Gravitationswellen und deren Nachweis

Dr. Werner Becker

Max-Planck Institut für extraterrestrische Physik

Giessenbachstrasse 1, 82041 Garching

web@mpe.mpg.de

http://www.xray.mpe.mpg.de/~web

Gravitationswellen und deren Nachweis

1.) Die Wellengleichung

- Die linearisierten Feldgleichungen, Lorentz-Eichung

2.) Eigenschaften von Gravitationswellen

- Untersuchung der homogenen Wellengleichung
- Wirkung auf frei fallende Testmassen, Polarisationsmoden

3.) Quellen von Gravitationswellen

- Untersuchung der inhomogenen Wellengleichung, Quadrupolformel

4.) Indirekter Nachweis von Gravitationswellen

- Der Binärpulsar PSR 1913+16, Nobelpreis 1993

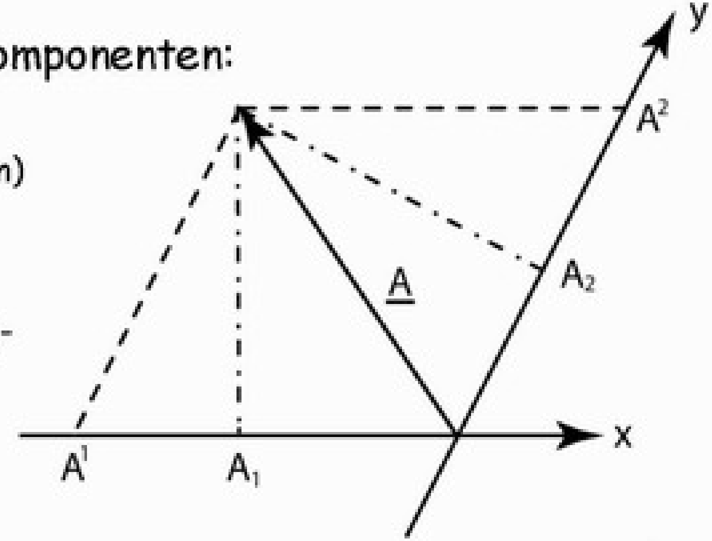
5.) Die aktuellen Experimente

- Laser-Interferometer Experimente und Resonanzantennen

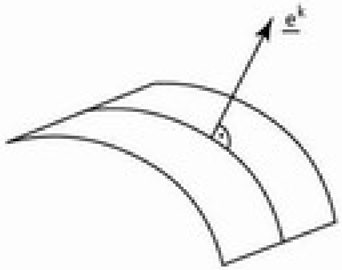
Nomenklatur:

Ko- und kontravarainte Vektor-/Tensorkomponenten:

- Unterscheidung typisch für Vektoren in (beliebigen) schiefwinkligen Koordinatensystemen
- entsprechend den verschiedenen Konstruktionsmöglichkeiten für Basisvektoren in beliebigen Koordinatensystemem



- Kovariante Vektorkomponenten: A_k
  beziehen sich auf die reziproke Vektorbasis
- Kontravariante Vektorkomponenten: A^k
  beziehen sich auf die Tangentialbasis



$$\underline{A} = A_k \underline{e}^k$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x^i} = \frac{\partial x'^k}{\partial x^i} \frac{\partial \varphi}{\partial x'^k}$$

$$\underline{A} = A^k \underline{e}_k$$

$$dx^i = \frac{\partial x^i}{\partial x'^k} dx'^k$$

Nomenklatur:

- Vierer-Ortsvektor: $(x^0, x^1, x^2, x^3)^T = (ct, x, y, z)^T$ $\quad x^i : i=0,1,2,3$

$$(x_0, x_1, x_2, x_3)^T = (ct, -x, -y, -z)^T$$

- Transformation zwischen ko- und kontravarianten Komponenten:

$$x^n = g^{nk} x_k \qquad x_k = g_{kn} x^n$$

Metrik-Tensor (Signatur: + - - -)

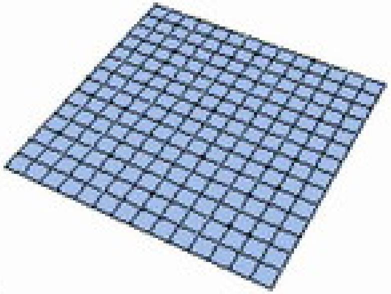
- Über gleiche Indizes wird summiert: $A^k A_k = A^0 A_0 + A^1 A_1 + A^2 A_2 + A^3 A_3$

- Partielle Ableitung nach der Koordinate x^n: $\dfrac{\partial}{\partial x^n} \mathrm{A}^k \equiv \partial_n \mathrm{A}^k \equiv \mathrm{A}^k{}_{,n}$

Der Raum ist nicht Schauplatz des physikalischen Geschehens, sondern ein Aspekt der Wechselwirkung und der Bewegung der Materie:

- Die Materie bestimmt die Krümmung des Raumes
  - Der Raum bestimmt die Bewegung der Materie
    - Alle Materie in Bewegung, Geometrie der Raumzeit ändert sich ständig
      - Gravitationsfeld: Veränderung der Metrik von Raum und Zeit

Raum ohne Masse



$$ds^2 = \eta_{ik} dx^i dx^k$$

keine Krümmung (Pseudo-Euklidischer Raum)

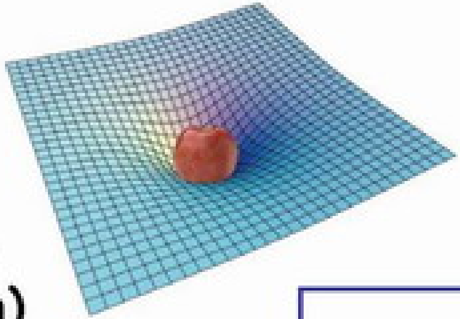
„Flachraum"-Metrik

$$\eta_{ik} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Der Raum ist nicht Schauplatz des physikalischen Geschehens, sondern ein Aspekt der Wechselwirkung und der Bewegung der Materie:

- Die Materie bestimmt die Krümmung des Raumes
  - Der Raum bestimmt die Bewegung der Materie
    - Alle Materie in Bewegung, Geometrie der Raumzeit ändert sich ständig
      - Gravitationsfeld: Veränderung der Metrik von Raum und Zeit

Masse



= Raumkrümmung
(Riemannscher Raum)

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k$$

allgemeiner Metrik-Tensor:

$g_{ik}(x^0, x^1, x^2, x^3)$

ist die das Gravitationsfeld beschreibende Größe

- Einsteinschen Feldgleichungen:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik} + \Lambda g_{ik}$$

Energie-Impuls-Tensor

Krümmungsskalar: $R = g^{ik} R_{ik}$

Ricci-Tensor: $R_{ik} = \Gamma^{l}_{ik,l} - \Gamma^{l}_{il,k} + \Gamma^{l}_{ik}\Gamma^{m}_{lm} - \Gamma^{m}_{il}\Gamma^{l}_{km}$

Christoffel-Symbol: $\Gamma^{l}_{nk} = \frac{1}{2} g^{lj} \left(g_{jn,k} - g_{nk,j} + g_{jk,n} \right)$

Nichtlineares gekoppeltes Differentialgleichungssystem zur Bestimmung der 6 unabhängigen Komponenten des Metrik-Tensors, der 3 unabhängigen Komponenten der 4er Geschwindigkeit sowie der Materiedichte (bzw. des Drucks).

Größe relativistischer Effekte: → $8\pi G/c^4 = 2\times10^{-43}$ [1/N]

- Beitrag der Sonne zur Raumkrümmung: 10^{-6}
- Beitrag der Erde zur Raumkrümmung: 10^{-9}

Annahme:

Metrik des Raumes weicht nur wenig von der des euklidisch-flachen Raumes ab:

$$g_{ik} = \eta_{ik} + h_{ik} \qquad h_{ik} \ll 1$$

$$g^{ik} = \eta^{ik} - h^{ik} \qquad h^{k}{}_{i} = \eta^{kl} h_{il}$$

- Entkopplung der Feldgleichungen durch Linearisierung:
  - Vernachlässigung aller Terme höherer als von erster Ordnung in h_{ik} sowie in deren Ableitungen
  - Nebeneffekt: in der linearisierten Theorie hat das Gravitationsfeld keine Rückwirkung auf die Bewegung der felderzeugenden Materie mehr (d.h. keine Retardierung!)

