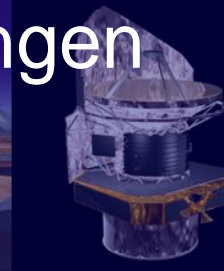
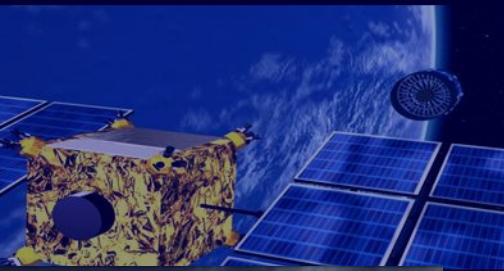


Multifrequenz-Beobachtungen in der Astronomie Wintersemester 2007/8



Themen & Daten

- 19.10.: Überblick
- 02.11.: Erste Ergebnisse der Durchmusterungen
- 16.11.: Hochenergie-Astronomie
- 30.11.: Update: Neue Teleskope
- 14.12.: Dunkles (Materie & Energie)
-

2008

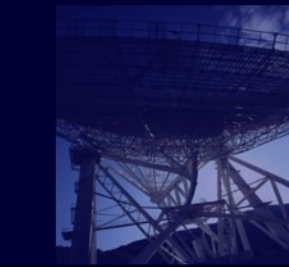
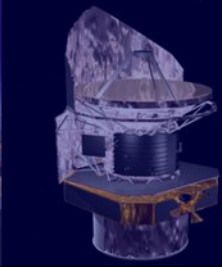
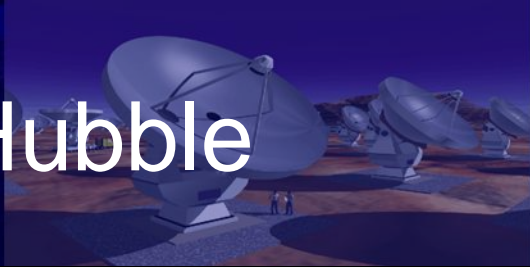
- 11.01: Fortsetzung: Dunkles (Materie & Energie)
- **25.01.: Gravitationswellen & mehr**
- 08.02.: GPS & die Erde

Das Geheimnis der

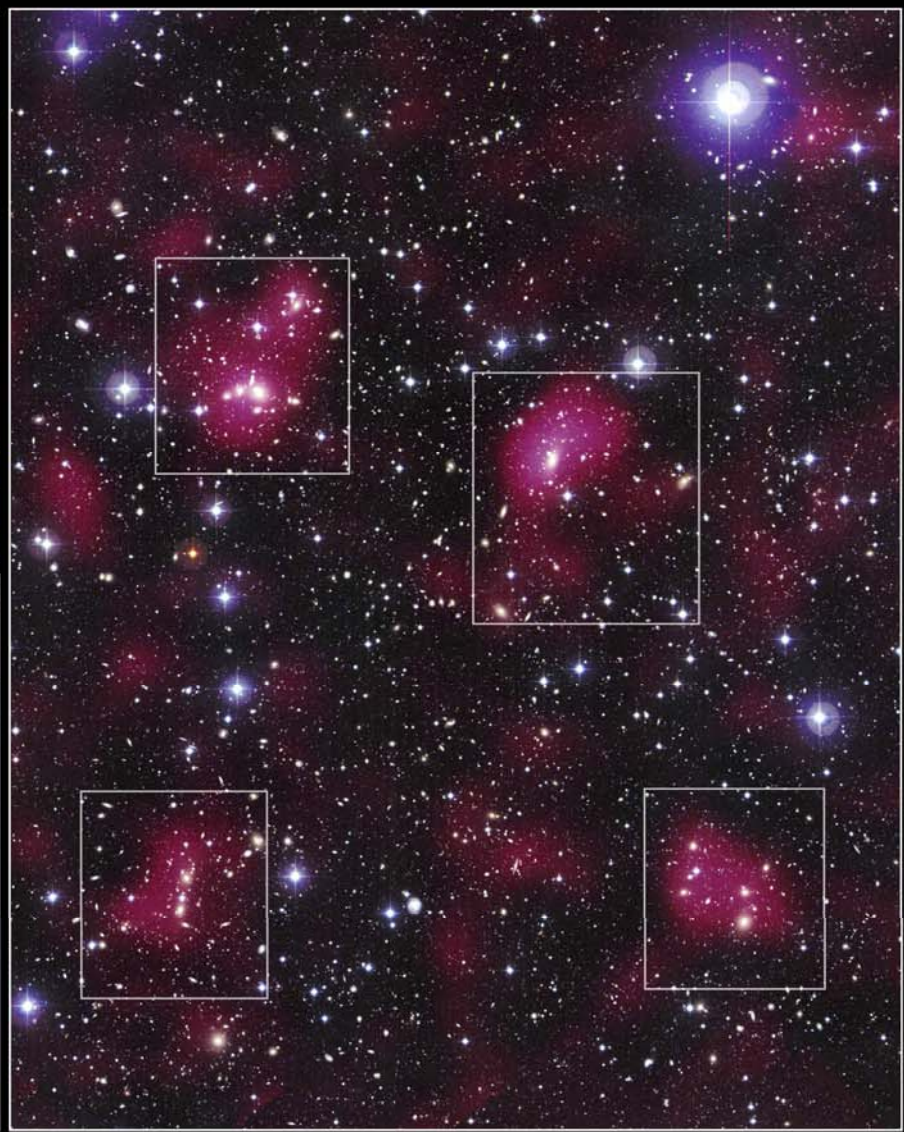
Dunklen Materie

Woraus besteht das Universum?

Neue Ergebnisse: Hubble



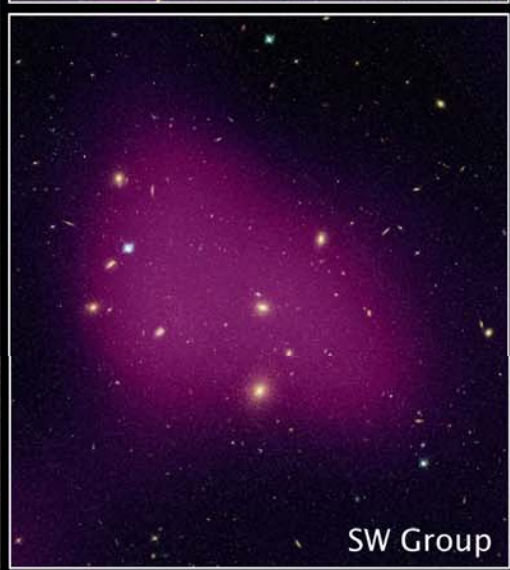
Abell 901a



Abell 901b



Abell 902



SW Group

Neue Ergebnisse: Hubble



- Space Telescope Abell 901/902 Galaxy Evolution Survey (STAGES)
- Die Verteilung Dunkler Materie im Superhaufen Abell 901/902, einige 100 Galaxien
- 2.2 m La Silla, Chile
- Dunkle Materie-Karte aus Hubble-Beobachtungen (weak Lensing), 80 Hubble Aufnahmen 60 000 entfernter Galaxien und Störungen untersucht
- Verhalten der Galaxien in verschiedenen Bereichen des Superhaufens können untersucht werden
- Es passiert mehr außen, wo sich die Galaxien langsam bewegen, innen zu schnell um zu kollidieren und zu verschmelzen

The background of the image is a vibrant cosmic scene. It features a dense field of purple and magenta nebulae, with intricate, swirling patterns of gas and dust. Interspersed among these nebulae are numerous star clusters and individual stars, some appearing as bright white or yellow points, while others are smaller and dimmer. The overall color palette is dominated by deep purples, magentas, and blues, creating a rich, ethereal atmosphere. The text is overlaid on this background, centered horizontally and vertically.

Das Geheimnis der
Dunklen Energie

Dunkle Energie ohne Dunkle Energie



- Auf Skalen kleiner als 150-300 Mpc ist unser Universum nicht homogen
- Dagegen: Schwamm-artige Struktur mit großen Leerräumen (Voids), umgeben von Blasenwänden und Filamenten, in denen sich die Galaxienhaufen befinden
- 40-50% der jetzigen Volumens des Universums befindet sich in Voids
- Weiterhin: minivoids und große supervoids: void-dominiertes Universum
- Homogenität ist dann nicht gerechtfertigt, war nur in den Frühphasen gegeben -> andere (richtige) Rechnungen notwendig
- Homogenität gibt es heute nur in einer „gemittelten“ Form
- Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker Lösung erfordert aber eine isotrope homogene Geometrie in allen Epochen der kosmischen Evolution -> zu Zeiten des Mikrowellenhintergrundes war dies gegeben
- Mittelung der vollen nicht-linearen Einstein-Gleichungen notwendig

Dunkle Energie ohne Dunkle Energie



- Fraktales Blasen-Modell
- Ändert den Verlauf der Zeit
- Kann die meisten der gemachten Beobachtungen erklären (z.Bsp. Supernovae, CMB, Kugelsternhaufen, Röntgenhaufen Häufigkeit, etc.)
- Universum ist dann 18.6 Milliarden Jahre alt
- Radikal konservatives Modell
- Benutzt nur die Allgemeine Relativitätstheorie



Gravitationswellen

Motivation



Isaac Newton
1643-1727

Motivation



Raum und Zeit bilden den *starren* Hintergrund aller physikalischen Vorgänge

- Newton'sche Gravitation:
„Zwei Massen üben eine anziehende Kraft aufeinander aus.“

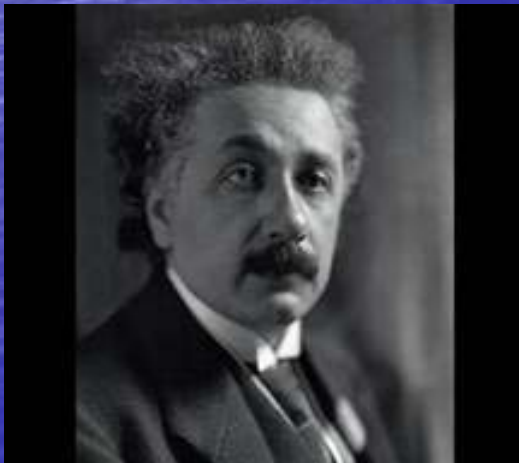
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gravitationsgesetz

Einsteins Verständnis der Gravitation

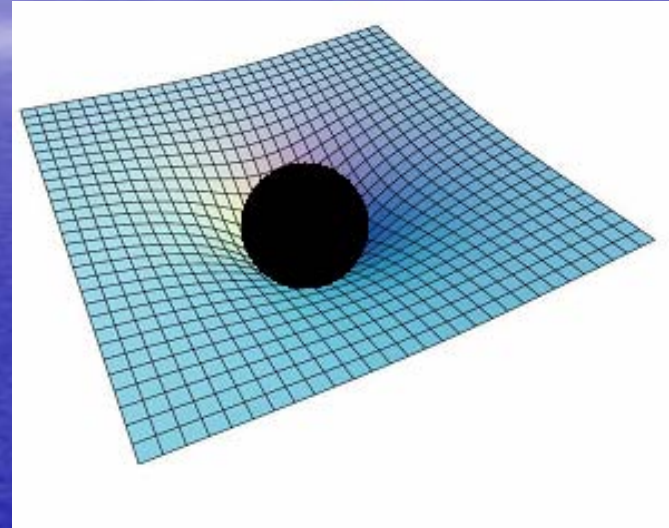
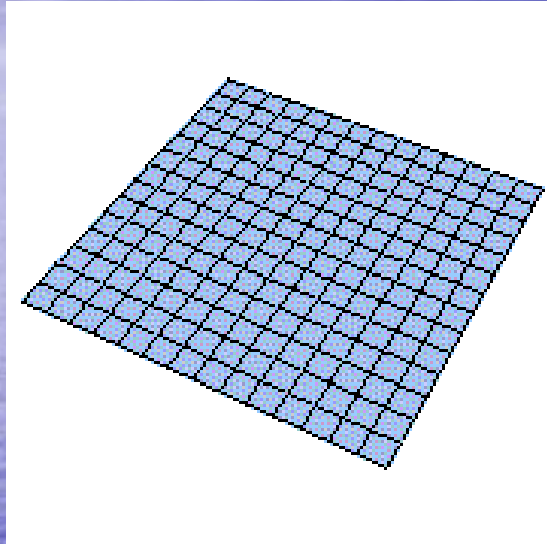
„Die Gravitation ist eine Eigenschaft des Raums“

Raum und Zeit beeinflussen sich gegenseitig und nehmen am Geschehen teil.



Albert Einstein
1879-1955

- Erläuterung im 2-dimensionalen Raum



Eine Masse krümmt den Raum !!!
Die Verteilung der Materie bestimmt die Krümmung
des Raums und die Struktur des Raums bestimmt
die Bewegung der Materie.

- **Gravitationswellen**

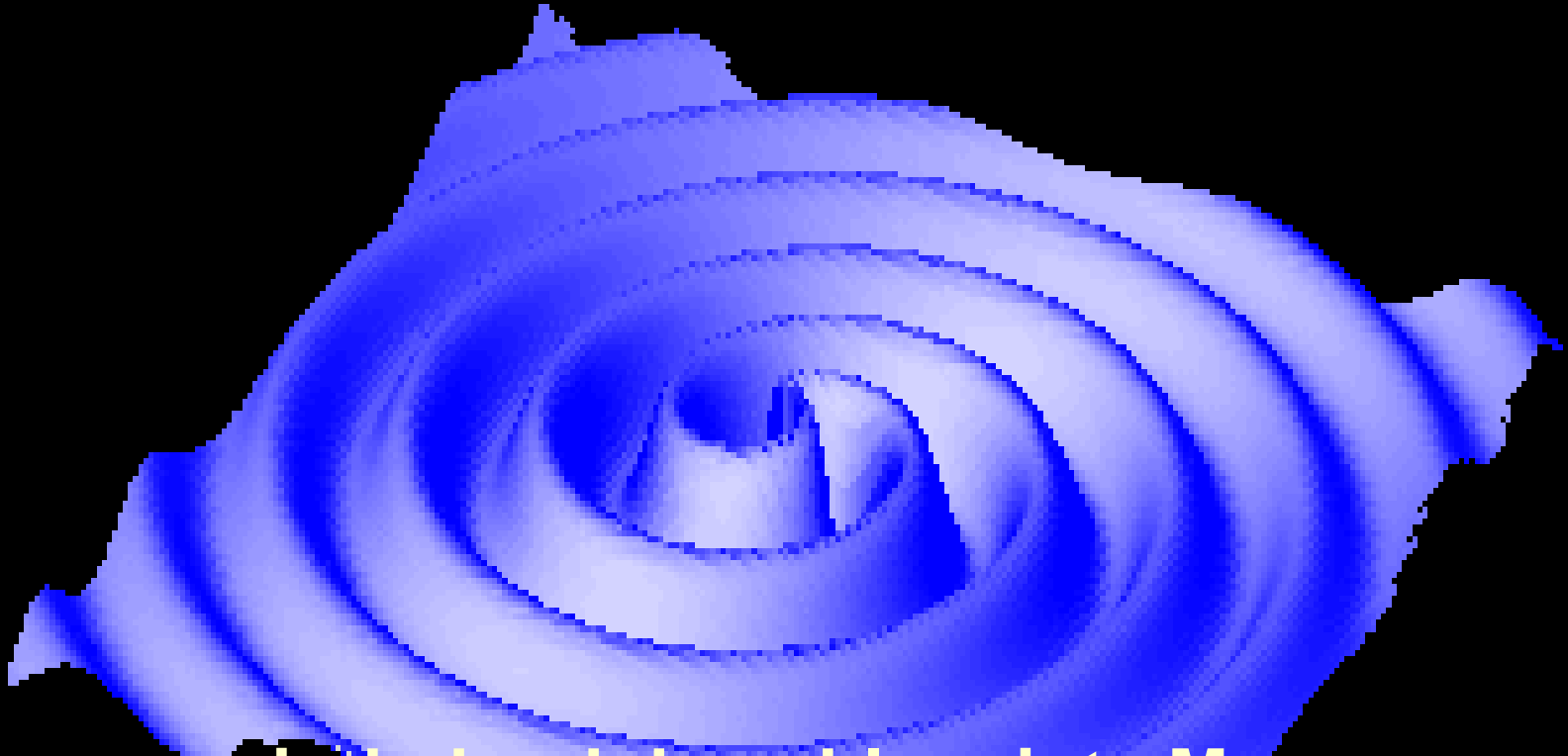
- Wirkung der Gravitation breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit aus

d.h. momentane Störungen in der Raumzeit pflanzen sich im Universum mit Lichtgeschwindigkeit fort

Mögliche Existenz von Gravitationswellen

→ Einstein erkannte, daß der Effekt winzig ist und befürchtete, dass man die Gravitationswellen nie würde nachweisen können

Gravitationswellen...



... sind durch beschleunigte Massen erzeugte Transversalwellen in der Struktur der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Theoretische Grundlagen

- Aus der Beschreibung der Allgemeinen Relativitätstheorie
- Einstein'sche Feldgleichung, beschreibt die Kopplung

Zwischen der Krümmung der Raumzeit und der Massenenergie:

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

$\mathbf{G}_{\mu\nu}$ Einstein'scher Feld -Tensor $\mathbf{T}_{\mu\nu}$ Energie - Impuls - Tensor

$$= R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R^{\mu}_{\mu}$$

$$= n_o m u_{\mu} u_{\nu}$$

Enorme Größe 10^{43}

- Daraus folgen direkt die Einstein'schen Feldgleichungen (EF)

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

$R_{\mu\nu}$ = Ricci-Tensor (Krümmung)

R = Ricci-Skalar (= Sp $R_{\mu\nu}$)

Λ = kosmologische Konstante (= 0)

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

$g_{\mu\nu}$ = metrischer Tensor (Metrik)

EF sind Feldgleichungen zur Bestimmung des metrischen Tensors

10 unabhängige Gleichungen für 10 unabhängige Funktionen
des metrischen Tensors

Beispiel für eine Metrik: Schwarzschildmetrik

- Eine Metrik bestimmt die Geometrie der Raumzeit, anhand der „Abstandsmessung“ ds^2
- Beschreibt das Gravitationsfeld außerhalb einer sphärisch symmetrischen Masse
- ausgenutzt wird dabei die Isotropie des Problems d.h. Quelle im Zentrum des Koordinatensystems
- in dieser Notation wird die Schwarzschildmetrik zu:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\Theta^2 + \sin^2 \Theta d\varphi^2)$$

Gravitationswellen

Ansatz: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ mit $|h_{\mu\nu}| \ll |\eta_{\mu\nu}|$

Für kleine Störungen $h_{\mu\nu}$ („Störungstheorie“)

Entwickeln und betrachten nur lineare Terme

Damit ergibt sich die lineare Wellengleichung:

$$O^1(h) \rightarrow \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] h_{\mu\nu} = -2\kappa T_{\mu\nu}^*$$

Lösungen im Vakuum (für $\mathbf{T}_{\mu\nu} = 0$) ebene Wellen

$$h_{\mu\nu}(r, t) = h_{\mu\nu}^0 e_{\mu\nu} \sin(k \cdot r - \omega t + \varphi_{\mu\nu})$$

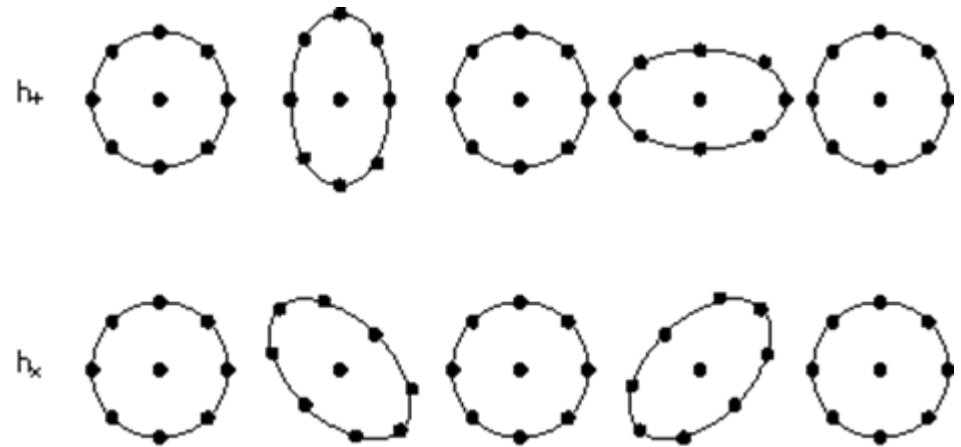
-In der sogenannten TT-Eichung (transverse, traceless) sieht der metrische Tensor für eine Welle in z-Richtung wie folgt aus:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- damit ändert sich die Metrik, d.h. die Struktur der Raumzeit, periodisch mit:

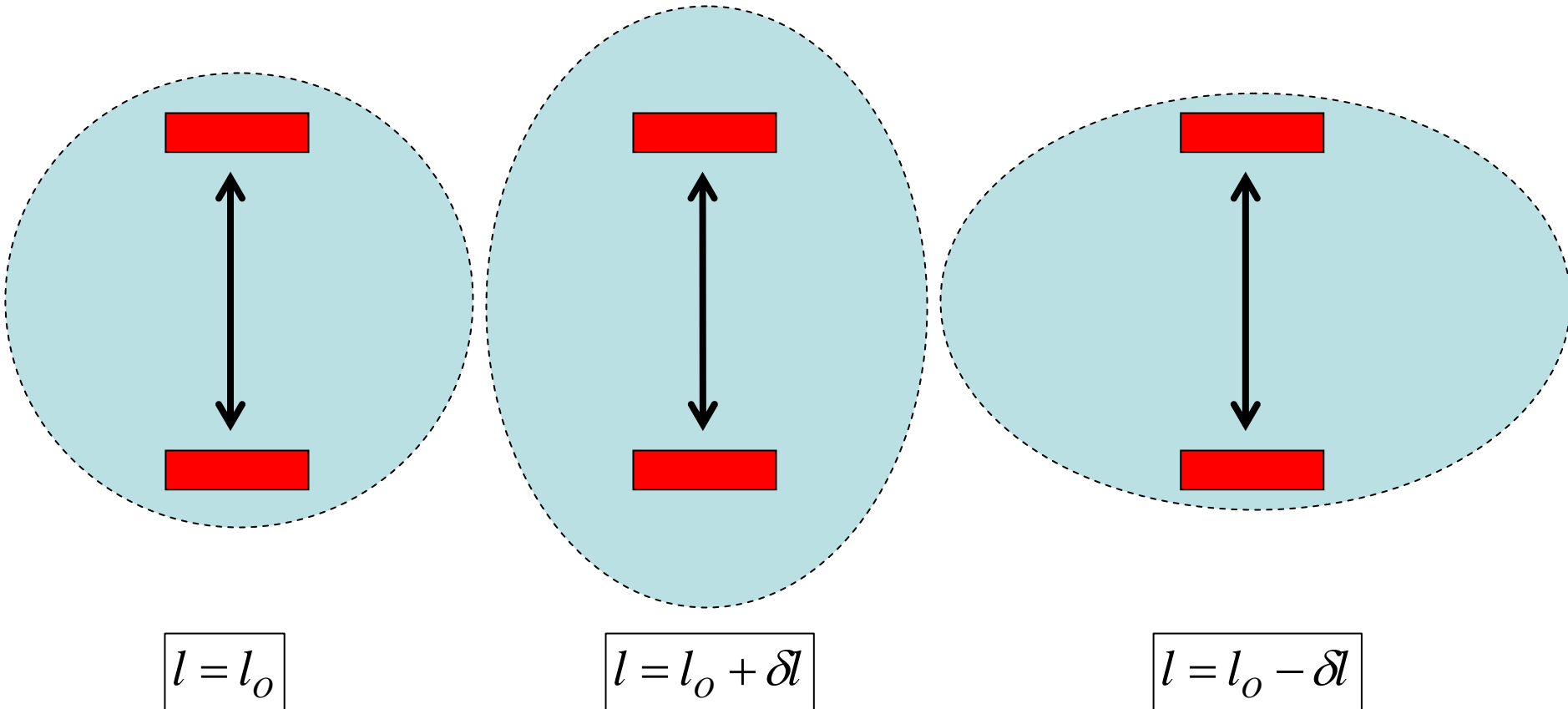
$$h_+ = A_+ e^{-i\omega(t-z/c)}$$

$$h_\times = A_\times e^{-i\omega(t-z/c)}$$



Phase 0 $\pi/2$ π $3\pi/2$ 2π

- Für eine Abstandmessung bedeutet das:



- der Abstand entspricht demnach:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + (1 + h_+) dx^2 + (1 - h_+) dy^2 + dz^2$$

-damit ändert sich die Metrik, d.h. die Struktur der Raumzeit, periodisch
-d.h. eine Gravitationswelle erzeugt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung periodische Dehnungen und Stauchungen in in der Struktur der Raumzeit und verändert so die Abstände zwischen den darin enthaltenen Objekten

-Amplitude der Gravitationswellen hängt von der zeitlichen Änderung des Quadrupolmoments der Quelle ab (die Abweichung des Systems von der Kugelsymmetrie)

-massereiche Systeme mit großen Quadrupolmomenten sind nötig, um nennenswerte Amplituden zu erzeugen

