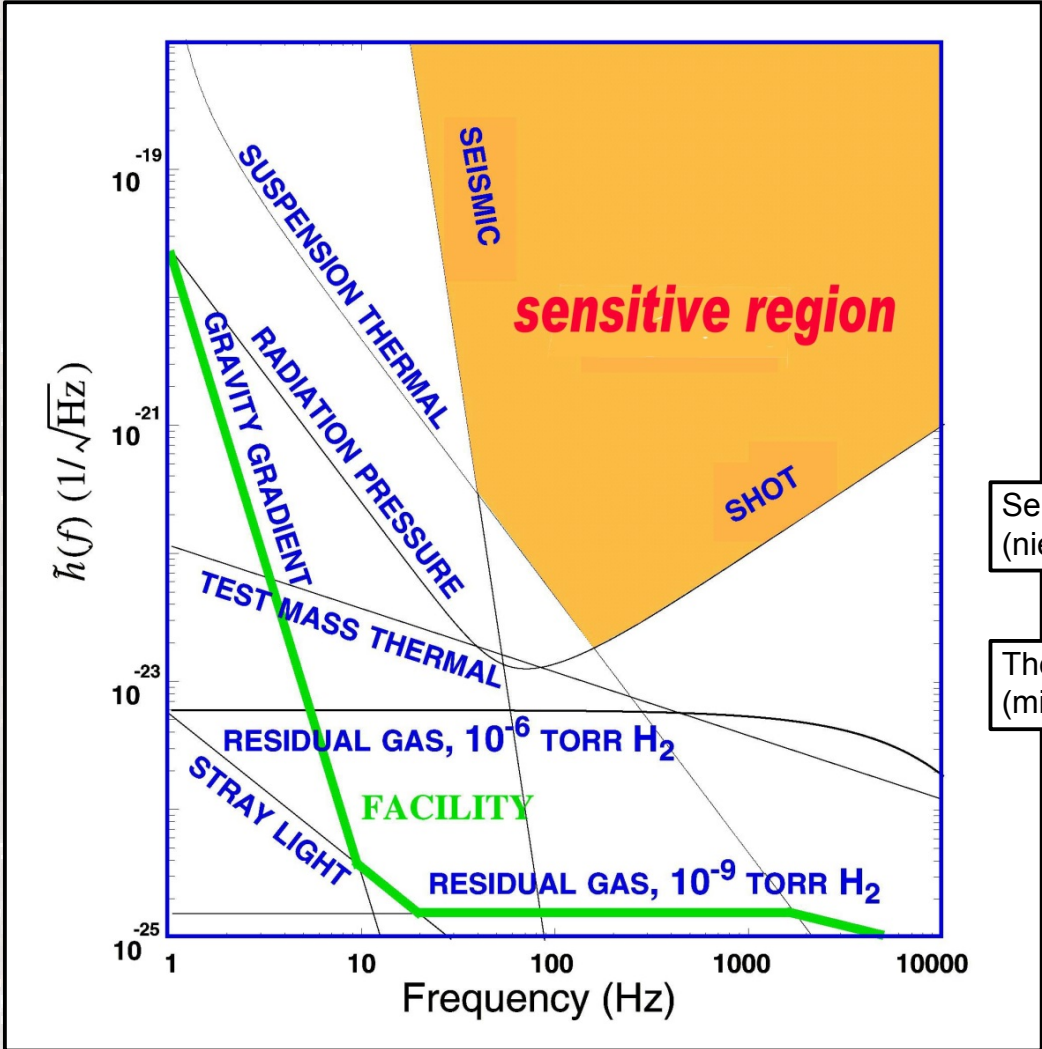
surface uniformity	< 1 nm
scatter	< 50 ppm
absorption	< 2 ppm
ROC matched	< 3 %
Internal mode Q's	> 2 · 10 <sup>6</sup>



Auxiliary laser

# Untergrundprofil

- Instrumenteller Untergrund:



Seismische Bewegungen  
(niedrige Frequenzen)

Single photon statistics  
(hohe Frequenzen)

Thermisches Rauschen  
(mittlere Frequenzen)

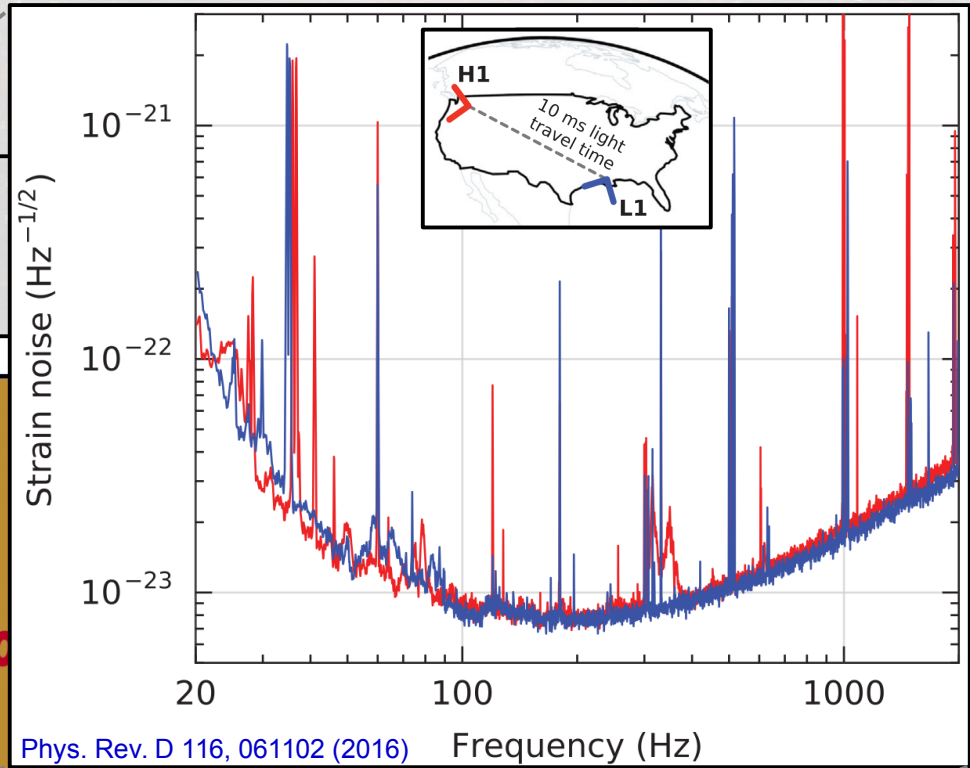
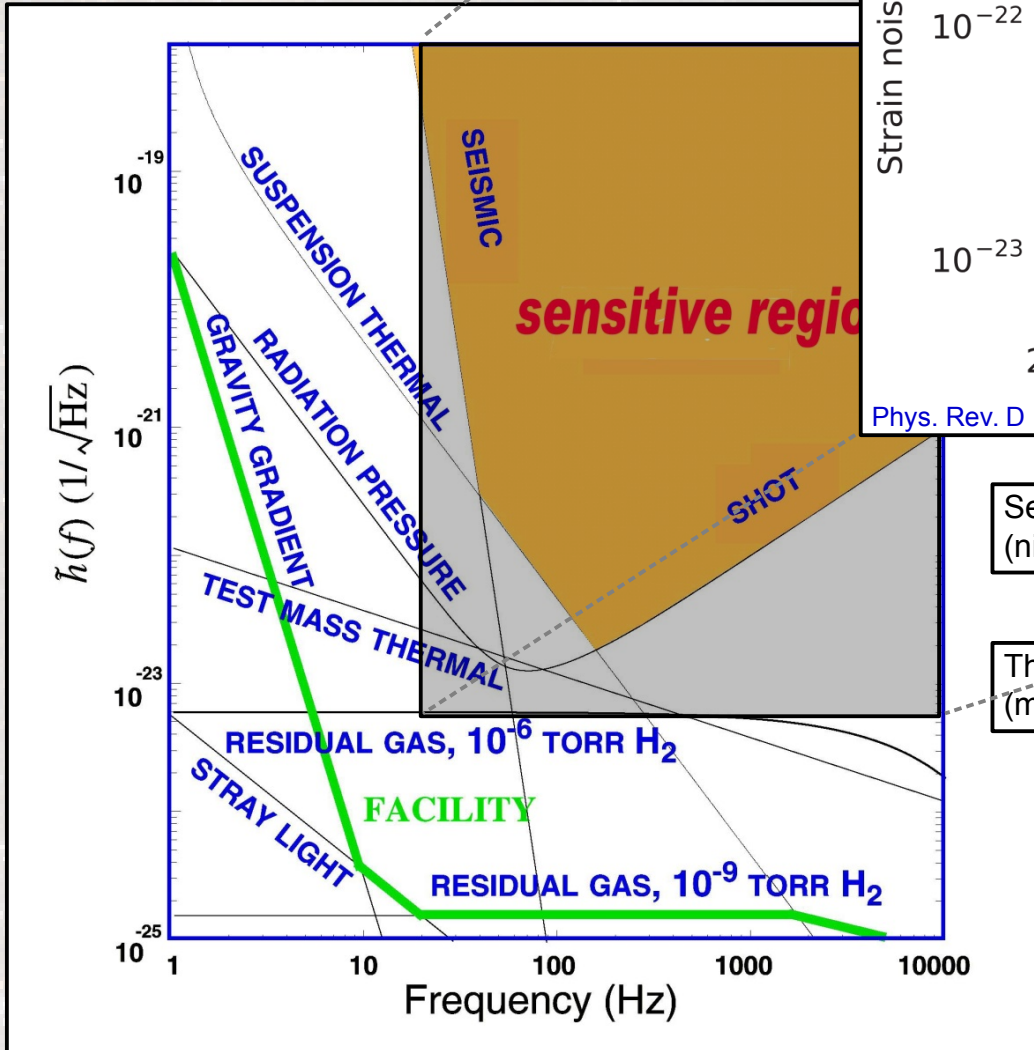
Streuung mit  
Restgasmolekülen