- Linearisierte Feldgleichungen:

$$\boxed{-\bar{h}_{mn}{}^{,l}{}_{,l} - \eta_{mn}\bar{h}^{lk}{}_{,lk} + \bar{h}^{l}{}_{n,ml} + \bar{h}^{l}{}_{m,nl} = \frac{16\pi G}{c^4} T_{mn}}$$

$$\bar{h}_{mn} \equiv h_{mn} - \frac{1}{2}\eta_{mn} h$$

- Weitere Vereinfachung durch geeignete Wahl des Koordinatensystems (Eichinvarianz), reduziert die Feldgleichungen bis auf den ersten Term

$$\Rightarrow \quad -\bar{h}_{mn}{}^{,l}{}_{,l} = -\partial^l \partial_l \bar{h}_{mn} = -\eta^{lk}\partial_k \partial_l \bar{h}_{mn} = -\eta^{lk}\frac{\partial^2}{\partial x^k \partial x^l}\bar{h}_{mn} = \left(-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \Delta\right)\bar{h}_{mn}$$

- Wellengleichung:

$$\boxed{\left(-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \Delta\right)\bar{h}_{mn} = \frac{16\pi G}{c^4} T_{mn}}$$

Gravitationswellen und deren Nachweis

1.) Die Wellengleichung

- Die linearisierten Feldgleichungen, Lorentz-Eichung

2.) Eigenschaften von Gravitationswellen

- Untersuchung der homogenen Wellengleichung
- Polarisationsmoden, Wirkung auf frei fallende Testmassen

3.) Quellen von Gravitationswellen

- Untersuchung der inhomogenen Wellengleichung, Quadrupolformel

4.) Indirekter Nachweis von Gravitationswellen

- Der Binärpulsar PSR 1913+16, Nobelpreis 1993

5.) Die aktuellen Experimente

- Laser-Interferometer Experimente und Resonanzantennen

- Allgemeine Lösung der homogenen Wellengleichung lässt sich durch eine Superposition von ebenen monochromatischen Wellen darstellen:

$$\bar{h}_{mn} = A_{mn} \exp(i k_i x^i)$$

$$x^i = (ct, \underline{r})$$

$$k_i = \left(\frac{\omega}{c}, \underline{k}\right) = \left(\frac{\omega}{c}, -\frac{\omega}{c}\underline{n}\right)$$

$$A_{mn} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{11} & h_{12} & 0 \\ 0 & h_{12} & -h_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Polarisationstensor (z.B.Welle in z-Richtung)

nur 2 unabhängige Polarisationszustände unter Berücksichtigung aller Eichtransformationen

(transversale spurlose Eichung)

$k_i k^i = 0$ → • Wellenvektor ist Nullvektor

$A_{lm} k^m = 0$ → • **A** orthogonal zu **K** *Gravitationswellen transversal*

- Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, sie sind transversal und besitzen zwei Freiheitsgrade der Polarisation

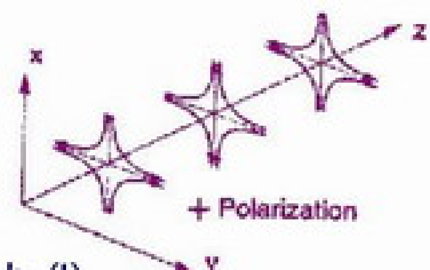
- <u>Ebene Welle in Z-Richtung:</u>

$$h_{mn} = (h_+ e_+ + h_\times e_\times)\, e^{i\omega(t - z/c)}$$

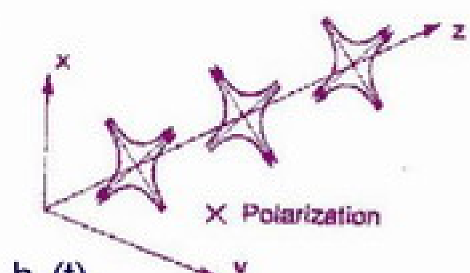
$$e_+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad e_\times = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Polarisations-Einheitstensor

- Die beiden von einander unabhängige Polarisationszustände gehen durch Rotation um 45 Grad ineinander über:



$h_+(t)$



$h_\times(t)$

- Die Metrik "schwingt" periodisch in der xy-Ebene
- Relativbeschleunigung benachbarter Punkte durch Gezeitenkräfte

- Effekt der GW:

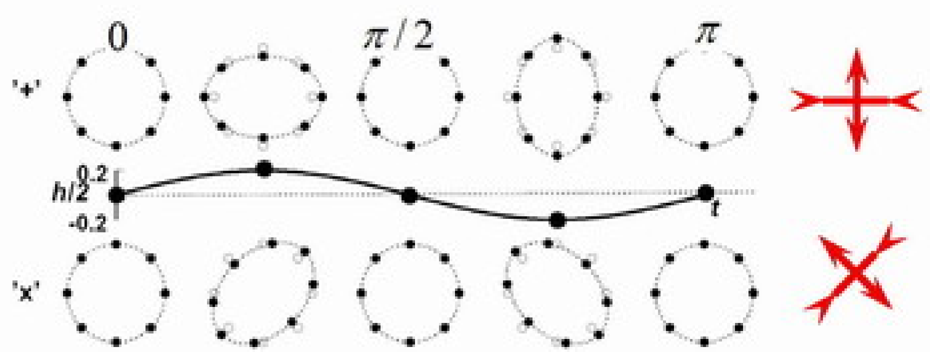
- Abstand zwischen zwei benachbarten Testmassen die in den Punkten $P_1 = (0,0,0)$ und $P_2 = (\varepsilon,0,0)$ mit $|\varepsilon| \ll 1$ ruhen.

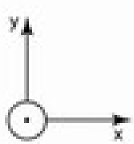
(Tafel) $\Rightarrow$

$$\int_{P_1}^{P_2} ds = \int_{P_1}^{P_2} \left| g_{ik} dx^i dx^k \right|^{\frac{1}{2}} = \int_0^{\varepsilon} \left| g_{xx} \right|^{\frac{1}{2}} dx \simeq \left| g_{xx}(P_1) \right|^{\frac{1}{2}} \varepsilon \simeq \left[1 + \frac{1}{2} \bar{h}_{xx}(P_1) \right] \varepsilon$$

- Gravitationswellen ändern die Distanz zwischen den Testmassen! $\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{2} h$

- Wirkung auf einen Ring von freien Testmassen:





Aufgetragen ist die Distanz (!) zwischen den Testmassen

Gravitationswellen und deren Nachweis

1.) Die Wellengleichung

- Die linearisierten Feldgleichungen, Lorentz-Eichung

2.) Eigenschaften von Gravitationswellen

- Untersuchung der homogenen Wellengleichung
- Wirkung auf frei fallende Testmassen, Polarisationsmoden

3.) Quellen von Gravitationswellen

- Untersuchung der inhomogenen Wellengleichung, Quadrupolformel

4.) Indirekter Nachweis von Gravitationswellen

- Der Binärpulsar PSR 1913+16, Nobelpreis 1993

5.) Die aktuellen Experimente

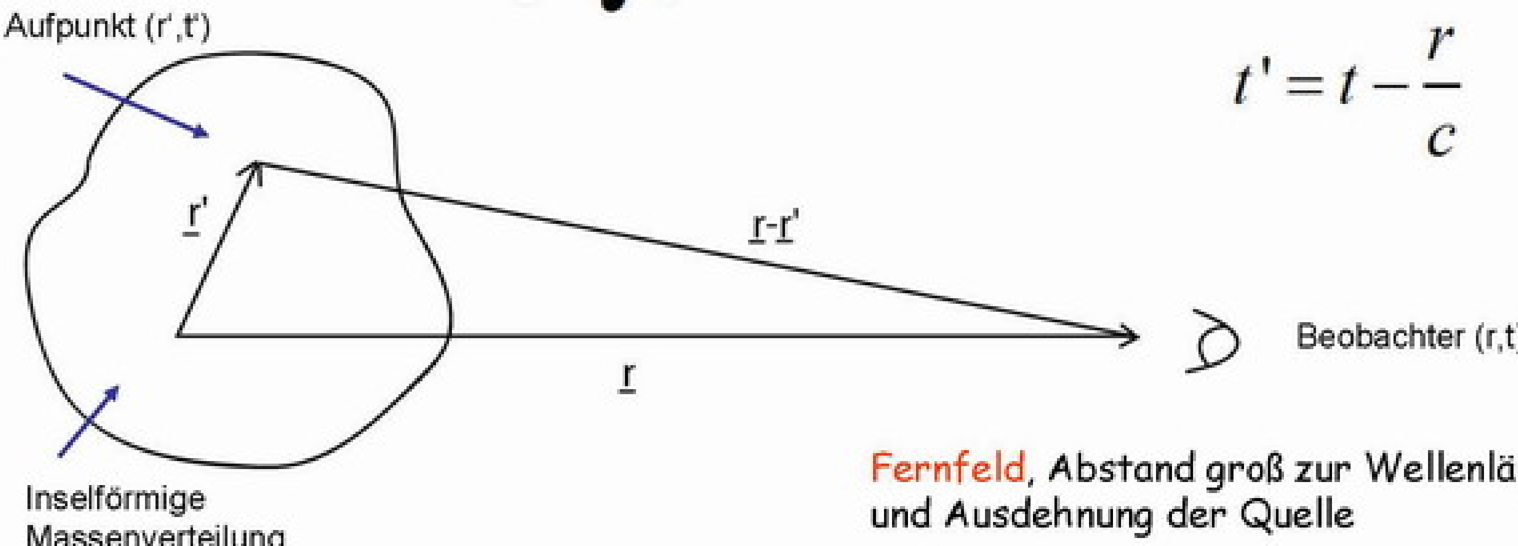
- Laser-Interferometer Experimente und Resonanzantennen

