



Gravitationswellenastronomie

Was Einstein nicht für möglich hielt, wird Realität

H.-P. Nollert

Theoretische Astrophysik, Universität Tübingen

Workshop der Heisenberg-Gesellschaft

Schloss Lautrach, 02.07.2017



Gravitationswellen

Gravitationswellen

- ▶ sind die Wellenerscheinung der Gravitation wie elektromagnetische Wellen beim Elektromagnetismus
- ▶ lassen sich mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben
- ▶ werden durch beschleunigt bewegte Massen erzeugt
- ▶ breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- ▶ wirken transversal
- ▶ weisen zwei unabhängige Polarisationszustände auf



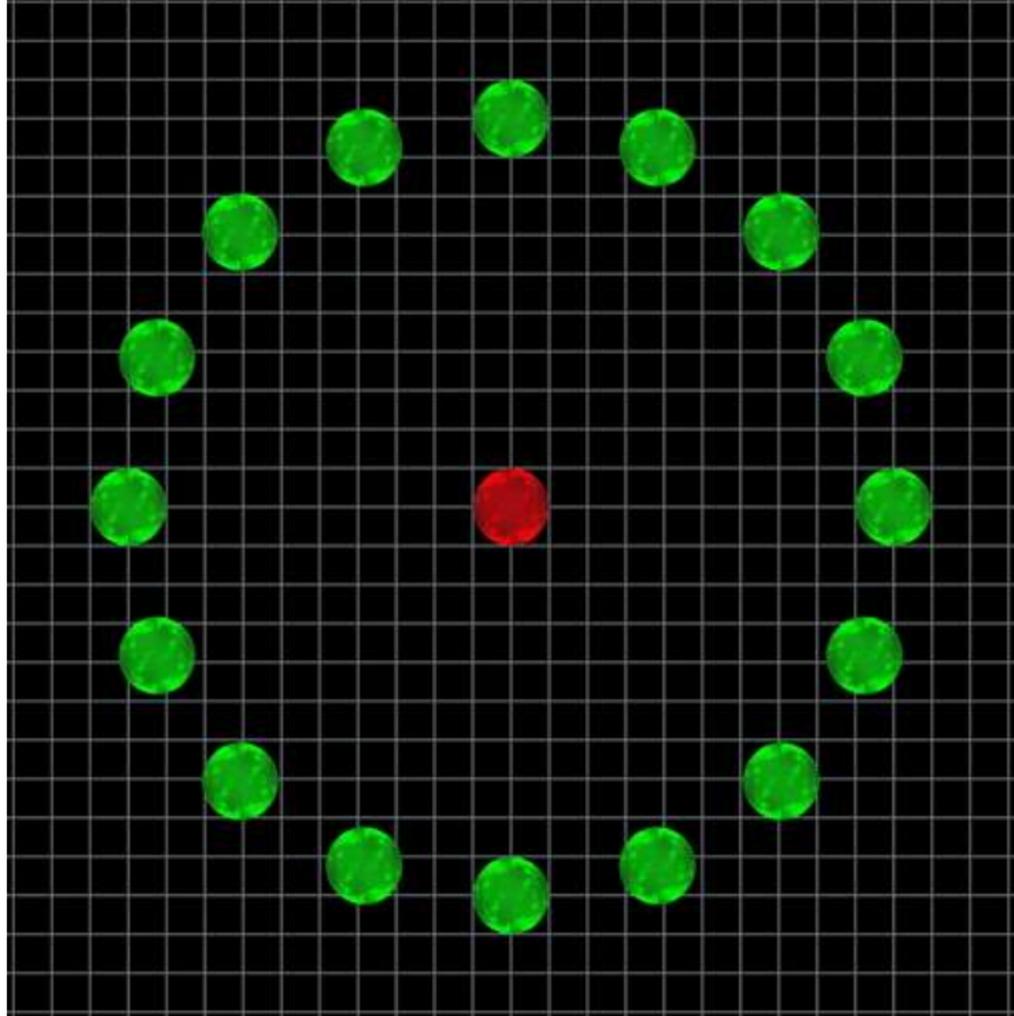
Allgemeine Relativitätstheorie

Massen verändern Raum und Zeit.

Raum und Zeit bestimmen, wie Massen sich bewegen.

Abstand zweier fester Punkte im Raum
ist auch eine Eigenschaft des Raums dazwischen,
der sich unter dem Einfluss von Massen verändern kann.

Ebenso verändert sich der zeitliche Abstand von Ereignissen.





Mögliche Polarisierungen einer Gravitationswelle:

„Plus“ 

„Kreuz“ 

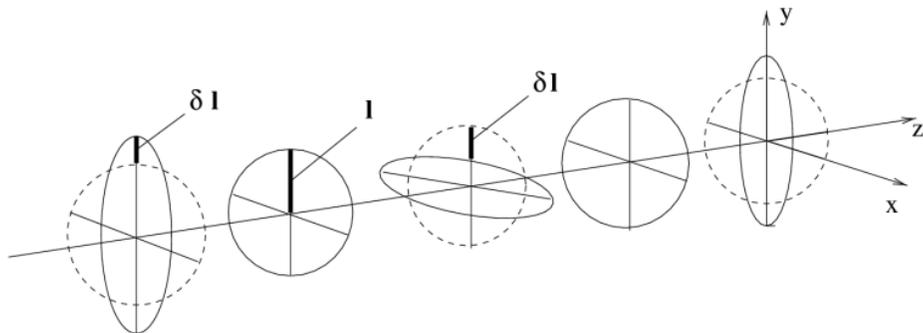
Davon abgeleitet:

„Links zirkular“ 

„Rechts zirkular“ 

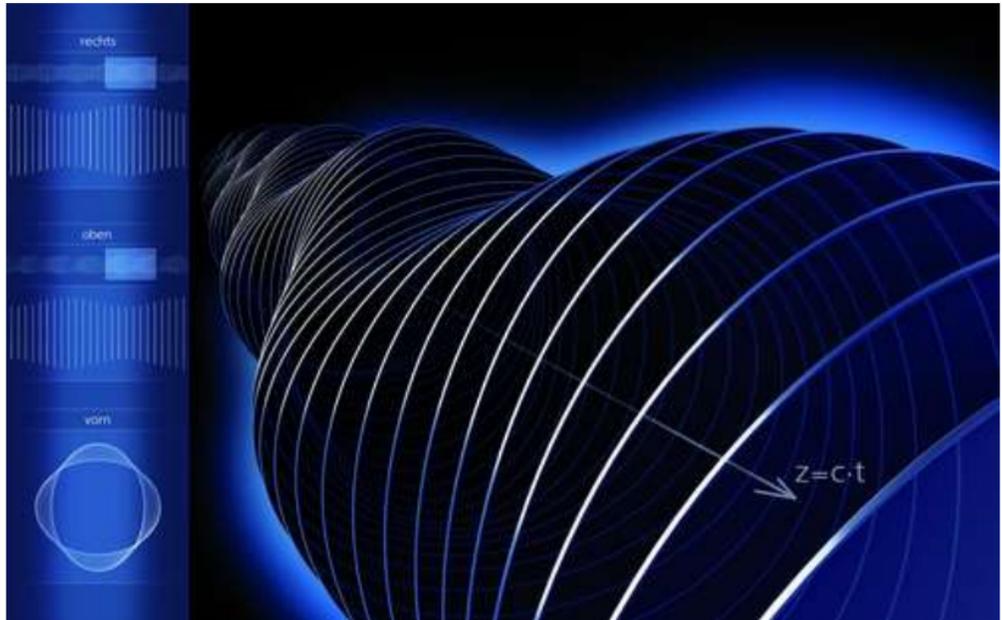


Ausbreitung in Raum und Zeit:





Ausbreitung in Raum und Zeit:





Ausbreitung in Raum und Zeit:

Animation: ESA  (Aufgerufen: 13.07.2017)

Quelle: Einstein-Online (dort anscheinend nicht mehr verfügbar):

Kreuzpolarisation: 

Zirkular polarisiert: 

Von der Seite: 

Alle hier zu finden:  (Aufgerufen: 13.07.2017)



Kosmische Quellen von Gravitationsstrahlung

Objekt	Signaltyp	Frequenz
Doppelsterne, Planeten	periodisch	sehr niedrig sehr schwach
Binärsysteme Neutronensterne Schwarze Löcher	quasi-periodisch	Mikrohertz bis Kilohertz
Supernova Typ II	Impuls	Breit, bis Kilohertz
Schwingende Schwarze Löcher	periodisch, stark gedämpft	Millihertz bis Kilohertz
(Instabil) Schwingende Neutronensterne	periodisch, gedämpft	Kilohertz
Kosmische Strings, Topologische Defekte	Stochastisch	Breit
Urknall, Inflation	Stochastisch	Breit, bis Millihertz



Wirkung

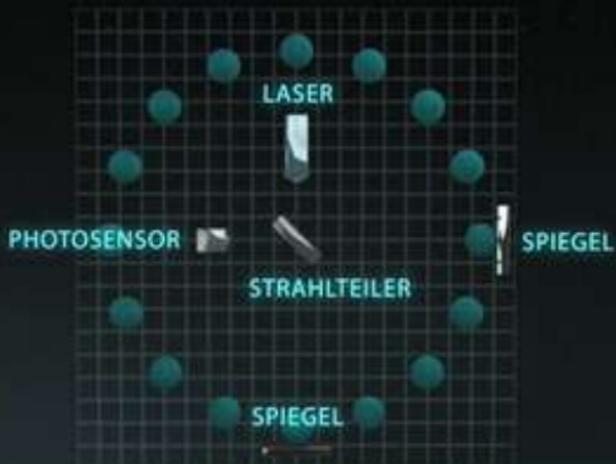
Astronomische Quellen erzeugen typischerweise Längenänderungen von $\delta l/l \sim 10^{-21} = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001\ !!!$

Auf einer Strecke von 1km entspricht das einer Längenänderung von 1/1000 Protondurchmesser!!!!

Schwache Kopplung von Gravitationswellen an Materie:
Fluch und Segen zugleich!

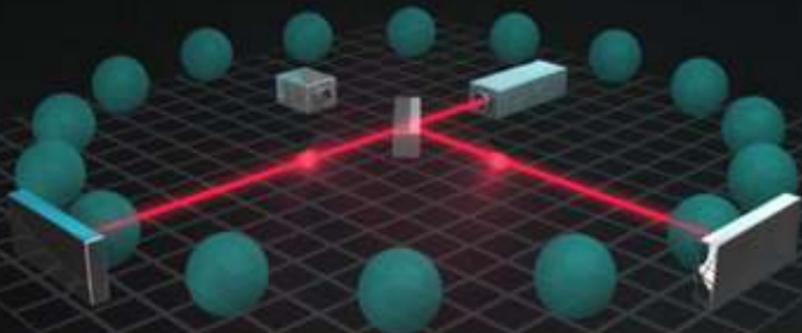
Beispiele: Supernova, Neutronensterne, Urknall
→ Gravitationswellenastronomie

GRAVITATIONSWELLEN



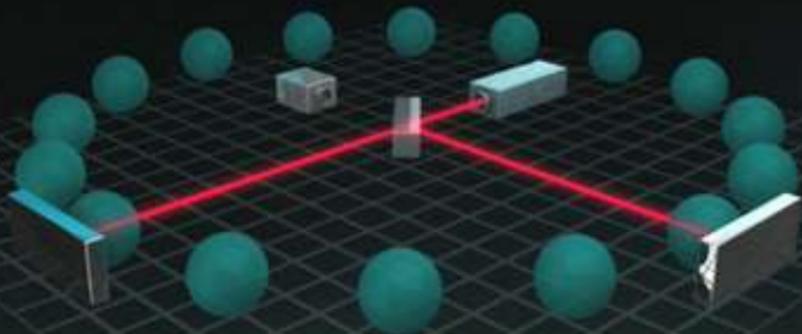
Ersetzen wir den Kreis durch einen Laserinterferometer:
Ein Laser, ein Strahlteiler, zwei Spiegel, ein Photosensor

GRAVITATIONSWELEN



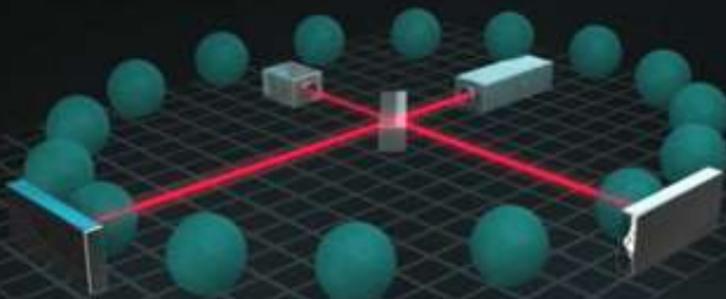
Am Strahlteiler überlagern sich die Lichtwellen wieder (Interferenz).
Ein Teil läuft zum Photosensor, der Rest in Richtung Laser

GRAVITATIONSWELLEN



Das Interferometer ist so eingestellt, dass ohne Gravitationswelle gar kein Licht am Photosensor ankommt

GRAVITATIONSWELLEN



Die Überlagerung verändert sich:
Nun gelangt Licht zum Photosensor



Messung

Baue Laserinterferometer sehr groß, um eine entsprechend „große“ Längenänderung der Messstrecken zu erreichen.