Wellenlängenstabilität des  
Lasers

Strahlungsdruck auf die  
Testmassen (Spiegel)

# Untergrundprofil

- Instrumenteller Untergrund:



Seismische Bewegungen  
(niedrige Frequenzen)

Single photon statistics  
(hohe Frequenzen)

Thermisches Rauschen  
(mittlere Frequenzen)

Streuung mit  
Restgasmolekülen

Wellenlängenstabilität des  
Lasers

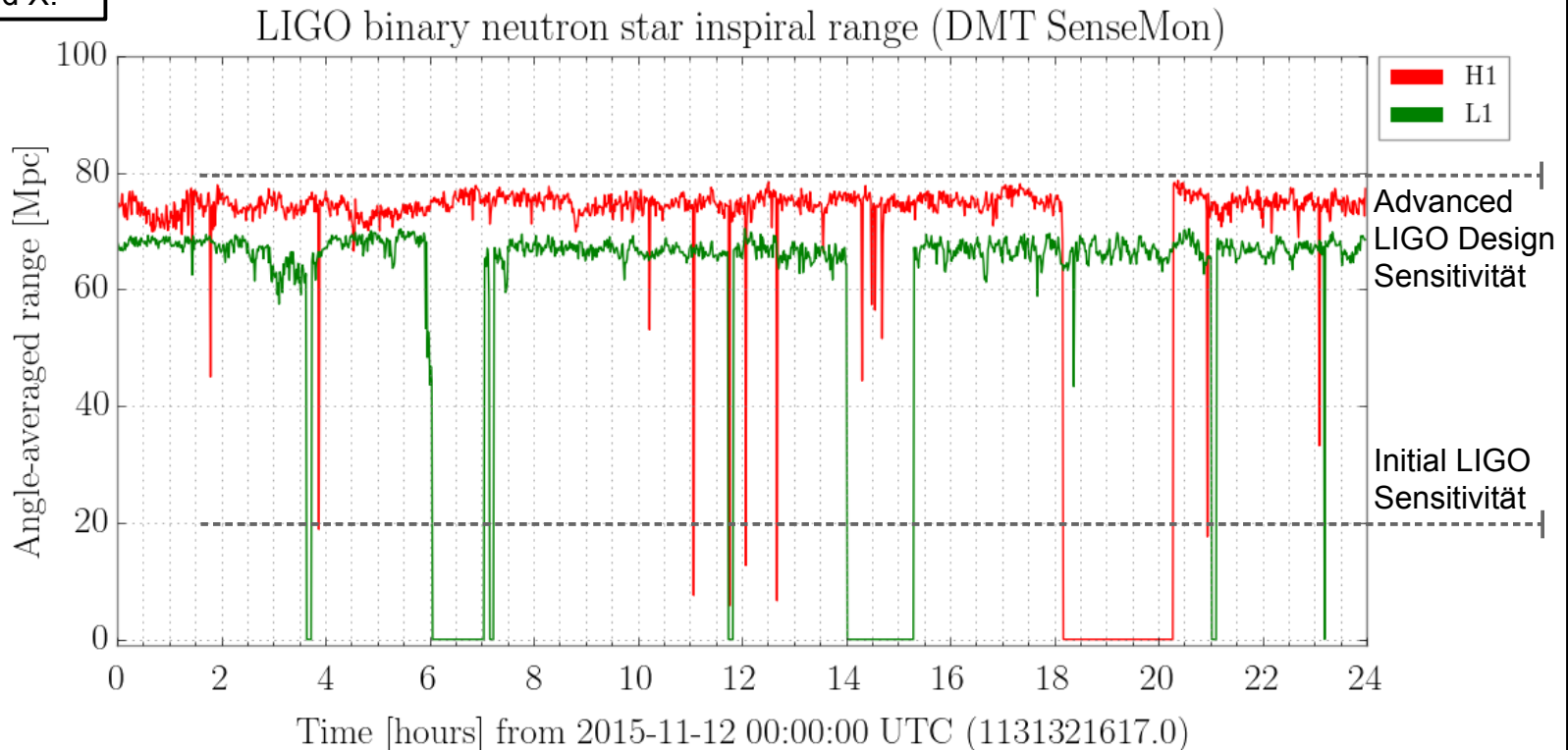
Strahlungsdruck auf die  
Testmassen (Spiegel)

# Typisches Datennahmeprofil

- Beide Interferometer in Betrieb (→ 50% duty cycle).

- Von Daten unbeeinflusste Analyse (→ „*blind analysis*“).
- Gelegentlich: „*injections*“ zum Test der Ausleseketten (→ mechanisch, elektronisch und in *software*).
- Online monitor um offensichtliche Ereignisse schnell identifizieren zu können (→ zur Weiterleitung an astronomische *arrays*).

Nachweis: *NS binary merger*  
im Abstand X.