- **Inhomogene Wellengleichung:** $$\left(-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}+\Delta\right)\bar{h}_{ik}=\frac{16\pi G}{c^4}T_{ik}$$

- Die quellenmäßigen Lösungen der inhomogenen Wellengleichung sind die Greenschen „retardierten" Potentiale:

$$\bar{h}_{ik}(\underline{r},t)=-\frac{4G}{c^4}\int\frac{1}{r}T_{ik}(\underline{r}',t')d^3x' \qquad r\simeq|\underline{r}-\underline{r}'|$$

$$t'=t-\frac{r}{c}$$



Fernfeld, Abstand groß zur Wellenlänge und Ausdehnung der Quelle

- alle Integrale über $T_{\alpha\beta}$ lassen sich durch Integrale ausdrücken die nur die Komponente T_{00} enthalten.

$$\Rightarrow \quad T_{00} = \rho(t', \underline{r}')\, c^2$$

Massendichte

$$\Rightarrow \quad \bar{h}_{\alpha\beta}(t, \underline{r}) = -\frac{2G}{c^4 r} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \underbrace{\int \rho(\underline{r}') x'^{\alpha} x'^{\beta}\, d^3x'}_{\boxed{\text{Lässt sich durch Quadrupoltensor ausdrücken}}}$$

- Quadrupoltensor: $D_{\alpha\beta}(t, \underline{r}) \equiv \int \rho(\underline{r}') \left[3x'^{\alpha} x'^{\beta} - \delta_{\alpha\beta} r'^2 \right] d^3x'$

- Gravitationswellen: ~ Quadrupolstrahlung

$$h_+(t) \equiv \bar{h}_{11}(t,\underline{r}) - \bar{h}_{22}(t,\underline{r}) = -\frac{2G}{3c^4 r}\left[\ddot{D}_{11} - \ddot{D}_{22}\right]$$

$$h_x(t) \equiv \bar{h}_{12}(t,\underline{r}) = -\frac{2G}{3c^4 r}\ddot{D}_{12}$$

Amplituden proportional 1/r

- Energieverlust des strahlenden Systems:

Quadrupolformel

(A.Einstein 1916)

$$\boxed{-\frac{dE}{dt} = L_{GW} = \frac{G}{45c^5}\left\langle \sum_{\alpha=1}^{3}\sum_{\beta=1}^{3} \dddot{D}_{\alpha\beta}\dddot{D}_{\alpha\beta} \right\rangle}$$

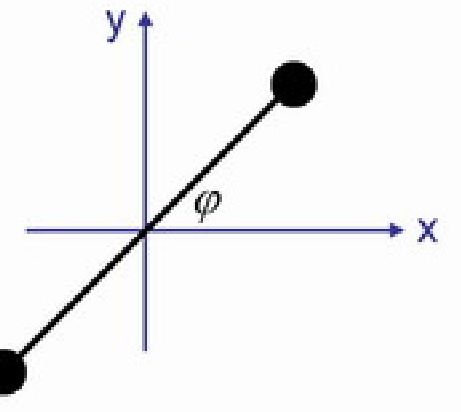
- Pfaller'scher Gravitationswellengenerator: Energieabstrahlung

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{32}{5}\frac{G}{c^5}\Theta^2\Omega^6$$

6. Potenz

$$\Omega = \dot{\varphi} = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{}$$

$$\frac{G}{c^5} = 2.75\times10^{-53}\ (\text{Watt})^{-1}$$



$$m_1 + m_2 \qquad 2$$

- Wie groß ist die Strahlungsleistung?

$$\nu = 30\,\text{Hz} \rightarrow \Omega = 188.5\,\text{rad/s}$$

$$m_1 = m_2 = m = 100\,\text{g} \rightarrow \mu = 0.05\,\text{kg}$$

$$r = 0.2\,\text{m}$$

$$c \simeq 3\,10^8\,\text{m/s} \qquad G = 6.67\,10^{-11}\,\frac{\text{m}^3}{\text{kg s}}$$

$$-\frac{dE}{dt} = 3.2\,10^{-44}\,\text{Js}^{-1}$$

$$E_{Graviton} = \hbar\Omega_{Gw} = \hbar(2\Omega)$$

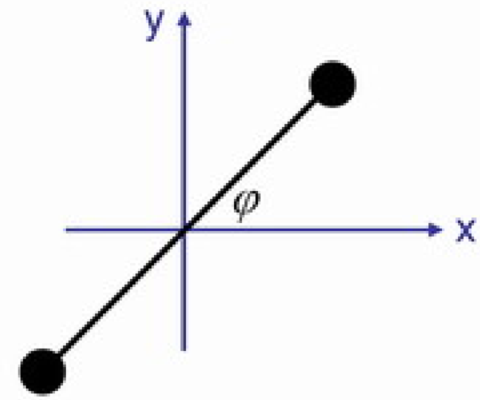
$$E_{Graviton} = 3.97\,10^{-22}\,\text{J}$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{-dE/dt}{E_{Graviton}} = 8\,10^{-13}\,\text{s}^{-1}$$

$$\boxed{\text{~ 1 Graviton in 40000 Jahren}}$$

- Binärsystem: 2 NS auf Kreisbahn um gem. Schwerpunkt, Umlaufzeit 1h

3tes Keplersches Gesetz: $\Omega^2 = \frac{4\pi^2}{P_b} = \frac{GM}{a^3}$



$$M \equiv m_{NS} + m_{NS}$$

- Strahlungsleistung des Binärsystems:

$m_{NS} = 1.4\ \mathrm{M}_\odot$ $\quad \mathrm{M}_\odot \simeq 2\ 10^{30}\ \mathrm{kg}$ $\quad G = 6.67\ 10^{-11}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg\ s}}$

$a \approx\ 5\ 10^8\mathrm{m}$ $\quad \Omega = 1.74\ 10^{-2}\,\mathrm{rad/s}$ $\quad c \simeq 3\ 10^8\,\mathrm{m/s}$

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{32}{5}\frac{G}{c^5}\mu^2 a^4 \Omega^6 \left. \vphantom{\int} \right\} \begin{array}{l} -\dfrac{dE}{dt} = 6.0\ \ 10^{26}\ \mathrm{Js}^{-1} \\[2ex] \dfrac{dN}{dt} = \dfrac{-dE/dt}{E_{Graviton}} = 1.73\ 10^{63}\ \mathrm{s}^{-1} \end{array}$$

$E_{Graviton} = 3.48\ 10^{-37}\,\mathrm{J}$

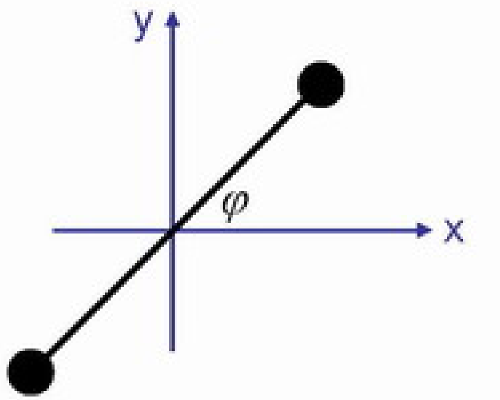
$\mathrm{f}_{GW} = 1.44\ 10^{25}\ \mathrm{s}^{-1}\mathrm{m}^{-2}$

$d = 320\ \mathrm{Lj}$

Strahlungsleistung vergleichbar mit der der Sonne, wenn auch bei anderen Wellenlängen

- Binärsystem: 2 NS auf Kreisbahn um gem. Schwerpunkt, Umlaufzeit 1h

- Amplituden der GW-Welle:



$$h_+ = \frac{1}{r}\frac{8G}{c^4}\mu\, a^2\Omega^2 \cos(2\Omega\, t)$$

$$h_\times = \frac{1}{r}\frac{8G}{c^4}\mu\, a^2\Omega^2 \sin(2\Omega\, t)$$

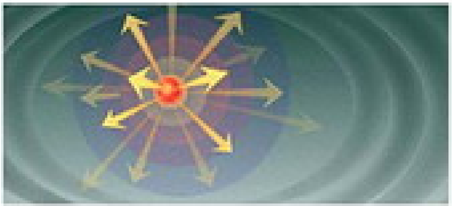
Frequenz der GW = doppelte Umlauffrequenz

Abstand Beobachter-Quelle

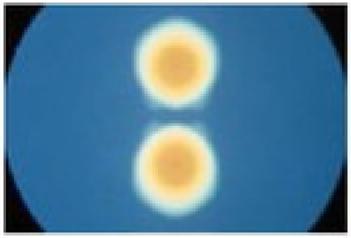
$\left|h_\times\right| = 2.26\ 10^{-18}$ für einen Abstand Beobachter-Quelle von 320 Lj

