

125 Jahre Physikalische Gesellschaft Zürich

29 September 2012

# GRAVITATIONSWELLEN: DEM UNIVERSUM ZUHÖREN!

Bernard Schutz

Albert-Einstein-Institut, Potsdam

School of Physics and Astronomy, Cardiff University

# DEM *RAUM* ZUHÖREN



# DEM *RAUM* ZUHÖREN

Analogien:



# DEM *RAUM* ZUHÖREN

Analogien:

- Wellen des Raums  $\sim$  Schallwellen

# DEM *RAUM* ZUHÖREN

Analogien:

- Wellen des Raums ~ Schallwellen
- Gravitationswellendetektoren ~ Mikrofone

# DEM *RAUM* ZUHÖREN

Analogien:

- Wellen des Raums ~ Schallwellen
- Gravitationswellendetektoren ~ Mikrofone
- Gravitationswellenastronomie ~ Gehörschutzstöpsel aus!

Das Universum  $\sim$  ein Dschungel, nur  
teilweise erforscht.







Und das Universum IST ein Dschungel!



# DIE SCHWERKRAFT SPRICHT...



# DIE SCHWERKRAFT SPRICHT...

- Für Isaac Newton war die Schwerkraft ein Sklave der Masse:
  - Bewegt sich ein Körper, so folgt das Schwerkraftfeld wie ein Starrkörper.
  - Egal wie weit entfernt, würden Sie die Bewegung *gleich* bemerken.

# DIE SCHWERKRAFT SPRICHT...

- Für Isaac Newton war die Schwerkraft ein Sklave der Masse:
  - Bewegt sich ein Körper, so folgt das Schwerkraftfeld wie ein Starrkörper.
  - Egal wie weit entfernt, würden Sie die Bewegung *gleich* bemerken.
- Einstein hat die Schwerkraft von ihren Quellen *befreit*:
  - Relativitätstheorie begrenzt die Geschwindigkeit von Einflüssen.
  - In der ART fließen Änderungen in der Schwerkraft mit Lichtgeschwindigkeit.

# DIE SCHWERKRAFT SPRICHT...

- Für Isaac Newton war die Schwerkraft ein Sklave der Masse:
  - Bewegt sich ein Körper, so folgt das Schwerkraftfeld wie ein Starrkörper.
  - Egal wie weit entfernt, würden Sie die Bewegung *gleich* bemerken.
- Einstein hat die Schwerkraft von ihren Quellen *befreit*:
  - Relativitätstheorie begrenzt die Geschwindigkeit von Einflüssen.
  - In der ART fließen Änderungen in der Schwerkraft mit Lichtgeschwindigkeit.
- Gravitationswellen sind nur winzige Störungen der existierenden Schwerkraftfeld.



# ... ABER ZUHÖREN – WARUM?



# ... ABER ZUHÖREN – WARUM?

- Die Quellen sind höchst interessant: schwarzen Löcher, Neutronensterne, ultra-kompakt binäre Systeme, der Urknall.

# ... ABER ZUHÖREN – WARUM?

- Die Quellen sind höchst interessant: schwarzen Löcher, Neutronensterne, ultra-kompakt binäre Systeme, der Urknall.
- Gravitationswellen durchdringen durch ALLES.
  - *Die sind unsere genaueste Botschafter.*

# ... ABER ZUHÖREN – WARUM?

- Die Quellen sind höchst interessant: schwarzen Löcher, Neutronensterne, ultra-kompakt binäre Systeme, der Urknall.
- Gravitationswellen durchdringen durch ALLES.
  - *Die sind unsere genaueste Botschafter.*
- Sie tragen in ihren Wellenformen ein, wie ganze Masse sich bewegen.
  - *Unsere Rückschlüsse über die Quellen sind sicherer.*

# ... ABER ZUHÖREN – WARUM?

- Die Quellen sind höchst interessant: schwarzen Löcher, Neutronensterne, ultra-kompakt binäre Systeme, der Urknall.
- Gravitationswellen durchdringen durch ALLES.
  - *Die sind unsere genaueste Botschafter.*
- Sie tragen in ihren Wellenformen ein, wie ganze Masse sich bewegen.
  - *Unsere Rückschlüsse über die Quellen sind sicherer.*
- Die physikalische Begründung:
  - Beide Vorteile folgen von eine Tatsache: für die Schwerkraft gibt es nur ein Art Ladung: die Masse ist immer positiv. In dem Elektromagnetismus ist es üblich das die positive und negative Ladungen einander nullen.

# GLAUBEN WIR AN DIESER GESCHICHTE?



# GLAUBEN WIR AN DIESER GESCHICHTE?

- Binäre Systeme: als die Sterne sich in ihre Umlaufbahnen bewegen, strahlen sie Gravitationswellen ab.

# GLAUBEN WIR AN DIESER GESCHICHTE?

- Binäre Systeme: als die Sterne sich in ihre Umlaufbahnen bewegen, strahlen sie Gravitationswellen ab.
- Diese Wellen tragen Energie und Drehimpuls ab, deren Verlust bringt die Sterne immer näher einander, immer schneller in Bewegung.

# GLAUBEN WIR AN DIESER GESCHICHTE?

- Binäre Systeme: als die Sterne sich in ihre Umlaufbahnen bewegen, strahlen sie Gravitationswellen ab.
- Diese Wellen tragen Energie und Drehimpuls ab, deren Verlust bringt die Sterne immer näher einander, immer schneller in Bewegung.
- **Michael Kramer** wird beschreiben, wie Binärpulsaren diese Effekte zeigen und damit die ART testen lassen.

# GLAUBEN WIR AN DIESER GESCHICHTE?

- Binäre Systeme: als die Sterne sich in ihre Umlaufbahnen bewegen, strahlen sie Gravitationswellen ab.
- Diese Wellen tragen Energie und Drehimpuls ab, deren Verlust bringt die Sterne immer näher einander, immer schneller in Bewegung.
- **Michael Kramer** wird beschreiben, wie Binärpulsaren diese Effekte zeigen und damit die ART testen lassen.
- Bottom line: die Gravitationswelleneffekte der ART sind mit besser als 0.1% Genauigkeit bestätigt!

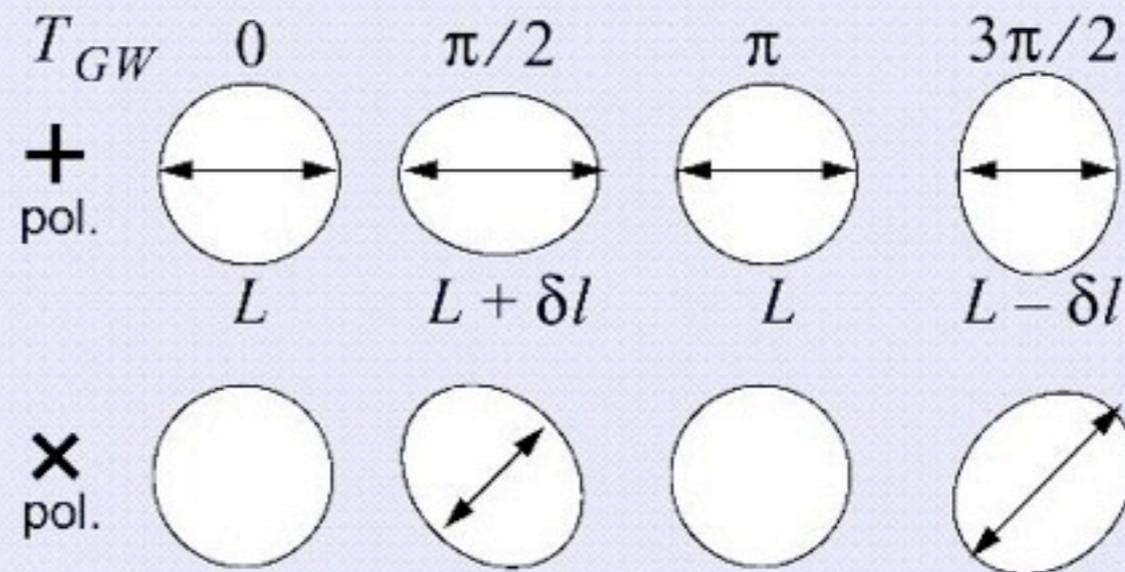
# WIE HÖREN WIR DIE WELLEN?