-völlig aussichtslos, im Labor erzeugte Gravitationswellen nachweisen zu wollen – die beteiligten Massen sind viel zu klein

-nur astrophysikalische Prozesse kommen in Frage

-selbst im günstigsten Fall einer stark asymmetrischen Sternexplosion in Unserer Milchstraße verändert die Gravitationswelle den Abstand zwischen Erde und Sonne (150 Mio km) nur um den Durchmesser eines Wasserstoffatoms

Abschätzung zur Stärke von Gravitationswellen (Amplitude)

Szenario: Supernovae in der Umgebung der Milchstraße

$$M = 1.4 M_{\odot}, d = 500 \text{ kpc}, f \sim 1 \text{ kHz},$$

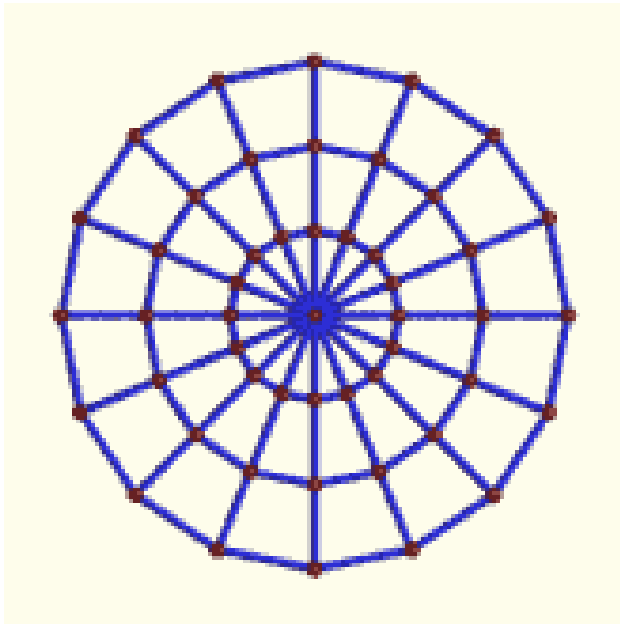
$$E_{\text{SN}} \sim 3 \cdot 10^{46} \text{ J}, E_{\text{GW}} \sim 10^{44} \text{ J}$$

Erwartete Längenänderung:

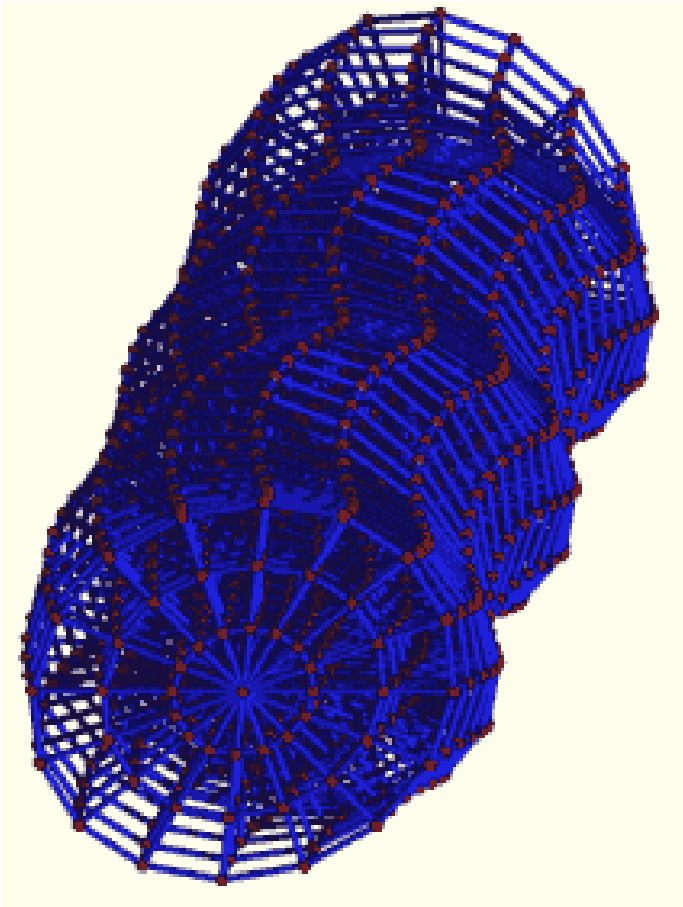
$$h \sim 10^{-18}$$

Der Abstand Erde-Sonne ändert sich um den Durchmesser eines H-Atoms

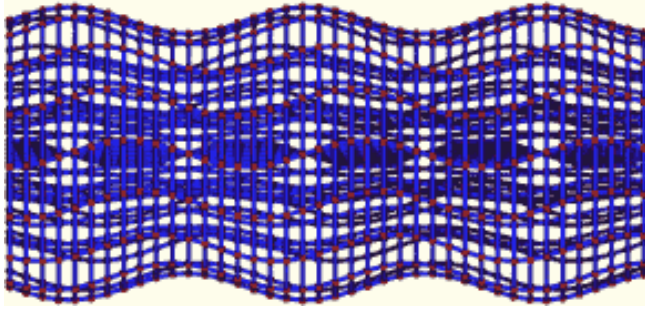
Eine 1km lange Messstrecke um den Durchmesser eines Protons



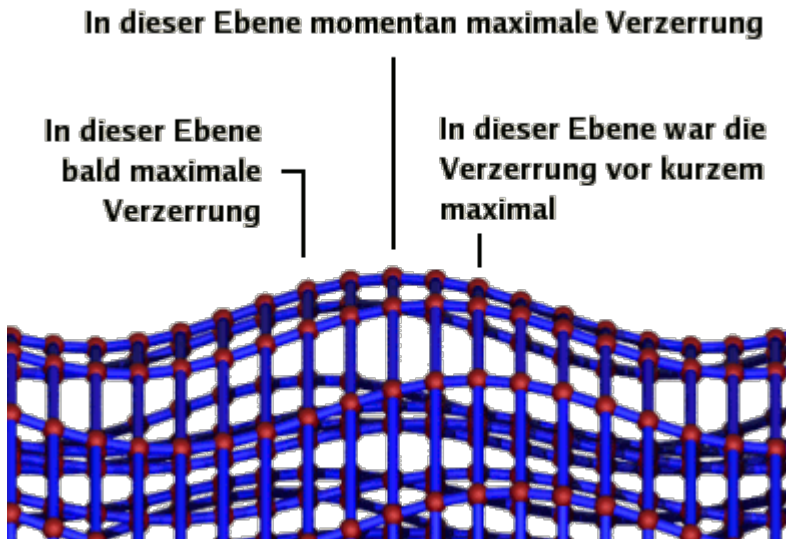
- Rote Kugeln: freie Teilchen
- Blaue Linien: keine Verbindung, dienen nur der Anschauung
- Einfluß der Gravitationswelle zeigt sich darin, wie sich die Abstände zwischen den Teilchen mit der Zeit verändern
- In der Hälfte der Zeit dehnt die Gravitationswelle alle senkrechten Abstände zwischen den Teilchen, während gleichzeitig alle horizontalen Abstände gestaucht werden und andersherum
- Gravitationswelle breitet sich senkrecht zur Bildebene aus und läuft auf den Betrachter zu oder von ihm weg



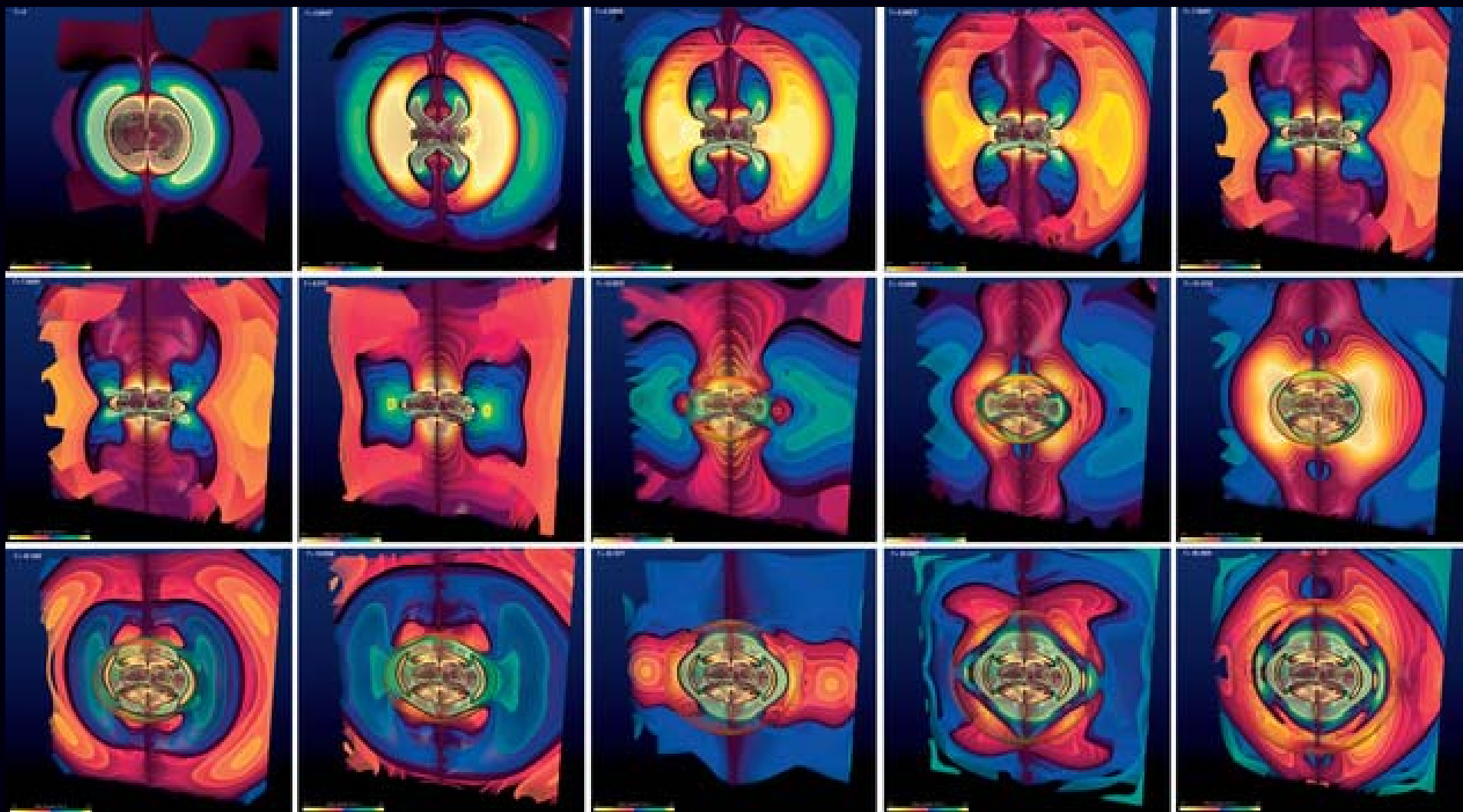
- Eine Welle entspricht einem Schwingungsmuster, was sich durch den Raum ausbreitet
- Die anderen Ebenen dazunehmen
- Die Abstände zwischen Testteilchen auf einer dieser anderen Ebenen verzerren sich genau so wie bei einer Ebene allein, mit einem einzigen Unterschied: einer Zeitverschiebung
- Erst die Zeitverzögerung zwischen den Ebenen führt dazu, dass wir wirklich eine Welle erhalten – ein sich durch den Raum ausbreitendes Schwingungsmuster
- Ausbeulungen und Dellen wandern auf den Betrachter zu

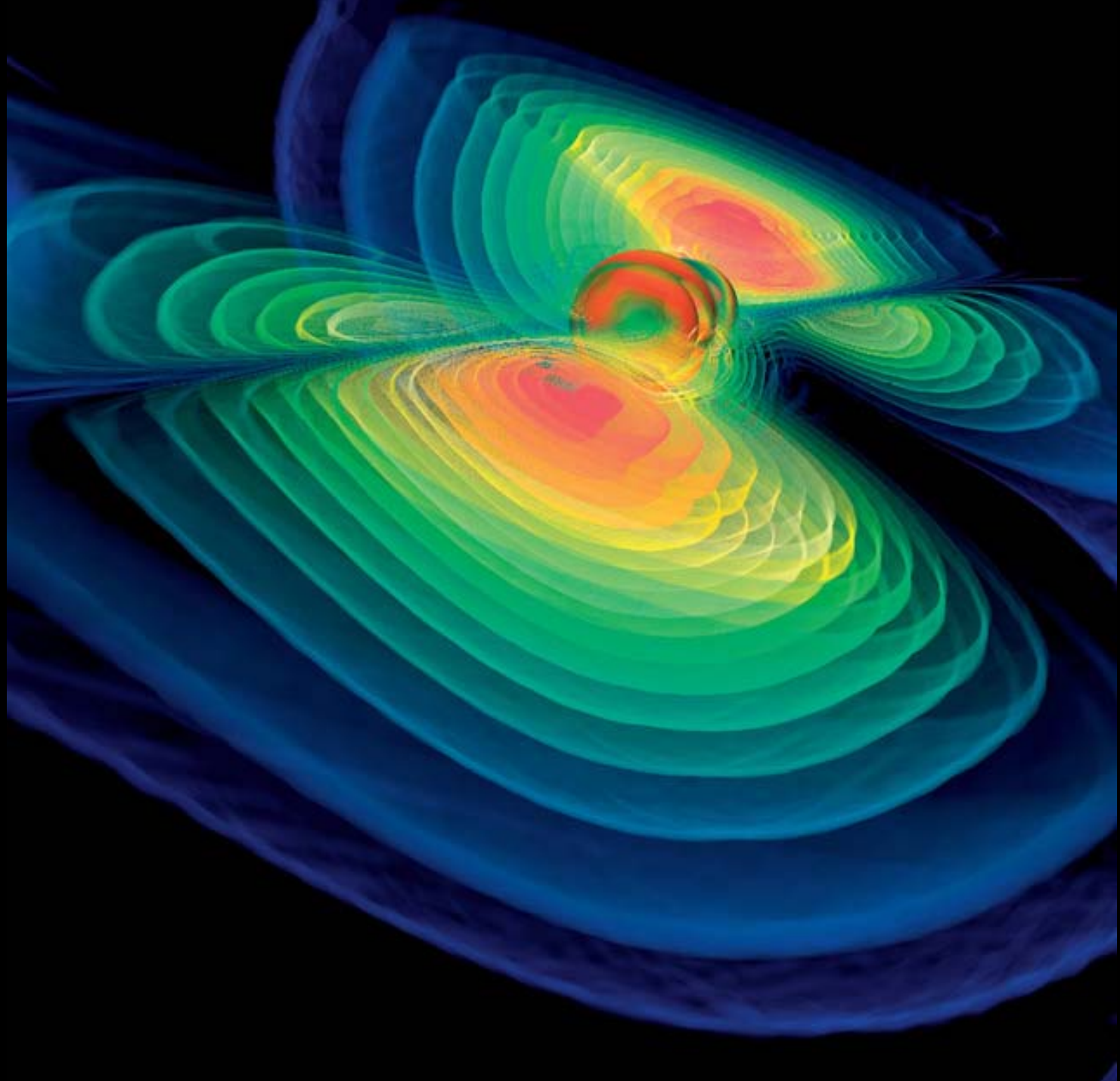


- Von der Seite betrachtet: Verzerrungsmuster mit Minima und Maxima, welches sich mit konstanter Geschwindigkeit durch den Raum bewegt, ähnlich wie die Wellenberge und Wellentäler einer Wasserwelle
- In Richtung der Wellenausbreitung – in waagerechter Richtung – bleiben die Abstände zwischen den Teilchen unverändert (transversale Welle)



- Zeitverzögerung zwischen den einzelnen Ebenen





Mögliche Quellen im Universum

Zur Abschätzung des Effekts:

In der Multipolentwicklung ist der erste von null verschiedene Term der Quadrupolterm

Daraus lässt sich der Energiefluß einer ebenen Gravitationswelle abschätzen:

Labor: Rotierende Hantel	10^{-26} W
Erde um Sonne	200 W
Jupiter um Sonne	5300 W
Doppelsternsystem	10^{15} ... 10^{30} W
Neutronensternsystem	10^{45} W

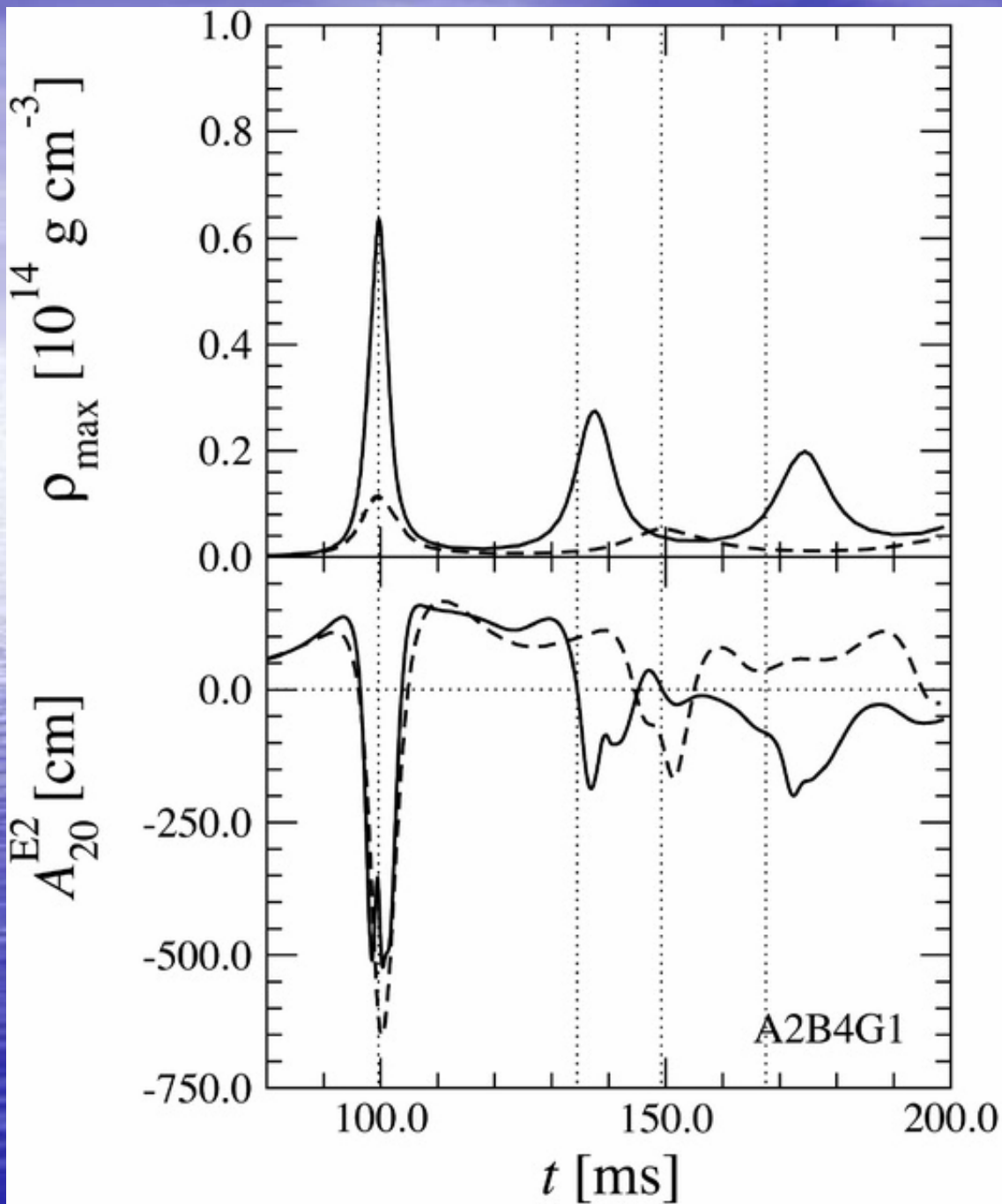
→ Es kommen nur kompakte kosmische Objekte als Quellen detektierbarer Gravitationswellen in Frage, bei denen große Beschleunigungen auftreten (wo zwei Himmelskörper einander umkreisen oder Materie bei einer gewaltigen Explosion in den Weltraum geschleudert wird)

z.B. Supernovae,



Krebs Nebel:

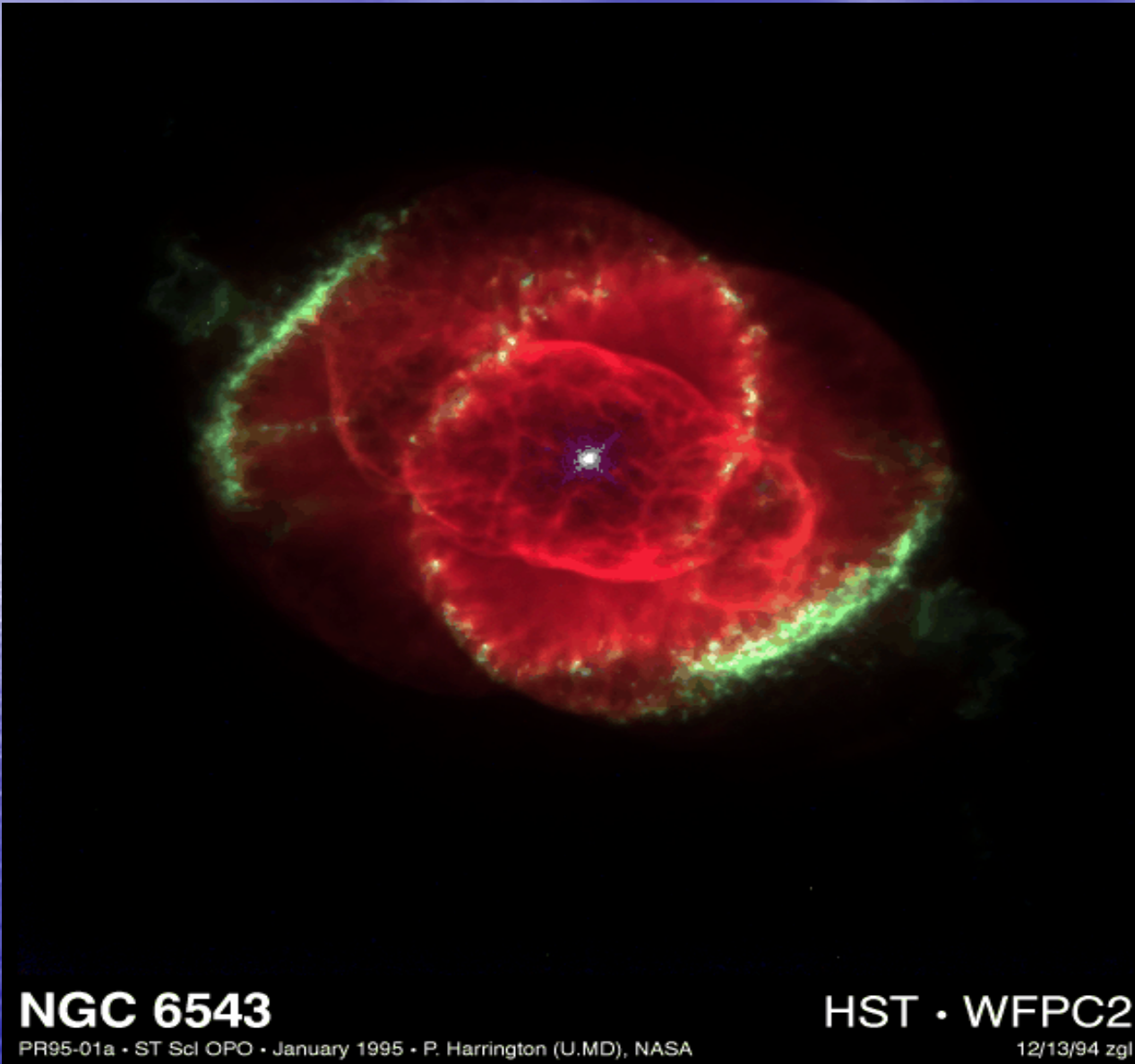
- Distanz 6000 Ly
- Durchmesser 10 Ly
- SN im Jahre 1054
- Im Zentrum befindet sich ein Pulsar der mit $f = 30$ Hz rotiert



Verlauf von Materiedichte
und Gravitationswellen-
amplitude beim
Gravitationskollaps eines
rotierenden Sterns

gestrichelt:
Newtonsche
Beschreibung der
Bewegung des Sterns,

durchgezogen:
allgemein-relativistische
Beschreibung der
Bewegung des Sterns



- genannt „Katzenauge“
- planet. Nebel
- ca. 3000 Ly entfernt
- $d \approx 3,5 \text{ Ly}$