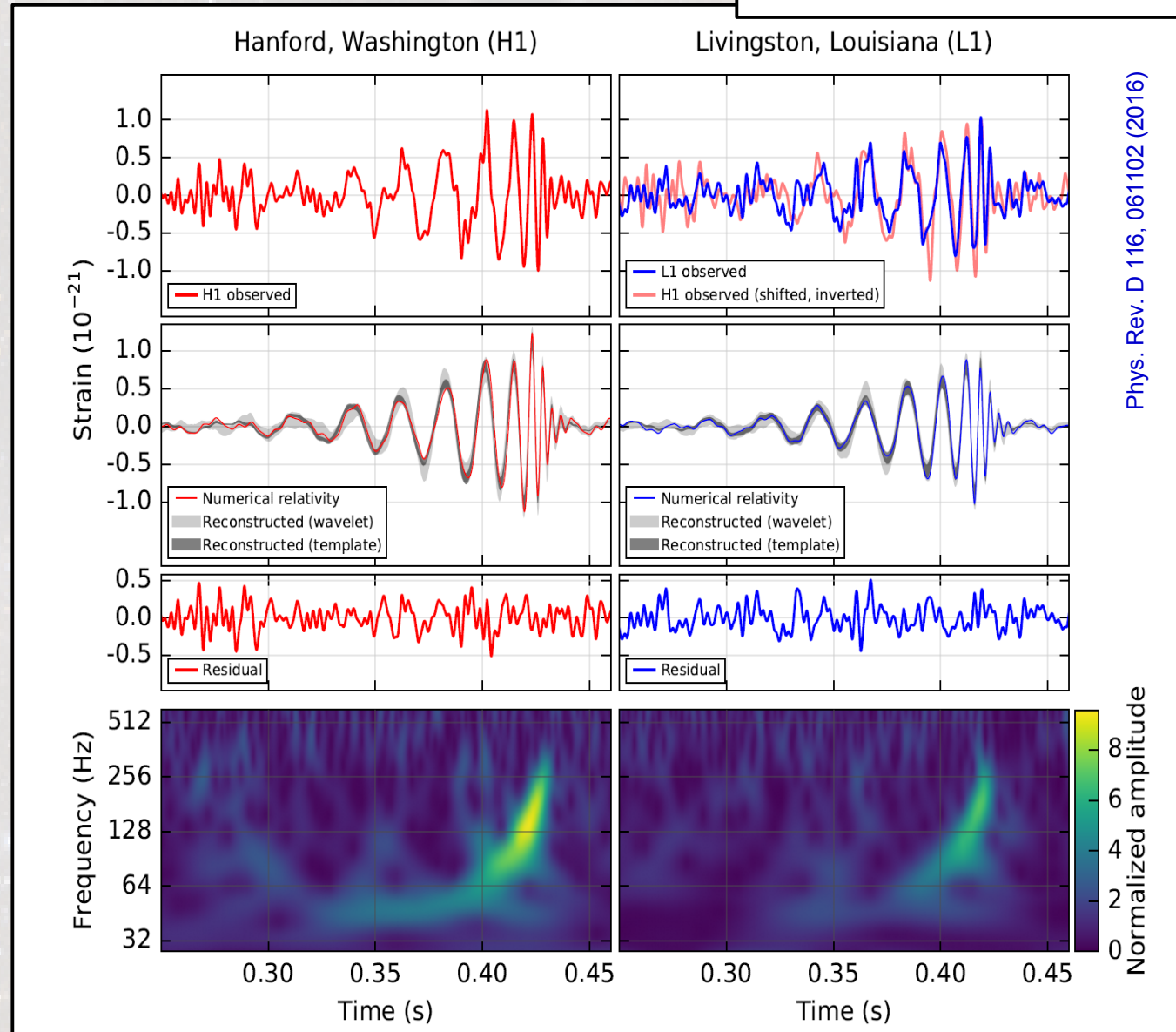


Zeitpunkt des beobachteten Ereignisses: September 14, 2015, 09:50 UTC.

# GW150914

35 Hz – 350 Hz bandpass gefiltert.  
Zeitdifferenz:  $6.9 \pm_{0.4}^{0.5}$  ms (L1 first).

- Im September 2015 befand sich advanced LIGO in der letzten Vorbereitungsphase des Observational Run-1 nach einem substantiellen *upgrade*.
- Im Rahmen dieser Vorbereitungen hat das *online monitoring* das Ereignis GW150914 registriert.
- Als Reaktion hat die LIGO Kollaboration die Konfiguration der Datennahme sofort eingefroren und die Datennahme offiziell begonnen.
- Nach einem Zeitraum der Datennahme der es erlaubt, das Signal mit einer Signifikanz von mehr als  $5\sigma$  zu bestimmen (16 Tage Datennahme) hat LIGO die gesammelten Daten analysiert ( $\rightarrow$  *blind analysis*).



# Signalbestimmung

- Mehrere unabhängige Methoden der Signalbestimmung.

## Matched Template Methode:

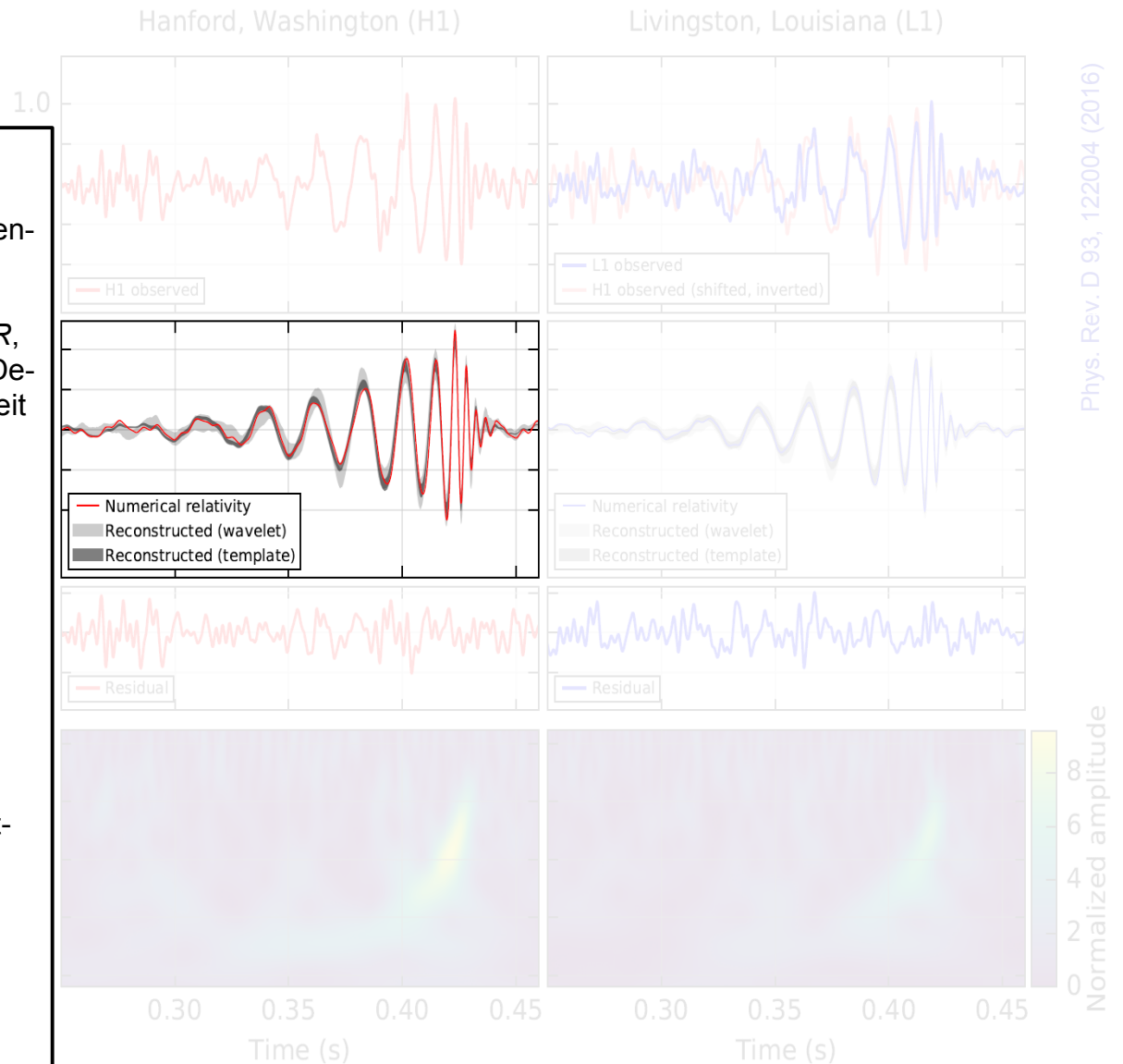
- 250'000 simulierte *template* Wellenformen ( $\rightarrow$  modelabhängig).
- Bestimme *matched template SNR*,  $\rho(t)$  für jedes *template* in jedem Detektor als Funktion der Ankunftszeit des Signals.
- Quantifiziere Kompatibilität des *templates* mit Daten in jedem Maximum ( $\rightarrow \chi^2$ ). Teststatistik:

$$\hat{\rho} = \begin{cases} \frac{\rho}{[(1+\chi^2/2)]^{1/6}} & \chi^2 > 1, \\ \rho & \chi^2 \leq 1. \end{cases}$$

(weighted matched template SNR)

- Verlange Koinzidenz der Maxima innerhalb der maximalen Laufzeitdifferenz von L1 nach H1 ( $\mathcal{O}(35)$  Ereignisse nach Auswahl).
- Finale *ranking* Variable:  

$$\hat{\rho}_c = \sqrt{\hat{\rho}_{L1}^2 + \hat{\rho}_{H1}^2}$$
 (GW150914:  $\hat{\rho}_c = 23.6$ )



# Signalbestimmung

- Mehrere unabhängige Methoden der Signalbestimmung.

## Matched Template Methode:

- 250'000 simulierte *template* Wellenformen (→ modelabhängig).
- Bestimme *matched template SNR*,  $\rho(t)$  für jedes *template* in jedem Detektor als Funktion der Ankunftszeit des Signals.