- Kosmische Quellen von Gravitationswellen:

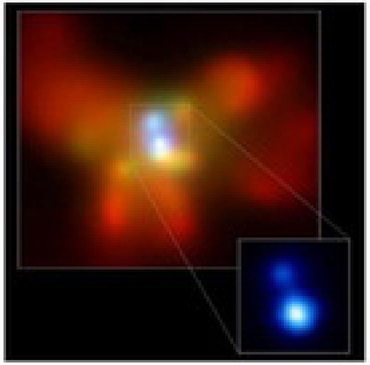
die energiereichsten und heftigsten Vorgänge im Universum



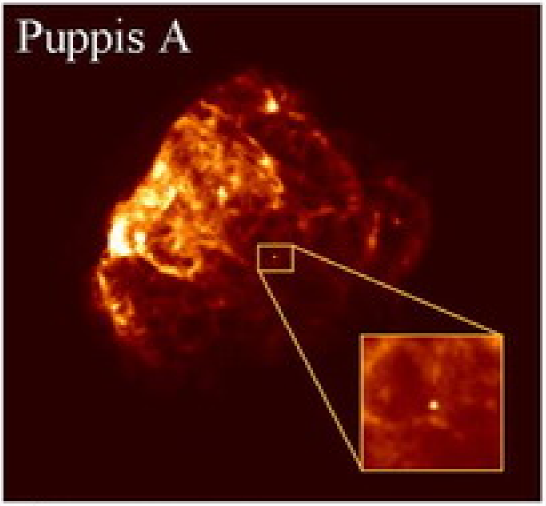
Urknall /Inflation



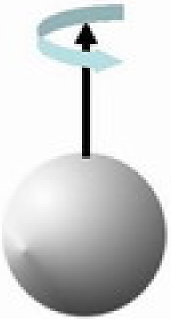
Doppelsternsysteme



Kollidierende superschwere Schwarze Löcher



Supernovae
asymmetrischer Core-collapse



„bergige"
Neutronensterne

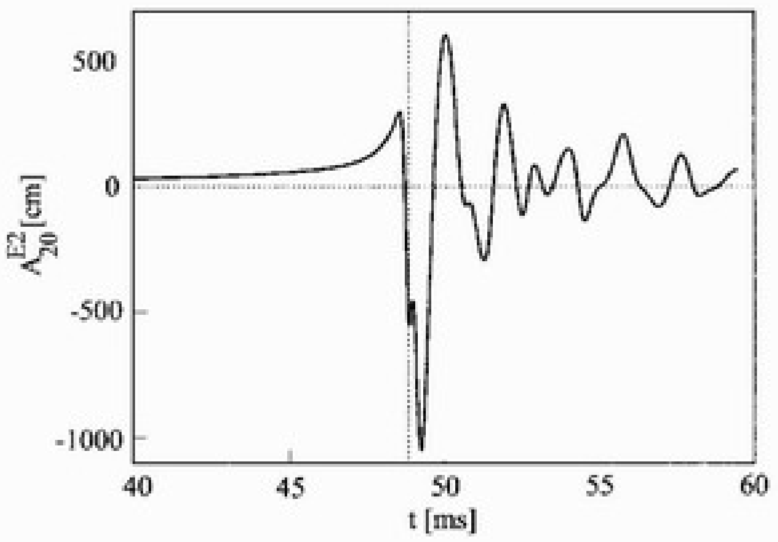
Akkretierende Neutronensterne

• Gravitationswellen von Supernovae:

- verläuft der Core-collaps asymmetrisch, können bis zu ~ 1 % der Gravitationsbindungsenergie in Form von GW abgestrahlt werden

Signalform: Impuls, f ~ 1 kHz

z.B. berechnetes Signal für den Kollaps eines durch Rotation abgeplatteten Sterns:



T. Zwerger, E. Müller 1997

GW-Stärke und Häufigkeit:

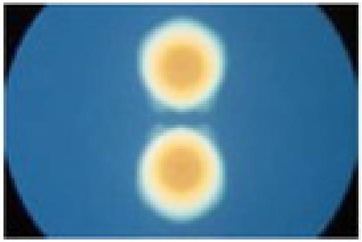
h ~ 10^{-18} in der Milchstraße

h ~ 10^{-21} im Virgo-Cluster

Rate: einige pro Jahr

Kenntnis der Signalform wichtig (Templates für die Detektion)

• Gravitationswellen von kompakten Binärsystemem



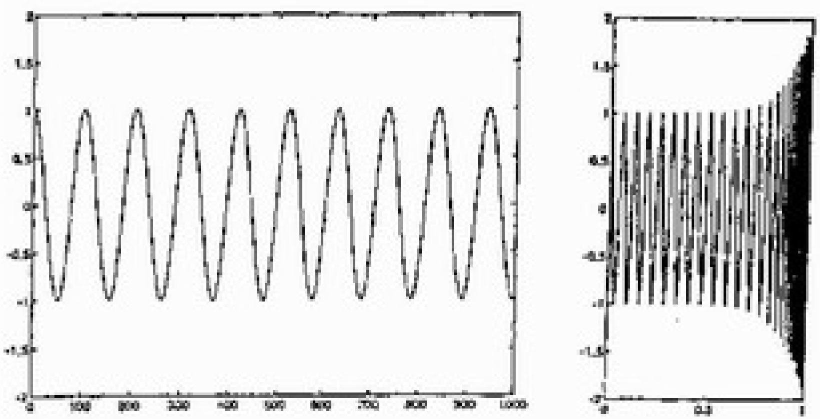
- Zwei Neutronensterne oder Schwarze Löcher, die einander umkreisen und schließlich verschmelzen
- Amplitude und Wellenform sind sehr gut bekannt

Signalform: quasi-periodisch,
f ~ 100 Hz, Endphase *„zirpsen"*

GW-Stärke:

$h \sim 10^{-18}$ in der Milchstraße
$h \sim 10^{-21}$ im Virgo-Cluster

Rate der Verschmelzungen:
einige pro Jahr



Zeit t [s]

Gravitationswellen und deren Nachweis

1.) Die Wellengleichung

- Die linearisierten Feldgleichungen, Lorentz-Eichung

2.) Eigenschaften von Gravitationswellen

- Untersuchung der homogenen Wellengleichung
- Wirkung auf frei fallende Testmassen, Polarisationsmoden

3.) Quellen von Gravitationswellen

- Untersuchung der inhomogenen Wellengleichung, Quadrupolformel

4.) Indirekter Nachweis von Gravitationswellen

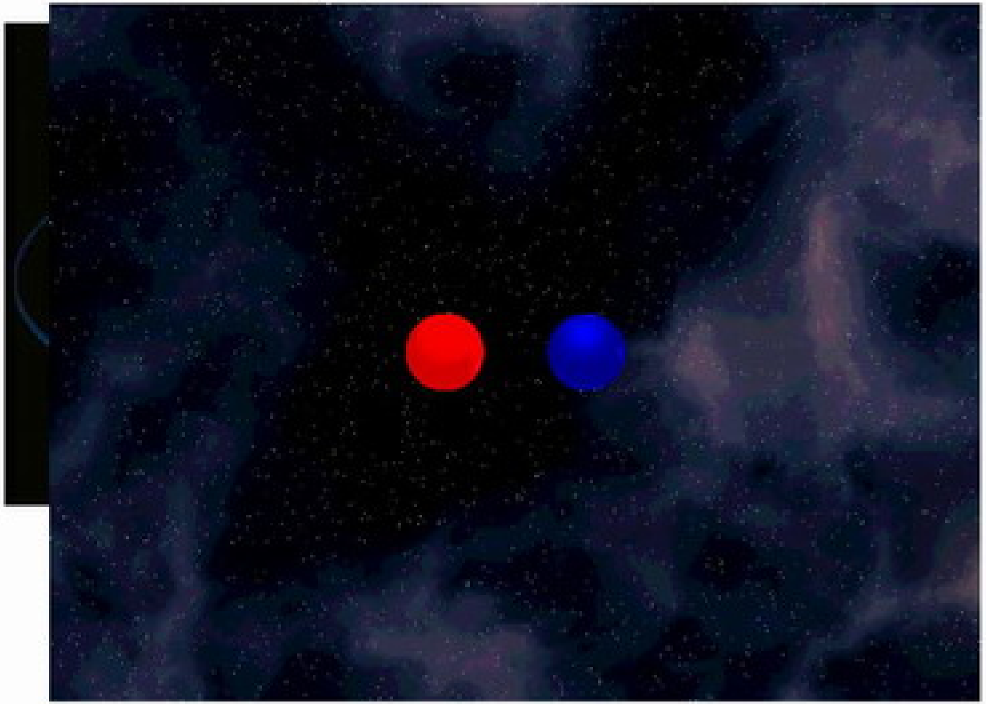
- Der Binärpulsar PSR 1913+16, Nobelpreis 1993