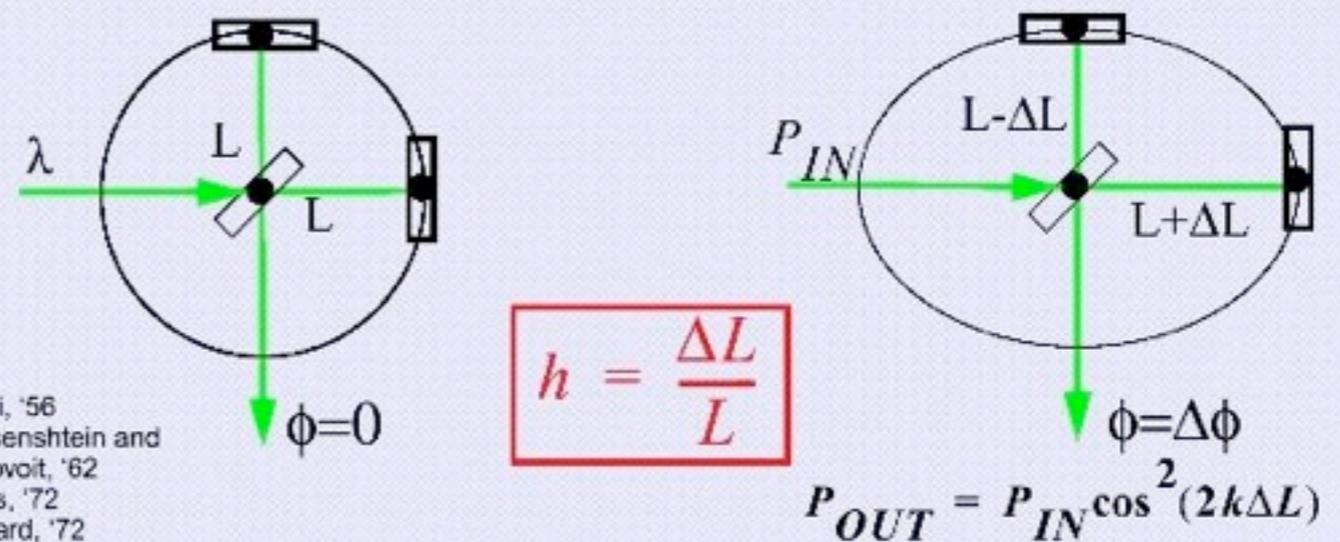
# WIE HÖREN WIR DIE WELLEN?

- GWs sind dynamische Schwerkraft.
- Die Kräfte sind quer zu die Fahrtrichtung.
- Wie Licht, gibt est mit GWs zwei Polarisationen.

## Two polarizations of GWs



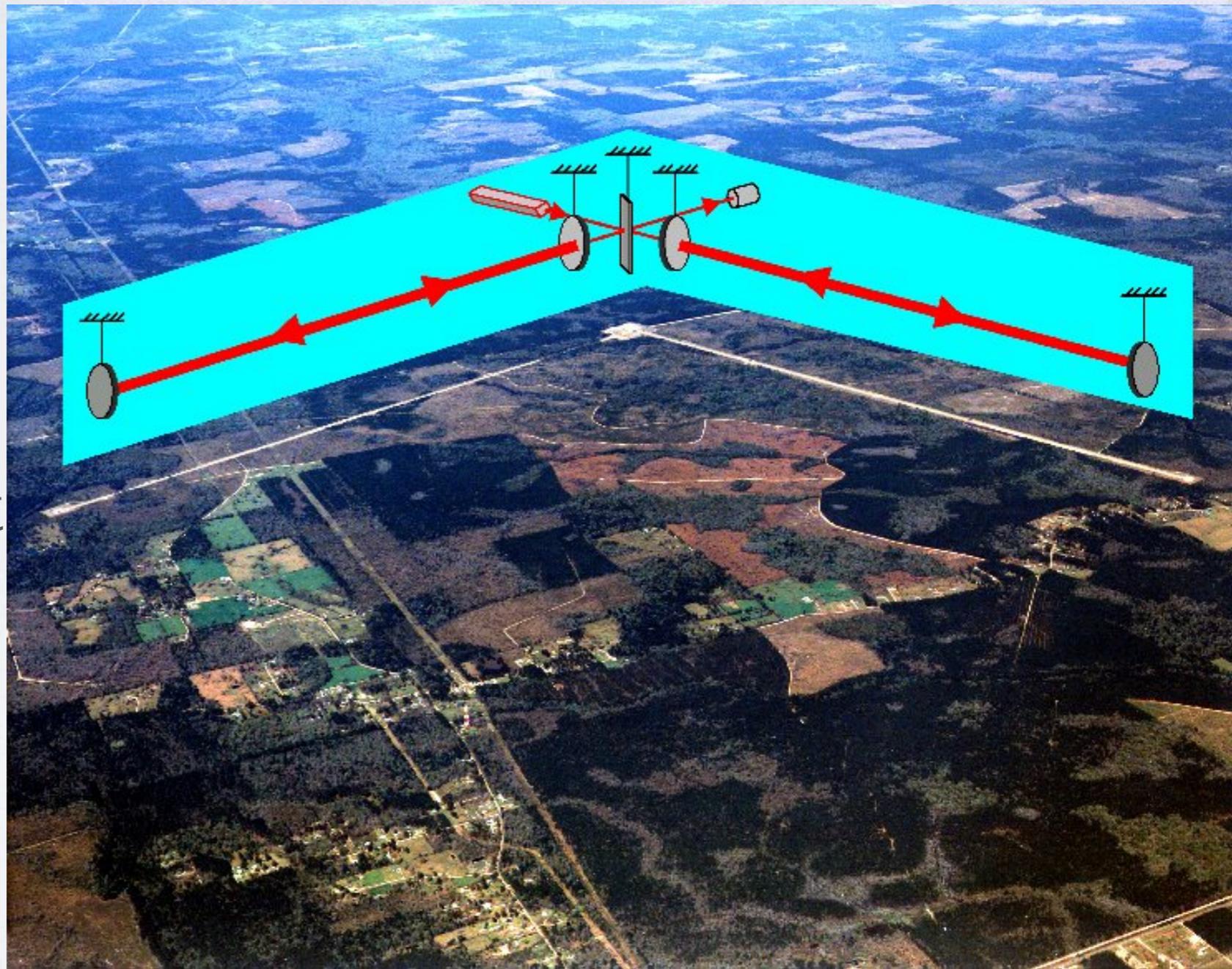
## Laser interferometer



Pirani, '56  
 Gertsenshtein and  
 Pustovoit, '62  
 Weiss, '72  
 Forward, '72

# WIE HÖREN WIR DIE WELLEN?

- GWs sind dynamische Schwerkraft.
  - Die Kräfte sind quer zu die Fahrtrichtung.
  - Wie Licht, gibt est mit GWs zwei Polarisationen.
- Ein Interferometer ist ideal als Detektor.