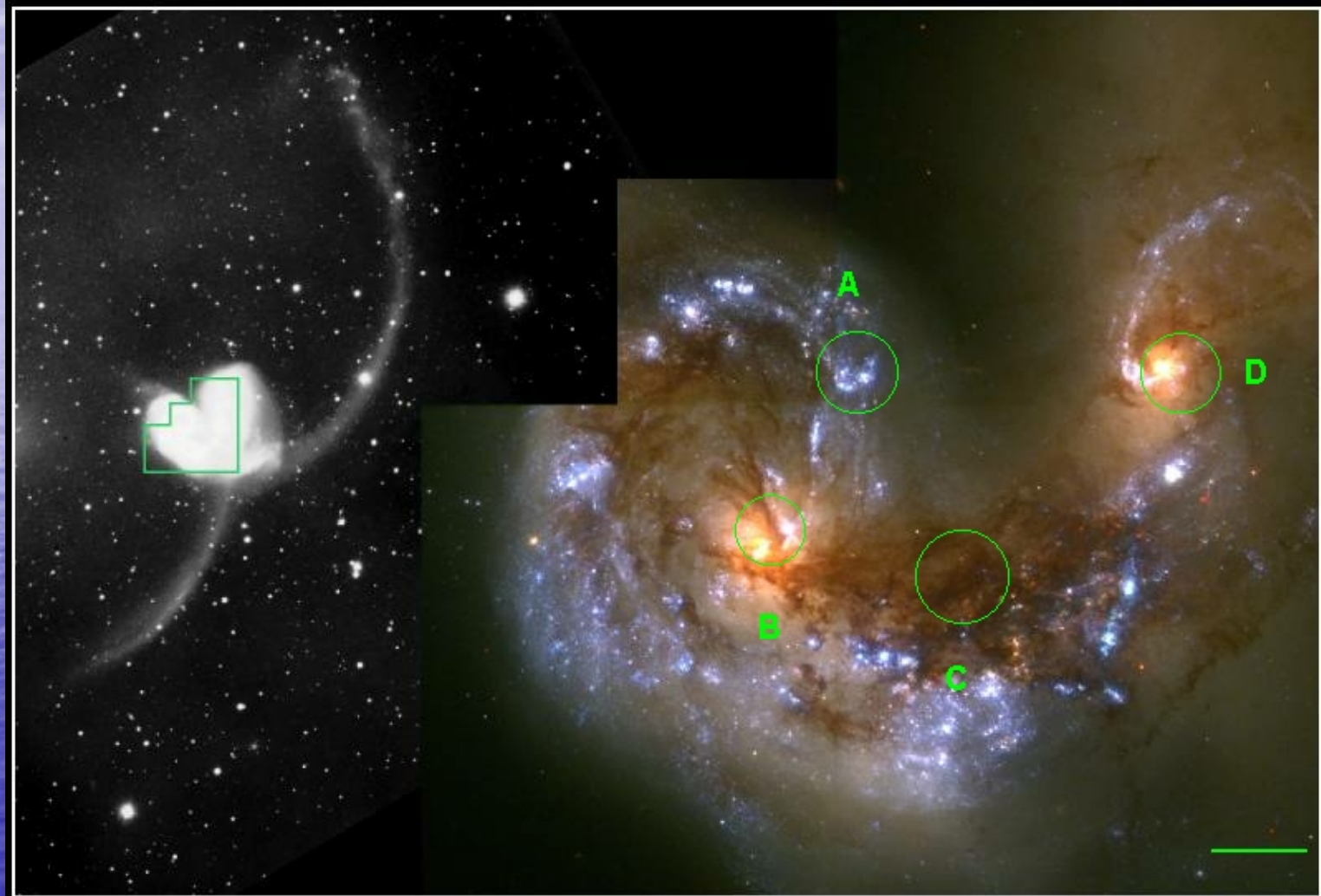
NGC 6543

PR95-01a • ST ScI OPO • January 1995 • P. Harrington (U.MD), NASA

HST • WFPC2

12/13/94 zgl

superschwere kollidierende schwarze Löcher,

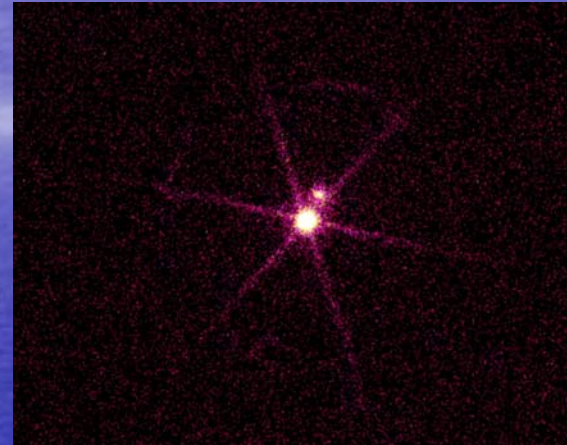


Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039

HST • WFPC2

PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST ScI) and NASA

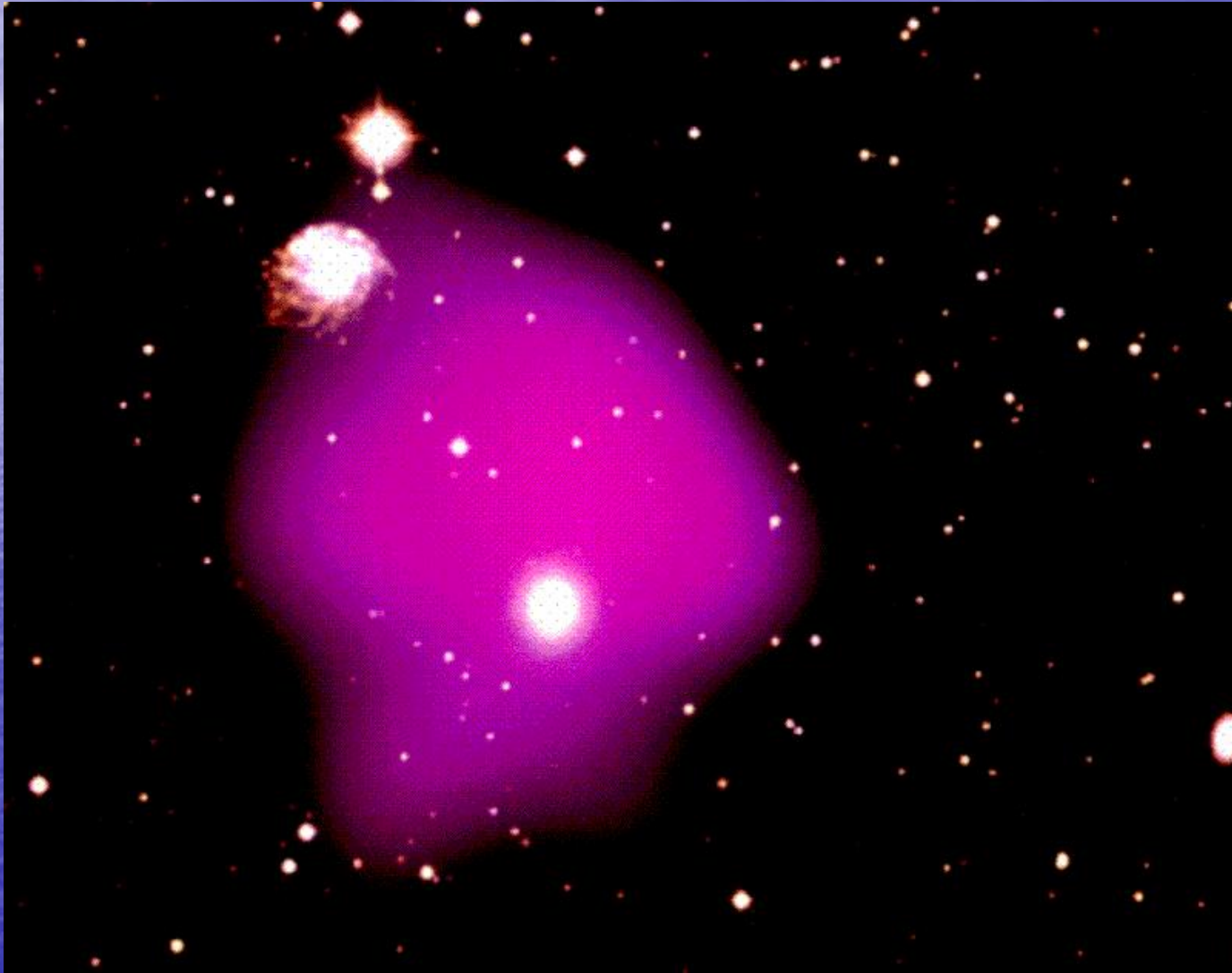
Doppelsternsysteme, akkretierende Neutronensterne,



Sirius B



Dunkle Materie,

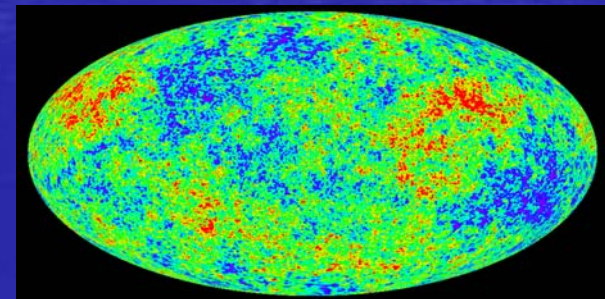


Inflation kurz nach dem Urknall.

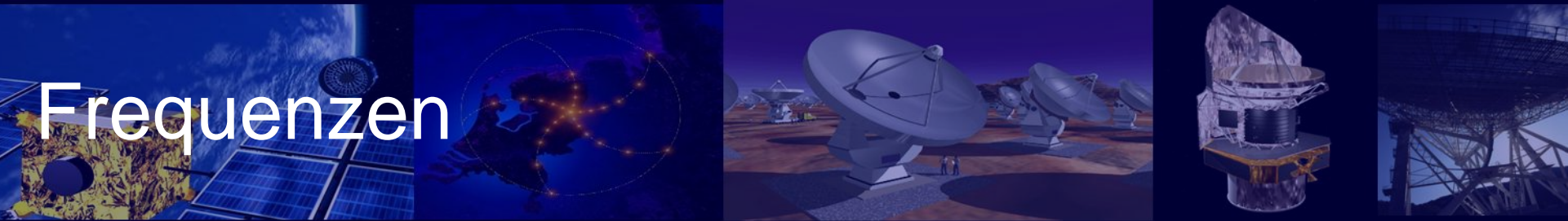
künstl. Darstellung des
frühen Universums



Mikrowellen-Hintergrund stammt aus
Einer Zeit als das Universum 380 000
Jahre alt war, Gravitationswellen
Können ein Bild aus einer Zeit liefern, in der
Das Universum 10^{-24} s jung war

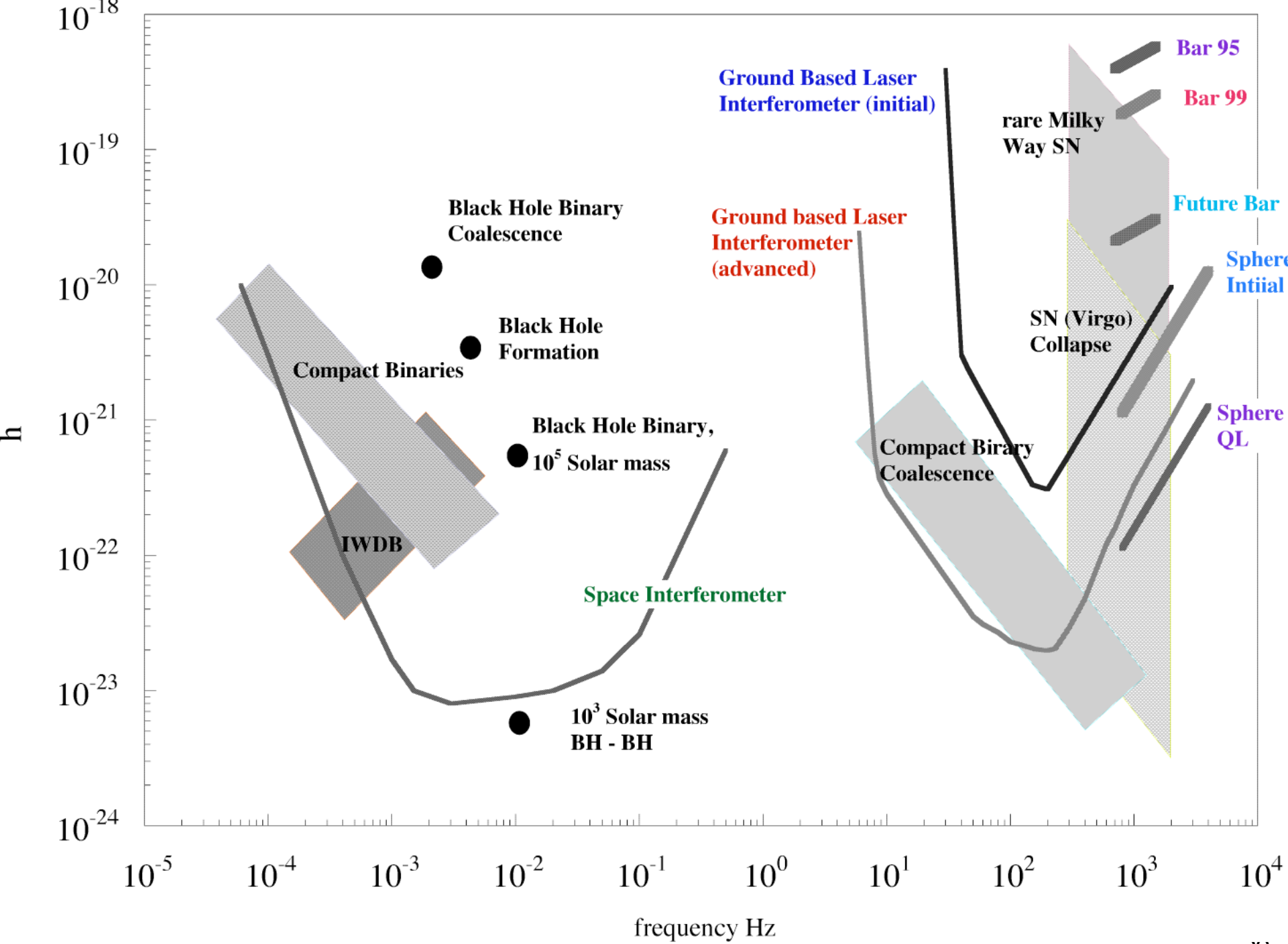


Cosmic Microwave Background



Frequenzen

- Je nach dem zeitlichen Verhalten der Quellen gibt es Gravitationswellen in einem sehr breiten Frequenzbereich
- Frühzeit des Universums: Erzeugung durch kosmische Strings oder topologische Defekte; Spektrum der Strahlung von 10^{-16} – 10^4 Hz (isotroper stochastischer Hintergrund, vergleichbar Radiobereich)
- Quasiperiodische Signale von Binärsystemen aus Schwarzen Löchern aller Größe und aus Weißen Zwergen: 10^{-3} – 1 Hz
- Ähnliche Signale aus Neutronensternen: einige 100 Hz
- Schnell rotierende Pulsare erzeugen periodische Signale: einige 100 Hz – 1.5 Kilohertz
- Supernovae oder verschmelzende Binärsysteme: Kilohertz
- Großteil der Frequenzen liegt im Hörbereich, können verstärkt, auf einen Lautsprecher gegeben und hörbar gemacht werden
- Beobachtungsfenster auf der Erde öffnet sich ab einer Frequenz von ca. 10 Hz; unterschiedliche Stadien (z.Bsp. Komponenten eines Doppelsternsystems, kurz vor dem Kollaps irdisch beobachtbar)





**Gravitationswellen
Nachweis: indirekt**

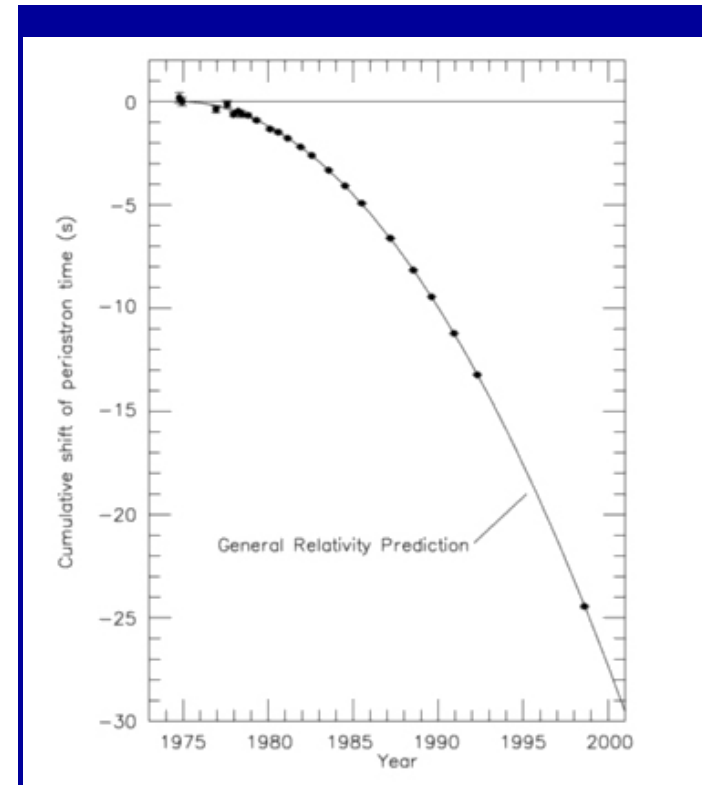
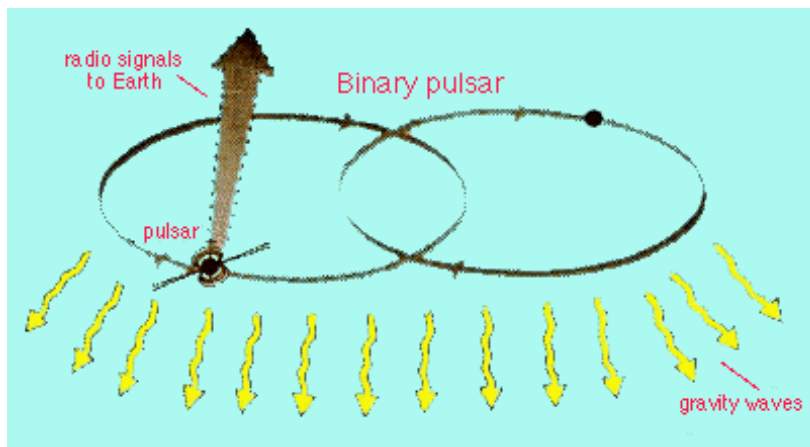


Was wissen wir über Gravitationswellen?

Sie existieren!...



Nobel Preis
in Physik 1993
Hulse & Taylor

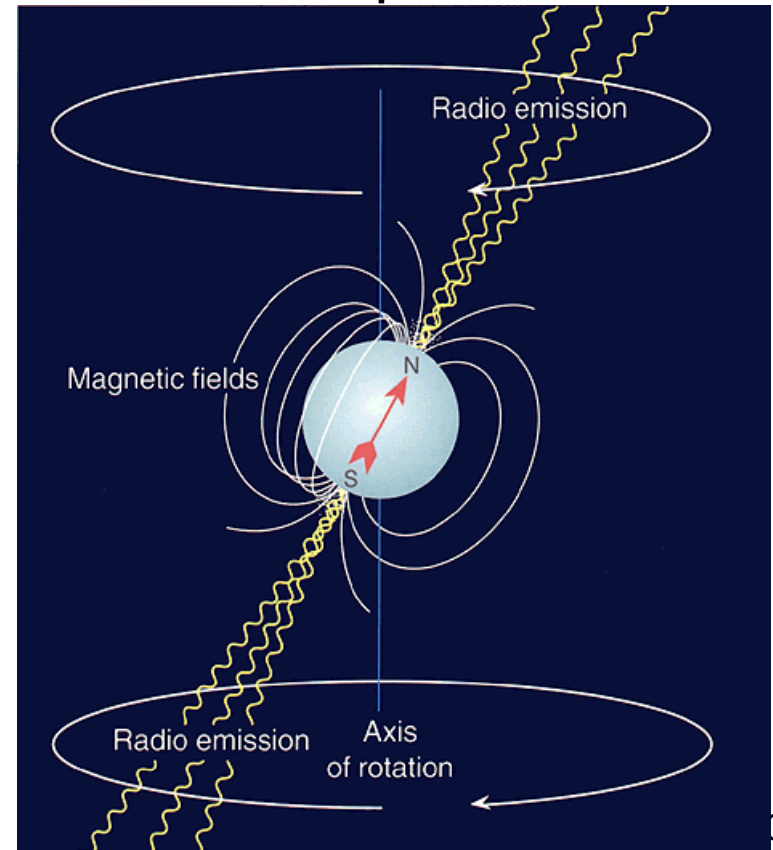


Neutronenstern

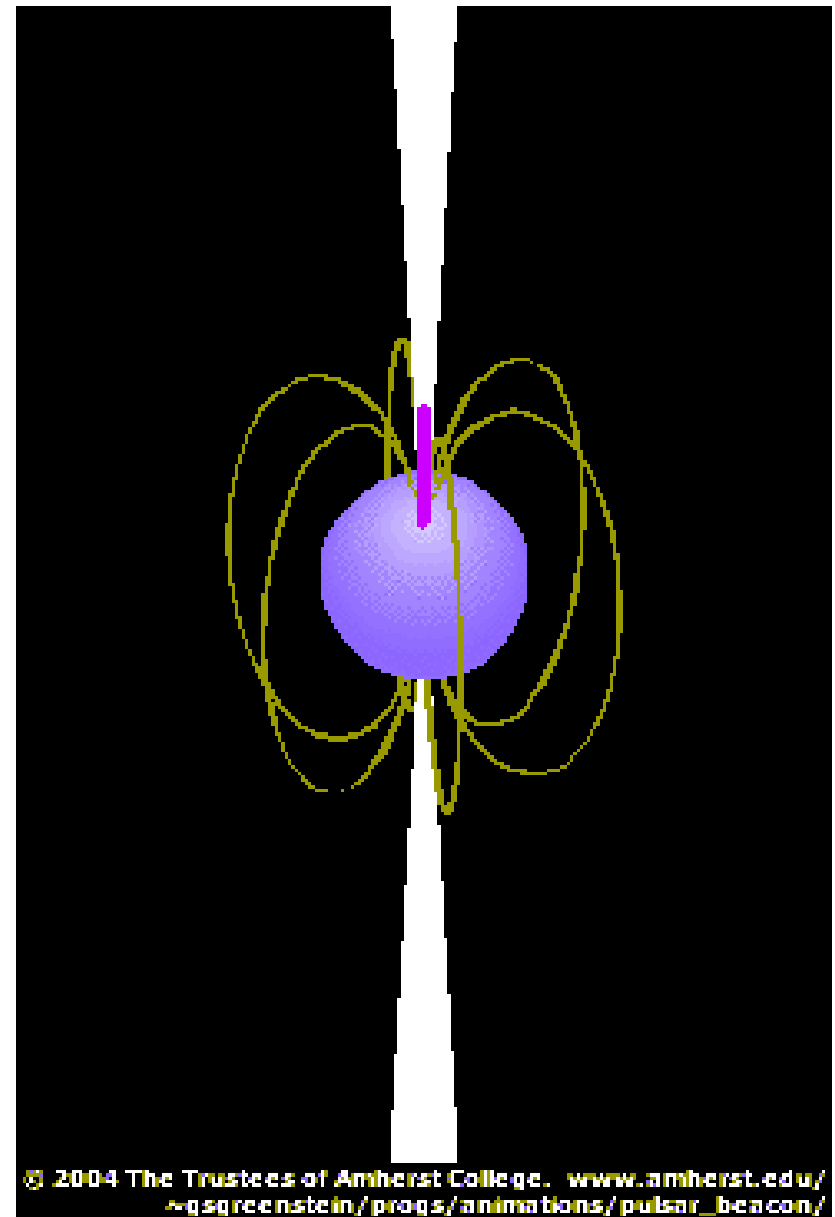
- Kosmisches Objekt mit circa $d = 20$ km
- Masse von circa 1,4-3 Sonnenmassen
- steht am Ende seiner Sternentwicklung
- besteht hauptsächlich aus Neutronen mit extremer Dichte
- ein Stecknadelkopf wiegt 1 Mt
- entsteht durch eine Supernova
- Gravitationsfeld ist circa $2 \cdot 10^{12}$ -mal stärker als auf der Erde

Pulsar

- klein, schnell rotierende, extrem dichte Neutronensterne
- durch Supernova entstanden
- hohe Gravitationskräfte, so stark, dass e^- und p^+ zu Neutronen gequetscht werden
- ist die Achse des Magnetfeldes gegen die Rotationsachse geneigt, so wird eine periodische Radiowelle mit einer gesamten Strahlungsleistung von 10^5 fachen der Sonne abgestrahlt