5.) Die aktuellen Experimente

- Laser-Interferometer Experimente und Resonanzantennen

Das Binärpulsar-System PSR 1913+16

- 2 NS (1.4 Mo)
- Abstand 6.5 Ls
- P_b=7h 45min
- e=0.62
- P_{PSR}=59 ms
- Entf.~19000 Lj



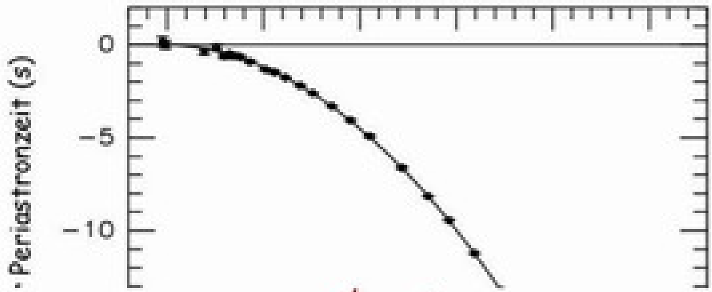
- Pulsar-Timing: -> Zeiten des Periastrondurchgangs ändern sich
- Verkleinerung des Abstandes beider NS von 3mm pro Orbit

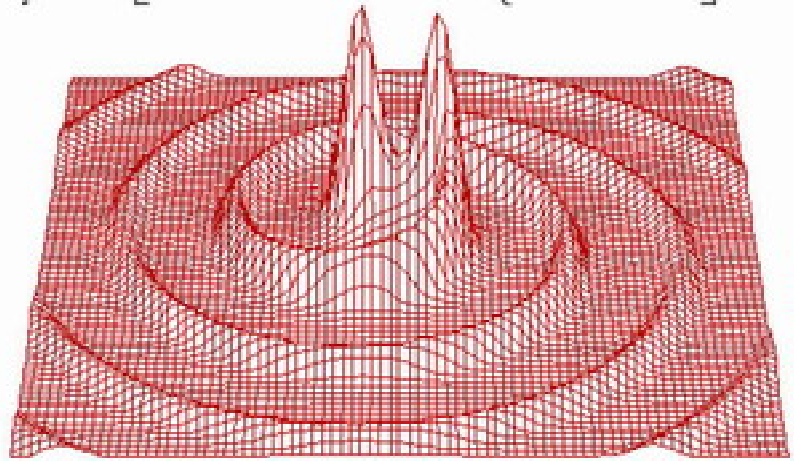
→ Verkürzung der Bahnperiode

$$\dot{P}_{bGW} = (-2.40247 \pm 0.00002) \times 10^{-12}\,\mathrm{s/s}$$

$$\dot{P}_{b-obs} = (-2.4086 \pm 0.0052) \times 10^{-12}\,\mathrm{s/s}$$

Δt_p stimmt mit dem Wert überein, den die Allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt (auf < 1 %).





$$L_{GW} \approx 8\;10^{24}\;\mathrm{Js^{-1}}$$

Indirekter Nachweis von Gravitationswellen !

Nobelpreis für Physik 1993

Joseph Weber (1919 – 2000)

Der Pionier der GW-Forschung:

Resonanzantennen („Weber-Zylinder")

Nachteil: nur geringe Nachweisempfindlichkeit, schmalbandig, f~1 kHz

Gravitationswellen und deren Nachweis

1.) Die Wellengleichung

- Die linearisierten Feldgleichungen, Lorentz-Eichung

2.) Eigenschaften von Gravitationswellen

- Untersuchung der homogenen Wellengleichung
- Wirkung auf frei fallende Testmassen, Polarisationsmoden

3.) Quellen von Gravitationswellen

- Untersuchung der inhomogenen Wellengleichung, Quadrupolformel

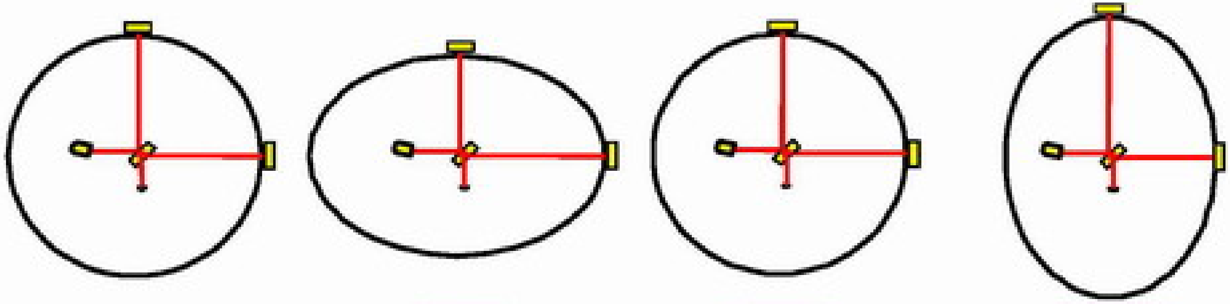
4.) Indirekter Nachweis von Gravitationswellen

- Der Binärpulsar PSR 1913+16, Nobelpreis 1993

5.) Die aktuellen Experimente

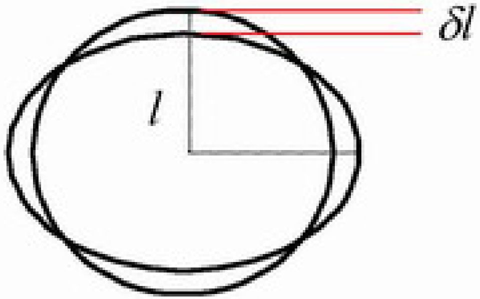
- Laser-Interferometer Experimente (und Resonanzantennen)

- Nachweisprinzip der Laser-Interferometer Antennen:



$t = 0$ $\qquad t = \frac{\tau}{4}$ $\qquad t = \frac{\tau}{2}$ $\qquad t = \frac{3\tau}{4}$

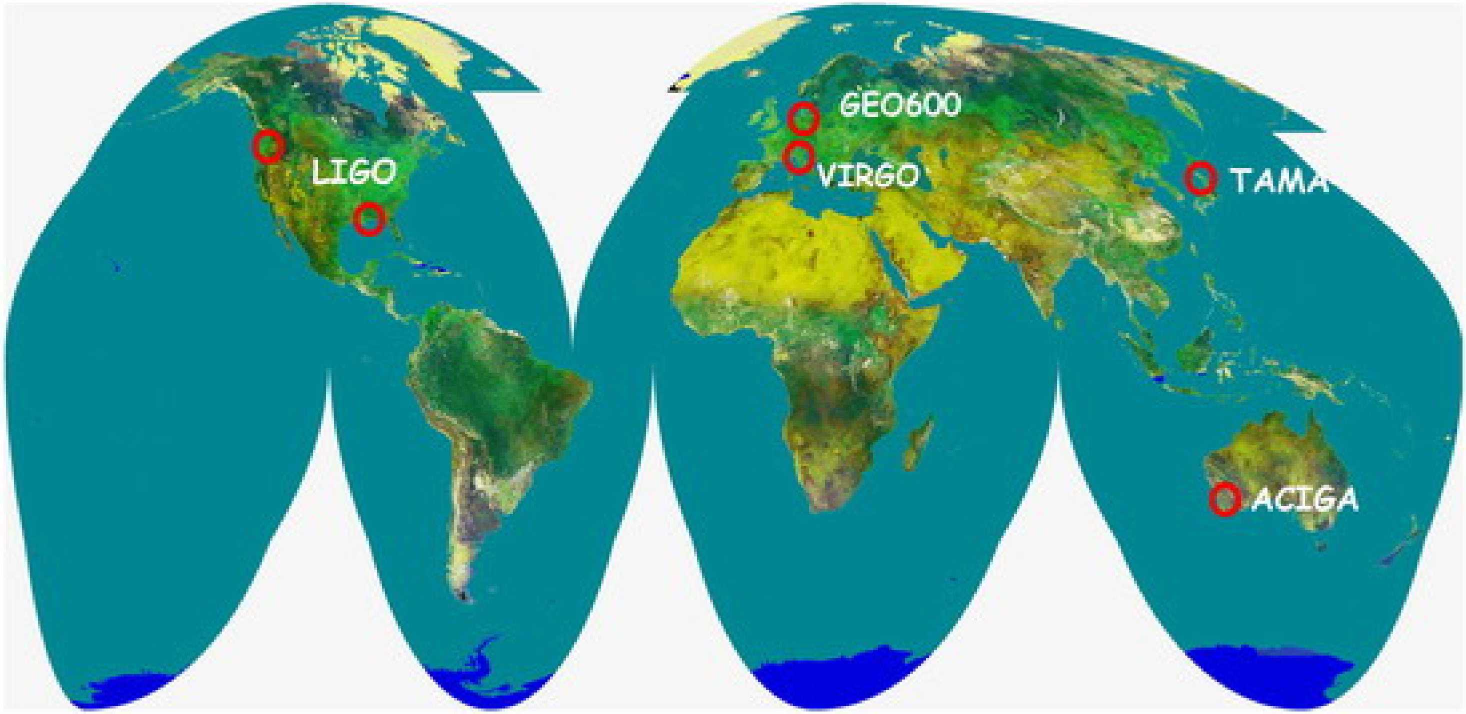
Strahlteiler und Spiegel dienen als Testmassen