LIGO, Louisiana, USA: 4 km x 4 km

# INTERFEROMETER



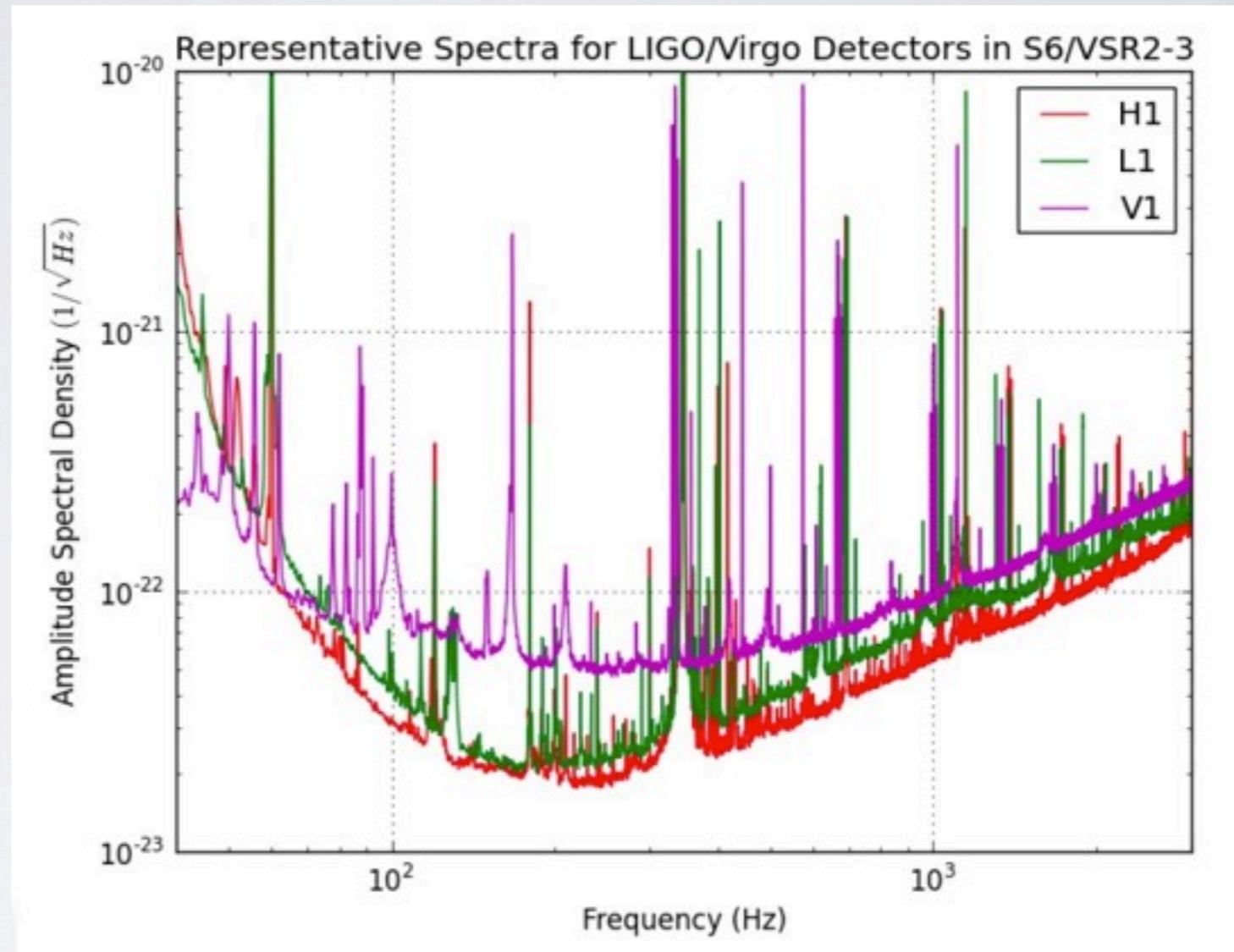
# INTERFEROMETER

- Technologie: schön,  
fundamental



# INTERFEROMETER

- Technologie: schön, fundamental
- Beispiel: thermische Rausch



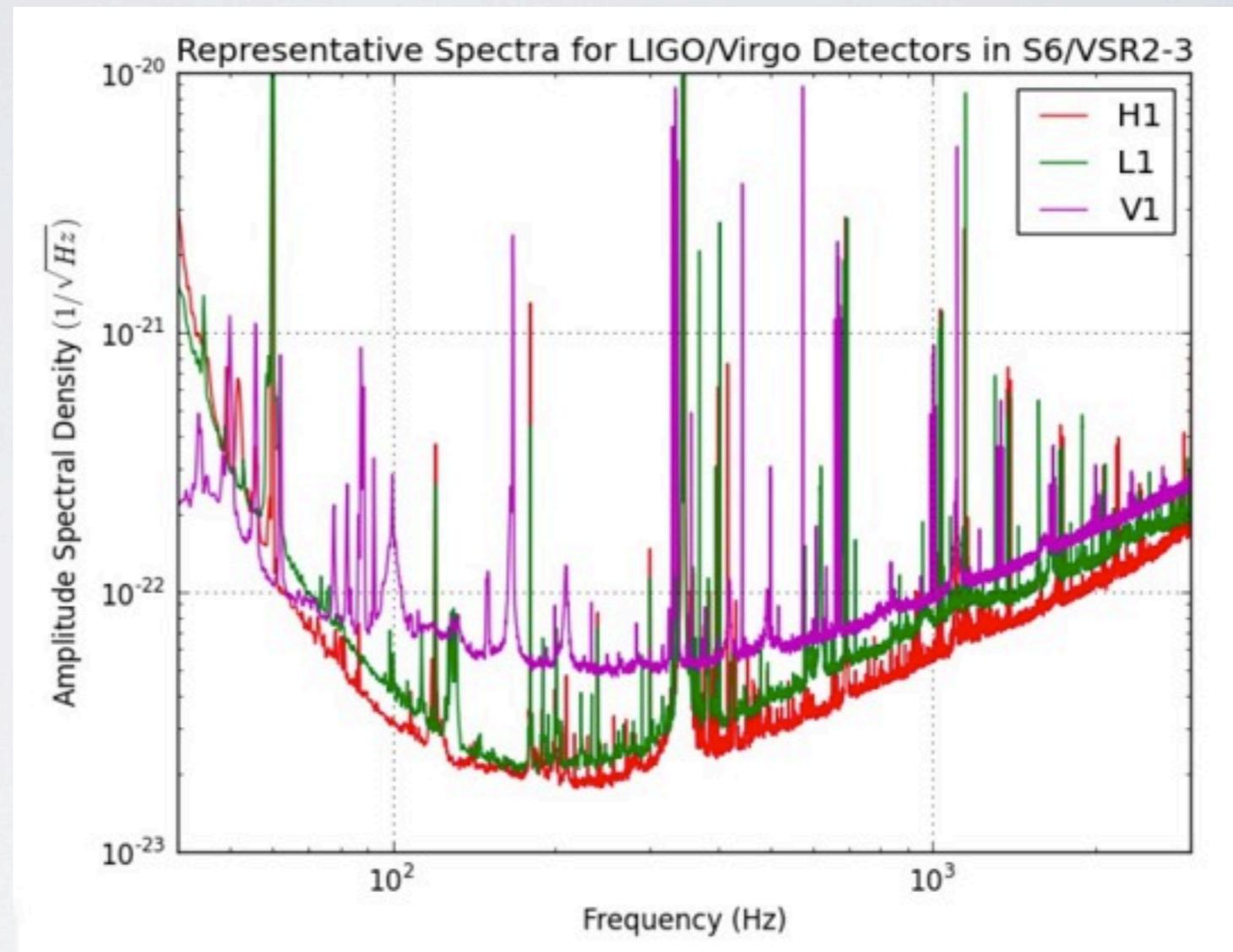
# INTERFEROMETER

- Technologie: schön, fundamental
- Beispiel: thermische Rausch

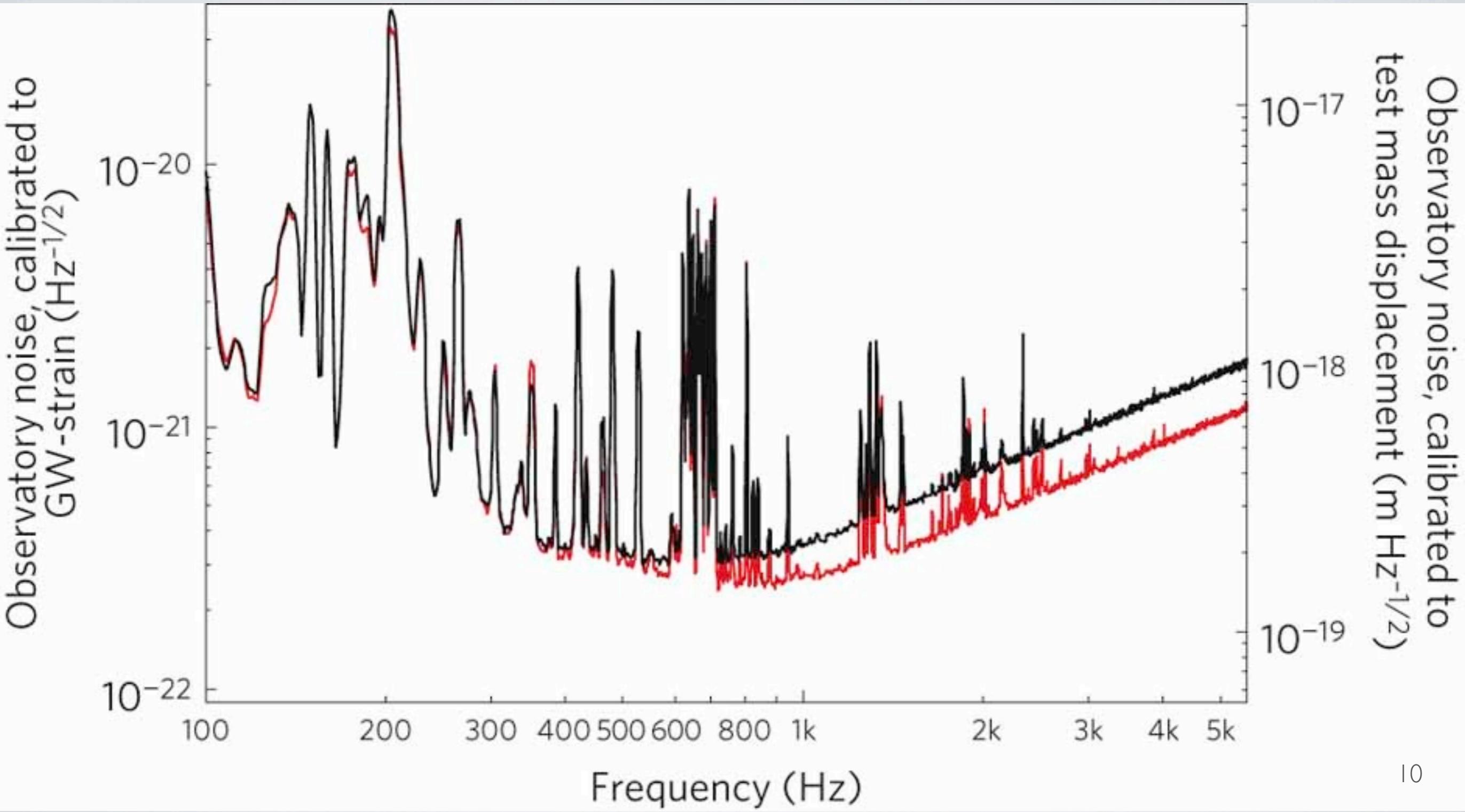


# INTERFEROMETER

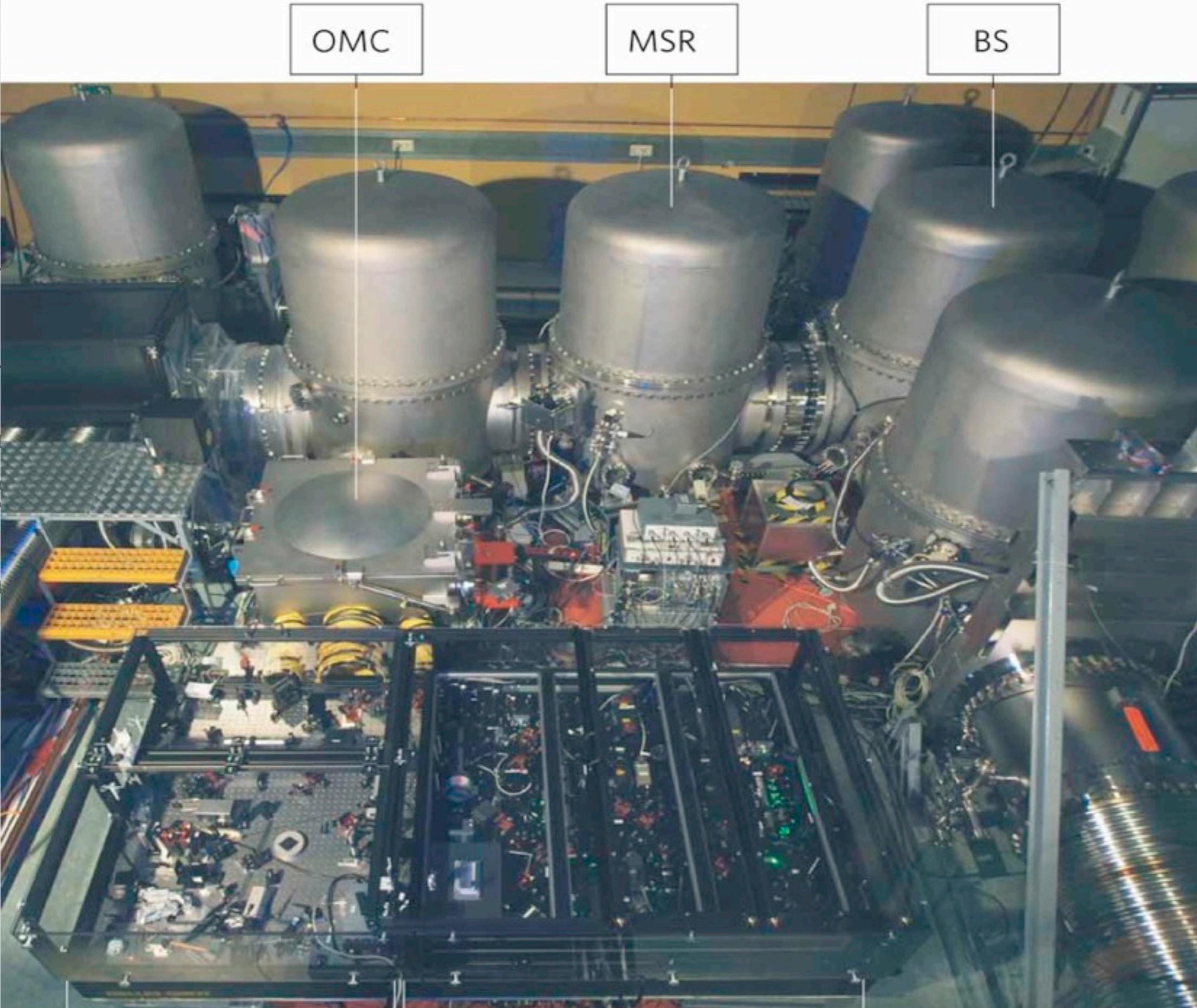
- Technologie: schön, fundamental
- Beispiel: thermische Rausch
- Beispiel: squeezing