LIGO





Messung

GEO600

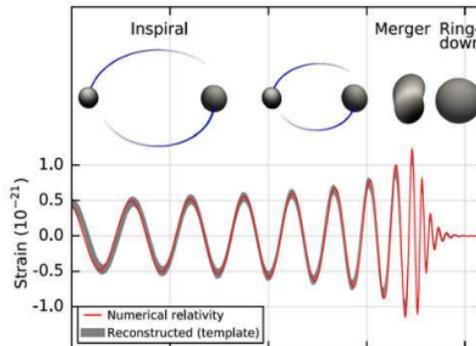
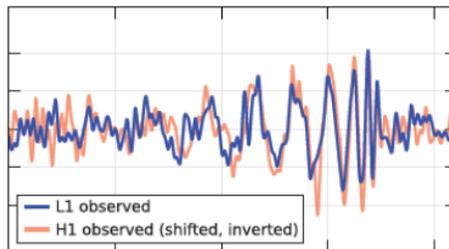
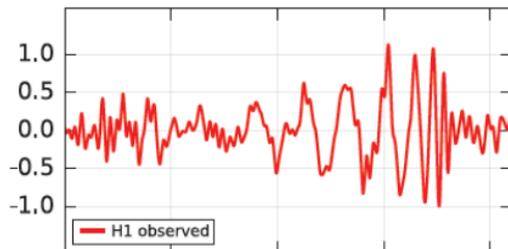




Die erste Messung

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



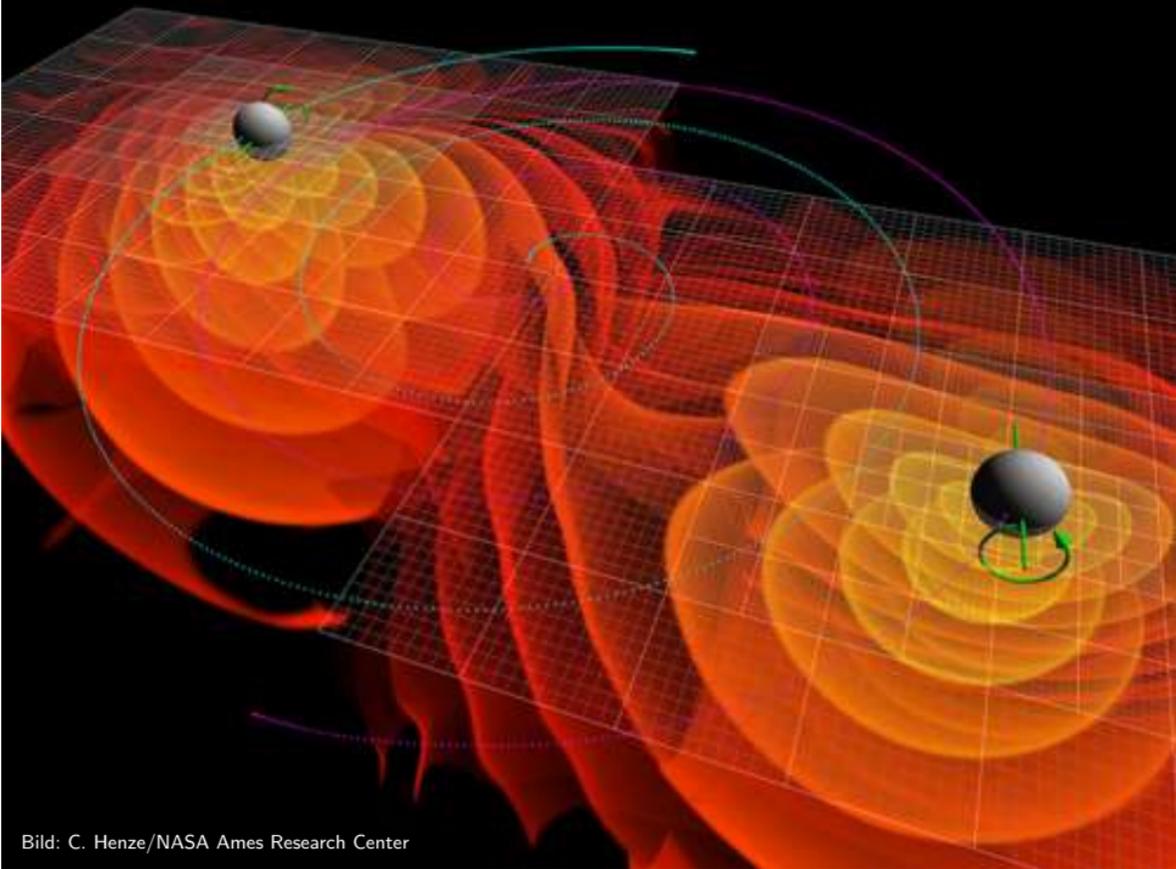


Bild: C. Henze/NASA Ames Research Center



Die Bedeutung dieser Messung

Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen

Die Krönung von 50 Jahren Arbeit tausender Wissenschaftler

Völlig neue Möglichkeiten für die Astronomie:

- ▶ erster direkter Nachweis Schwarzer Löcher
- ▶ erster Nachweis überhaupt eines Binärsystems aus Schwarzen Löchern
- ▶ erster Nachweis von Schwarzen Löchern mit mehr als 20 Sonnenmassen
- ▶ unerwartete Parameter der beteiligten Schwarzen Löcher



Parameter der Schwarzen Löcher

$$M_1 : 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$$

$$M_2 : 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

$$M_{\text{final}} : 62_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Entfernung: 1,3 Mrd. LJ

Während ca. 50ms: Mehr Energie abgestrahlt (in Form von Gravitationsstrahlung) als das gesamte sichtbare Universum (in Form von elektromagnetischer Strahlung)