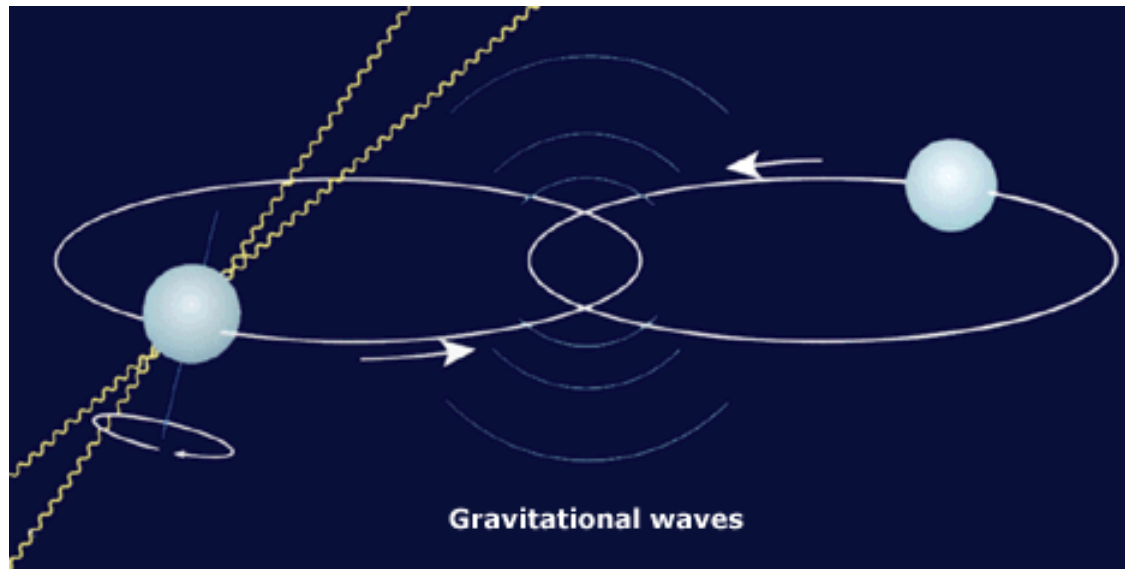
- trotz starker Verkleinerung - Drehimpulserhaltung
- die Rotationsdauer: Tagen \rightarrow Sekunden
- Energie wird entnommen – wird langsamer
- von 300 identifizierten Radiopulsaren senden 2 nur sichtbares Licht aus

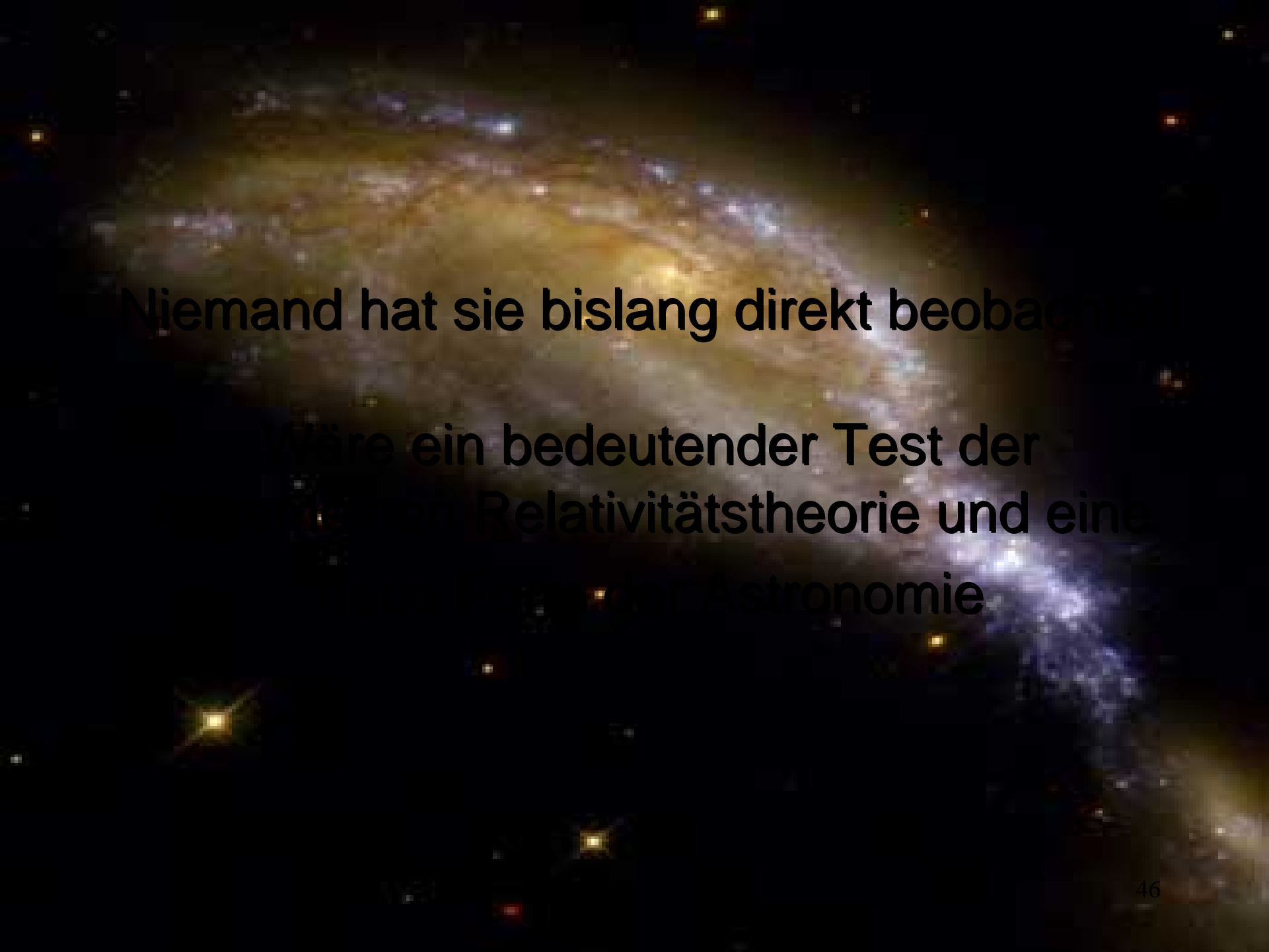


© 2004 The Trustees of Amherst College. www.amherst.edu/~qsqgreenstein/progs/animations/pulsar_beacon/

PSR1913 +16

- 1974 entdeckt
- untersucht von Hulse und Taylor
- Mitglied eines Doppelsternsystems
- laufen mit 400 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ um einander (8 Stunden); Umlaufperiode
Nimmt pro Jahr um 75,6 Millionstel Sekunden ab
- beide massereicher als Sonne
- System verliert Energie; Umlaufzeit verringert sich seit Beginn
Der Beobachtungen um mehr als 35 Sekunden
- Nobelpreis-Pulsar





Niemand hat sie bislang direkt beobachtet.
Wäre ein bedeutender Test der
allgemeinen Relativitätstheorie und eine
neue Herausforderung für die Astronomie

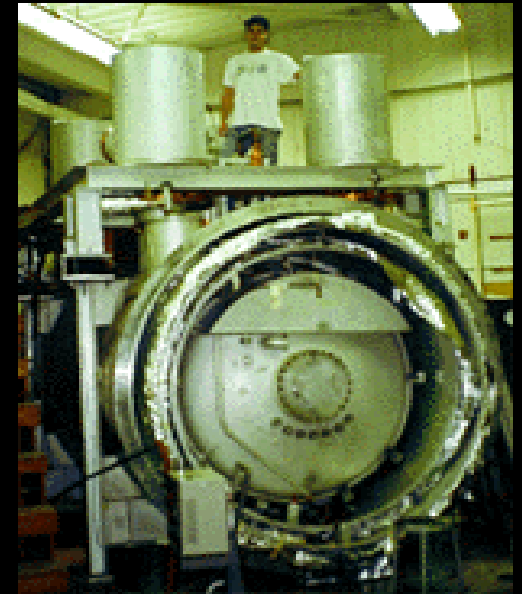


**Gravitationswellen
Nachweis: direkt**

Gravitationswellen:



Resonanz-
detektoren



Experimente zum Nachweis

- Zylinderantennen

Gravitationswellen wirken auf einen massiven Körper wie Gezeitenkräfte, d.h. sie stauchen und strecken ihn

Prinzip: In einem Zylinder werden durch Gravitationswellen longitudinale Schwingungsmoden angeregt. Gemessen wird dabei die Bewegung der Endflächen.

Die Empfindlichkeit hängt von der Masse, der Temperatur und der Qualität der Kopplung zwischen Messzylinder und Verstärker ab. Aluminiumzylinder ist gekühlt und stoßisoliert.

Experimente zum Nachweis

Eigenfrequenz des Zylinders = GW-Frequenz $< 10.000\text{Hz}$

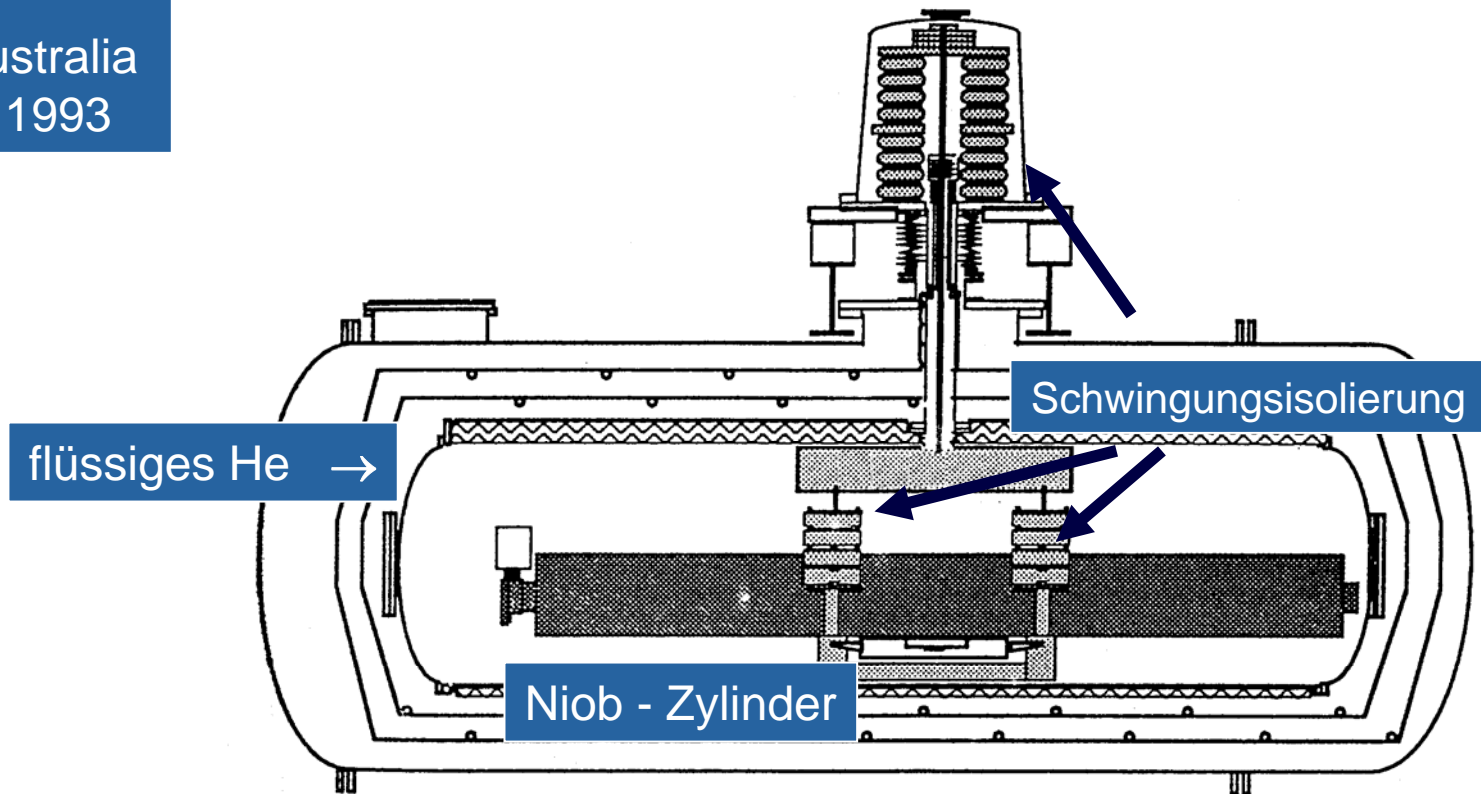
Joseph Weber: erste Versuche in Maryland in 1960er Jahren,
mit einem anderhalb Tonnen schweren Zylinder aus
Aluminium

1000Hz, entspricht GW-Frequenz Schwarzer Löcher,
angeblich Signal aus der Richtung des galaktischen Zentrums
Gefunden (??)

Beispiel:

Niobe-Zylinder, $M = 1.5 \text{ t}$,
 $V = 380 \text{ l}$ flüssiges He; $T = 0.9 \text{ K}$

NIOBE
Univ. W. Australia
(Perth) seit 1993



Empfindlichkeit:
 $h \approx 4 \times 10^{-19}$

an kleinen Massekörper als Resonator gekoppelt

Weitere Zylinderdetektoren

ALLEGRO
Baton Rouge,
LSU (USA)



AURIGA
Legnaro, INFN (Italien)



EXPLORER
Geneva, CERN, INFN
(Schweiz)

NAUTILUS
Frascati, INFN (Italien)



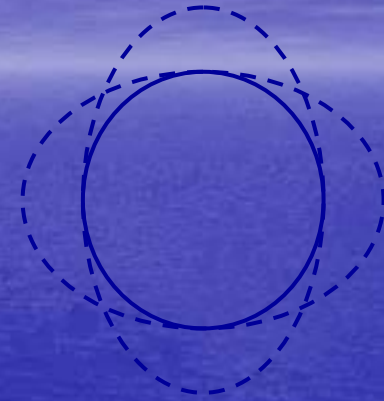
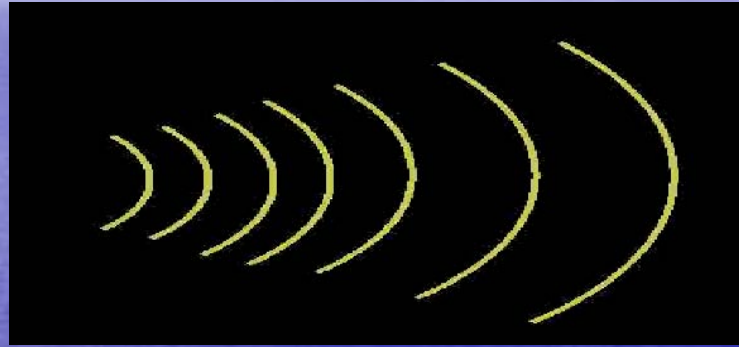
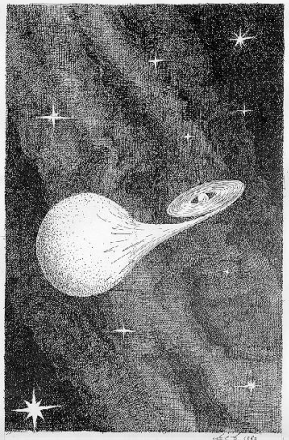
NIOBE
Perth, UWA (Australien)

Alle Resonanzantennen arbeiten unter dem Dach der
„International Gravitational Event Collaboration“ (IGEC)

Nachteil der Zylinder: geringe Bandbreite von 100 Hz, mit Kugeln 230 Hz.

Alternativen gesucht

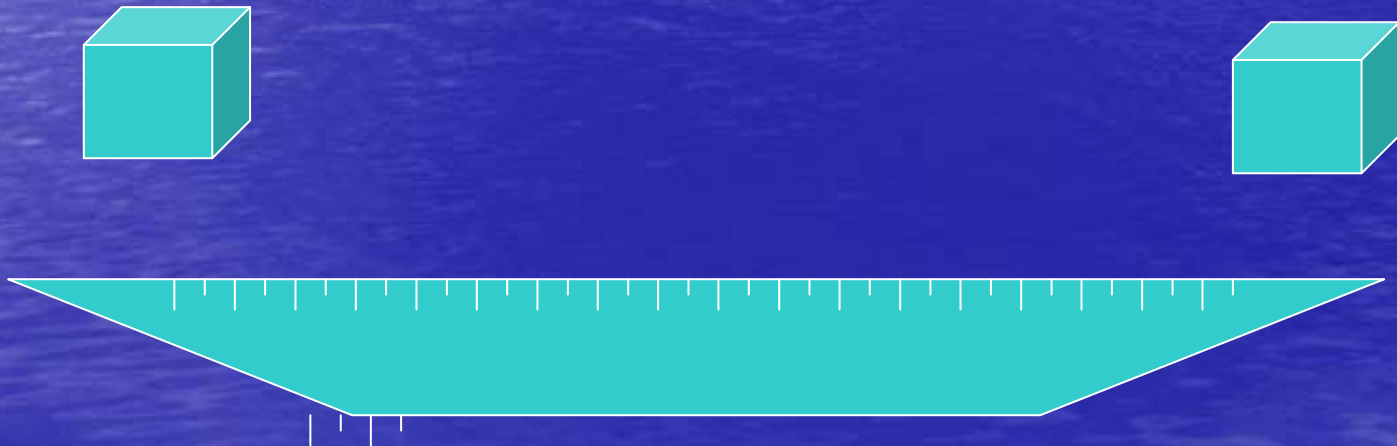
Gravitational Waves: was wissen wir noch?



- Gravitational Waves are ripples in space-time.
- They cause distortions of distances.
- Their strength is measured by *strain*, the fractional change in distance, called h .
- The size of the waves is tiny because space is very “stiff”!
- A NS binary, oscillating at ~ 100 Hz, ~ 100 Mpc away, produces $h \sim 10^{-21}$

Einfach die Distanz zwischen zwei sich frei im Raum bewegenden Objekten messen!

Wenn es so einfach ist, warum wurde es dann bisher noch nicht gemacht?



Probleme:

Die Markierungen auf dem Messgerät müßten eine Milliarde mal kleiner sein und näher beisammen als die Atome aus denen das Messgerät besteht.

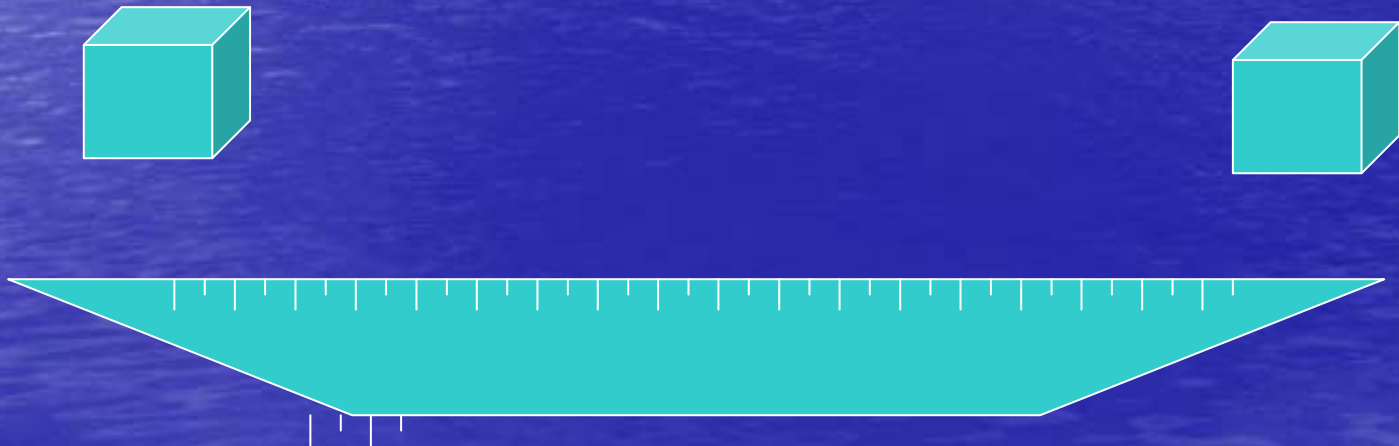
Die Objekte könnten sich voneinander entfernen. Sie müssen kontrolliert werden, ohne festgehalten zu werden.

Die Länge des Messgerätes wird ebenfalls durch die Gravitationswellen beeinflusst.

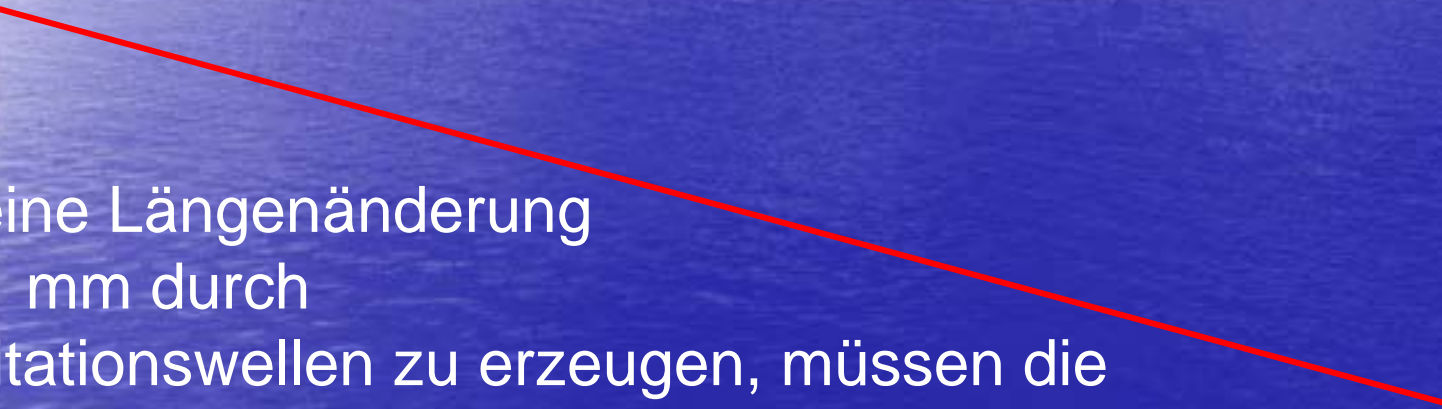


Lösung: die Entfernung
zwischen den kontrollierten
Objekten sehr groß machen.

Um so größer die Entfernung,
um so größer der Effekt der
Gravitationswellen.



Einen Laser-Beam benutzen, um die Entfernung zu messen.



Um eine Längenänderung von 1 mm durch Gravitationswellen zu erzeugen, müssen die Objekte nur eine Million Milliarde km voneinander entfernt sein.



Problem: Es würde länger als 100 Jahre dauern, um eine Messung zu machen.



Die Distanz muß auch kleiner sein als die Wellenlänge die wir versuchen zu messen.

Lösung: Es ist viel einfacher die Differenz zwischen zwei langen Distanzen zu messen, als die lange Distanzen selber.

Interferometer tun dies mit ausgezeichneter Genauigkeit.

Ein Interferometer vergleicht die Distanzen, die von zwei Laser-Beams zurückgelegt wurden. Es ist sensitive für Änderungen die kleiner als die Wellenlänge des Lichts sind.



- Interferometrische Detektoren

Prinzip: Durch Gravitationswellen werden zwei senkrechte Strecken um den gleichen Betrag verkürzt bzw. verlängert. Daher benutzt man vorzugsweise den Aufbau eines Michelson Interferometers.

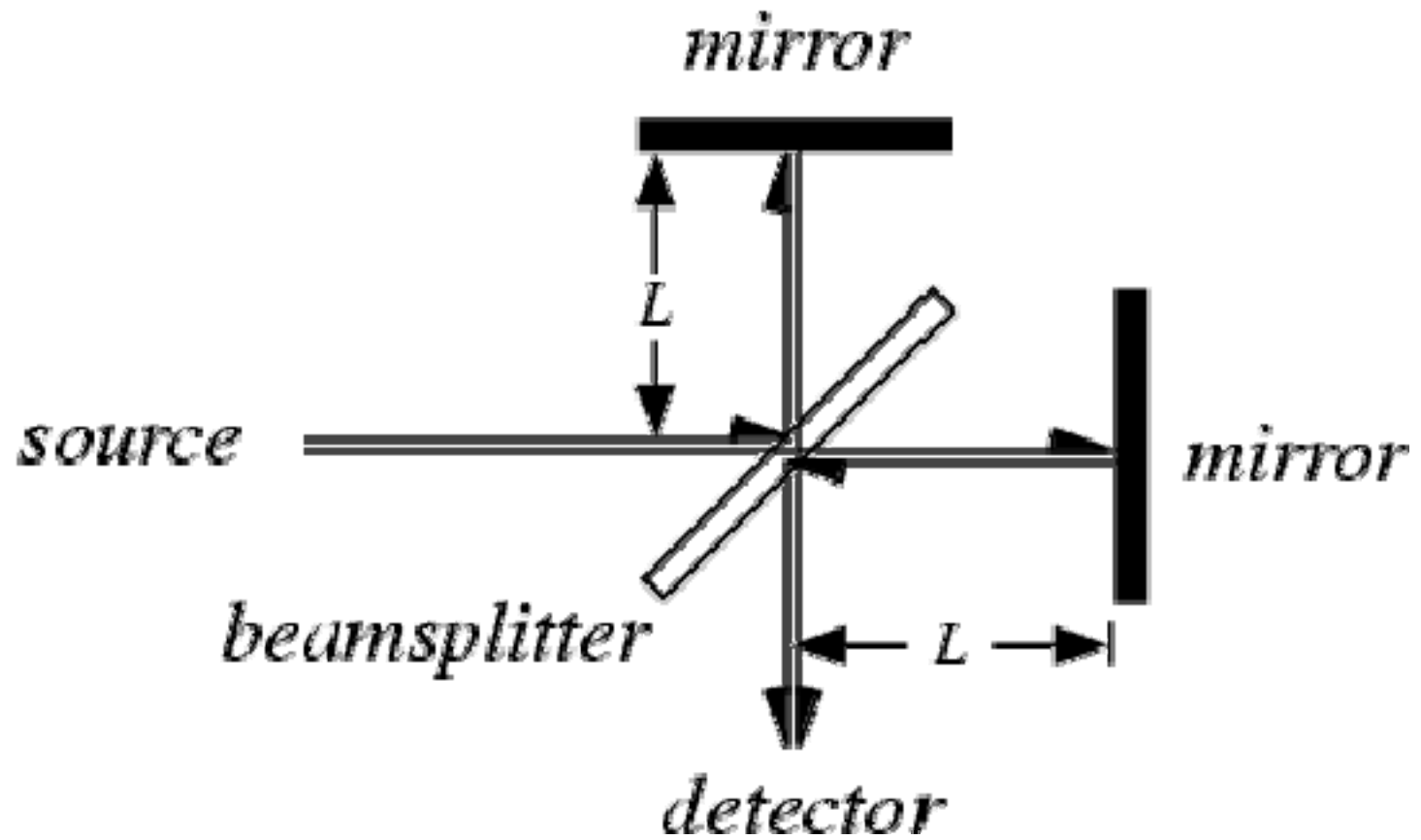
Die Empfindlichkeit des Detektors hängt von der Länge der Messstrecke und von der umlaufenden Lichtleistung ab.