# INTERFEROMETER



- T
- fu
- B
- R
- B



OMC

MSR

BS

Squeezing injection

Squeezed light source

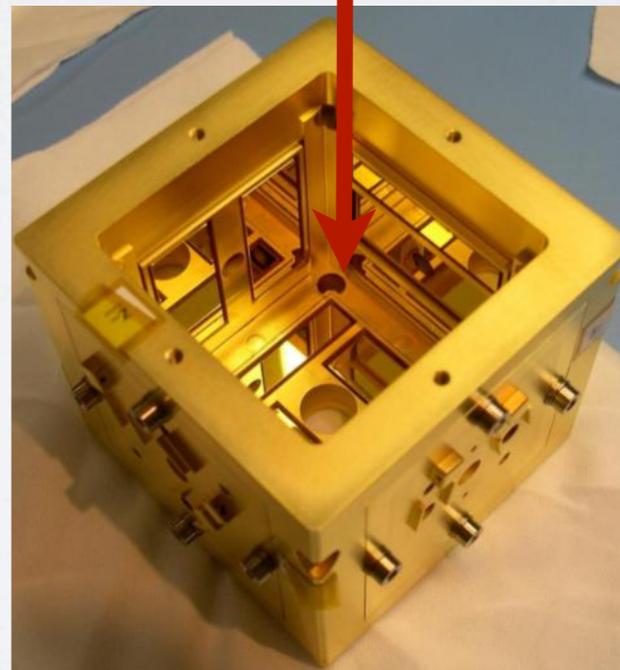
600 m tube



B  
A

# INTERFEROMETER

- Technologie: schön, fundamental
- Beispiel: thermische Rausch
- Beispiel: squeezing
- Ruhigste Stelle in dem Sonnensystem: LISA Pathfinder.



# INTERFEROMETER

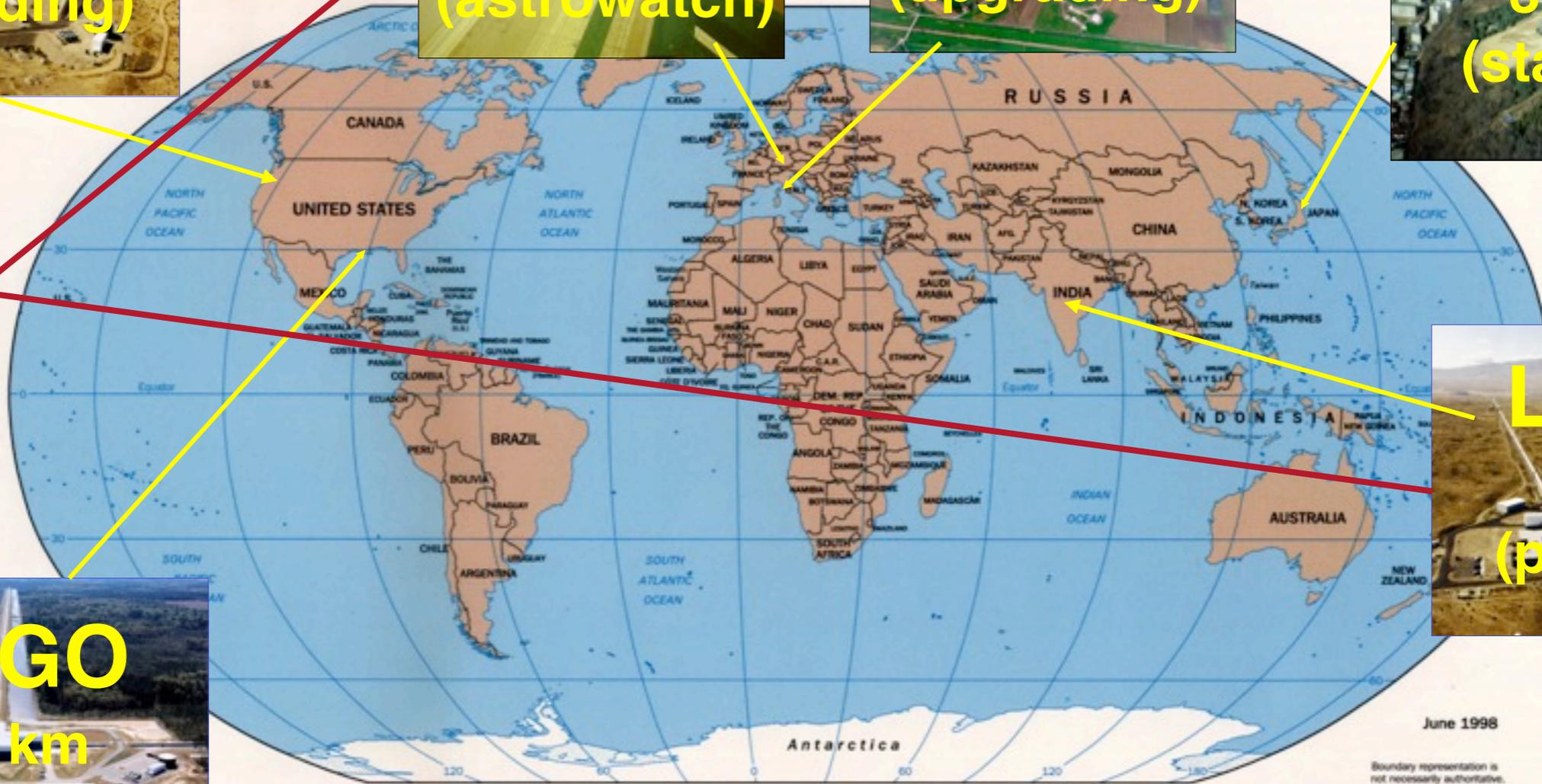
- Technologie: schön, fundamental
- Beispiel: thermische Rausch
- Beispiel: squeezing
- Ruhigste Stelle in dem Sonnensystem: LISA Pathfinder.
- 3G Technologien