- Quantifiziere Kompatibilität des *templates* mit Daten in jedem Maximum (→  $\chi^2$ ). Teststatistik:

$$\hat{\rho} = \begin{cases} \frac{\rho}{[(1+\chi^6/2)]^{1/6}} & \chi^2 > 1, \\ \rho & \chi^2 \leq 1. \end{cases}$$

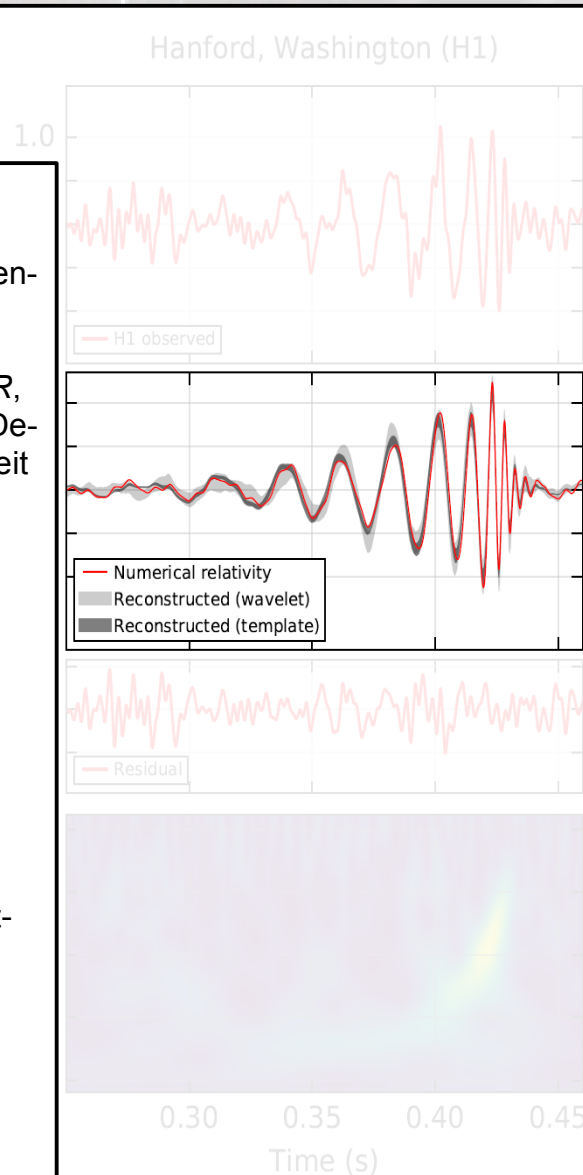
(weighted matched template SNR)

- Verlange Koinzidenz der Maxima innerhalb der maximalen Laufzeitdifferenz von L1 nach H1 ( $\mathcal{O}(35)$  Ereignisse nach Auswahl).

- Finale *ranking* Variable:

$$\hat{\rho}_c = \sqrt{\hat{\rho}_{L1}^2 + \hat{\rho}_{H1}^2}$$

(GW150914:  $\hat{\rho}_c = 23.6$ )



## Coherent Waveburst Methode:

- Constrained Maximum Likelihood* Methode (→ keine Annahme über Wellenformen sondern nur über Gleichheit in beiden Detektoren).

- 2-d Analyse im Frequenzraum  
Teststatistik:

$$\hat{\eta} = \sqrt{\frac{2E_c^2}{E_c + E_n}}$$

$E_c$  : normalized coherent energy

$E_n$  : residual noise energy

- Ereignisklassifikation in:

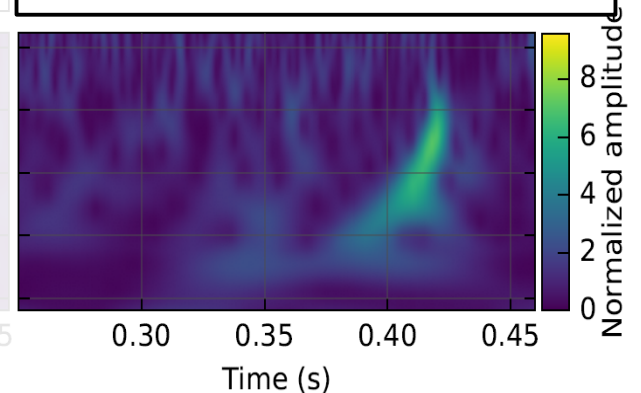
$C1$  : known noise patterns

$C3$  : increasing frequency

$C2$  : rest

(GW150914:  $\eta_c = 20.0$  in Klasse  $C3$ )

- Verwendete Methode für *online monitoring* (→ signal identifiziert innerhalb von 3 min).





# Signifikanzbestimmung

- Verschiebe die Datensätze beider Experimente um  $\Delta t$  größer als Laufzeitdifferenz des Signals zwischen L1 und H1 ( $\approx 15$  ms, in Wahrheit 100 ms shift).

- 16 d  $\approx 1.5 \cdot 10^9$  ms  $\rightarrow \mathcal{O}(10^8)$  time shifts ( $\mathcal{O}(10$  ms)), um Pseudodatensätze zu generieren.
- Laufzeitäquivalent der Pseudoexperimente: 16 d  $\times 10^8 \approx 600'000$  a

C1 : known noise patterns  
 C3 : increasing frequency  
 C2 : rest

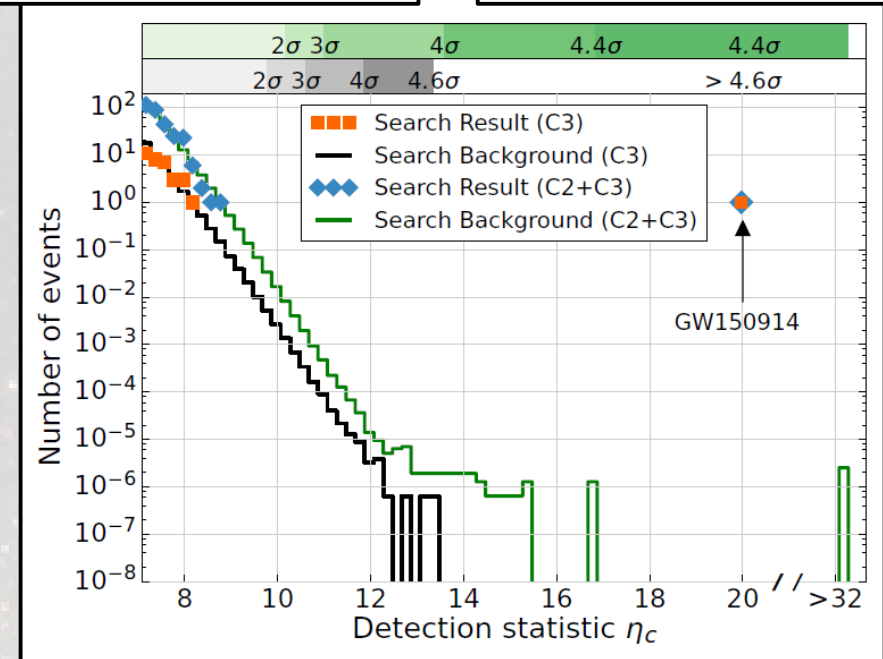
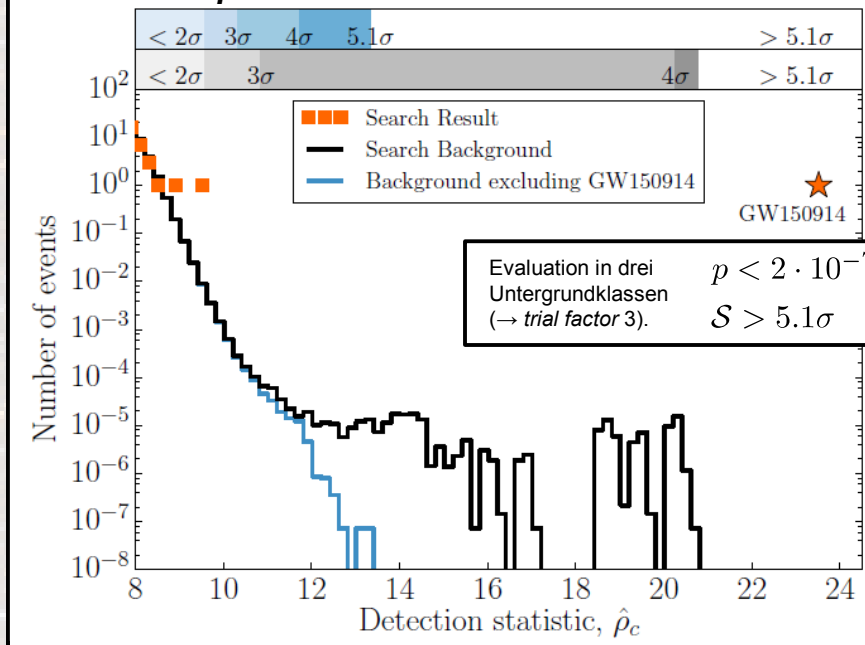
C2 + C3

Evaluation in drei Untergrundklassen ( $\rightarrow$  trial factor 2).  
 $p = 5 \cdot 10^{-6}$   
 $S = 4.4\sigma$

C3

Evaluation in drei Untergrundklassen ( $\rightarrow$  trial factor 3).  
 $p = 2 \cdot 10^{-6}$   
 $S = 4.6\sigma$

## Matched *template* Methode:



## Coherent Waveburst Methode:

# Signifikanzbestimmung

- Verschiebe die Datensätze beider Experimente um  $\Delta t$  größer als Laufzeitdifferenz des Signals zwischen L1 und H1 ( $\approx 15$  ms, in Wahrheit 100 ms shift).