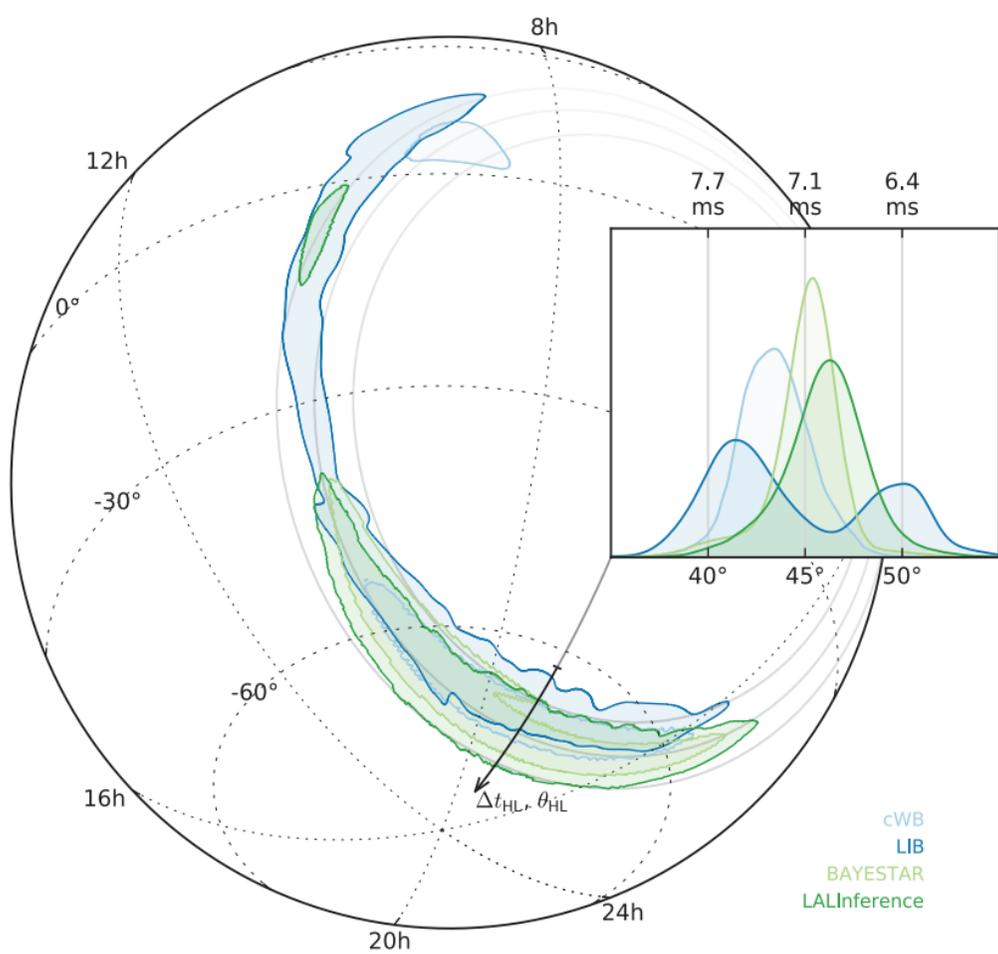
Das gewaltigste Ereignis, das die Menschheit je beobachtet hat!



„Klassische“ Beobachtung von GW150914

Ziele:

- ▶ Verifikation
- ▶ Zusätzliche Informationen
- ▶ Lokalisierung



LOCALIZATION AND BROADBAND FOLLOW-UP OF THE GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT GW150914

arXiv:1602.08492v1 [astro-ph.HE] 26 Feb 2016

- B. P. ABBOTT¹, R. ABBOTT¹, T. D. ABBOTT¹, M. R. ABERNATHY¹, F. ACERNESE^{1,4}, K. ACKLEY², C. ADAMS², T. ADAMS², P. ADESSO¹, R. X. ADHIKARI¹, V. B. ADYA², C. AFFELDT¹, M. AGATHOS¹, K. AGATSUMA¹, N. AGGARWAL¹, O. D. AGUIAR^{1,4}, L. AIELLI^{1,13}, A. AIZI¹, P. AITHI¹, B. AILEN^{1,11}, A. ALLOCCA^{1,19}, P. A. ALTMAN¹, S. B. ANDERSON¹, W. G. ANDERSON¹, K. ARAI¹, M. C. ARAYA¹, C. C. ARCENEUX^{1,21}, J. S. AREEDA^{2,7}, N. ARNAUD²¹, K. G. ARUN^{2,4}, S. ASCENZI^{1,13}, G. ASHTON²⁶, M. AST²⁷, S. M. ASTON²⁸, P. ASTONE²⁸, P. AUFMUTH³, C. AULBERT³, S. BABAK²⁹, P. BACON³⁰, M. K. M. BADER³¹, P. T. BAKER³¹, F. BALDACCINI^{1,10}, G. BALLARDIN¹, S. W. BALLMER¹, J. C. BARAYOGA¹, S. E. BARCLAY¹⁰, B. C. BARRISH¹, D. BARKER¹, F. BARONE¹, B. BARRS¹, M. B. BARTOLI¹, M. BAREGLIA¹, D. BARTA¹⁹, S. BARTHELEMY¹, J. BARTLETT¹, J. BARTOS¹⁹, R. BASSIRI¹, A. BASTI^{1,19}, J. C. BATH¹, C. BAINEY¹, V. BANGAYDAS^{1,10}, M. BAZZAN^{2,21}, B. BEHNKE¹, M. BEIGER^{1,4}, A. S. BELL¹⁰, C. J. BELL³⁶, B. K. BERGER¹, J. BERGMAN¹⁷, G. BERGMANN³, C. P. L. BERRY⁴¹, D. BERKANTEN^{10,42}, A. BERTALINO¹, J. BETZWIESER³, S. BHADWAT³, R. BHANDARE¹⁴, I. A. BILENKO³², G. BILLINGSLEY¹, J. BIRCH¹, R. BIENEY³⁰, M. C. BISCIONE¹, A. BISHT¹, M. BISSOTTI³, C. BIWER¹, M. A. BIZDARJAL¹, J. K. BLACKBURN³, C. D. BLAIR¹, D. G. BLAIR¹, R. B. BLAKE^{1,2}, S. C. BLIEMEN¹, O. BOCK¹, T. P. BOGATA¹, N. BOHE¹, G. BOGIANI¹, B. BOGAN¹, A. BOHE¹, P. BOITTO¹, C. BOND¹, F. BONDI^{1,3}, R. BONNARD¹, B. A. BOOM¹, R. BORK¹, V. BOSCHI^{14,19}, S. BOSE¹⁴, V. Y. BOUFFANAIS¹⁰, A. BOZZA^{1,4}, C. BRADASCHIA^{1,9}, P. R. BRADY¹⁰, V. B. BRAGINSKY⁴⁹, M. BRANCHESI¹, B. J. A. BRUNNEN¹, E. J. BRAUN¹⁹, T. BRIANT⁶⁰, A. A. BRILLET^{1,3}, M. BRINKMANN¹, V. BRISSON², P. BROCKILL^{1,4}, A. F. BROOKS⁴, D. A. BROWN², D. D. BROWN², N. M. BROWN¹⁹, C. C. BRUNNAN¹, A. BUI¹, T. BULL¹, H. B. BULTE¹, A. BUNGE¹, A. BUONANNO^{10,43}, D. BUSKELIC¹, C. BUTER¹, R. L. BUTY^{10,41}, L. CADONAN¹⁰, G. CAGNOLI^{10,60}, C. CAHILLANE¹, J. C. BUSTILLO^{10,64}, T. CALLISTER¹, E. CALLON^{10,4}, J. B. CAMP¹⁹, K. C. CANNON¹⁰, J. CAO¹⁰, C. D. CAPANO¹, E. CAPOCASA¹⁰, F. CARBOGNANI¹, S. CARIDE¹, J. C. DIAZ²³, C. CASCENTINI^{1,23}, S. CAUDILLI¹⁰, M. CAVAGLIA^{1,2}, F. CAVALIERI¹, R. CAVALIERI¹, G. CELLA^{1,4}, C. CEFEDA¹, L. C. E. BAIRD^{17,58}, G. CERRETTANI¹⁰, E. CESARINI¹, R. CHAKRABORTY¹, T. CHALERMSONGSAK¹, S. J. CHAMBERLIN¹, M. CHAN¹, S. CHAO¹⁹, P. CHARLTON¹⁰, E. CHASSANDE MOTTEZ¹⁰, H. Y. CHEN¹⁰, Y. CHEN¹⁰, C. CHIENG¹, A. CHINCARINI¹⁰, A. CHIUMMO¹⁰, H. S. CHIO¹, M. CHO⁴³, J. H. CHOW²⁰, N. CHRISTENSEN¹⁰, Q. CHU¹¹, S. CHU⁴⁰, S. CHUNG¹, G. CIANI¹, F. CLARA²⁷, J. A. CLARK^{10,4}, F. CLEVA¹, E. COCCIA^{15,113}, P.-F. COHADON¹⁰, A. COLLA^{79,28}, C. G. COLLETTE¹⁰, L. COMINSKI¹, M. CONSTANCO JR.¹, A. CONTE^{79,24}, L. CONTI¹, D. COOK¹, T. R. CORBITT¹, N. CORNISH¹, A. CORSI¹, S. CORTESE¹, C. A. COSTA¹, M. W. COUHRIN¹⁹, S. B. COUHLIN¹⁹, J.-P. COULON¹, S. T. COUNTSMAN¹, P. COUVARES¹, E. E. COWAN¹, D. M. COWARD¹, M. J. COWART¹, D. C. COYNE¹, R. COYNE¹, K. CRAIG¹⁰, J. D. E. CREIGHTON¹, J. CRIPPE¹, S. G. CROWDER¹, A. CUMMING¹⁰, L. CUNNINGHAM¹⁰, E. CUOCO¹, T. DAL CANTON¹⁰, S. L. DANILISHIN¹⁰, S. D'ANTONIO^{1,3}, K. DANZMANN^{17,18}, N. S. DARMAN¹⁰, V. DATTILO¹, I. DAVE¹⁰, H. P. DAVELOZA¹⁸, M. DAVIER²³, G. S. DAVIES¹⁶, E. J. DAW¹⁰, R. DAY¹, D. DEBRA¹, G. DEBREZENCZ¹, J. DEGALLANX¹⁰, M. DE LAURENTIS¹⁰, S. DELEGLISE¹, W. DEL POZZO¹, T. DENKER^{1,17}, T. DENT¹, H. DERELI¹, V. DEROGAZICH¹⁰, T. DE RIGGS¹, R. DE ROSA^{10,4}, R. DESALVO¹, S. DHRANDHAR¹, M. C. DIAZ¹, L. DI FIORE¹, M. DI GIOVANNI^{79,24}, A. DI LIETO^{10,10}, S. DI PACI^{79,28}, I. DI PALMA^{79,4}, A. DI VIRGILIO¹⁰, G. DOICINSKI¹⁸, V. DOLIQUE¹⁰, F. DONOVAN¹⁰, K. L. DOOLEY¹, S. DORAVARI¹⁸, R. DOUGLAS¹⁰, T. P. DOWNES¹⁸, M. DRAGO^{10,39,10}, R. W. P. DREVER¹, J. C. DRIGERS¹⁷, Z. DU¹⁰, N. M. DUCROT¹, S. E. DWYER¹⁷, T. B. EDO¹⁰, M. C. EDWARDS¹⁸, A. EFFLER¹⁸, H.