- messbare Längenänderung $\delta l = \frac{h}{2} l$

Proportional zur Länge

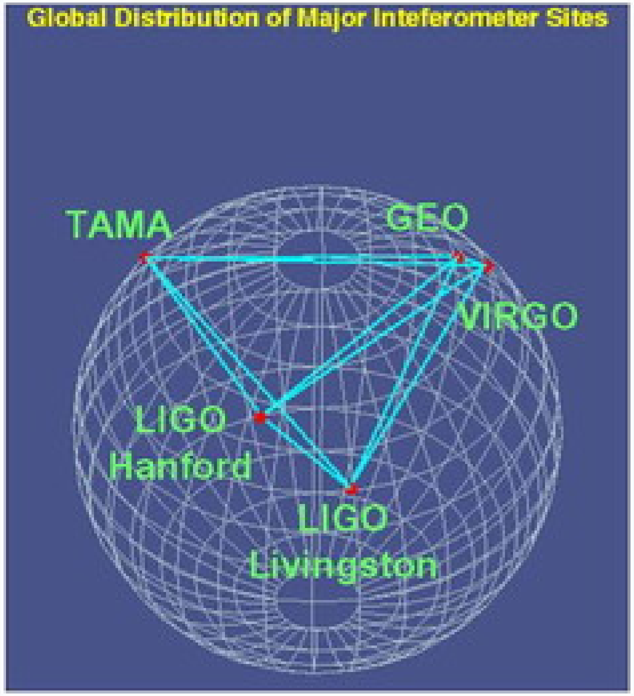
- Weltweites Netzwerk von Gravitationswellendetektoren

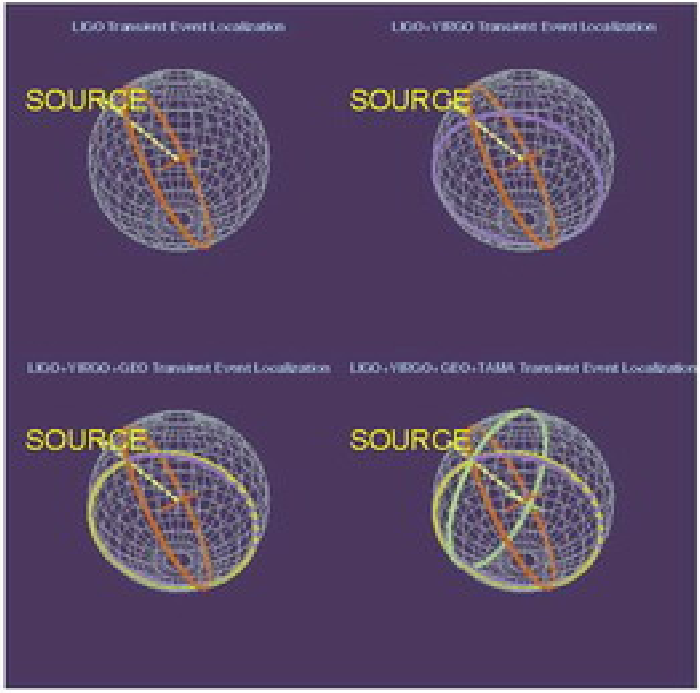


Laser-
Interferometerantennen

LIGO (USA)	: 4 km Armlänge	(Messbeginn 2001/2002)
GEO 600 (D/GR)	: 600m Armlänge	(Messbeginn 2001/2002)
VIRGO (I/FR)	: 3 km Armlänge	(Messbeginn ~ 2003+)
TAMA (Japan)	: 300m Armlänge	(Messbeginn 2000)

- Interferometer-Netzwerk:





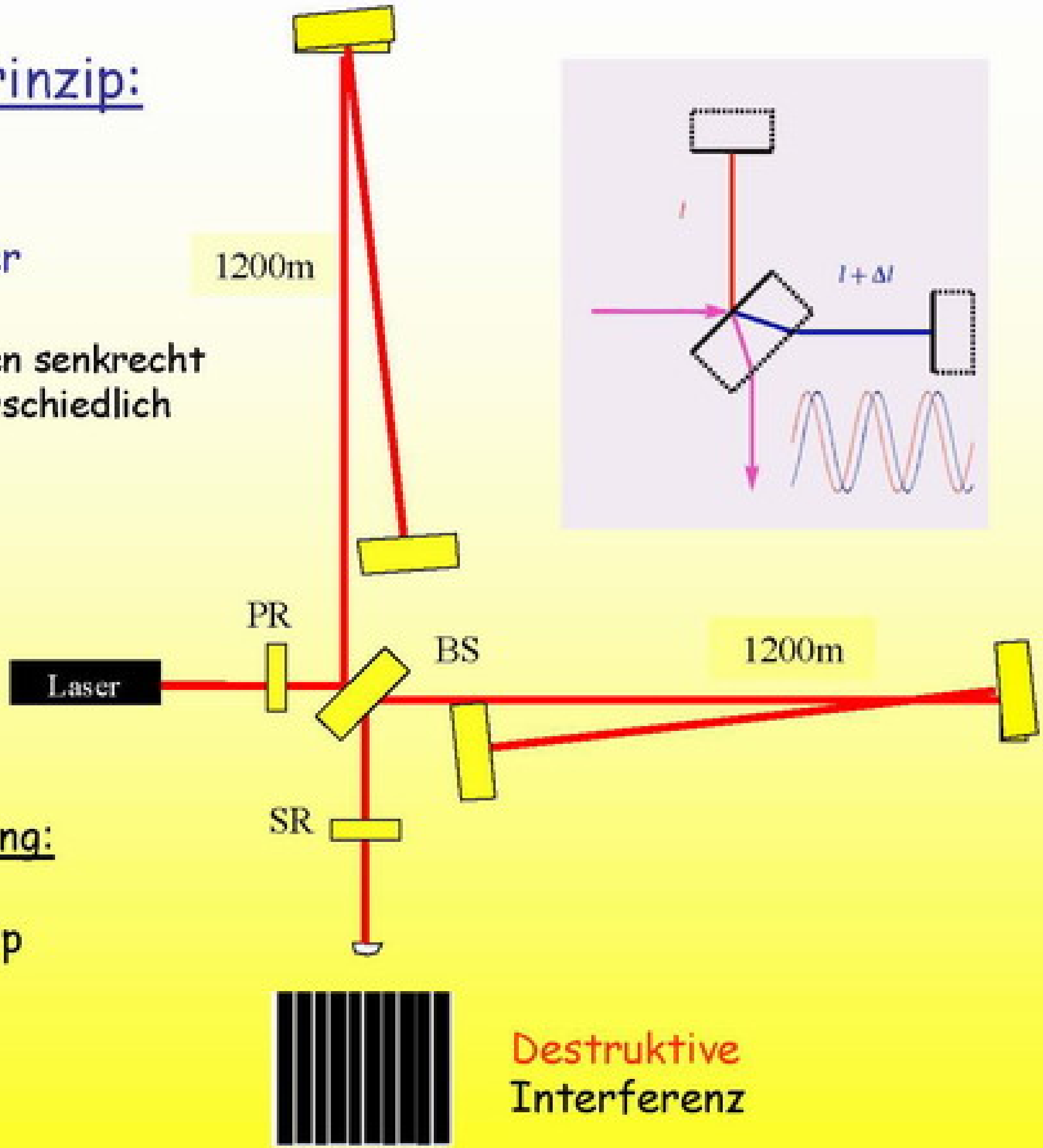
- Notwendig zur Verifizierung des Signals durch Koinzidenzmessungen!
- Erforderlich für Richtungsempfindlichkeit und „Ortsauflösung" (Triangulation)


GEO 600
Beteiligte Institutionen:
MPI für Gravitationsphysik, Golm und Hannover
MPI für Quantenoptik, Garching
Universität Hannover
University of Glasgow
Cardiff University
600m
600m

• Optisches Grundprinzip:

Michelson-Interferometer

Direkter Vergleich der beiden senkrecht aufeinander stehenden unterschiedlich veränderten Strecken



• Empfindlichkeitssteigerung:

- Delay-Line-4 Prinzip
- Power-Recycling
- Signal-Recycling

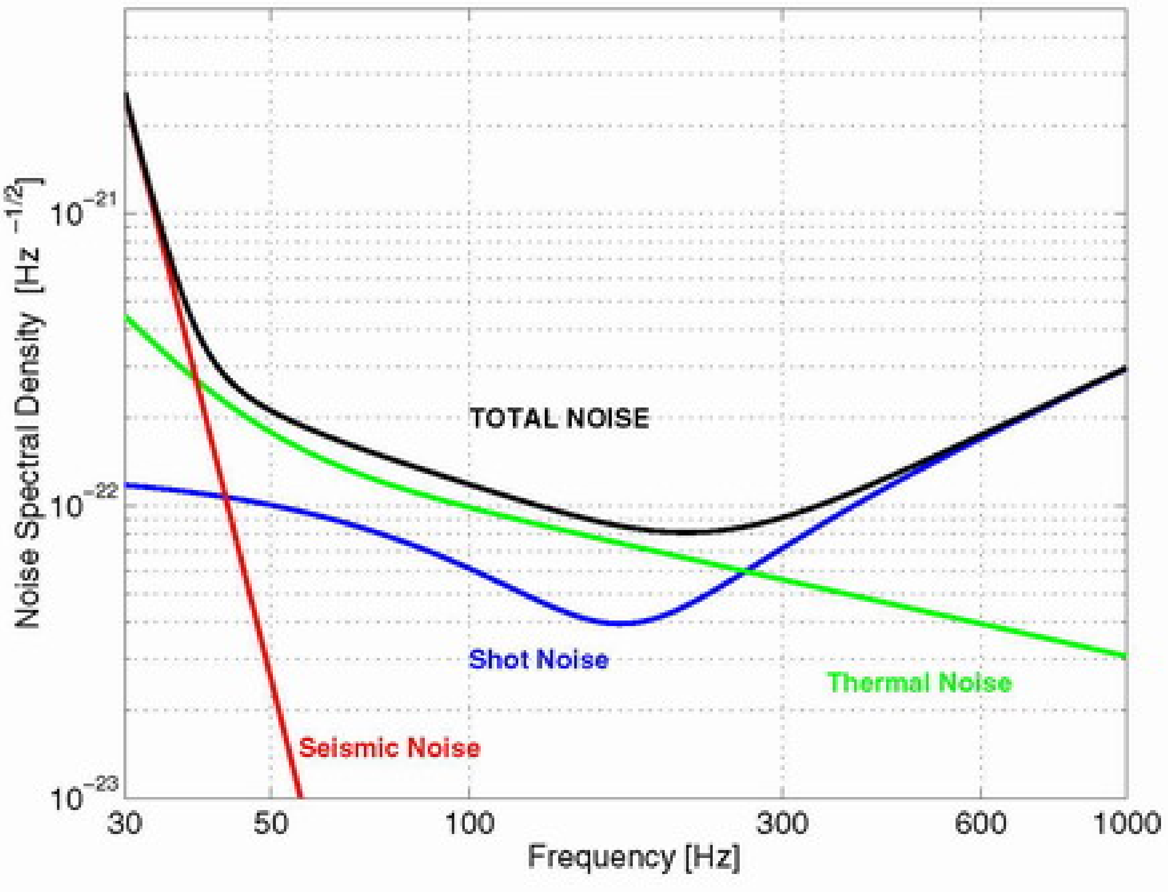
• Störquellen:

= Rauschen = alles, was ein GW-Signal vortäuscht, z.B.

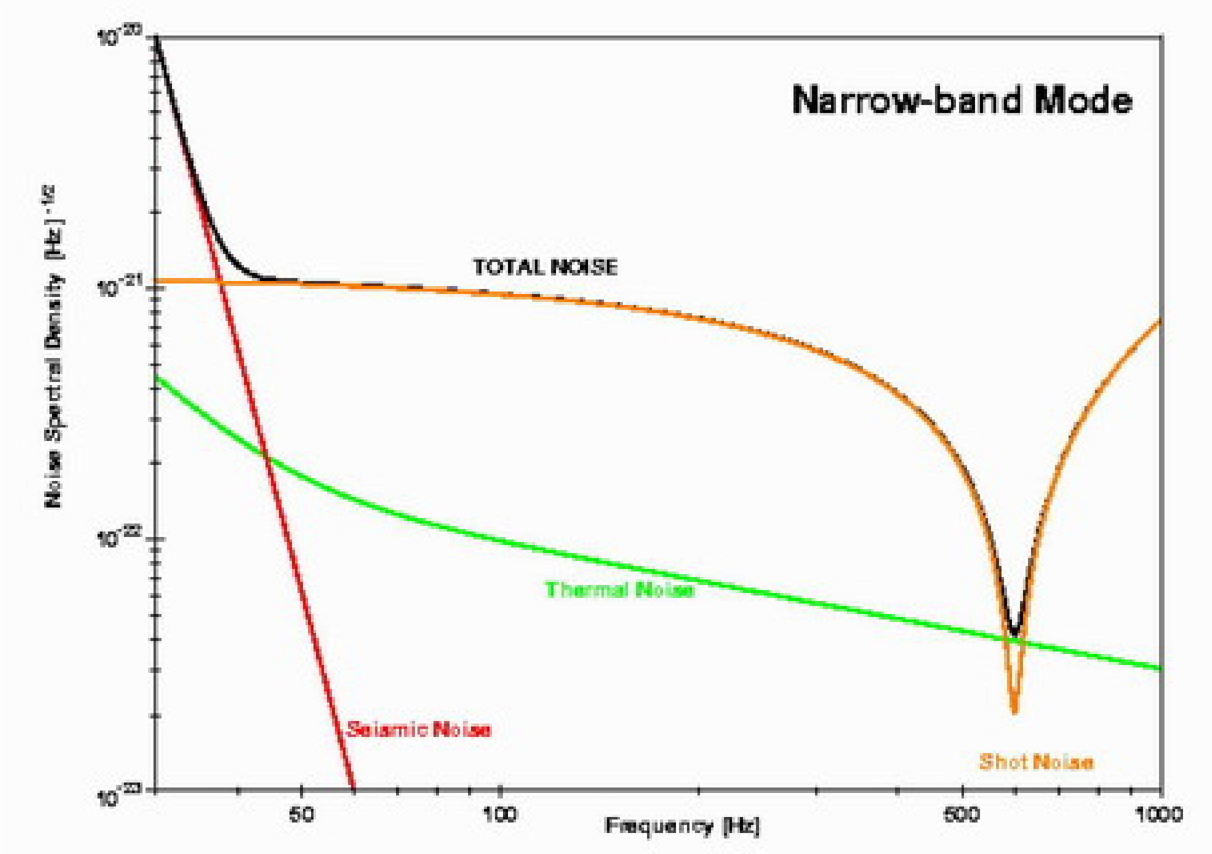
- Seismik, Fahrzeuge, Wolken, Nordseewellen, ...
- Luftbewegung (Akustik, Lichtstreuung)
- Wärmebewegung der Materialien
- Strahlungsdruck des Lichts auf die Spiegel
- Schrotrauschen

Gegenmaßnahmen: Rauschen unterdrücken !
oder in einen Frequenzbereich verschieben, wo es nicht stört