# GLOBALES NETZ



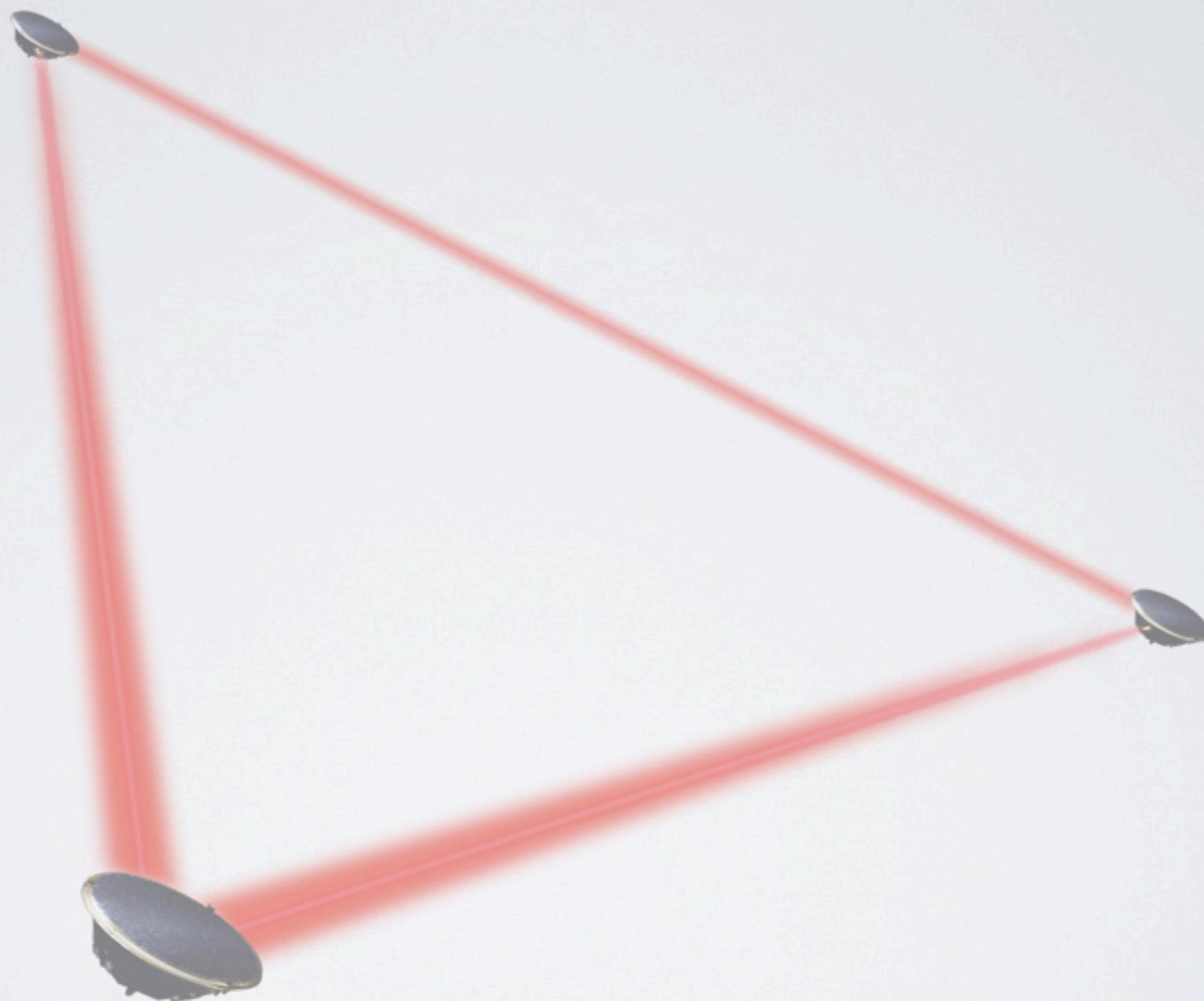
LSC



June 1998  
Boundary representation is not necessarily authoritative.  
802599 (R00352) 6-98



# DETEKTOR IM WELTALL



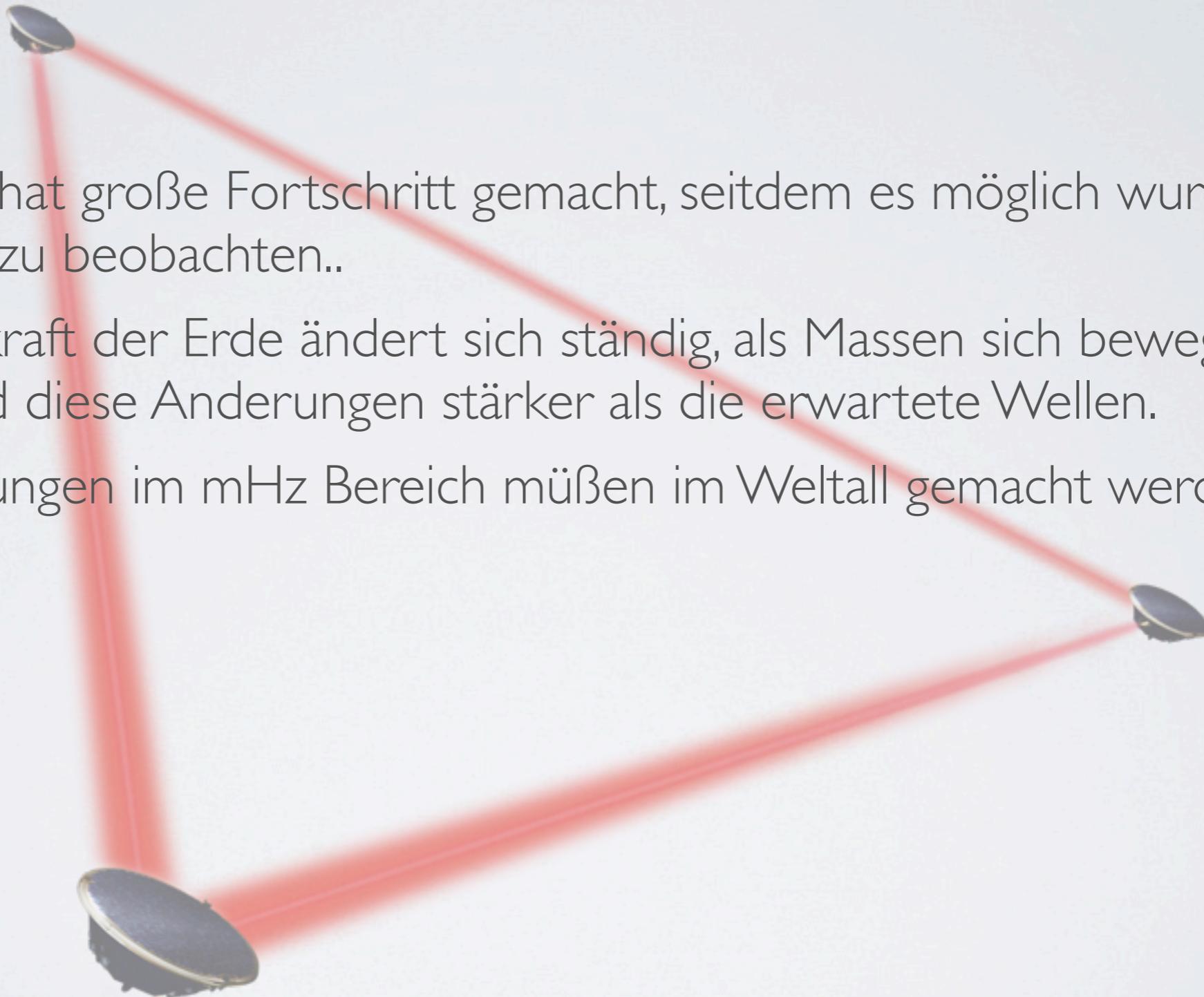
# DETEKTOR IM WELTALL

- Astronomie hat große Fortschritt gemacht, seitdem es möglich wurde, aus dem Weltall zu beobachten..