-B. EGENSTEIN¹, P. EHRENS¹, J. EICHHOLTZ¹, S. S. EIKENBERRY¹, W. ENGELS¹⁰, R. C. EISSACK¹, T. ETZEL¹, M. EVANS¹⁰, T. M. EVANS¹⁰, R. EVERETT¹, M. FACTOROVICH¹⁰, V. FAFONO^{10,11,15}, H. FAIR¹⁸, S. FAIRHEURT¹, X. FAN¹, Q. FANG¹, S. FANG¹, S. FARR¹, W. M. FARR¹, W. M. FAVATA¹, M. FAYS^{1,1}, H. FEHRMANN¹, M. M. FEJER^{1,1}, I. FERANTE^{10,19}, E. C. FERREIRA¹, F. FERRINI¹, F. FIDECARO^{10,19}, I. FIORI¹, D. FIORICCTI¹⁰, R. P. FISHER¹, R. FLAMMINIO¹, M. FLETCHER¹⁰, J.-D. FOURNIER¹, S. FRANCO¹, S. FRASCA¹, F. FRASCIONI¹⁰, Z. FREE¹, A. FREISE¹, R. FRIEY¹⁹, V. FREY¹⁹, T. P. FRICKE¹, P. FRITSCHEL¹⁰, V. V. FROLOV¹, P. FULDA¹, M. P. FURU¹, H. A. G. GARDNER¹, J. R. GARDFELT¹, L. GAMBARTOZZI¹, S. G. GAONKAR¹, F. GARIBOLDI¹, A. GATTO¹, G. GAUR¹⁰, N. GEHRELS¹⁰, G. GEMME¹⁰, B. GENDE¹, E. GENIN¹, A. GENNAI¹, J. GEORGE¹, L. GERGELY¹⁰, V. GERMANI¹, A. GHOSH¹⁰, S. GHOSH^{10,9}, J. A. GIAIME¹⁰, K. D. GIARDINA¹⁰, A. GHAZOTTO¹⁹, K. GILL¹⁹, A. GLAEFKE¹⁰, E. GOETZ¹⁰, R. GOETZ¹, L. GONDAN¹, G. GONZÁLEZ¹, J. M. G. CASTRO¹⁰, A. GOPAKUMAR¹⁰, N. A. GORDON¹⁰, M. L. GORODETSKY¹⁰, S. E. GOSSAN¹, M. GOSSWILDS¹⁰, R. GOUAY¹, C. GRAEF¹, P. B. GRAY¹⁰, M. GRANATA¹, A. GRANT¹, S. GRAY¹, C. GRAY¹, G. GRECO^{10,58}, A. C. GREEN¹⁰, P. GRIFFITH¹, H. GRIFFITHS¹, G. GRUNBERG¹, G. M. GUEY^{10,10}, X. GU^{10,10}, N. GUPTA¹, M. K. GURU¹, K. E. GUSHAFSTON¹, E. K. GUSTAFSON¹, R. GUSTAFSON¹, J. J. HACKER¹, B. R. HALL¹⁰, E. D. HALL¹, G. HAMMOND¹⁰, M. HANLEY¹⁰, M. M. HANKE¹, J. HANKS¹, C. HANNA¹, T. M. D. HANNAK¹, J. HANSON¹, T. HARDWICK¹, J. HARMIS¹⁹, G. M. HARRY^{10,10}, I. W. HARRY¹⁰, M. J. HART¹, M. T. HARTMAN¹, C.-J. HASTER¹, K. HAUGHIAN¹⁰, A. HEIDMANN¹⁰, M. C. HEINTZE¹⁰, H. HEITZING¹⁰, P. HELM¹, G. HEMMING¹, D. HENDER¹⁰, J. S. HENIG¹, J. HENNING¹⁰, A. W. HEPTSTALL¹, M. HENNING¹⁰, S. J. HILD¹⁰, D. HOAK¹⁰, K. A. HODGE¹, D. HOPMAN¹, S. E. HOLLITT¹⁰, K. HOLE¹, D. E. HOE¹, H. E. HOPKINS¹, D. J. HOSKEN^{10,117}, J. HOUGH¹⁰, E. A. HOUSTON¹⁰, E. J. HOWELL¹, Y. M. HU¹⁰, S. HUANG¹, E. A. HUERTA^{10,12}, D. HUET¹, B. HUGHY¹⁹, S. HUSA¹, S. H. HUTTNER¹⁰, T. HUYNH-DINH¹, A. IDRISY¹, N. INDIK¹, D. R. INGRAM¹, R. INTA¹, H. N. ISA¹⁰, J.-M. ISAC¹⁰, M. ISI¹, G. ISLAS¹, T. ISOGAI¹, B. R. IYER¹, K. IZUMI¹, T. JACQMIN¹, H. JANG¹, K. JANI¹, P. JARANOWSKI¹, S. JAWAHAR¹, F. JIMÉNEZ-FORTEZA¹⁰, W. W. JOHNSON¹, D. I. JONES¹⁰, R. JONES¹, R. J. G. JONKEA¹, J. J. JUI¹, H. KIM¹, C. V. KALAGARIDIS¹⁰, V. KALOGERA¹, S. KANDHASAMY¹⁰, G. KANG¹, J. B. KANNER¹, S. KARKI¹⁰, M. KASPRZAK^{10,23,4}, E. KATSIVOUNIDIS¹⁰, W. KATZMAN¹, S. KAUFER¹, T. KAUR¹, K. KAWABE¹, F. KAWAZOE^{1,17}, F. KÉFÉLIAN¹, M. S. KEHL¹⁰, D. KEITEL^{1,67}, D. B. KELLEY¹⁰, W. KELLS¹, R. KENNEDY¹, J. S. KEY¹, A. KHALALIDOVSKI¹, F. Y. KHALIL¹, I. KHAN¹, Z. S. KHAN¹, Z. KHAN¹, E. A. KHANZADOV¹⁰, N. KIBUNEN¹⁰, C. KIM¹, J. KIM¹, K. KIM¹, N. KIM¹, N. KIM¹, Y.-M. KIM¹⁰, E. J. KING¹⁰, P. J. KING¹, D. L. KINZEL¹, S. S. KISSEL¹, L. KLEYBOLTZ¹, S. KLIMECKO¹⁰, S. M. KOEHLERBECK¹, K. KOKYEMAS¹, S. KOLEV¹, V. KONDRASHOV¹, A. KONTOS¹⁰, M. KOROBKO¹⁷, W. Z. KORTI¹, I. KOWALSKI⁴¹, D. B. KOZAK¹, V. KRINGEL¹, A. KROLAK^{10,111}, C. KRUEGER¹, G. KUEHN¹, P. KUMAR¹⁰, L. KUI¹, A. KUTYNYA¹⁰, B. D. LACKEY¹, M. LANDRY¹, J. LANGE¹, B. LANTZ¹, J. P. D. LASKY¹, A. LAZZARINI¹, C. LAZZARO¹, P. LEACI^{10,79,10}, S. LEAVEY¹⁰, E. O. LEIBGOTT¹, C. H. LEE¹, H. K. LEE^{10,10}, H. M. LEE^{1,14}, LEE¹⁰, A. LENZI¹⁰, M. LEONARDI^{10,10}, J. R. LEON¹, N. LEROY¹, N. LETENDRE¹, Y. LEUNG¹, B. LEVINE¹, T. G. LI¹, A. LIBSON¹⁰, T. B. LITTENBERG¹, N. A. LOCKERIE¹⁰, J. LOGUE¹⁰, A. L. LOMBARDI¹⁰, J. E. LORD¹⁰