- 16 d  $\approx 1.5 \cdot 10^9$  ms  $\rightarrow \mathcal{O}(10^8)$  time shifts ( $\mathcal{O}(10$  ms)), um Pseudodatensätze zu generieren.
- Laufzeitäquivalent der Pseudoexperimente: 16 d  $\times 10^8 \approx 600'000$  a

C1 : known noise patterns  
 C3 : increasing frequency  
 C2 : rest

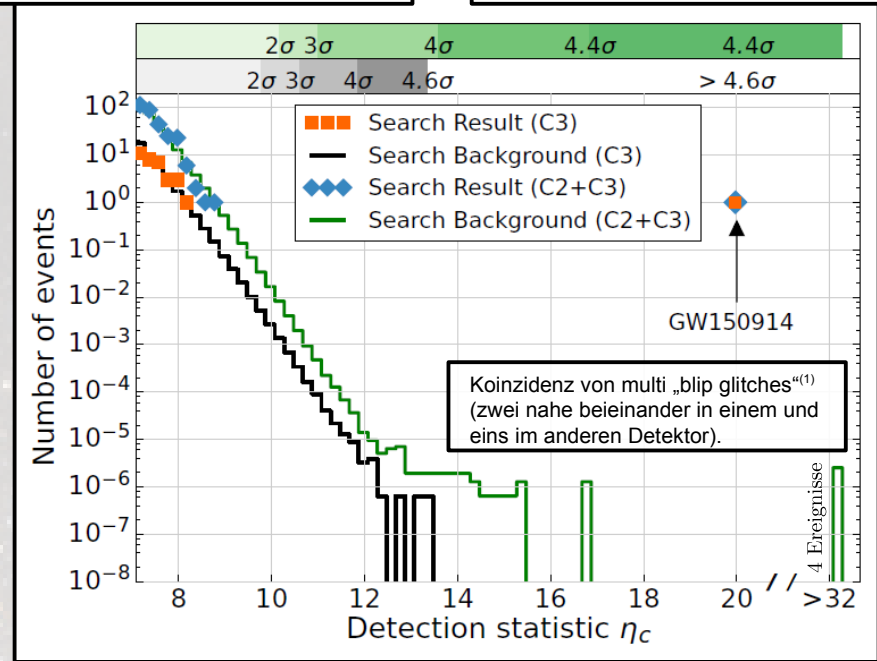
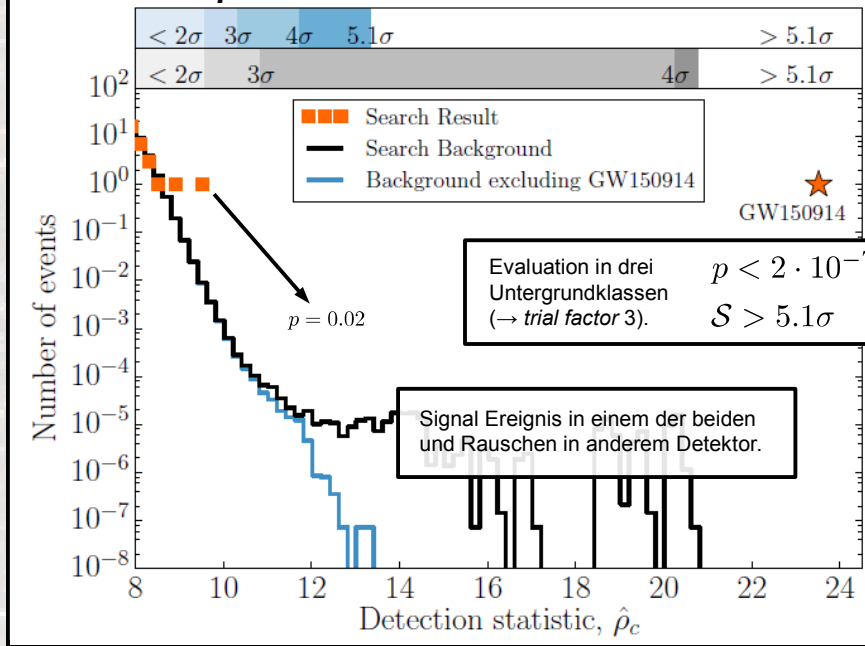
C2 + C3

Evaluation in drei Untergrundklassen ( $\rightarrow$  trial factor 2).  
 $p = 5 \cdot 10^{-6}$   
 $S = 4.4\sigma$

C3

Evaluation in drei Untergrundklassen ( $\rightarrow$  trial factor 3).  
 $p = 2 \cdot 10^{-6}$   
 $S = 4.6\sigma$

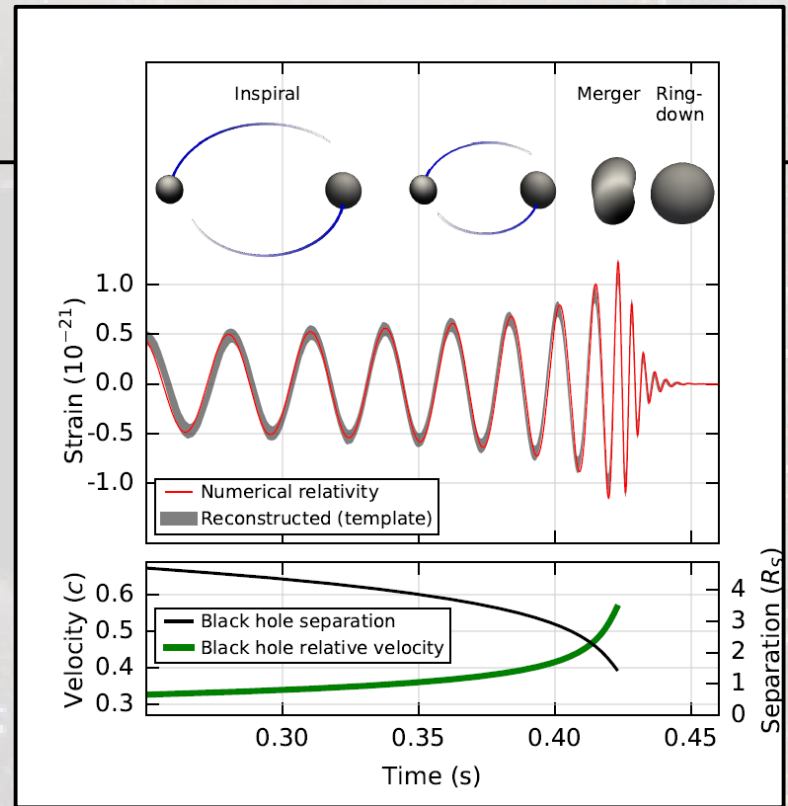
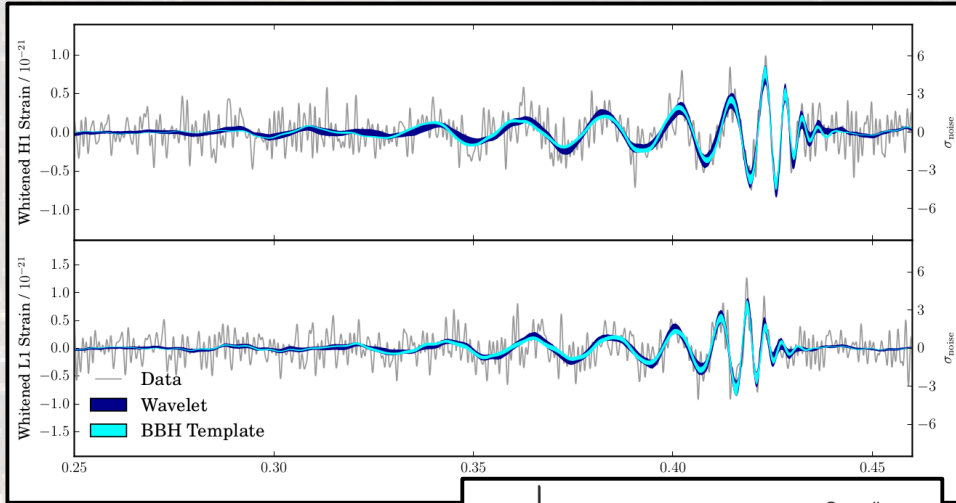
## Matched *template* Methode:



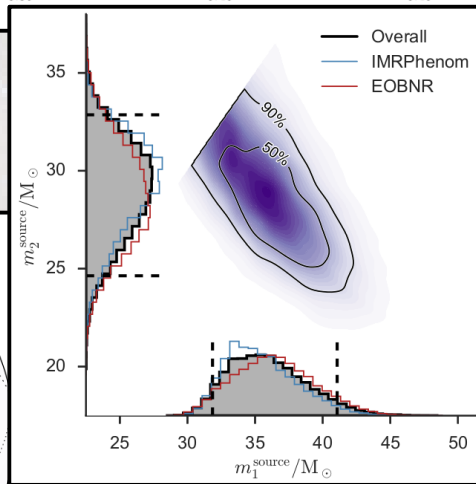
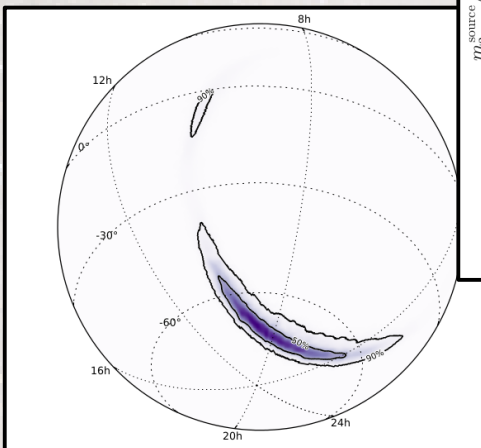
## Coherent Waveburst Methode:

# Charakterisierung der Quelle

Wellenform (unabhängige Bestimmung)



Lage im Raum



Massen der beiden BH'2

Primary black hole mass	$36 \pm 5 M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29 \pm 4 M_{\odot}$
Final black hole mass	$62 \pm 4 M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67 \pm_{0.07}^{0.05}$
Luminosity distance	$410 \pm_{180}^{160}$ Mpc
Source redshift	$0.09 \pm_{0.04}^{0.03}$

$\approx 65 M_{\odot}$

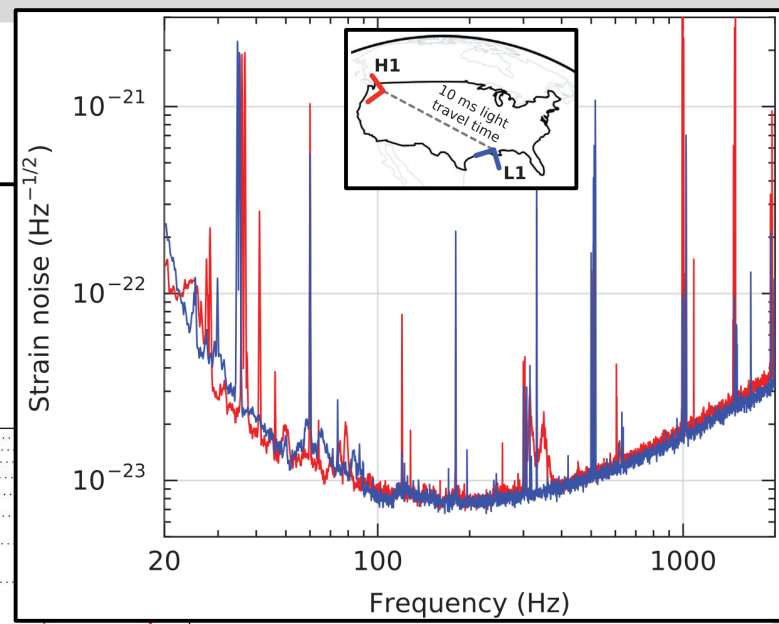
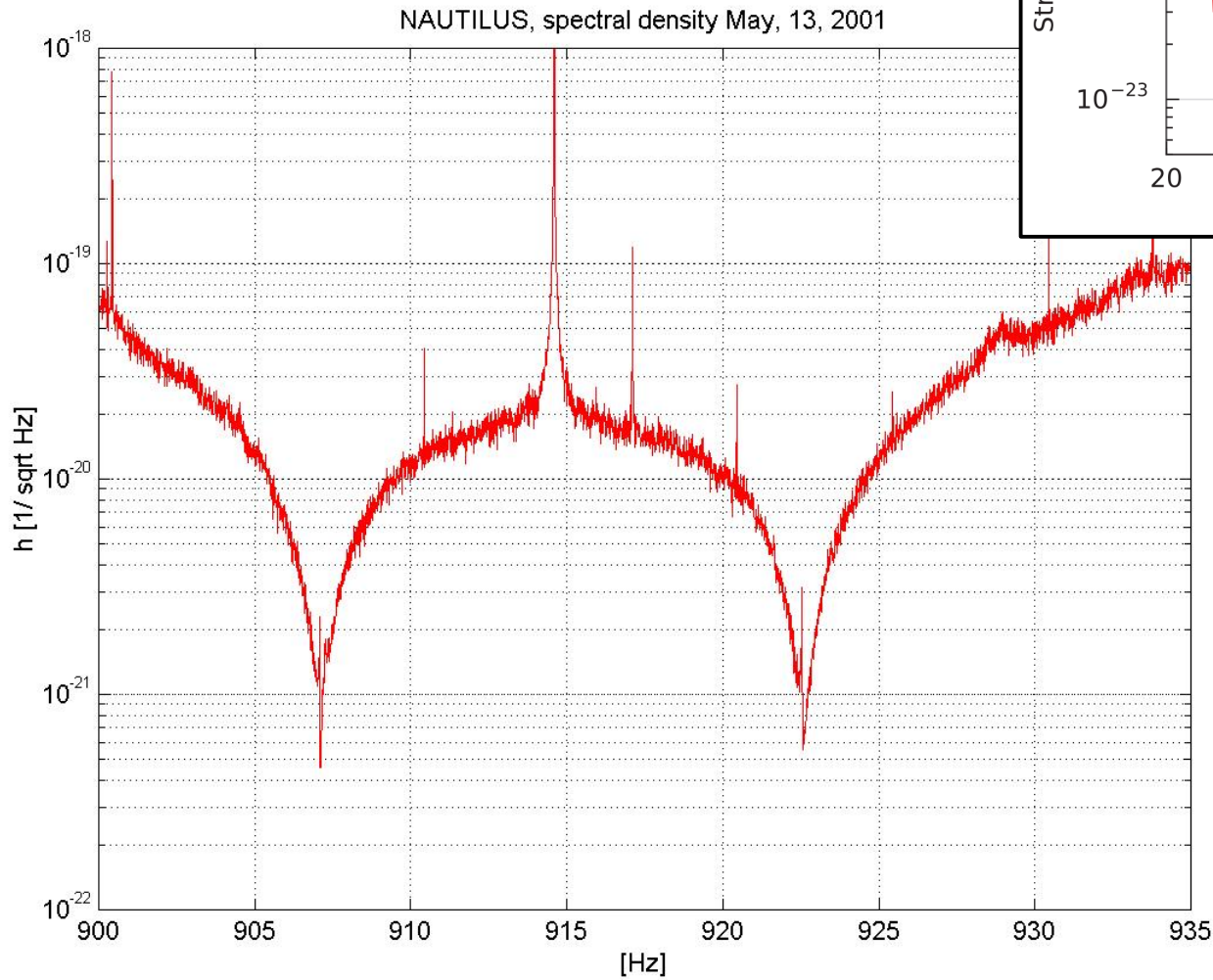
# Zusammenfassung