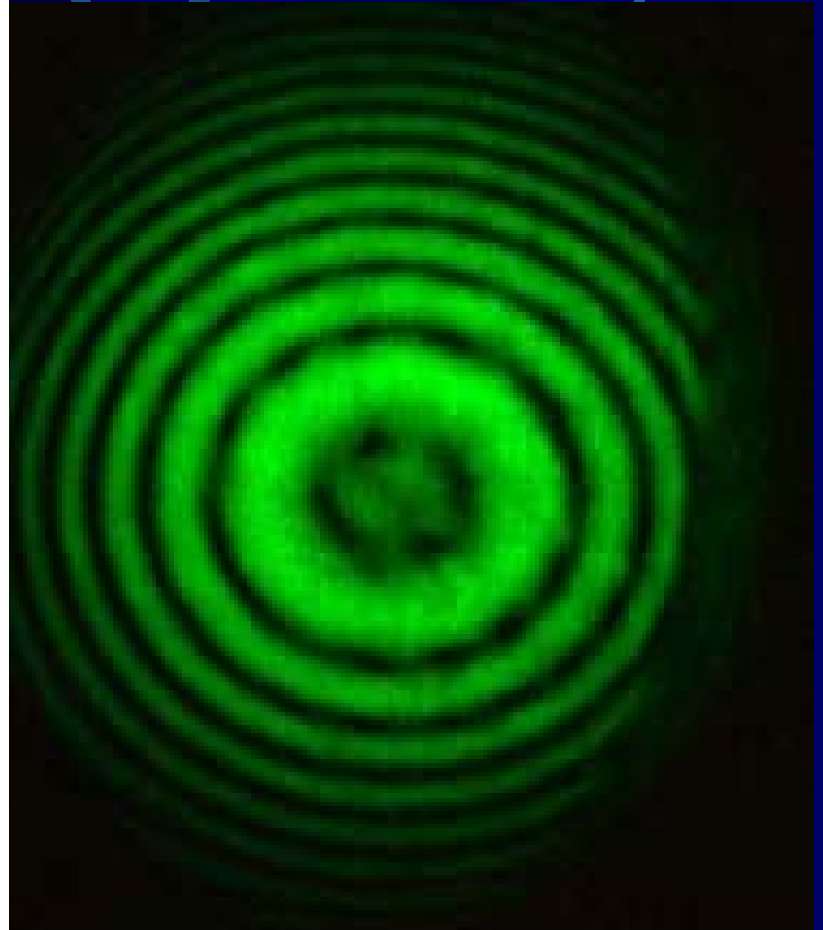
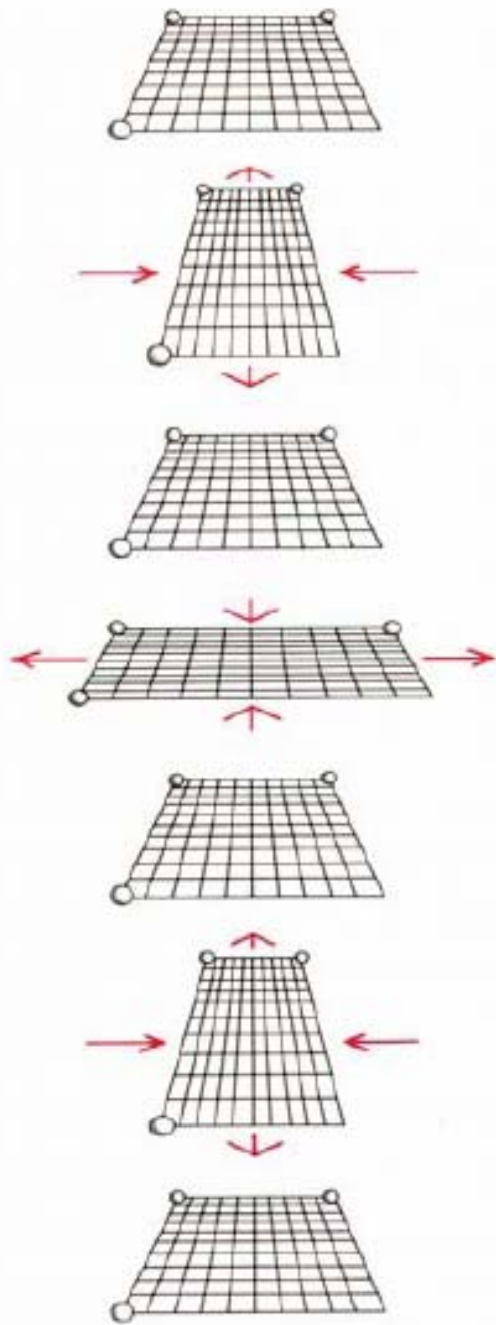
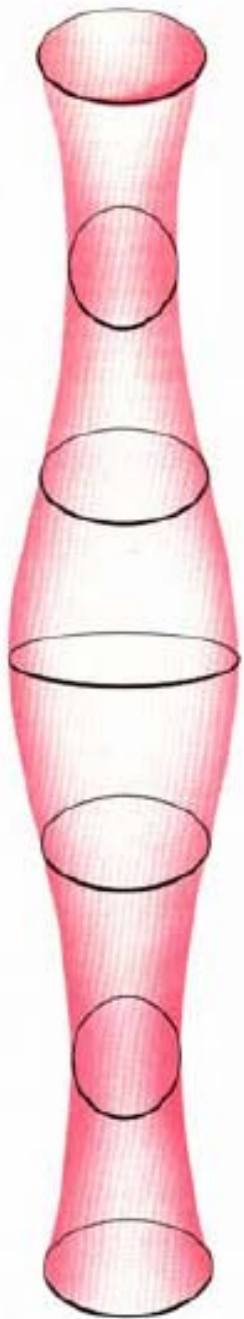
Vorteil gegenüber
Resonanzdetektor:

- sehr präzise
- breites Frequenzspektrum

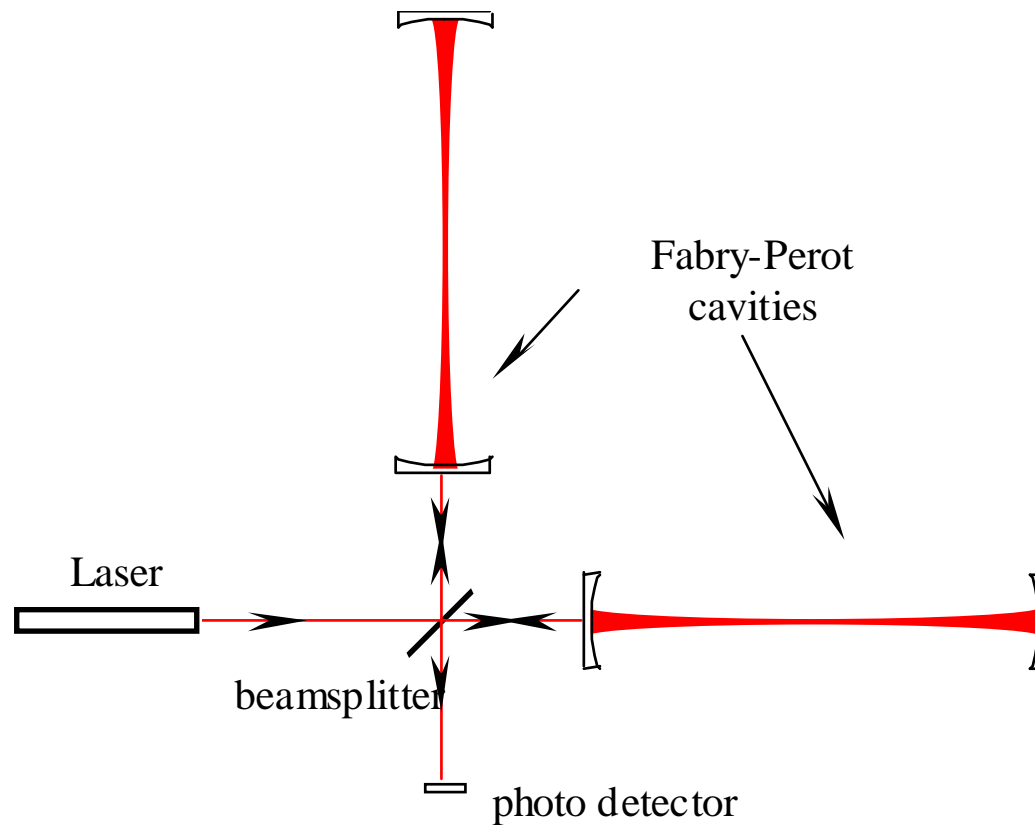


Das Michelson-Interferometer:

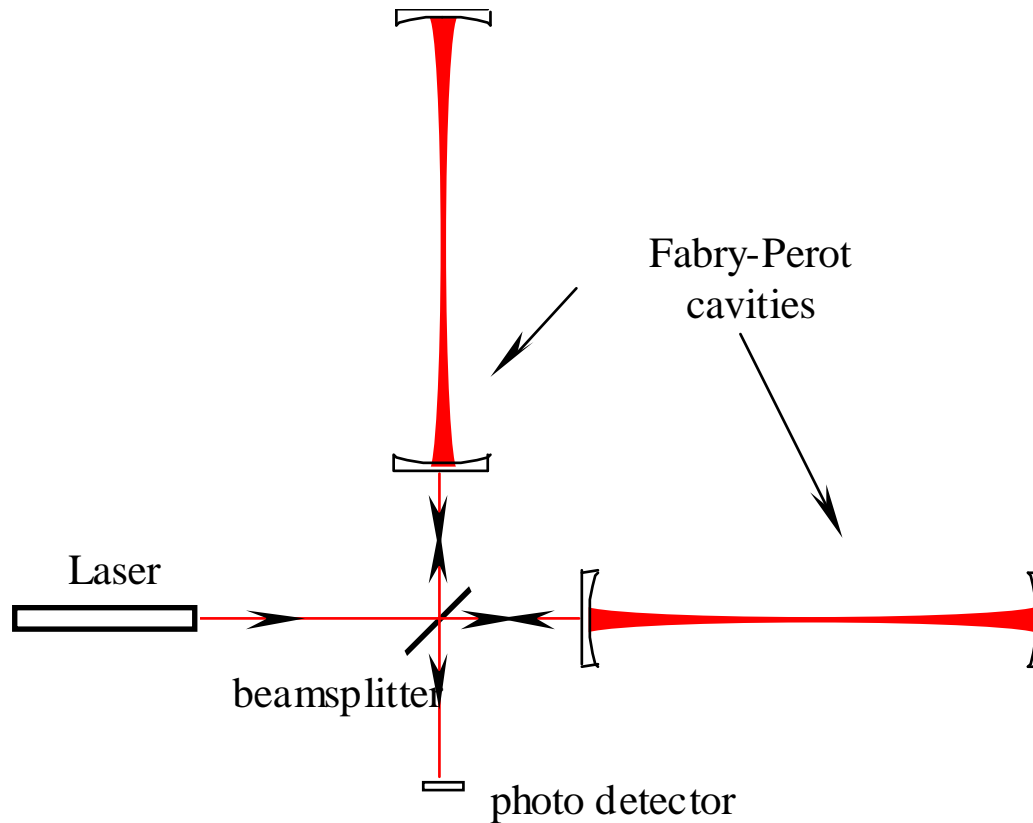




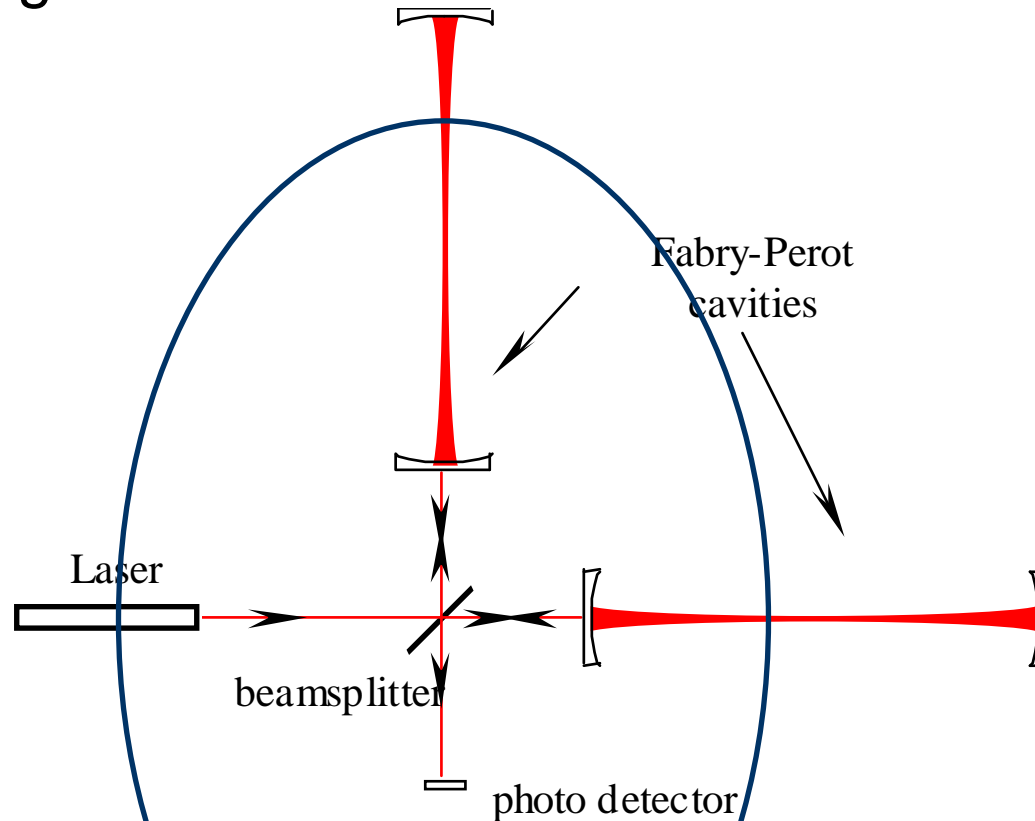
Fabry—Perot Cavity Interferometer



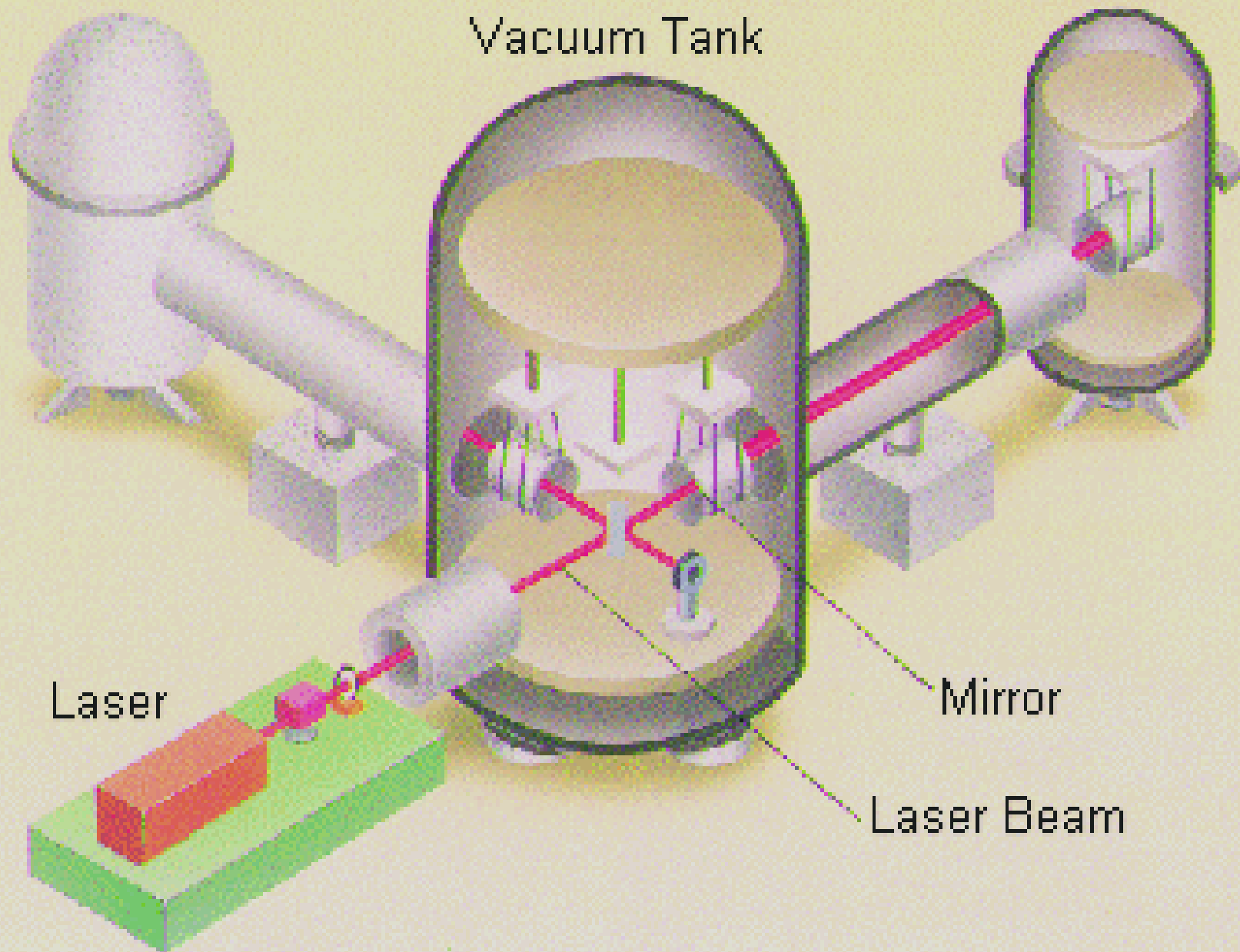
Werden nicht beide Arme des Interferometers gleich durch die Gravitationswellen beeinflusst?



Ja! Aber durch die Quadrupol Polarisation der Gravitationswellen, passieren die Effekte nicht auf beiden Seiten zur gleichen Zeit!



Dadurch, daß die Arme im rechten Winkel zueinander stehen, wird die Sensitivität bzgl. Der Gravitationswellen effektiv verdoppelt!



- Anforderungen an den Laser:
 - Stabilität der
 - Leistung (Helligkeit)
 - Frequenz (Farbe)
 - Räumliches Strahlprofil (kreisförmige Leistungsverteilung)
 - Verlässlichkeit und Wartungsfreundlichkeit
 - z.Bsp. von Universität Hannover und dem Laserzentrum Hannover, MPI für Quantenoptik in Garching entwickelt
- Optische Komponenten (Spiegel und Strahlteiler) müssen absorptionsfrei sein, da sie sich sonst erwärmen und verziehen
- Firma Heraeus entwickelte für Geo 600 ein Quarzglas, das 100mal weniger absorbiert als alle bisherige Gläser
- Oberfläche muss perfekt sein, um Streulicht zu vermeiden (Rauigkeit der Oberfläche eines 25-cm-Spiegels kann auf atomares Niveau beschränkt werden, 0.1 Nanometer)
- Um Streuung des Laserstrahls an Luftmolekülen und die Einkopplung von akustischen Störungen zu vermeiden, müssen die optischen Aufbauten in Vakuumtanks untergebracht werden: die Messstrecke verläuft in evakuierten Röhren
- Hauptstörquellen sind Bodenerschütterungen aller Art: Vibrationen von technischen Geräten, Fahrzeuge, die sich an der Anlage vorbei bewegen, Meeresdünung und Erdbeben aller Art: Ausschläge, die Milliarden Mal so groß sind wie die zu messenden Signale: Spiegel daher an mehrstufigem Pendel aufgehängt

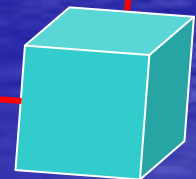
Sensibilisierung

- längere Arme
 - größere Längenkontraktion
 - größerer Gangunterschied
 - deutlichere Signale
- ideale Länge ~150 km
- z.B. Fabry-Perot-Michelson-Interferometer
- → Zunahme der Intensität und der Armlänge

Problem: Rauschen

Verschiedene Rauschquellen reduzieren die Sensitivität des Interferometers:

- Laser Fluktuationen
- Photonen Rauscheffekte
- Thermische Vibrationen der Spiegel
- Seismisches Rauschen



Fehlerquellen

- seismisches und mechanisches Rauschen
- Position der Spiegel durch Quantenunsicherheit nicht bestimmbar
- Fehler des Photonendetektors durch Totzeit
- verrücken der Spiegel durch Lichtdruck

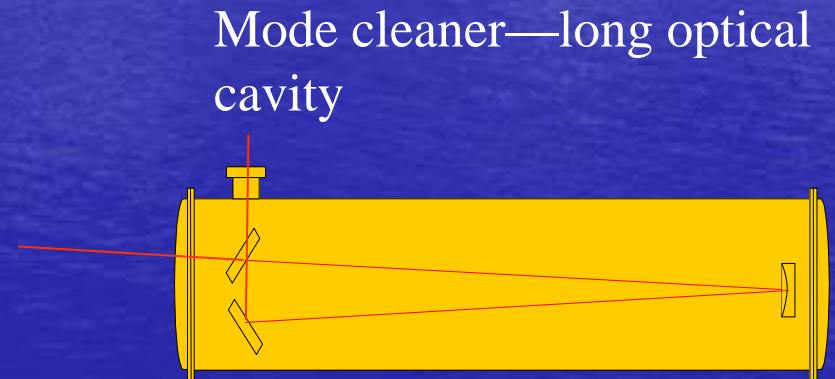
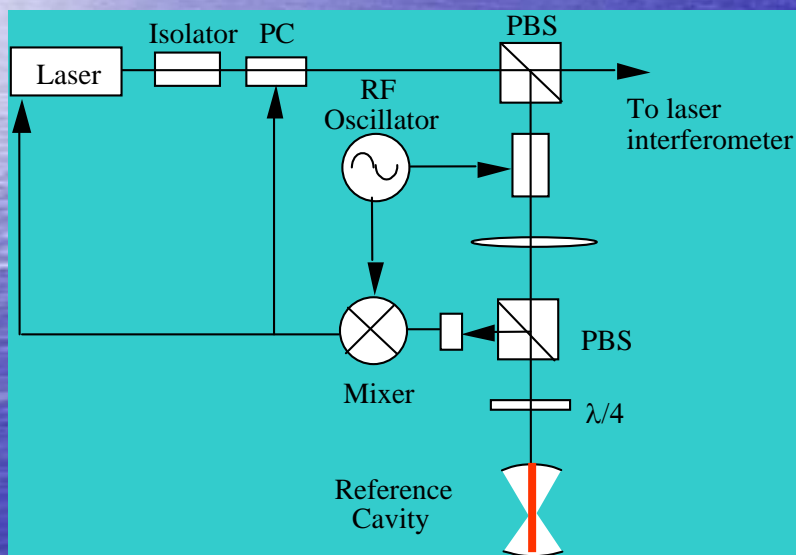
Lösungen:

Laser Stabilisierung

Einen sehr starken Laser benutzen (100 Watt und durch Resonanz auf 1 Megawatt bringen).