„Klassische“ Beobachtung von GW150914

Ziele:

- ▶ Verifikation
- ▶ Zusätzliche Informationen
- ▶ Lokalisierung

“LOCALIZATION AND BROADBAND FOLLOW-UP OF THE GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT GW150914”

[1562 Autoren]

25 (von 63 informierten) Arbeitsgruppen konnten sich an der Suche beteiligen

Kein passendes Ereignis elektromagnetischer Emission gefunden — das ist konsistent mit dem Verschmelzen eines Binärsystems Schwarzer Löcher als Quelle des Signals.



Die zweite Messung: GW151226

$$M_1 : 14,2_{-3,7}^{+8,3} M_{\odot}$$

$$M_2 : 7,5_{-2,3}^{+2,3} M_{\odot}$$

$$M_{\text{final}} : 20,8_{-1,7}^{+6,1} M_{\odot}$$

Entfernung: 1,4 Mrd. LJ



Die zweite Messkampagne

Seit 30. November 2016

Verbesserte Empfindlichkeit (dreifache Ereignisrate)

Erwartet: Ca. 10 Ereignisse in 6 Monaten

Bisher: 1 Ereignis und 6 schwach signifikante Kandidaten

GW170104 $M_1 : 31,2 M_{\odot}$

$M_2 : 19,4 M_{\odot}$

$M_{\text{final}} : 48,7 M_{\odot}$

Entfernung: 3 Mrd. LJ



Man fragt sich ...