# DETEKTOR IM WELTALL

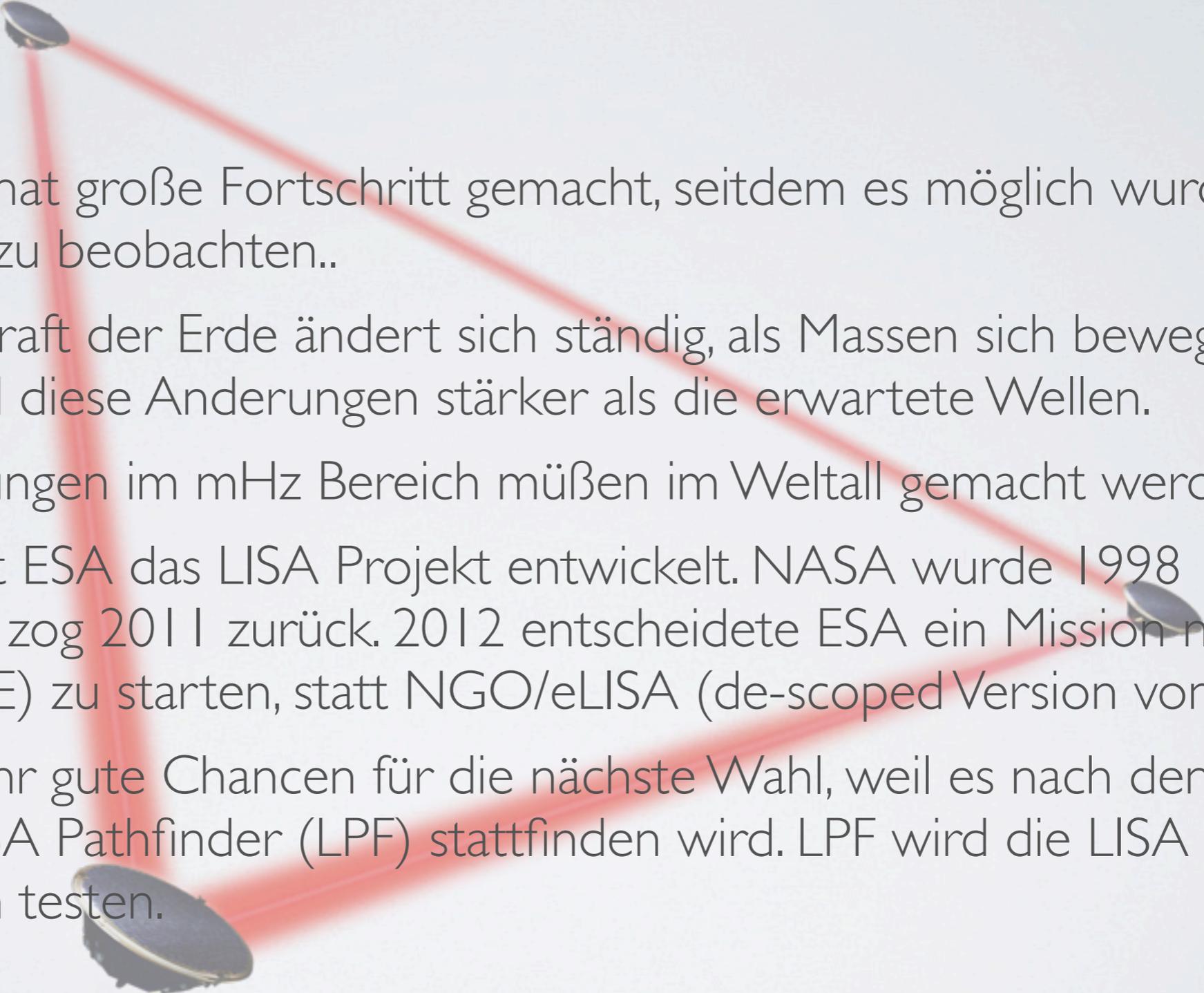
- Astronomie hat große Fortschritt gemacht, seitdem es möglich wurde, aus dem Weltall zu beobachten..
- Die Schwerkraft der Erde ändert sich ständig, als Massen sich bewegen. Bei  $f < 1$  Hz sind diese Änderungen stärker als die erwartete Wellen.
  - Beobachtungen im mHz Bereich müssen im Weltall gemacht werden.



# DETEKTOR IM WELTALL

- Astronomie hat große Fortschritt gemacht, seitdem es möglich wurde, aus dem Weltall zu beobachten..
- Die Schwerkraft der Erde ändert sich ständig, als Massen sich bewegen. Bei  $f < 1$  Hz sind diese Änderungen stärker als die erwartete Wellen.
  - Beobachtungen im mHz Bereich müssen im Weltall gemacht werden.
- Seit 1995 hat ESA das LISA Projekt entwickelt. NASA wurde 1998 Partner, aber zog 2011 zurück. 2012 entschiedete ESA ein Mission nach Jupiter (JUICE) zu starten, statt NGO/eLISA (de-scoped Version von LISA).

# DETEKTOR IM WELTALL



- Astronomie hat große Fortschritt gemacht, seitdem es möglich wurde, aus dem Weltall zu beobachten..
- Die Schwerkraft der Erde ändert sich ständig, als Massen sich bewegen. Bei  $f < 1$  Hz sind diese Änderungen stärker als die erwartete Wellen.
  - Beobachtungen im mHz Bereich müssen im Weltall gemacht werden.
- Seit 1995 hat ESA das LISA Projekt entwickelt. NASA wurde 1998 Partner, aber zog 2011 zurück. 2012 entschiedete ESA ein Mission nach Jupiter (JUICE) zu starten, statt NGO/eLISA (de-scoped Version von LISA).
- eLISA hat sehr gute Chancen für die nächste Wahl, weil es nach den Start 2014 von LISA Pathfinder (LPF) stattfinden wird. LPF wird die LISA Technologien testen.

# GW VON PULSAR TIMING



# GW VON PULSAR TIMING

- Ultra-niedrige Frequenzen (nHz) lassen sich mit Pulsaren beobachten.
  - 3 Projekte: PPTA (Australien), NANOgrav (USA), EPTA (Europa).

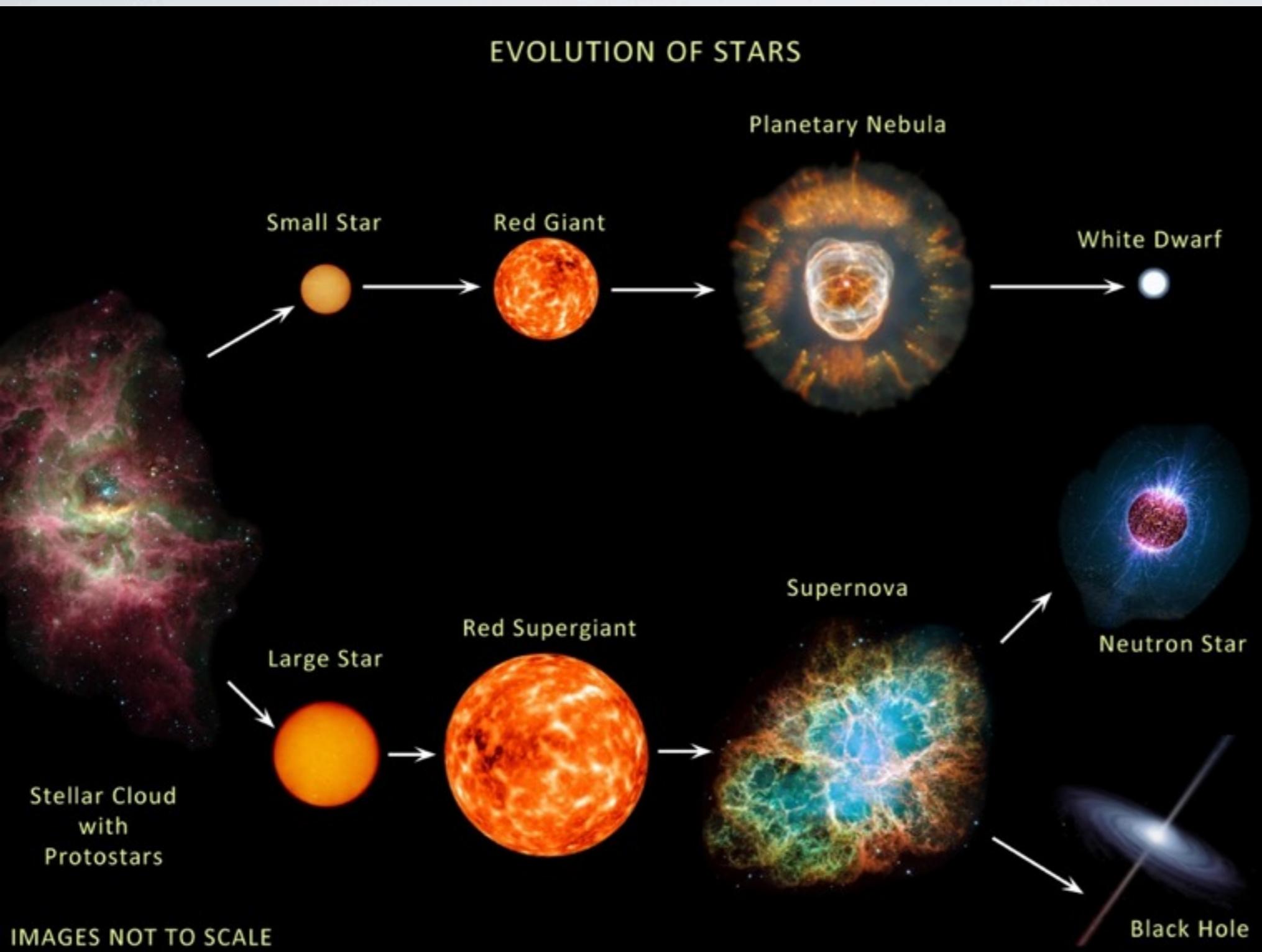
# GW VON PULSAR TIMING

- Ultra-niedrige Frequenzen (nHz) lassen sich mit Pulsaren beobachten.
  - 3 Projekte: PPTA (Australien), NANOgrav (USA), EPTA (Europa).
- Die suchen die stochastische Wellen von Millionen von supermassiven binären schwarzen Löcher.