- Breitbandempfindlichkeit von GEO 600



• Empfindlichkeit von GEO 600

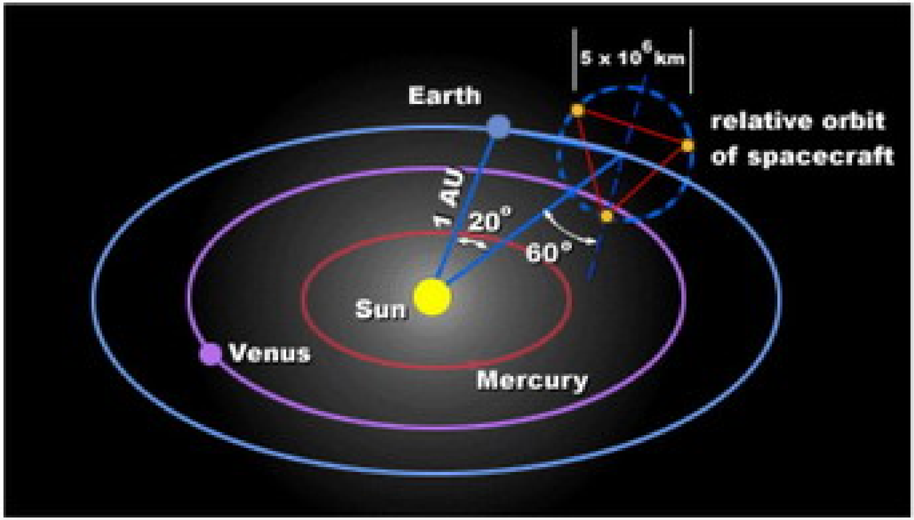


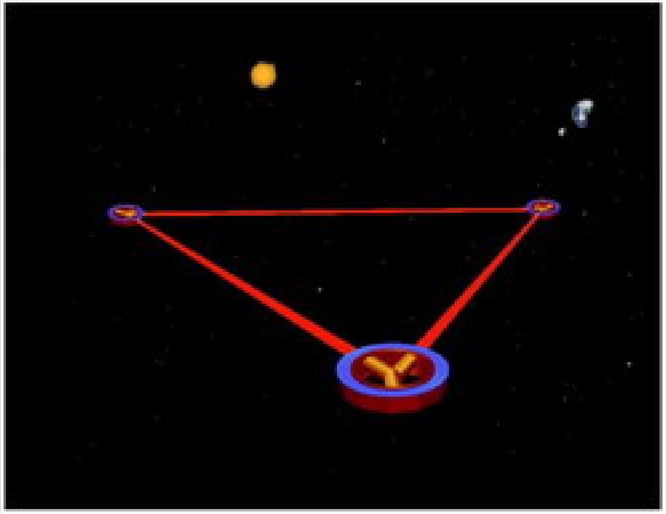
Frequenzbereich ~ 50 Hz – 1 kHz

„Laser Interferometer Space Antenna“

LISA

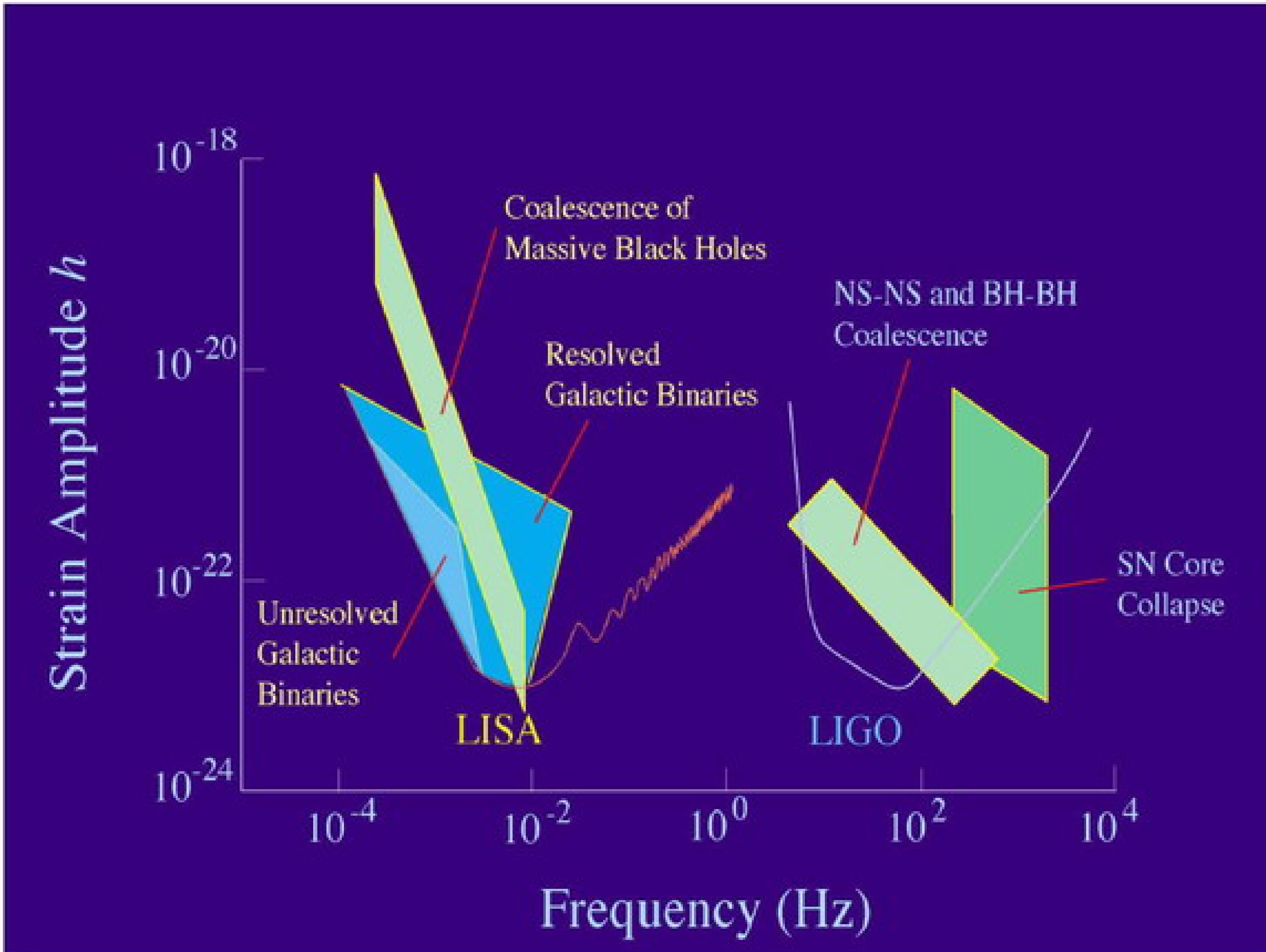
Ein Laserinterferometer im All
mit 5 Mio km Armlänge



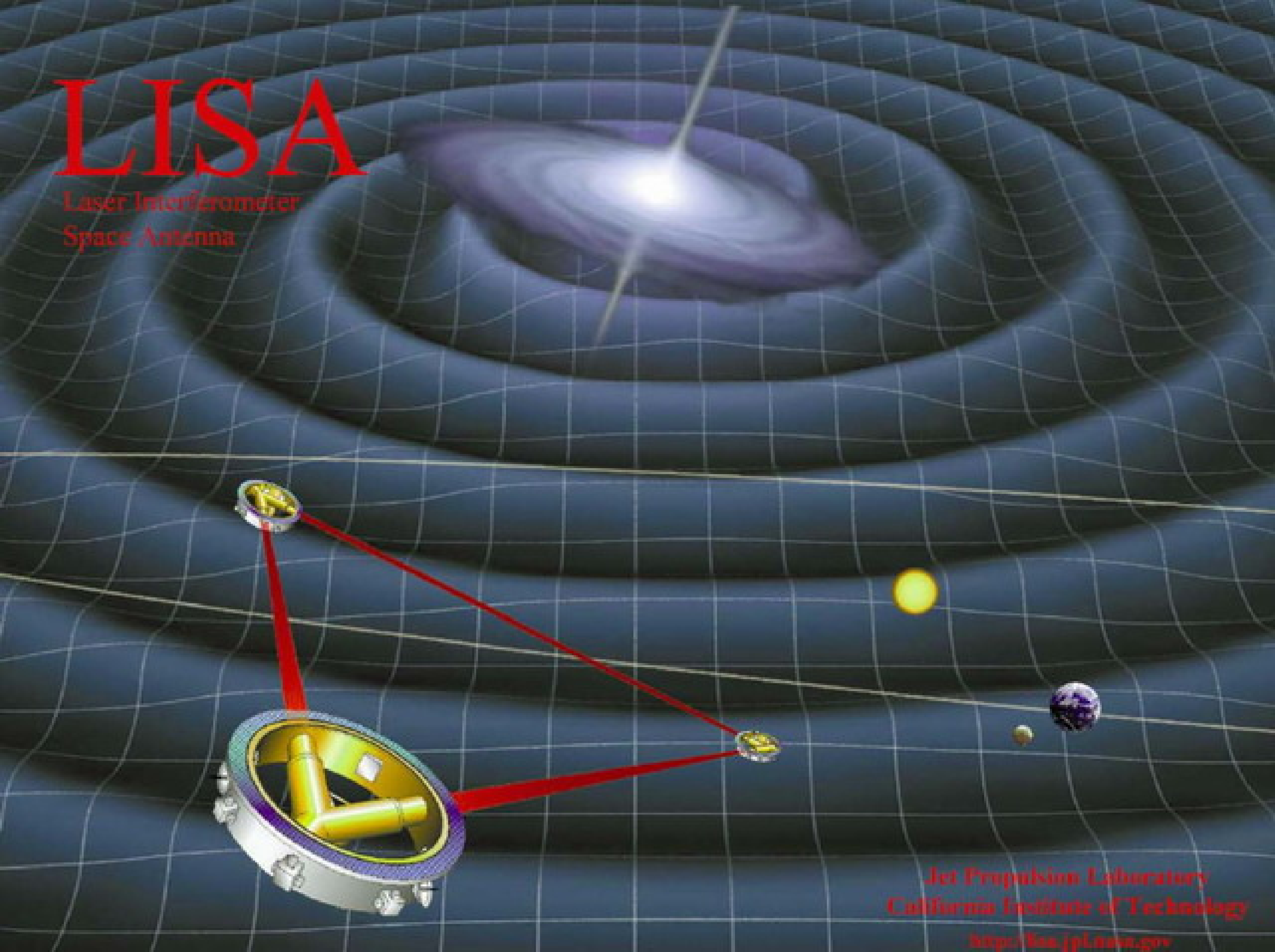


Drei Satelliten in heliozentrischer
Umlaufbahn 20° hinter der Erde

Vorgesehener Start: 2011



Strain Amplitude h
10^-18
10^-20
10^-22
10^-24
Coalescence of
Massive Black Holes
Resolved
Galactic Binaries
Unresolved
Galactic
Binaries
NS-NS and BH-BH
Coalescence
SN Core
Collapse
LISA
LIGO
10^-4
10^-2
10^0
10^2
10^4
Frequency (Hz)


LISA
Laser Interferometer
Space Antenna
Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology
http://lisa.jpl.nasa.gov