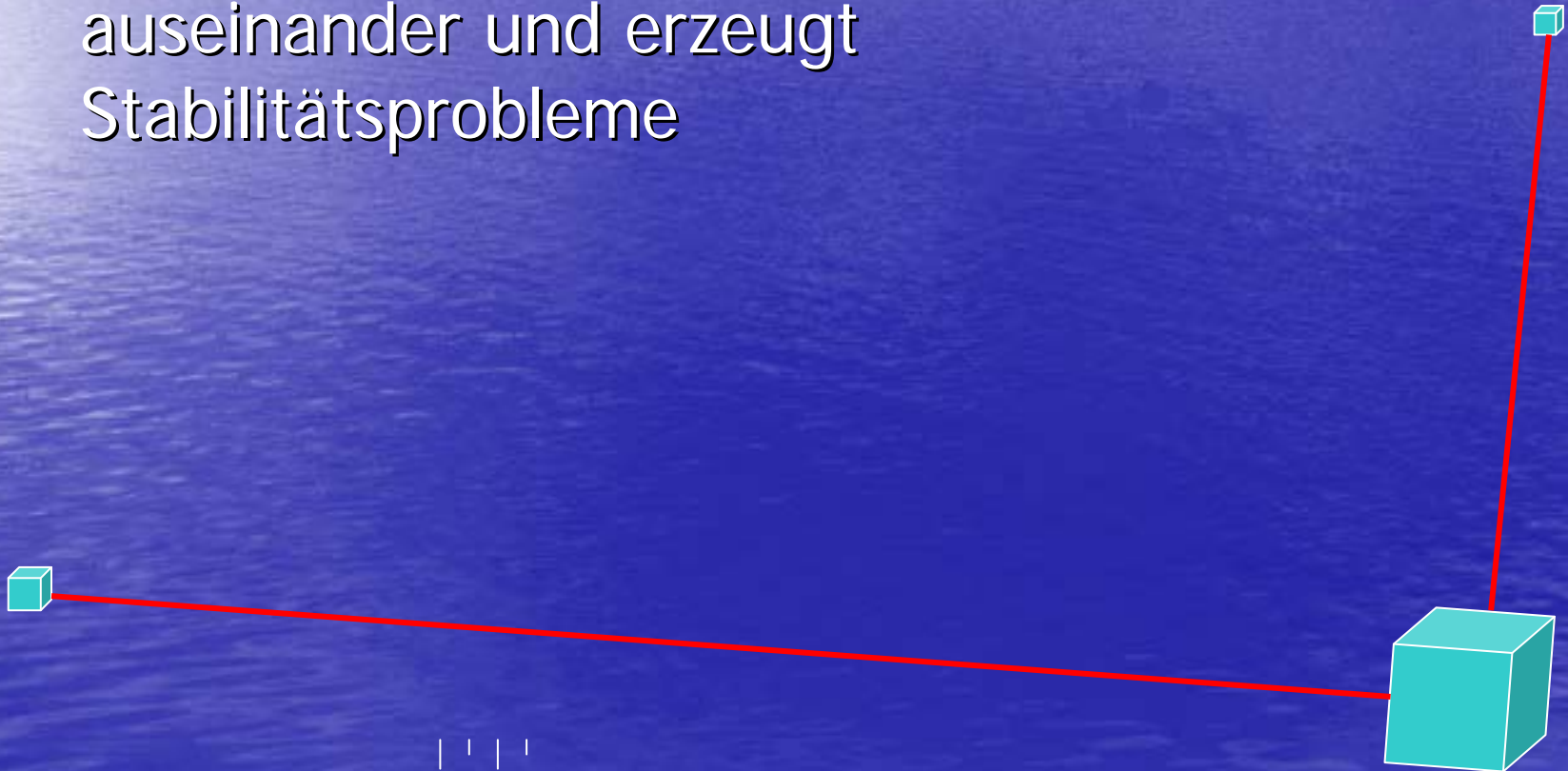
Frequenz Stabilisierung

Laser Geometrie Fluktuations Stabilisierung

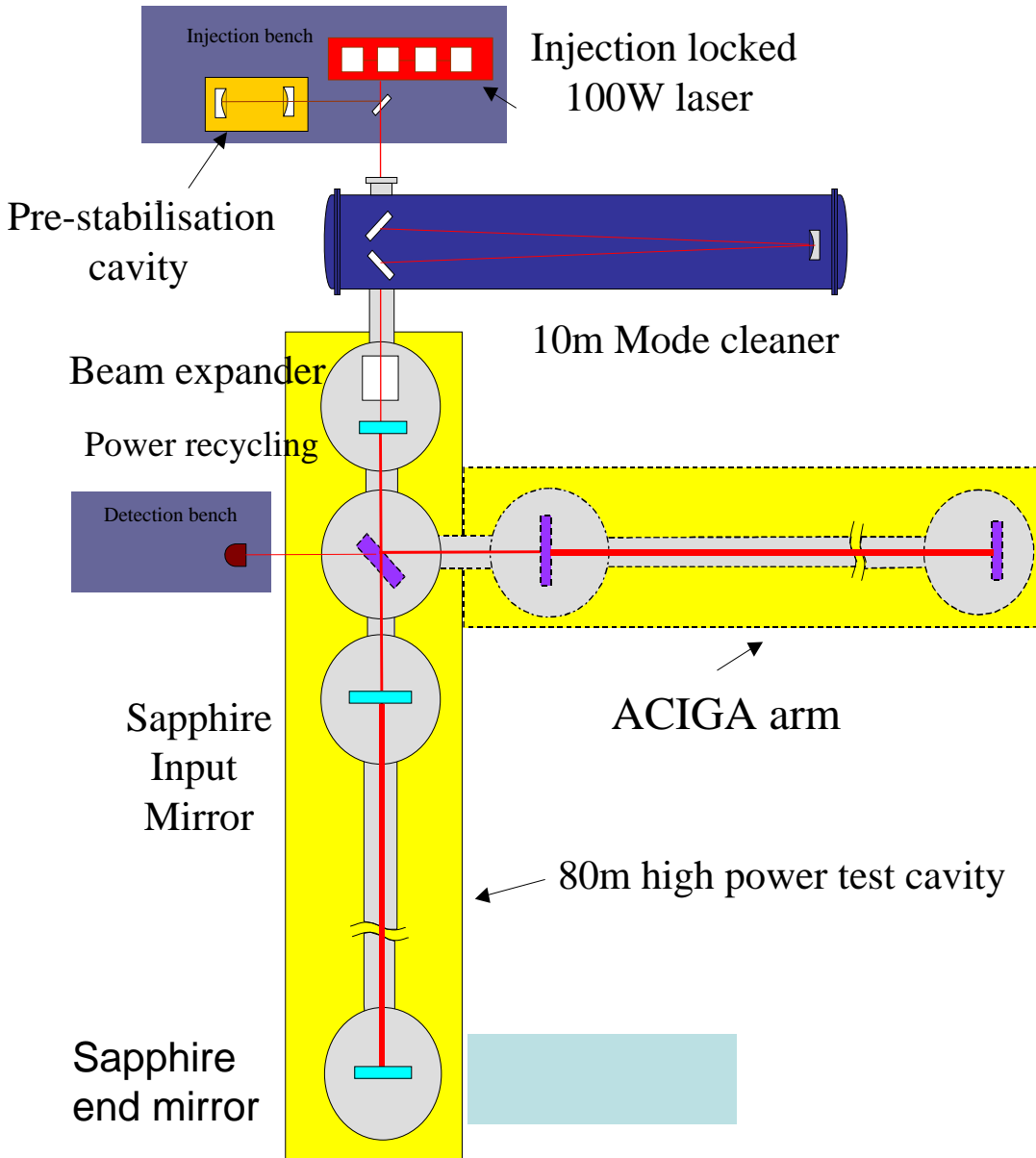


Probleme mit starkem Laser

Der Strahlungsdruck drückt die Spiegel
auseinander und erzeugt
Stabilitätsprobleme



AIGO High Optical Power Test Facility

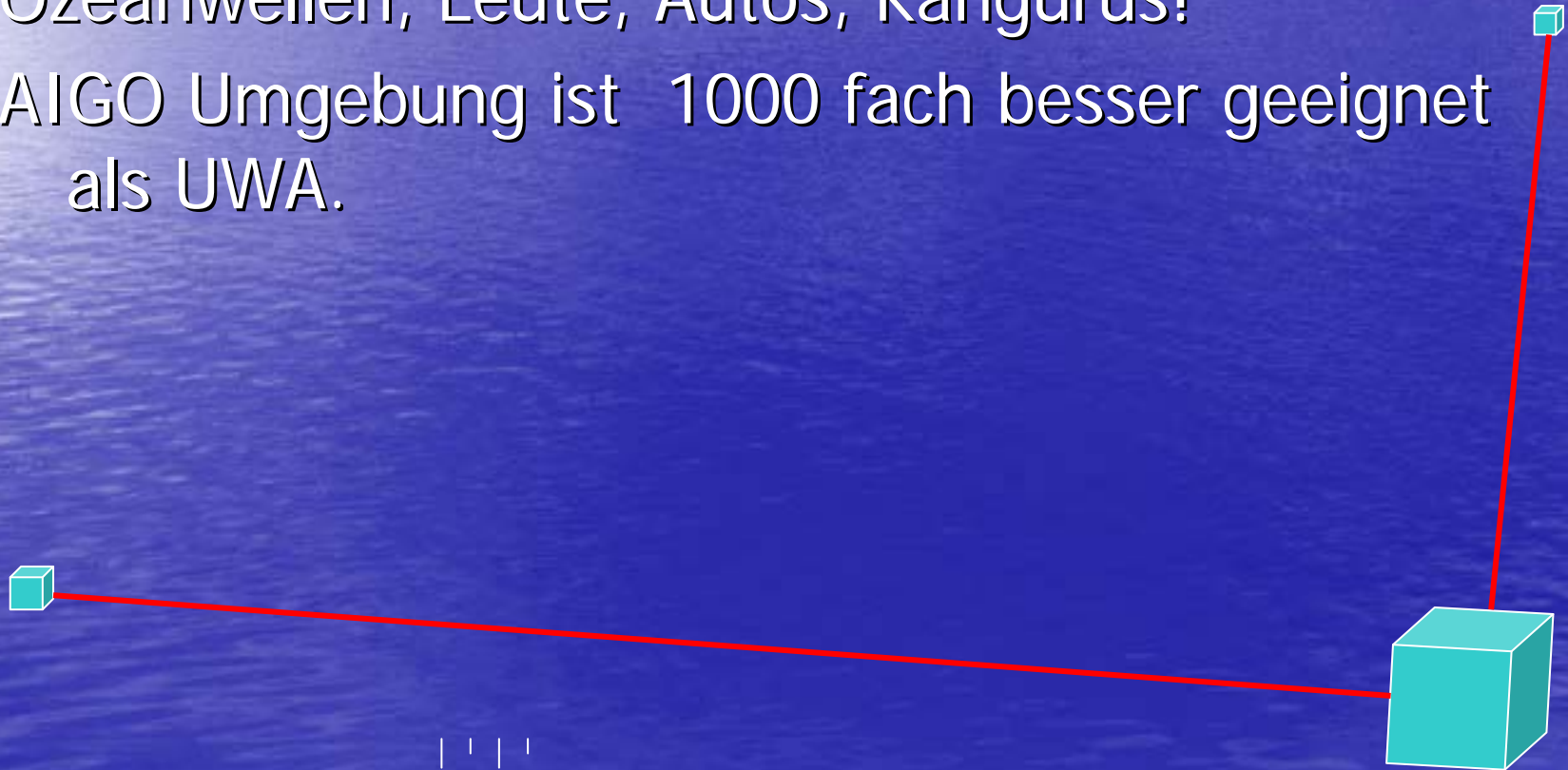


Probleme:

Seismisches Rauschen ist 10^{12} fach stärker als die Gravitationswellen.

Ozeanwellen, Leute, Autos, Kängurus!

AIGO Umgebung ist 1000 fach besser geeignet als UWA.



Gravitational waves: an international dream



GEO600 (British-German)
Hannover, Germany



LIGO (USA)
Hanford, WA and Livingston, LA



TAMA (Japan)
Mitaka



AIGO (Australia),
Wallingup Plain, 85km north of Perth



VIRGO (French-Italian)
Cascina, Italy

Geo 600

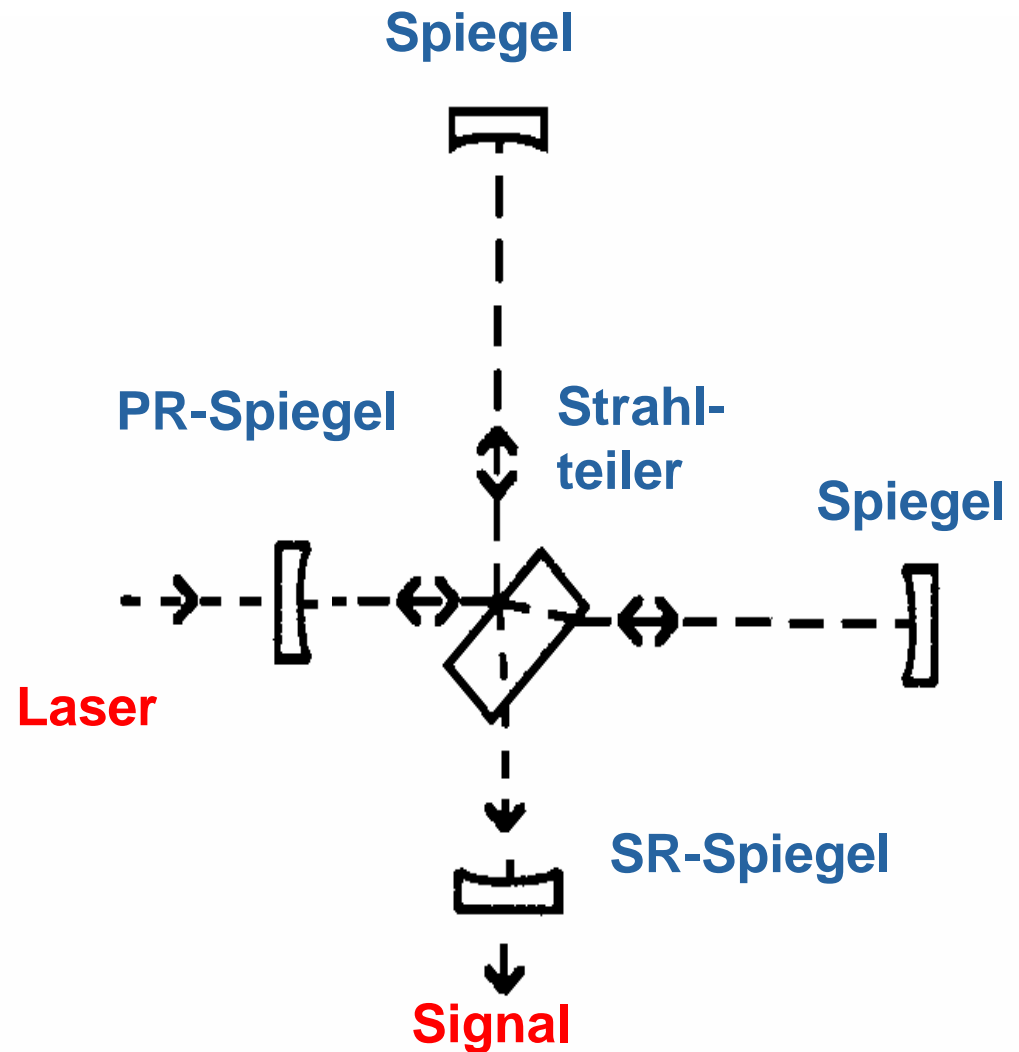
- Standort: Hannover
- Armlänge: 600 m
- Umlaufende
Lichtleistung 10 kW
- Nd:YAG-Laser 14 W
@ 1064 nm cw
- Ultrahochvakuum:
 $p < 10^{-7}$ Pa
- erster Testlauf in
Kooperation mit LIGO
Anfang 2002 erfolgt
- nächster 2005
geplant



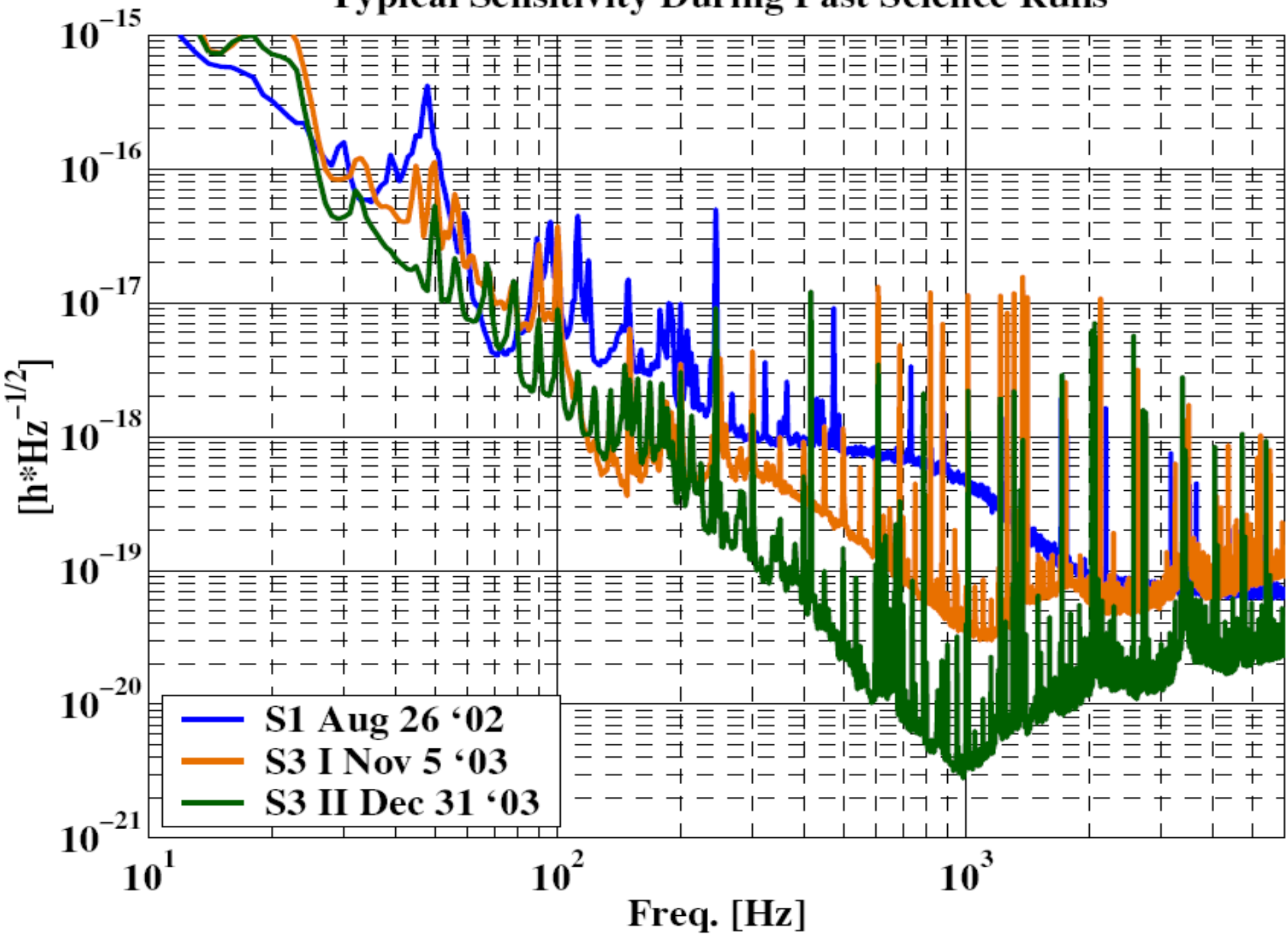
Geo 600

„**duales Recycling**“:

- Nullmethode: dunkler Ausgang → alles Licht läuft zurück zum Laser
Recycling !
- Power Recycling: Spiegel und Interferometer bilden einen Resonator, der die umlaufende Lichtleistung verstärkt.
ca. 1000 fach
- SignalRecycling: Spiegel und Interferometer bilden einen Resonator, der das Signal verstärkt.
ca. 100 fach



Typical Sensitivity During Past Science Runs



Technische Daten:

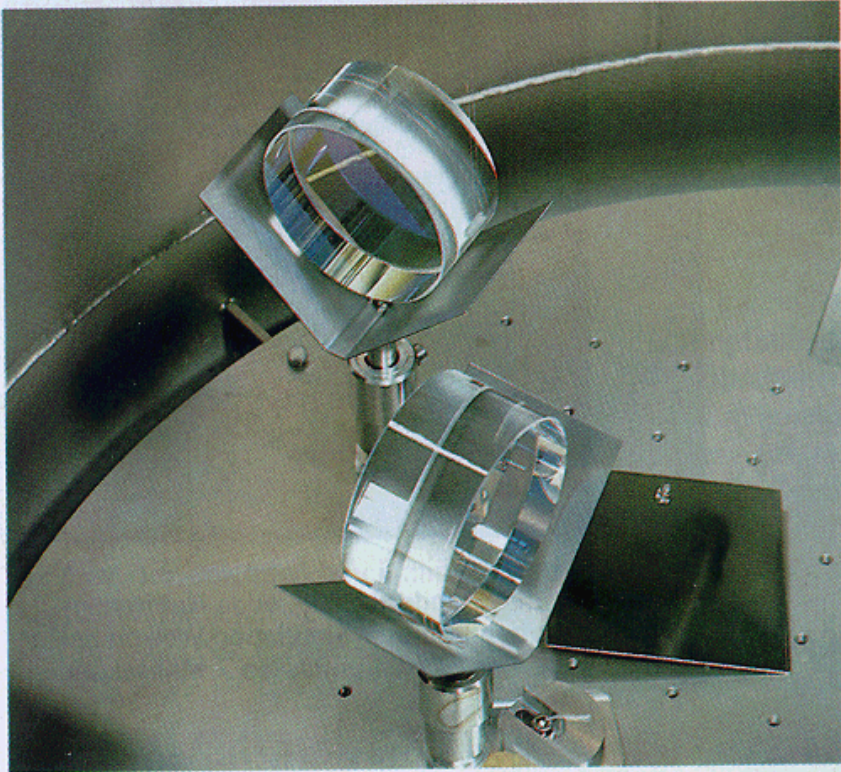
- Vakuumrohr: 2 x 600 m; 60 cm Durchmesser; 0,8 mm Dicke
- Vakuum: Druck $< 10^{-8}$ mbar
- Laser: diodengepumpter Nd:YAG-Laser bei 1064 nm

(Neodym: Yttrium-Aluminium-Granat-Laser)

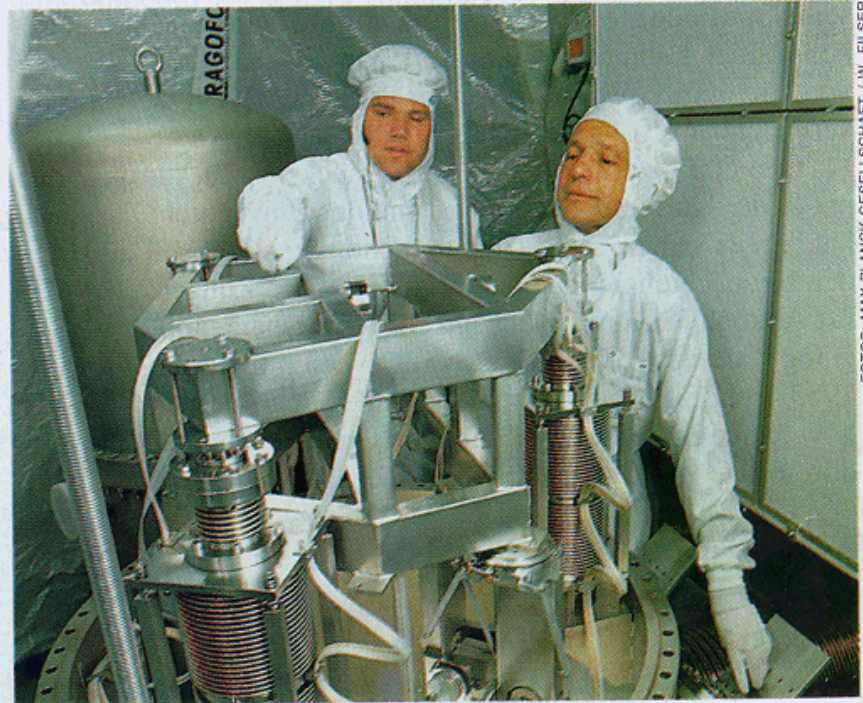
- Laserleistung: 10 W Ausgangsleistung
- Leistungsverstärkung: bis zu 10 kW
- Signalverstärkung: bis zu 100-fach
- Optik: Quarzglasspiegel mit 25 cm Durchmesser an Glasfäden aufgehängt
- Frequenzbereich: 50 Hz bis 2 kHz

Technische Daten:

- **Power-Recycling:** Gravitationswelle verursacht im Laserlicht eine Phasenmodulation. Dadurch werden Seitenbänder erzeugt, die gegenüber dem ursprünglichen Träger, der Laserfrequenz, um die Gravitationswellenfrequenz verschoben sind. Am Interferometerausgang erscheinen also die signalinduzierten Seitenbänder. Diese lassen sich resonant überhöhen, indem man einen weiteren hochreflektierenden Spiegel in den Ausgang stellt und auslaufendes und reflektiertes Signal phasenrichtig überlagert. Da es sich um ein Resonanzphänomen handelt, erhält man eine kleinere Bandbreite bei gleichzeitiger Überhöhung der



Im Innern von „Geo 600“, der deutschen Gravitationswellenantenne: Spiegel, welche die Laserstrahlen in den Interferometerarmen reflektieren, sind an hauchfeinen Quarzfäden aufgehängt (links). Rechts bei der Installation der Schwingungsisolierung: Max-Planck-Forscher Karsten Danzmann (rechts) und Mitarbeiter Harald Lück



FOTOS: MAX-PLANCK-GESSELLSCHAFT / W. FILSER



Beispiel für Störungen/Spektrum

Bodenunruhe

(seismisches Rauschen)