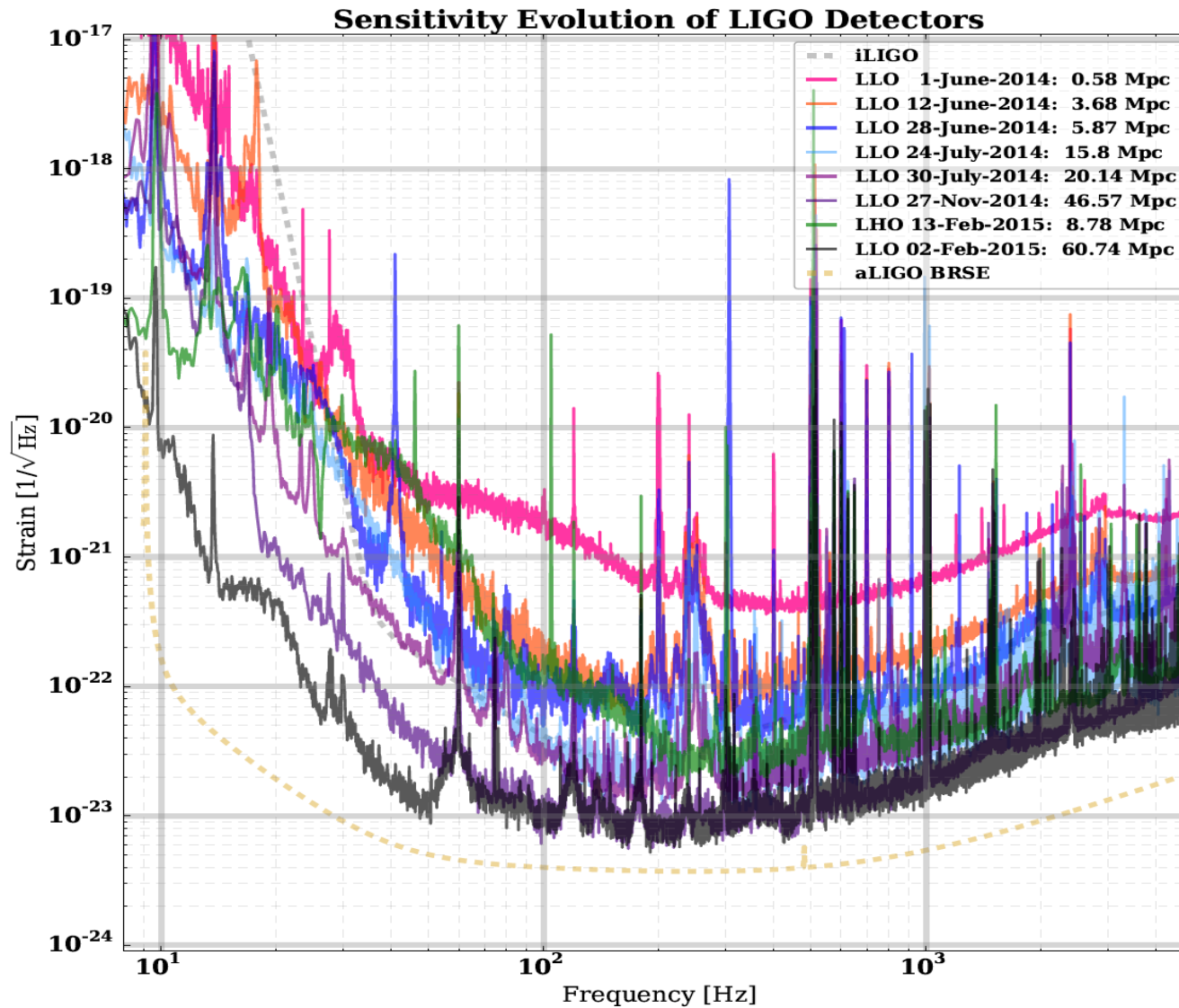
---

- Direkter Nachweis einer Gravitationswelle und damit der Schmelze zweier Schwarzer Löcher und der Existenz von Schwarzen Löchern von über 20 Sonnenmassen (→ Beobachtung des Jahres 2016).
- Entdeckung unumstritten – zahlreiche unabhängige Methoden und Tests.
- Beeindruckende Bestätigung der allgemeinen Relativitätstheorie. Neues Fenster zur Erforschung des Weltalls (elektromagnetisch [radio, sichtbar, UV], kosmische Strahlung, Neutrinos, → Gravitationswellen).
- Beginn einer neuen Ära der Astronomie.
- Speerspitze der Wissenschaft heute weit jenseits(!) der Vorstellungskraft Außenstehender in der technologieschen Machbarkeit.