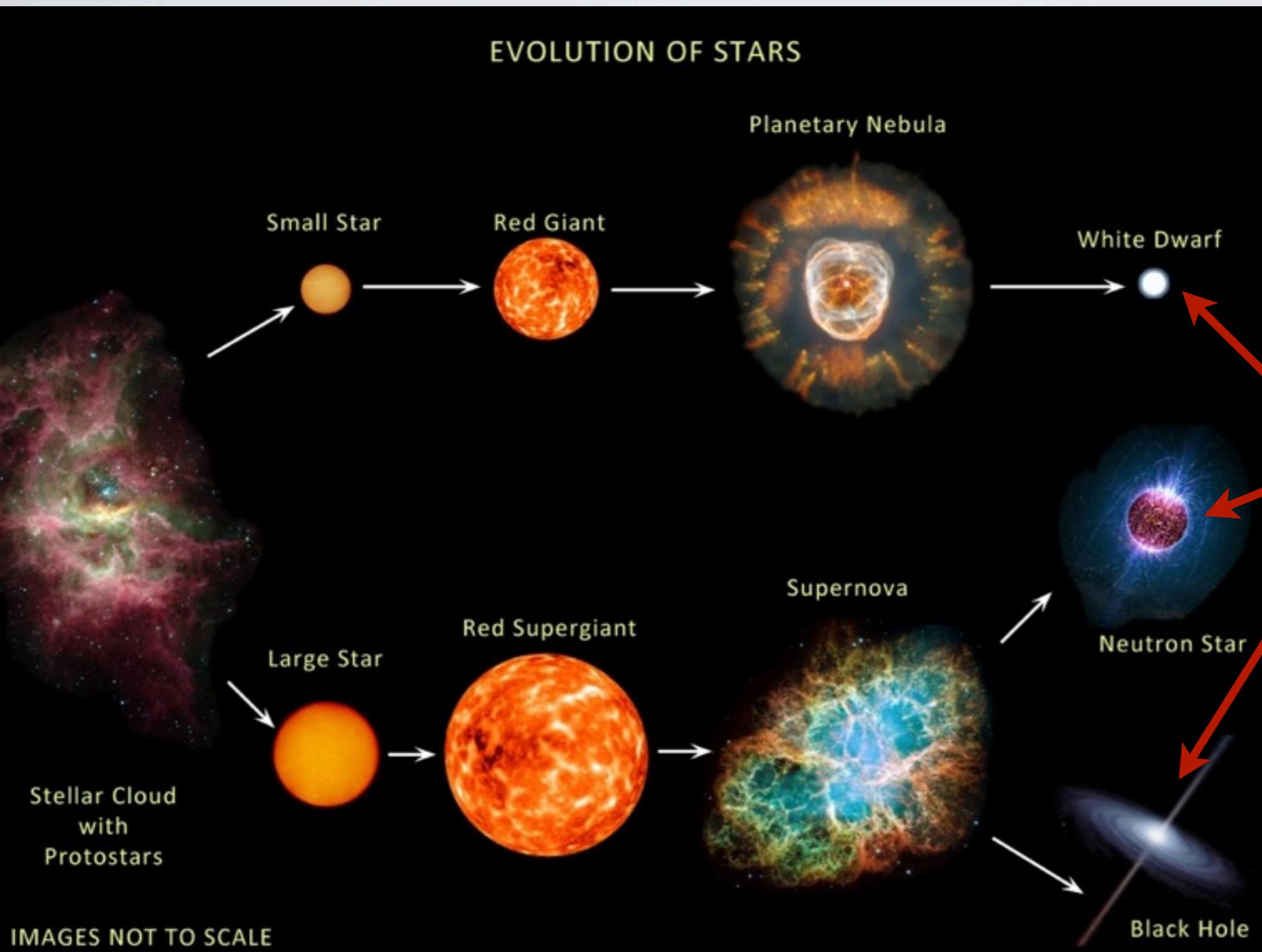
# GW VON PULSAR TIMING

- Ultra-niedrige Frequenzen (nHz) lassen sich mit Pulsaren beobachten.
  - 3 Projekte: PPTA (Australien), NANOgrav (USA), EPTA (Europa).
- Die suchen die stochastische Wellen von Millionen von supermassiven binären schwarzen Löcher.
- Erste Beobachtungen können 2015-20 gelingen.

# DER DRSCHUNGEL: DIE GEBURT DER KLEINEN



# DER DRSCHUNGEL: DIE GEBURT DER KLEINEN

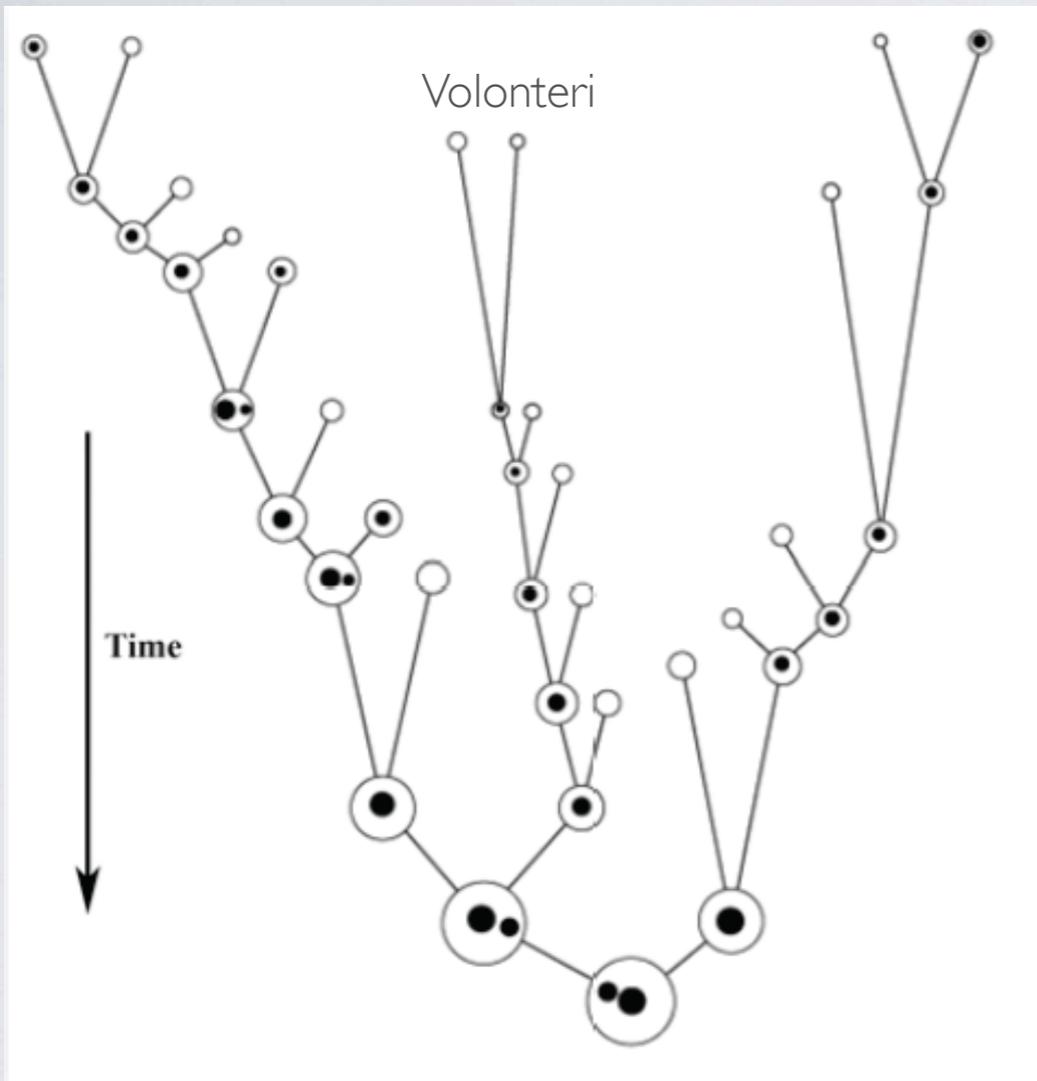


- Starke Schwerkraft
- Hohe Geschwindigkeit
- Wenig oder gar kein Lichtausstrahlung
- Beobachtungen mit GW, Röntgen, Gamma