Luftbewegung

(Restgasrauschen)

Wärmebewegung

(thermisches Rauschen)

Lichtdruck

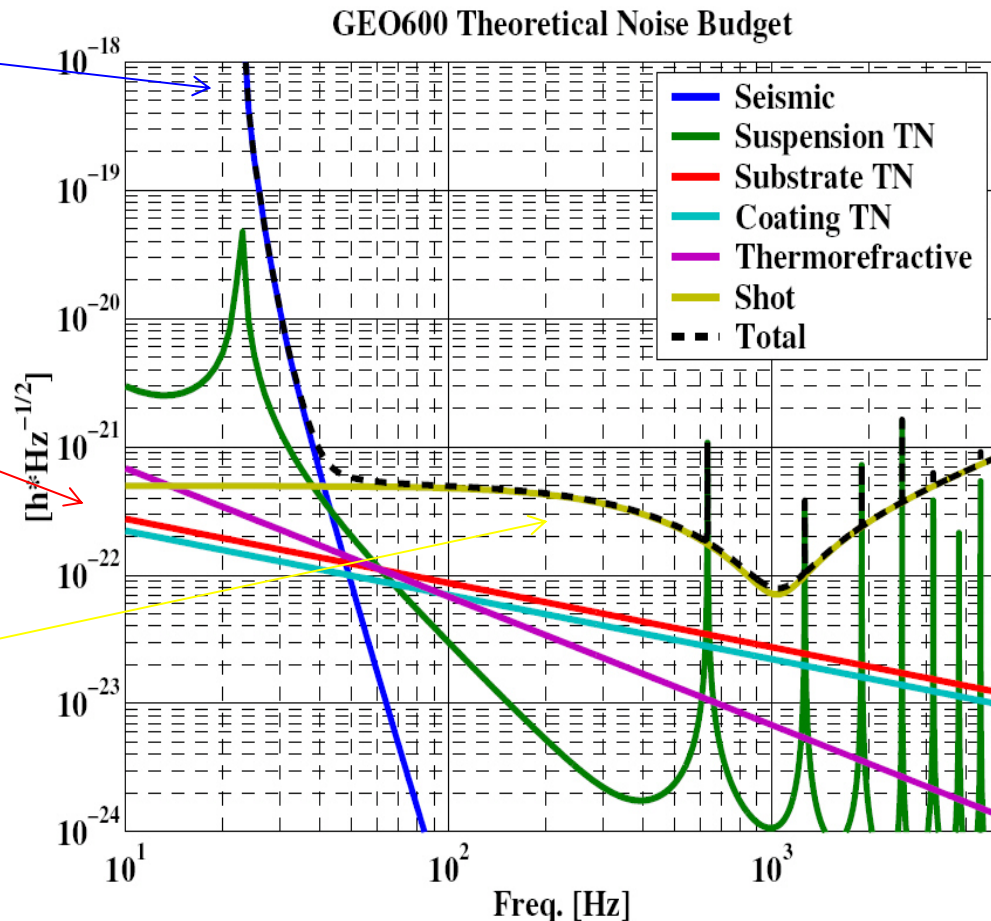
(Strahlungsdruckrauschen)

Meßverfahren

(Schrottrauschen)

Heisenbergsche Unschärfe

(Quantenrauschen)





LIGO

- ist eine Kooperation des California Institute of Technology (Caltech) und des Massachusetts Institute of Technology (MIT)
- seit 1996
- Armlänge: 2 bzw 4 km
- Power Recycling

Livingston, Louisiana

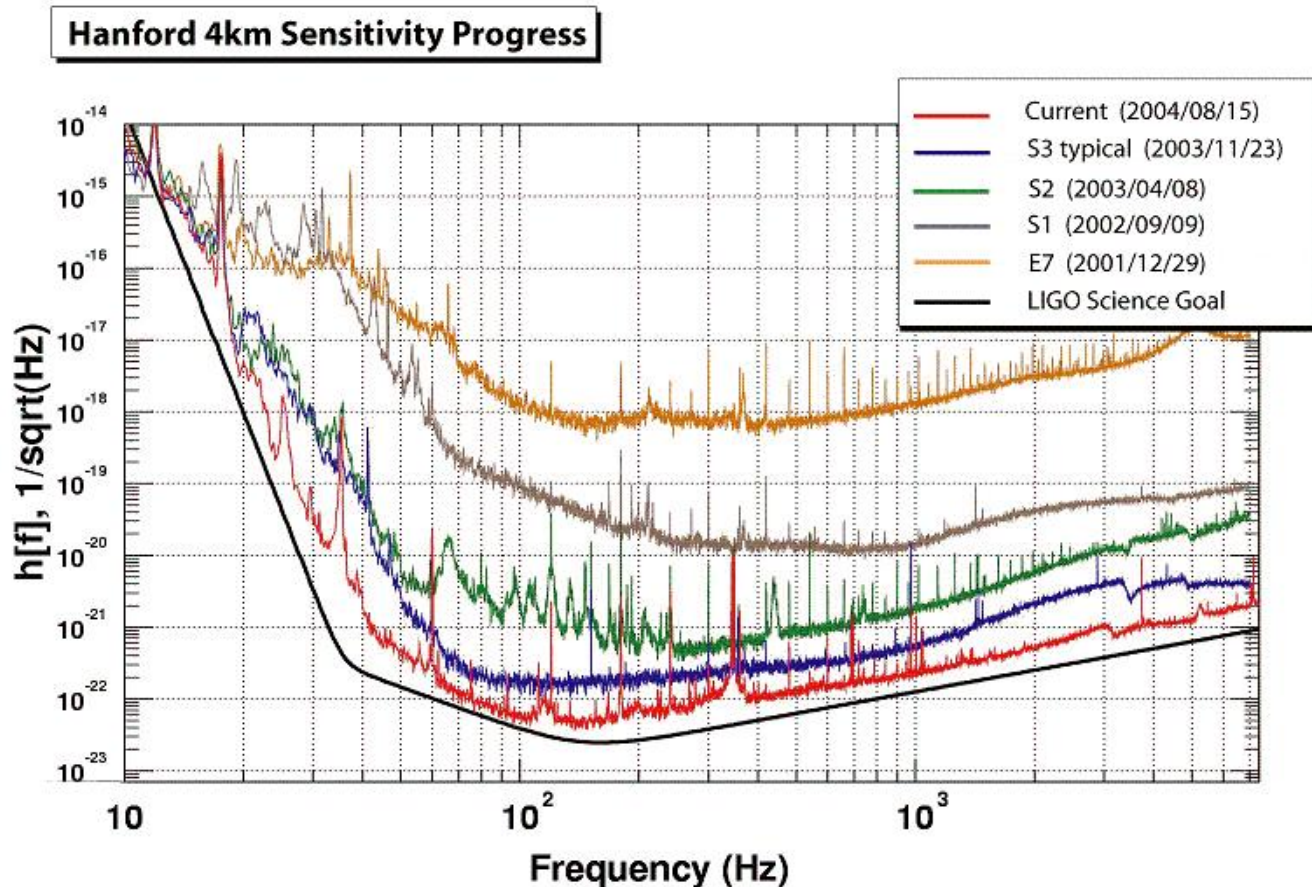


Hanford, Washington



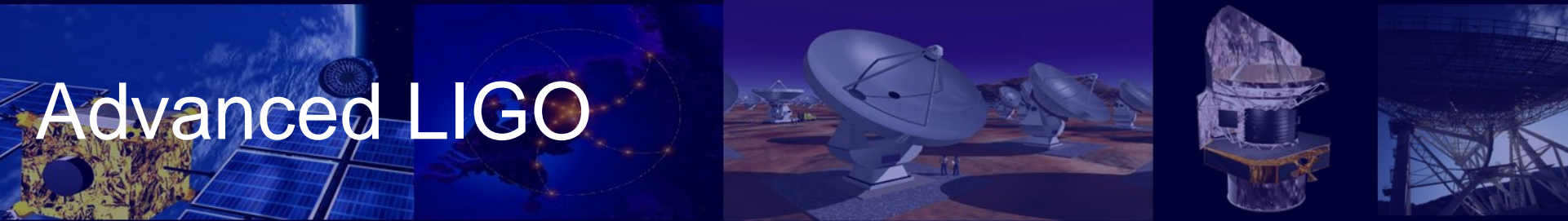
LIGO

http://www.ligo.caltech.edu/LIGO_web/0409news/0409liv.html

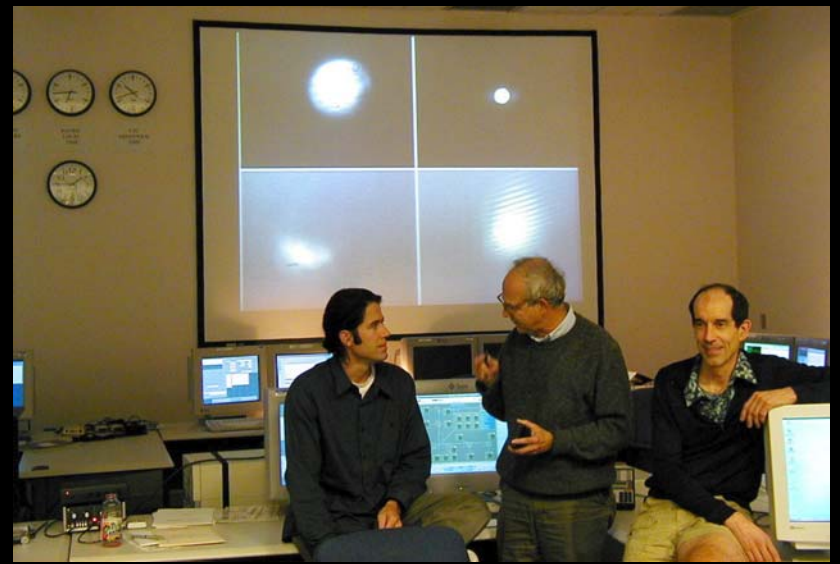


http://www.ligo.caltech.edu/LIGO_web/0409news/0409han.html

Advanced LIGO

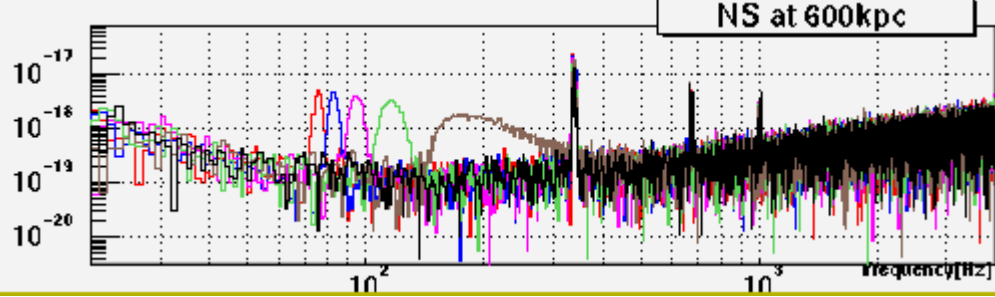


- Mehr als 10mal so sensitiv
- Wesentlich breiteres Frequenzband als LIGO
- Beobachtbares Raumvolumen mehr als 1000 mal größer als LIGO
- Den Bereich der detektierbaren Massen um Faktor 4 vergrößert
- Während einiger Stunden die integrierten Beobachtungen von 1 Jahr LIGO-Beobachtungen übertreffen
- 1.4 M Neutronensterne in einer Distanz von 300 Mpc (15 x weiter als LIGO), Ereignisrate 3000x größer
- Neutronenstern / Schwarzes Loch werden bis 650 Mpc sichtbar sein; verschmelzende Schwarze Loch Systeme bis zu $z=0.4$

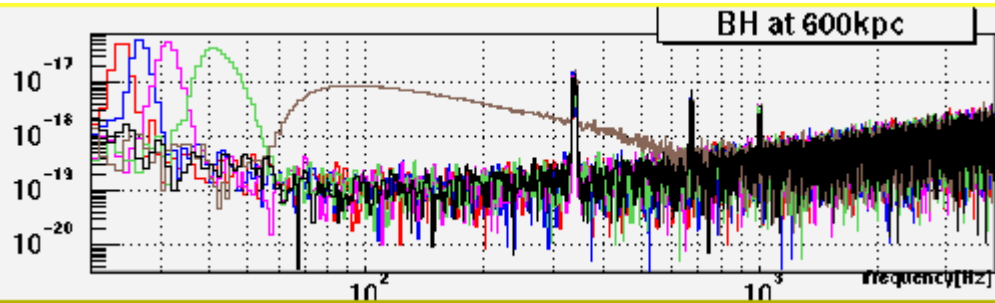


LIGO: Now testing, planning upgrade

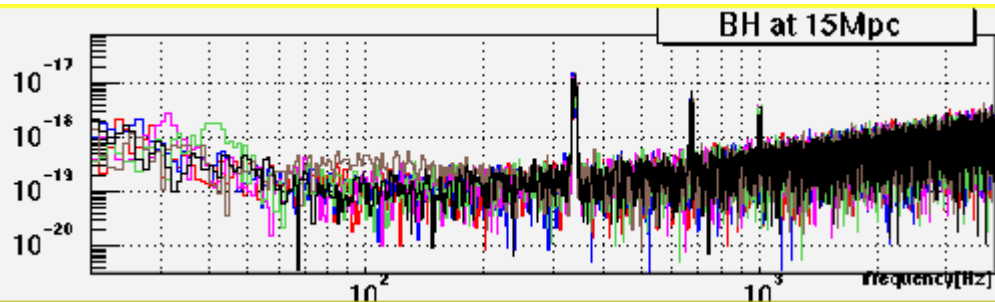




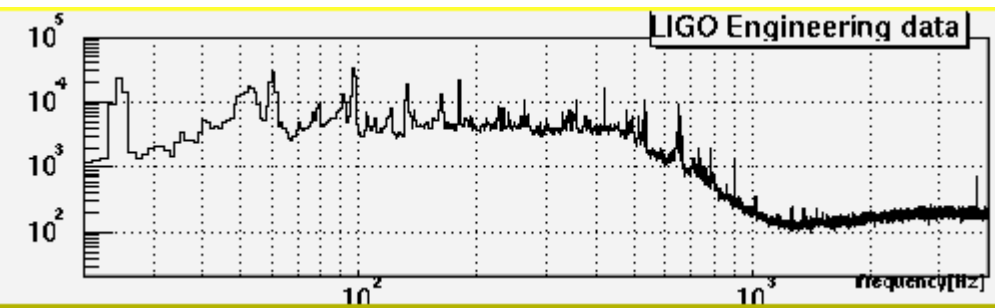
- Zwei Neutronensterne, die letzten 5 Sekunden
- Signalspektrum verändert sich: orange, blau, lila, grün, braun



- Zwei Schwarze Löcher (10 Sonnenmassen, 600 kpc z.Bsp. In Andromeda)



- Oder im Virgohaufen



- Realer Test (aber geringere Sensitivität als normal)

VIRGO

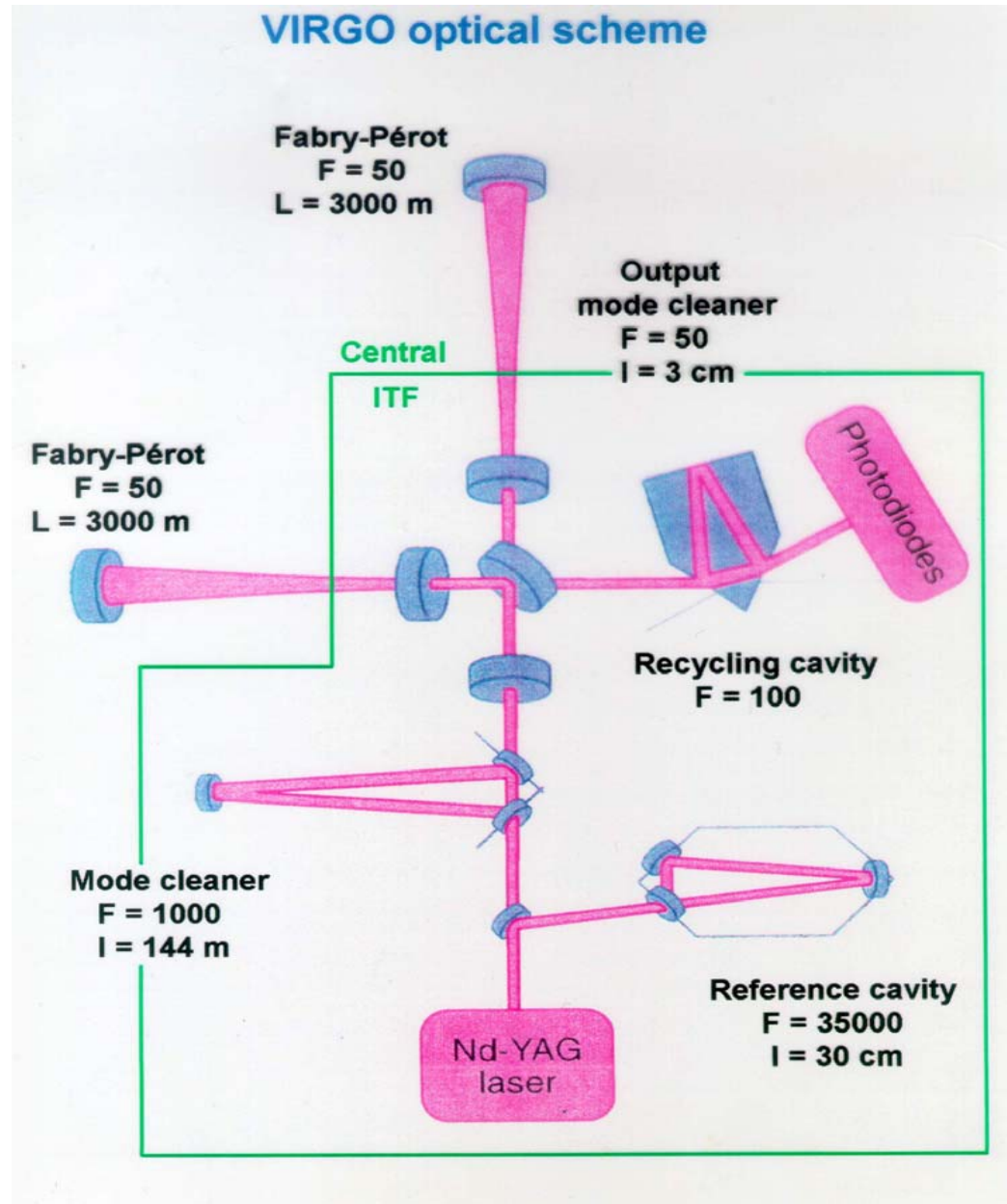
- Standort Pisa, Norditalien
- französisch italienische Kollaboration
- seit 1997



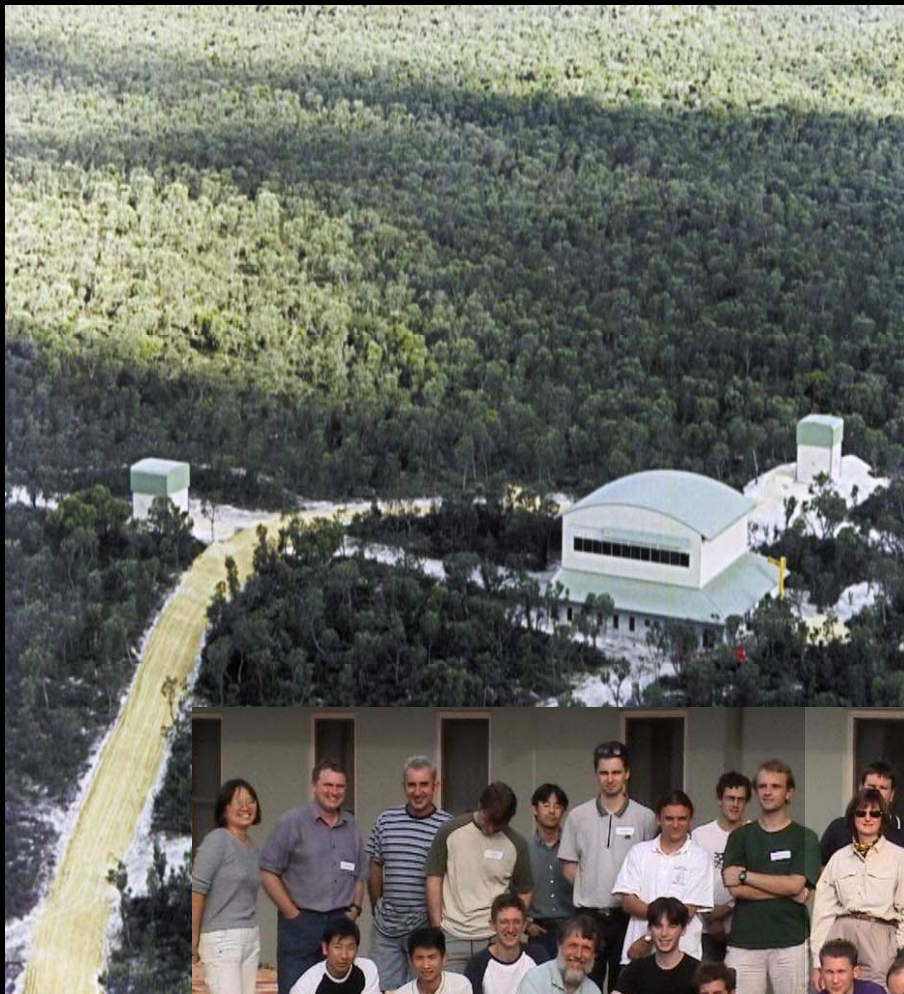
VIRGO

Technische Daten:

- Armlänge: 3000m
- Hochvakuum von $p = 10^{-12}$ bar



Australian International Gravitational Observatory



AIGO (opened in 2000) and Wallingup Plain



SITE PLAN

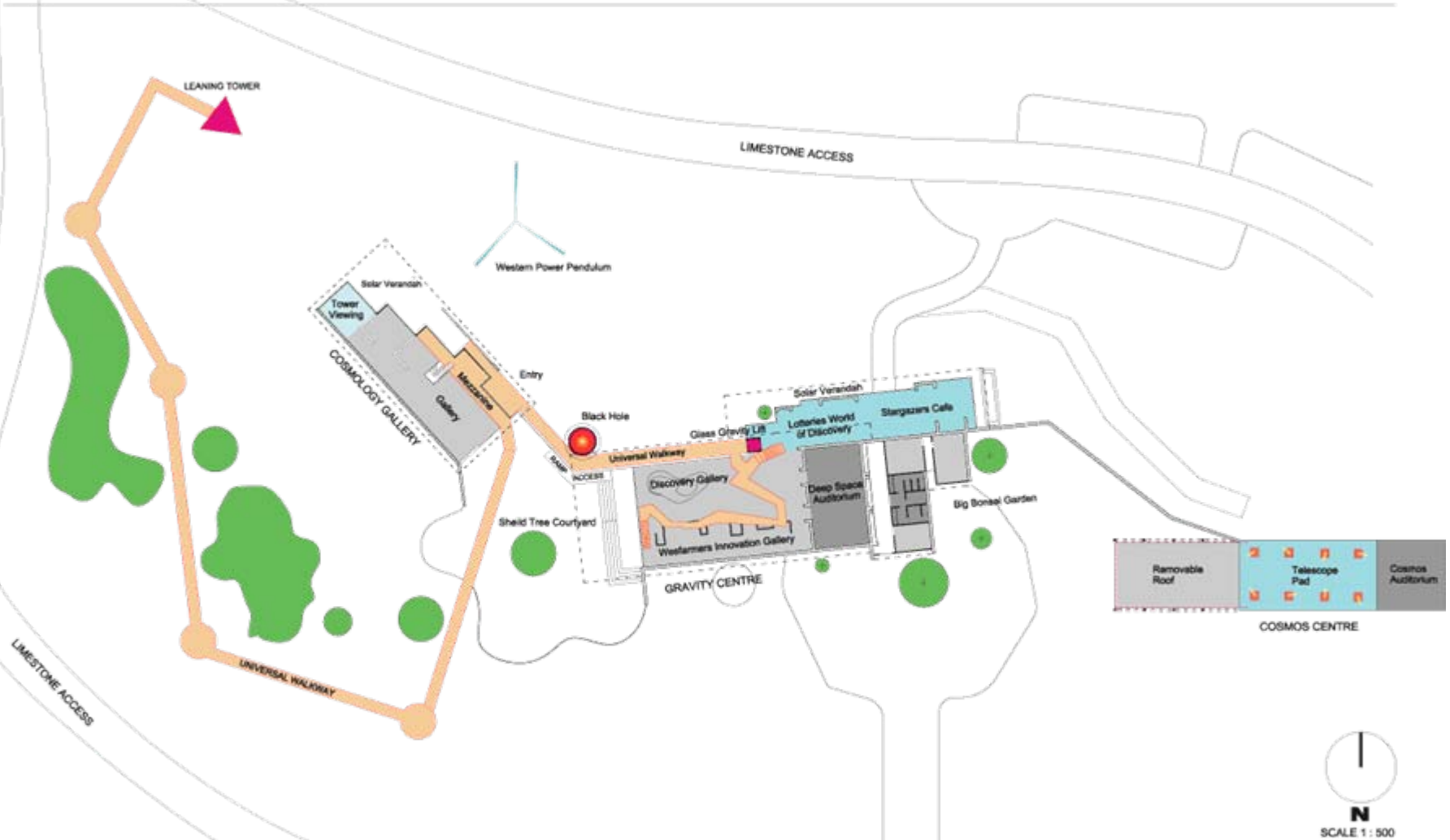


GRAVITY DISCOVERY CENTRE

gingin WESTERN AUSTRALIA

Gravity Discovery Centre

SITE PLAN



GRAVITY DISCOVERY CENTRE, GINGIN WA

TAMA 300

14. August 2000

höchste erreichte
Messempfindlichkeit:

$5 \cdot 10^{-21}$



TAMA

- Standort: Mitaka, Japan
- Projektstart 1995
- Als Prototyp für eine km-Anlage geplant
- Armlänge 300 m
- 10 W Laser
- April 03: 1158 h Daten mit einem duty cycle von 81.3%
- mittlerweile 9. Messreihe aufgezeichnet





Hauptraum

Vakuumröhren

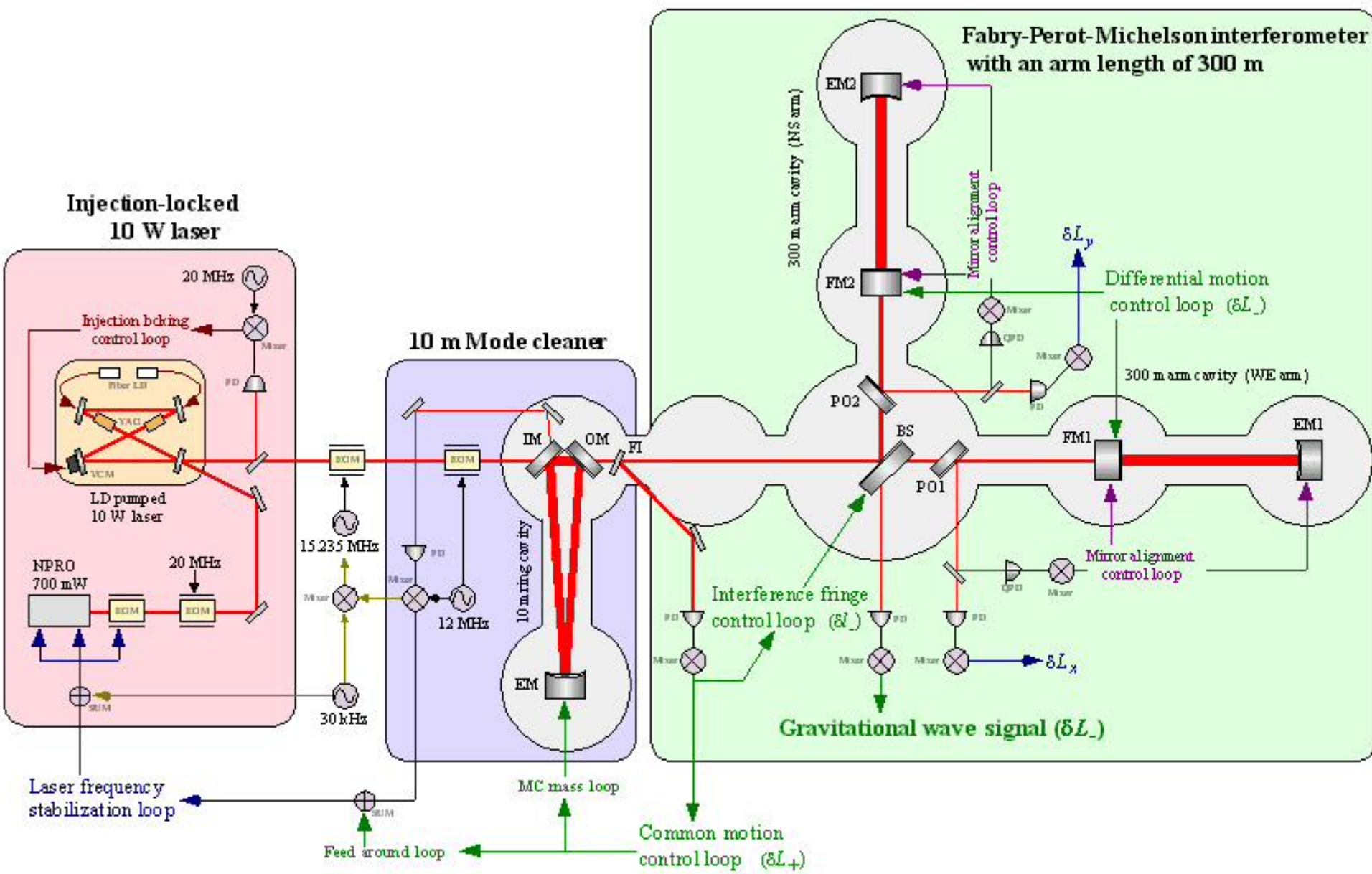


TAMA



MC:Mode Cleaner
RM:Recycling Mirror
BS:Beam splitter

Aufbau des optischen Systems



↑40kpc

1 Mpc

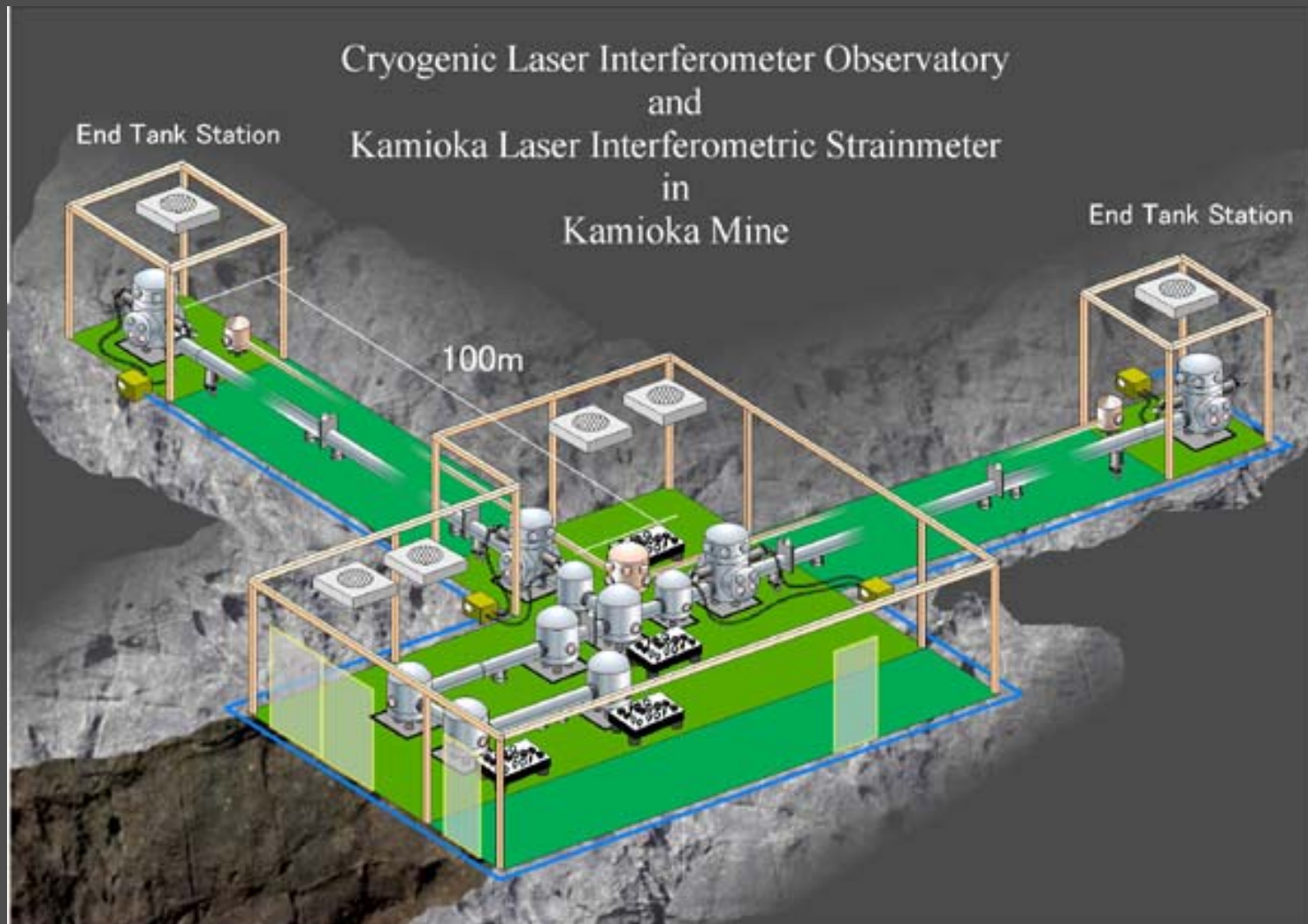
20Mpc

200Mpc

1.4-1.4 NS Binary
SN-10 Sensitivity2003/8
TAMA300

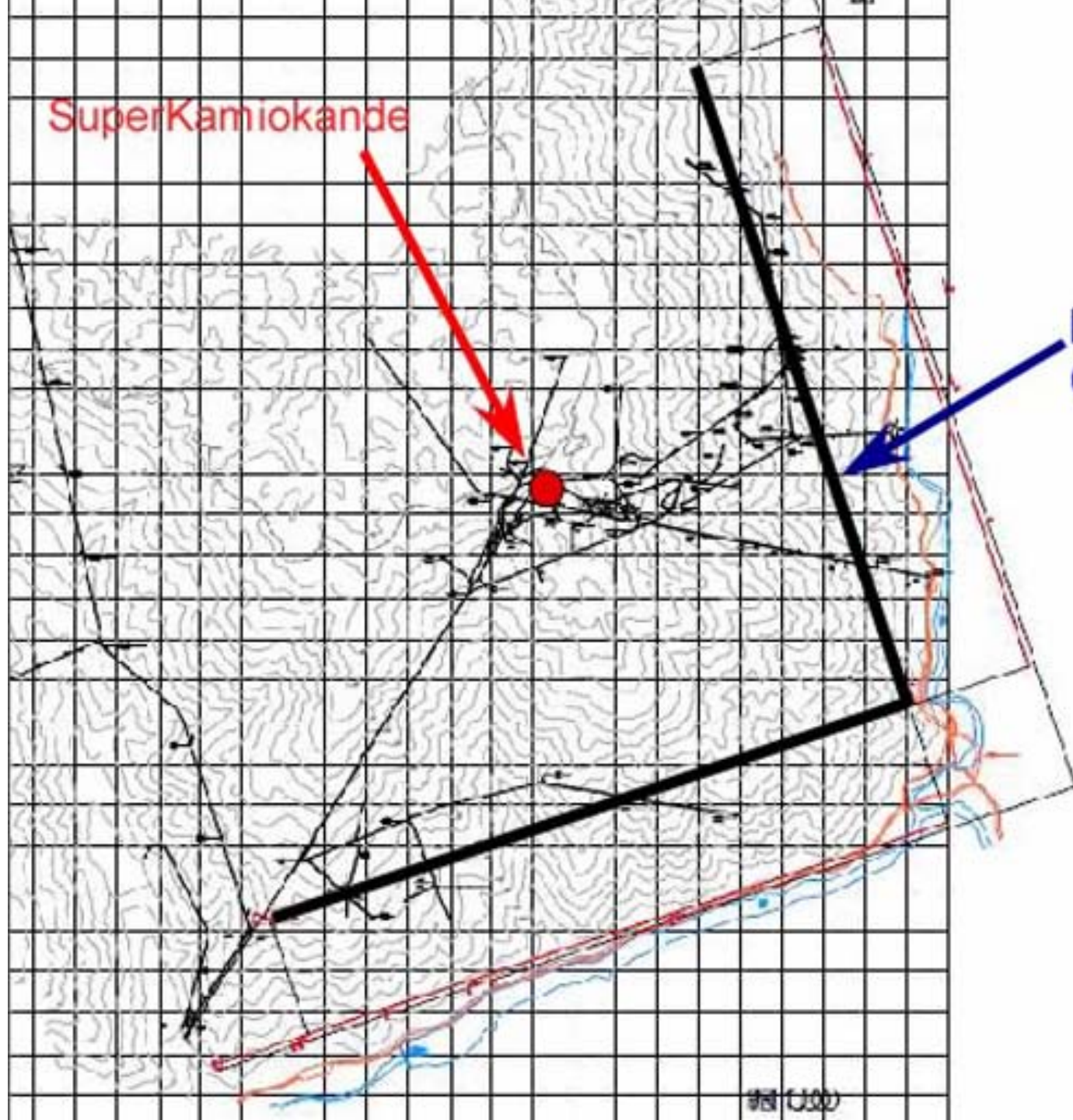
Gravitational Wave Group

Cryogenic Laser Interferometer Observatory and Kamioka Laser Interferometric Strainmeter in Kamioka Mine



SuperKamiokande

LCGT
(3km x 3km)

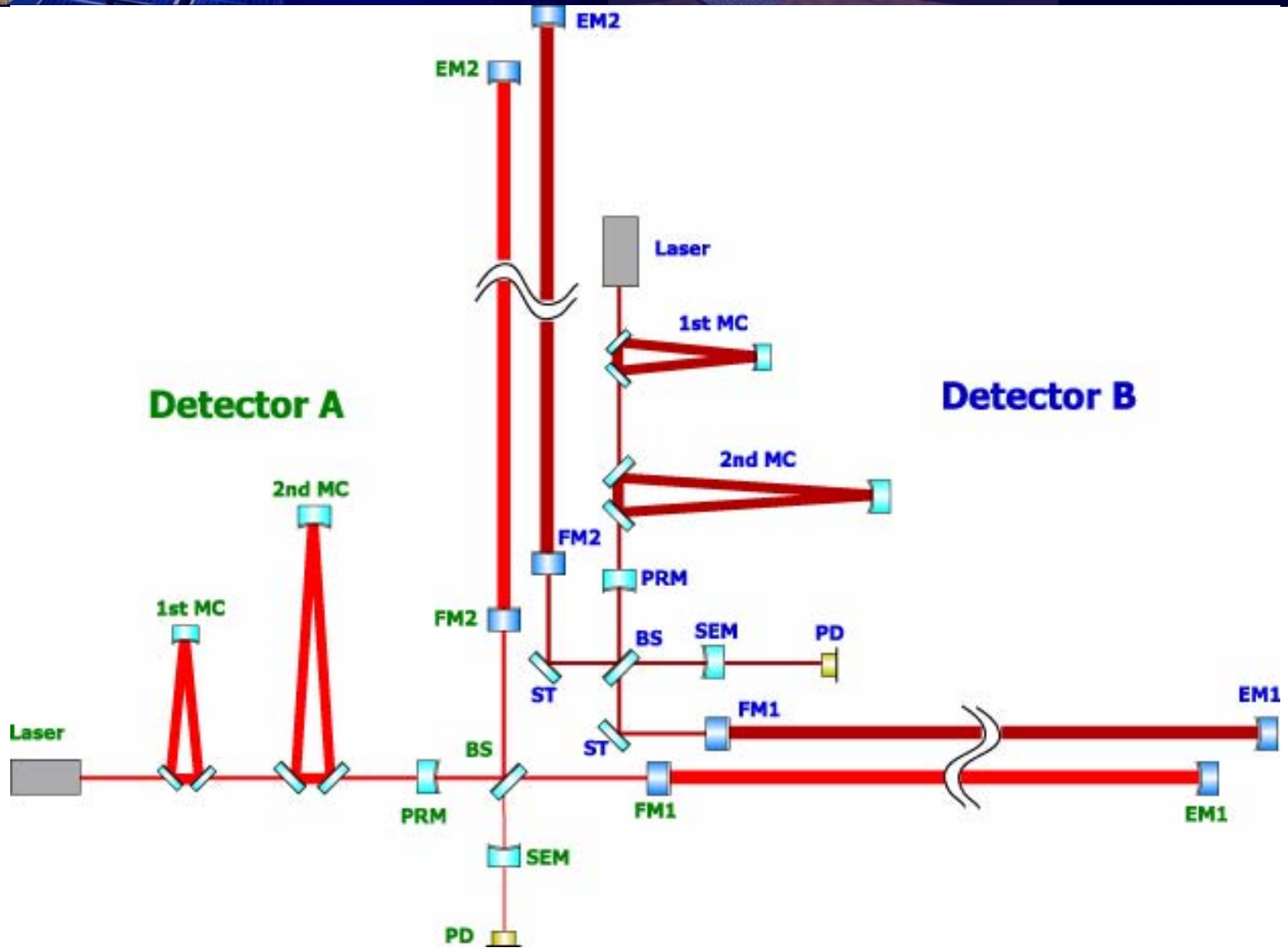




Gravitational Wave Group

- Vorgänger LISM (Laser-Interferometer gravitational-wave small observatory in a mine), 20 m aber 100 mal so empfindlich wie LIGO
- LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope), nächste Generation, 100 m Armlänge;
 - 200 m unter der Erde, zum Teil noch tiefer, kryogenische Spiegel (Saphir), 20 K, zwei parallele Interferometer installiert in derselben Vakuumröhre,

LCGT Konfiguration



Suspension system

Vacuum is common

SAS: three stages with inverted pendulum

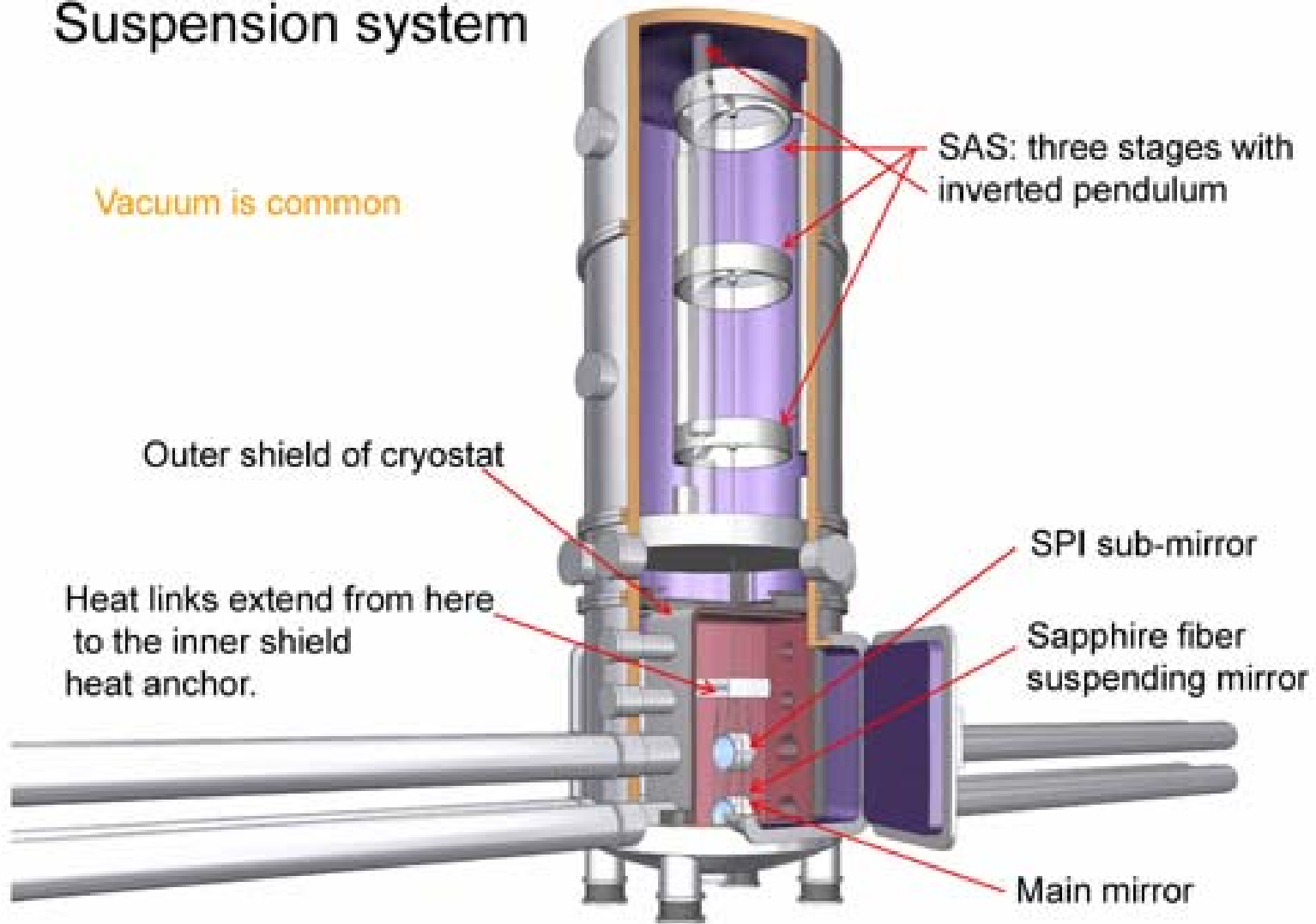
Outer shield of cryostat

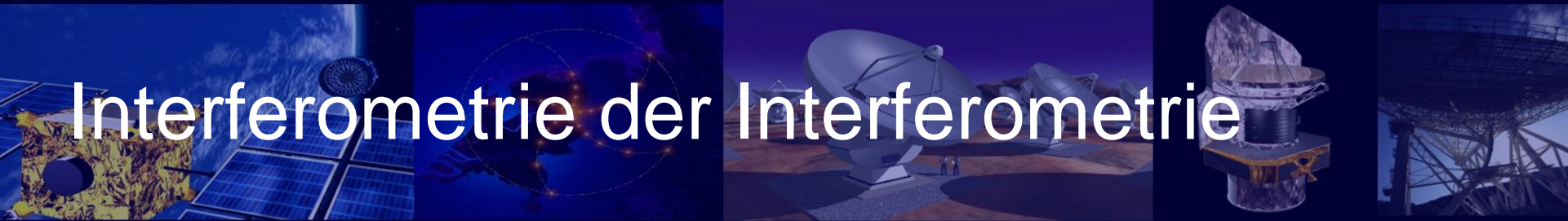
SPI sub-mirror

Heat links extend from here to the inner shield heat anchor.

Sapphire fiber suspending mirror

Main mirror





Interferometrie der Interferometrie

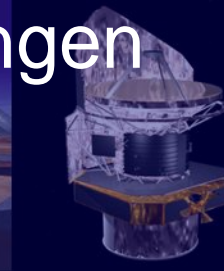
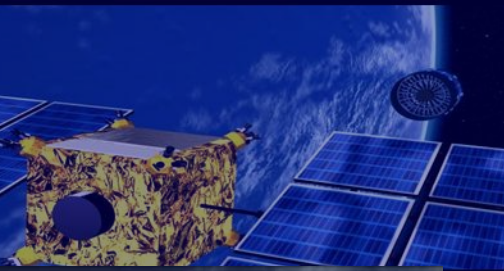
- Weltweites Netz:
 - In Koinzidenz mit einem weit entfernten Detektor kann man sicher sein, keinen lokalen Störungen aufgesessen zu sein
 - Um Informationen über den Ort der Quelle zu erlangen: dritte Anlage notwendig, um aus Ankunftszeiten der Welle die Richtung zu ermitteln
 - Vierter Detektor notwendig, um Zeitstruktur und Schwingungsform der Welle besser bestimmen zu können
- Daher: im Rahmen der „LIGO Scientific Collaboration“ (LSC) werden die Beobachtungszeiten abgestimmt, alle Messdaten ausgetauscht und ausgewertet sowie die Ergebnisse gemeinsam veröffentlicht
- Seit 2002 mehrere mehrwöchige Messperioden
- LIGO und GEO 600 haben Anfang 2006 geplante Empfindlichkeit erreicht und sind zu Dauermessungen übergegangen
- VIRGO will sich 2007 daran beteiligen
- Jeder kann sich an der Auswertung der Messdaten beteiligen, indem er im Rahmen des Projekts „Einstein@Home“ die nicht genutzte Kapazität des eigenen PCs dem LIGO-Rechenzentrum überlässt

Noch immer kein direkter Nachweis ...



- Bislang kein Nachweis von Gravitationswellen: beobachtbare Ereignisse in unserer Galaxis selten und die Empfindlichkeit für Signale aus Nachbargalaxien reicht gerade so aus
- Reichweite der Detektoren für die Beobachtung von Neutronensternsystemen liegt derzeit bei ca. 40 Mio Lichtjahren: einige Dutzend Galaxien
- Bis zum Jahr 2013 hofft man auf die nächste Generation der Detektoren, Empfindlichkeit soll dann um einen Faktor 10 verbessert werden; Beobachtungsvolumen hat sich dann um einen Faktor 1000 vergrößert

Multifrequenz-Beobachtungen in der Astronomie Wintersemester 2007/8



Themen & Daten

- 19.10.: Überblick
- 02.11.: Erste Ergebnisse der Durchmusterungen
- 16.11.: Hochenergie-Astronomie
- 30.11.: Update: Neue Teleskope
- 14.12.: Dunkles (Materie & Energie)
-

2008

- 11.01: Fortsetzung: Dunkles (Materie & Energie)
- 25.01.: Gravitationswellen & mehr
- **08.02.: GPS & die Erde**