- ▶ ... Massenverteilung Schwarzer Löcher?
- ▶ ... was ist eigentlich mit all den anderen potentiellen Quellen (insbesondere verschmelzenden Binärsystemen aus Neutronensternen)?



Masse eines Gravitons

Nicht-verschwindende Masse eines Gravitons

→ Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängig von Frequenz / Energie

→ Veränderung der Signalform

Ergebnis der Analyse von GW150914: $m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$

Etwas besser als Werte aus Tests im Sonnensystem (statisch)

Deutlich besser als Tests an Binärpularen (dynamisch)

Zum Vergleich: Masse des Photons: $m_\gamma \lesssim 10^{-18} \text{ eV}/c^2$

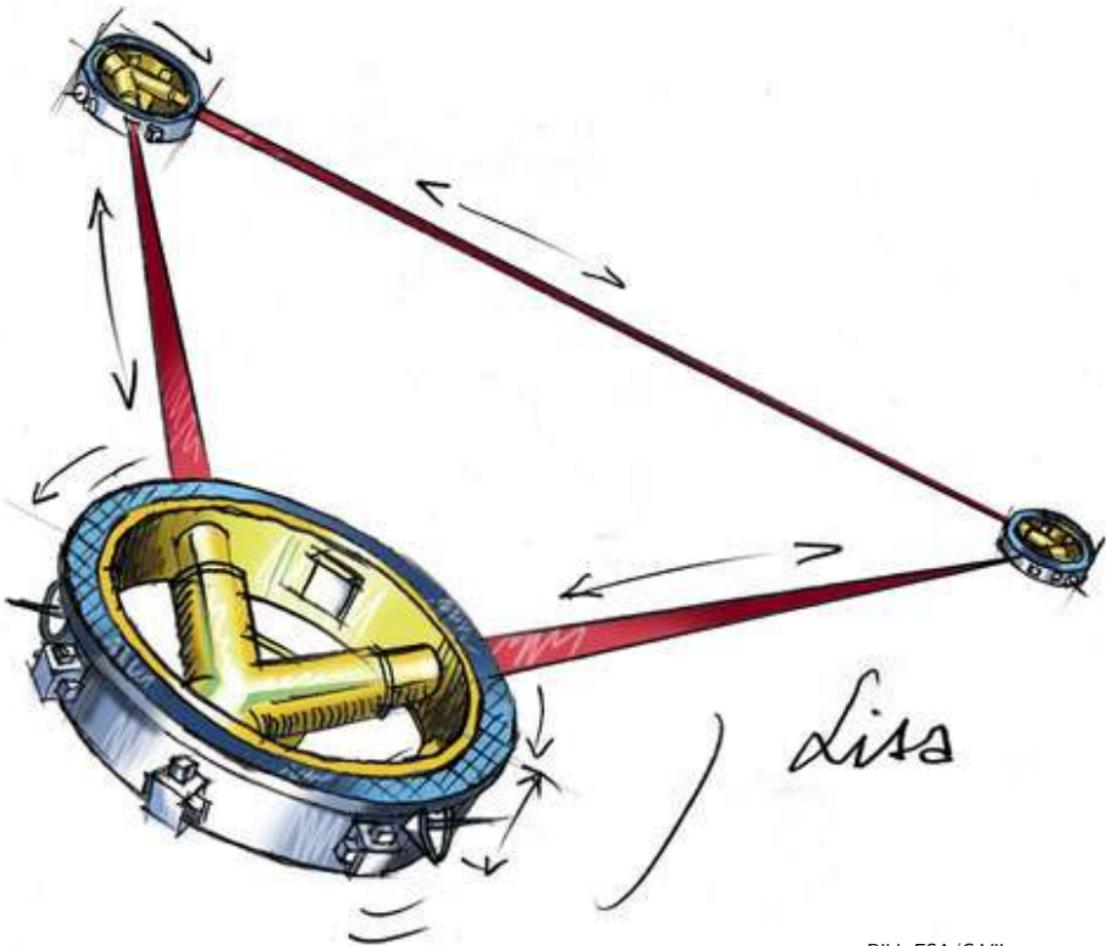


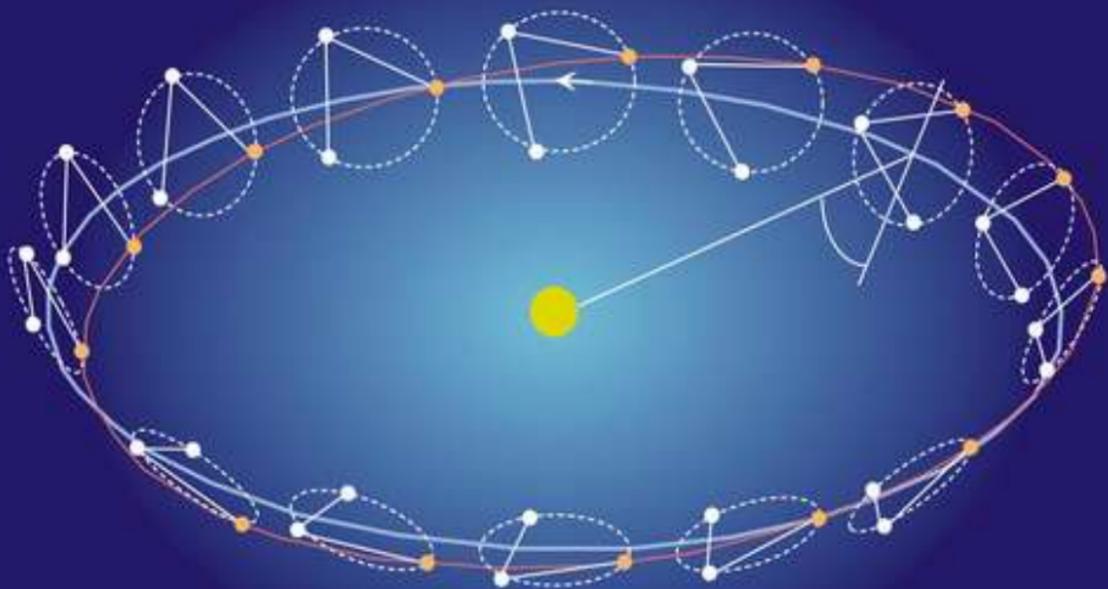
(Leider noch) Zukunftsmusik

LISA: Laser Interferometer Space Antenna

Mehrere Millionen(!) Kilometer Armlänge

Frequenzbereich ab ca. 0,1mHz bis ca. 1Hz



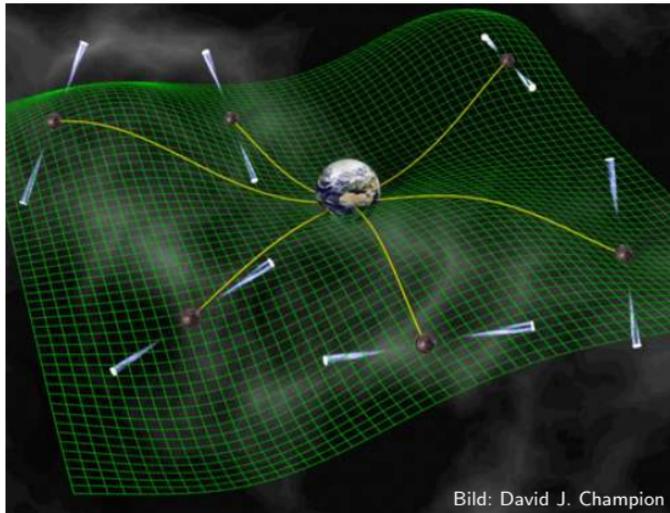




Pulsar Timing Array

Viele Pulsare über lange Zeit mit vielen Radioteleskopen weltweit beobachten

—→ Gravitationswellen mit Perioden von mehreren Jahren.



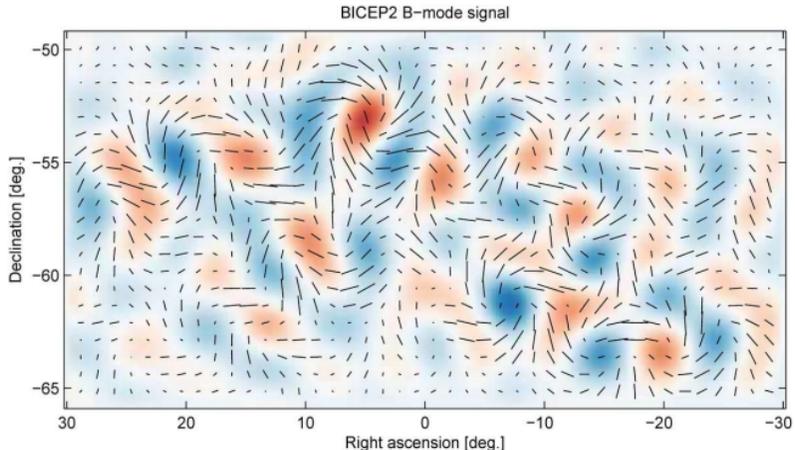


Polarisation der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

Einfluss von Gravitationswellen des sehr frühen Universums auf die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

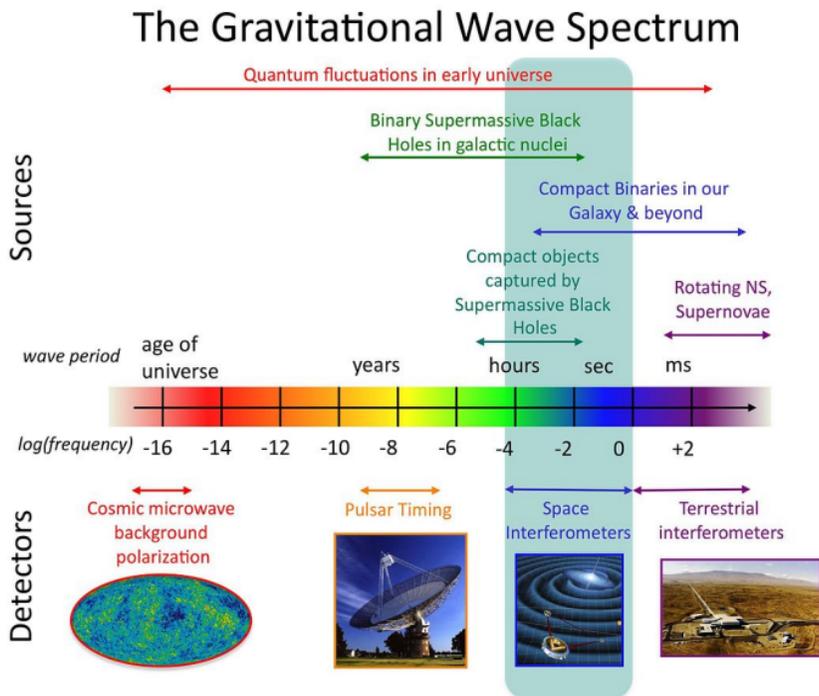
BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization)

PIPER (The Primordial Inflation Polarization Explorer)





Spektrum und Detektionsverfahren





Status und Ausblick

14. September 2015 Erste direkte Messung einer Gravitationswelle
(11. Februar 2016)
26. Dezember 2015 Zweite direkte Messung einer Gravitationswelle
(15. Juni 2016)
- Seit 30. Nov. 2016 LIGO Science Run mit höherer Empfindlichkeit
(1,5 bis 2-faches Detektionsvolumen)
Erwartet: Ca. 10 Ereignisse in sechs Monaten
Bisher: 1 Ereignis, 6 niedrig signifikante Kandidaten
- Seit 17. Juni 2017 VIRGO betriebsbereit
- Seit 2. Dez. 2015 LISA Pathfinder
Mission am 30.06.2017 erfolgreich abgeschlossen
- 2034 Start LISA (Beschluss der ESA vom 20.6.2017)
- Pulsar Timing: Messungen haben begonnen
- BICEP: Neue Messungen geplant



Gravitationswellenastronomie an der Schule?

Material: Lieber nicht bei YouTube suchen, sondern z.B. hier:

www.einstein-online.info ▶ (Aufgerufen: 13.07.2017)

www.scienceface.org ▶ (Aufgerufen: 13.07.2017)

LIGO Educational Resources ▶ (Aufgerufen: 13.07.2017)

Um Gravitationswellen zu behandeln, müssen die Schüler

- ▶ sehr wenig über Relativitätstheorie wissen
- ▶ sehr wenig über Wellen wissen



Gravitationswellenastronomie an der Schule

Einstein inside — 100⁺ Jahre Allgemeine Relativitätstheorie

ist eine interaktive Wanderausstellung, zu der auch eine ausführliche Darstellung von Gravitationswellen und Gravitationswellenastronomie gehört.

www.einstein-inside.de  (Aufgerufen: 13.07.2017)

www.einsteinwelle.de  (Aufgerufen: 13.07.2017)

„Demnächst“ wird die Ausstellung so weit wie möglich als virtuelle Ausstellung im Netz verfügbar sein.