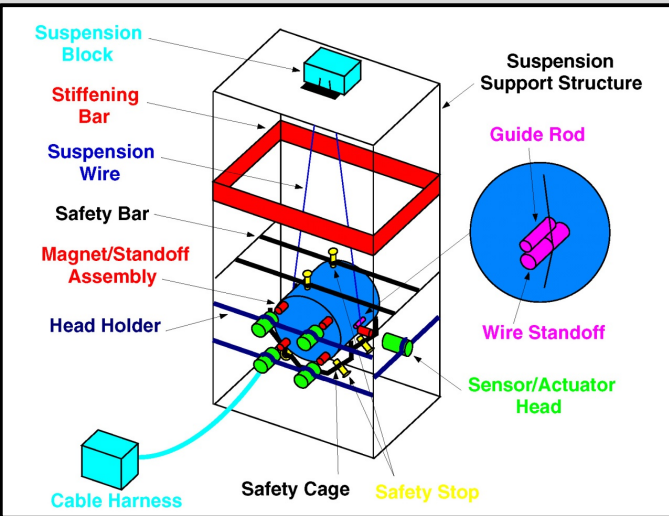


# Nautilus Sensitivität

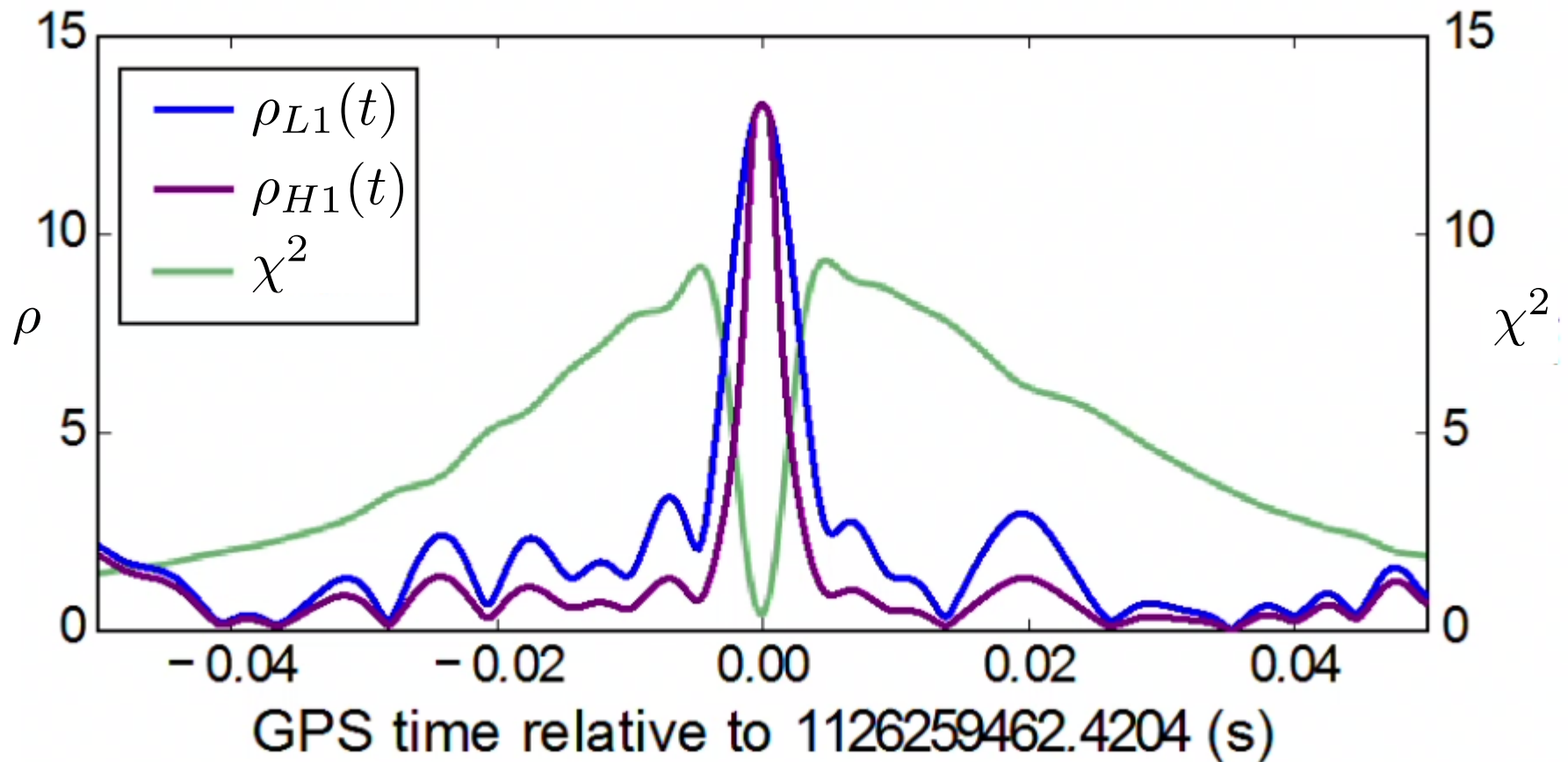




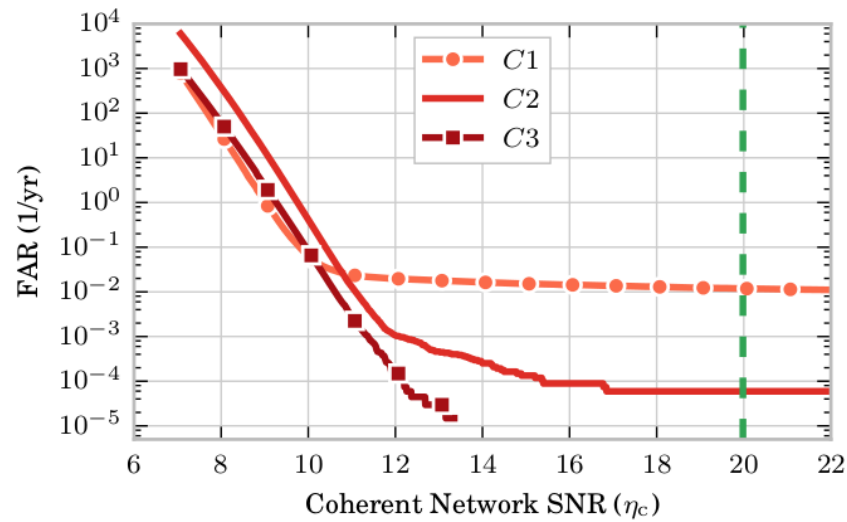
# LIGO Vakuumtanks





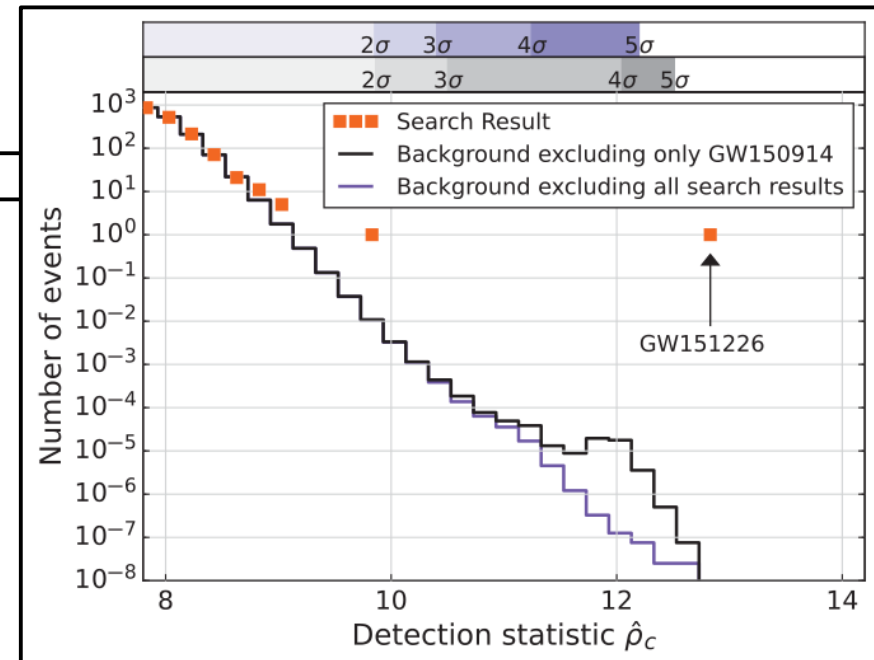
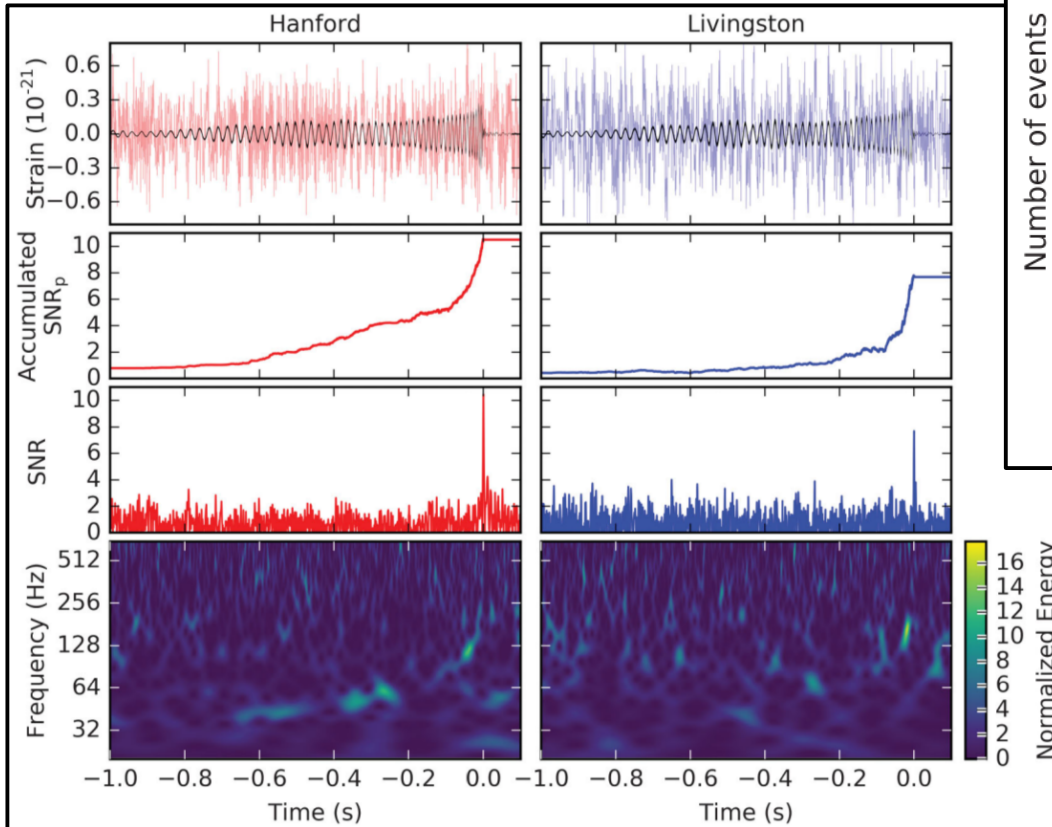


# FAR – modellunabhängige Suche



Phys. Rev. D 93, 122004 (2016)

# GW151226



Primary black hole mass	$14.2^{+8.3}_{-3.7} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$7.5^{+2.3}_{-2.3} M_{\odot}$
Final black hole mass	$20.8^{+6.1}_{-1.7} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$
Luminosity distance	$440^{+180}_{-190} \text{ Mpc}$
Source redshift	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

Phys. Rev. Lett. 116, 241103 (2016)

- Angabe von Quellen (abgesehen von denen, die bereits im Vortrag angegeben wurden):
- Wikipedia
- [Rept. Prog. Phys. 63 \(2000\) 1317-1427](#)
- Barry Barish: CERN Seminar 11.02.2016.