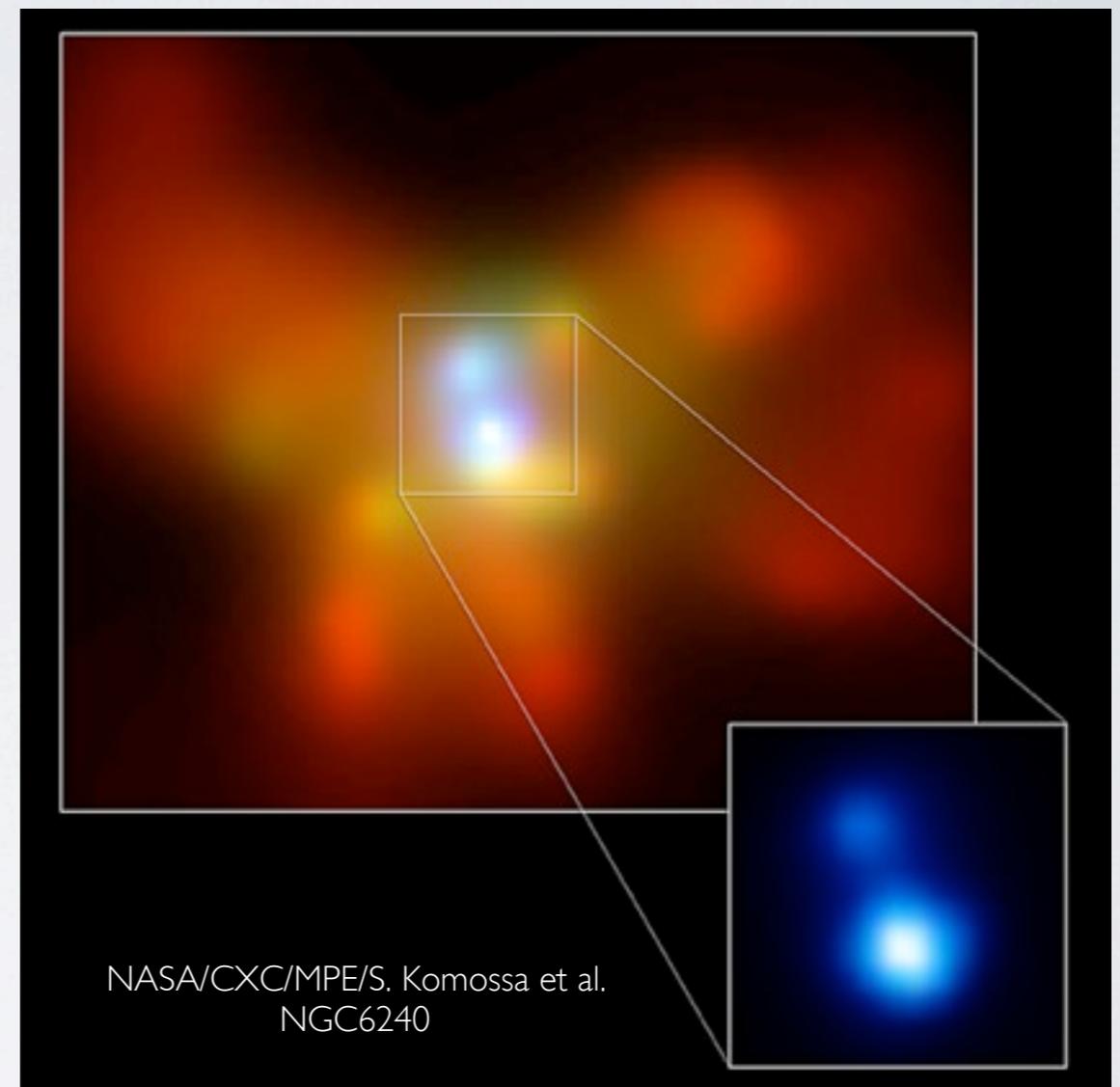
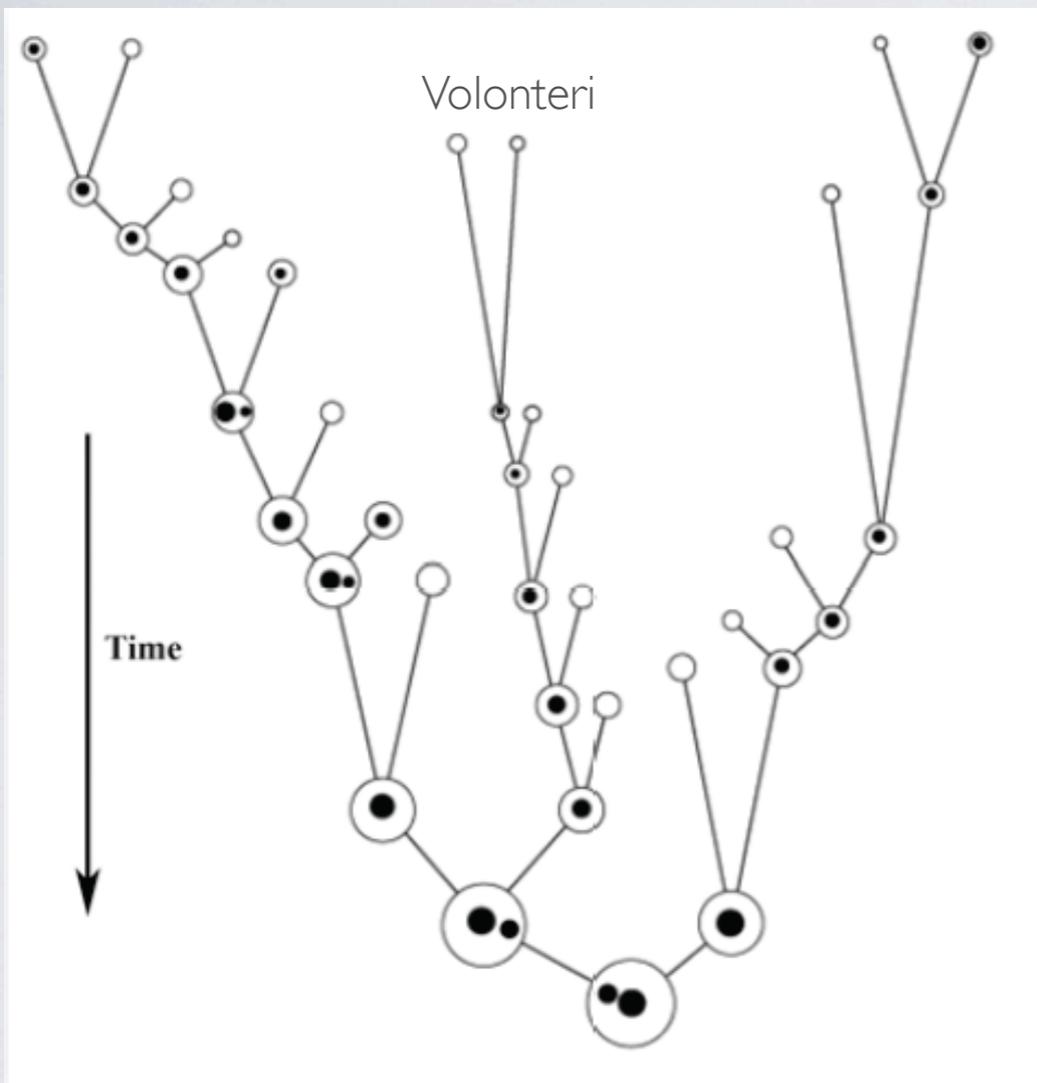
# DER DRSCHUNGEL: DIE GROSSE KERLS



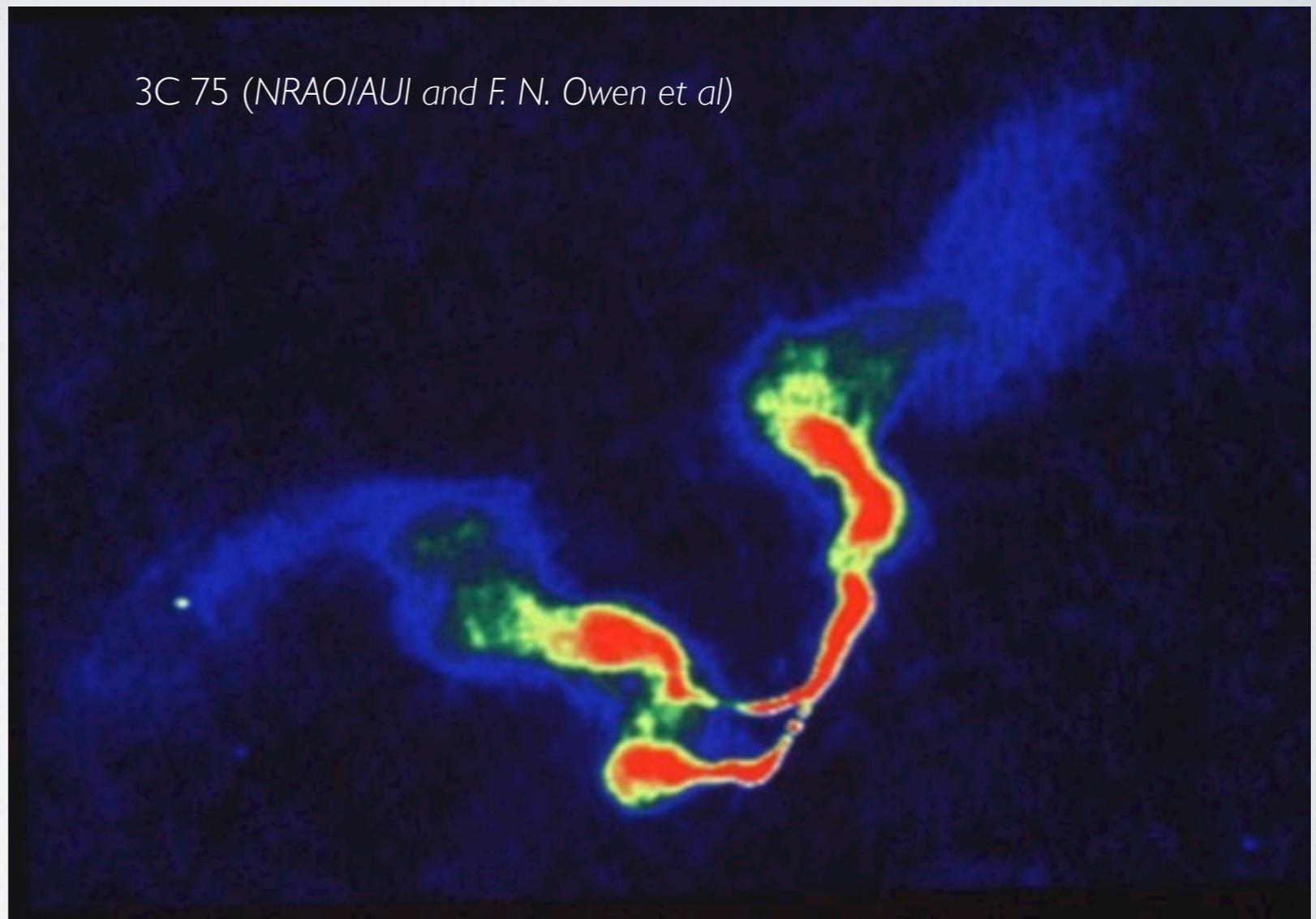
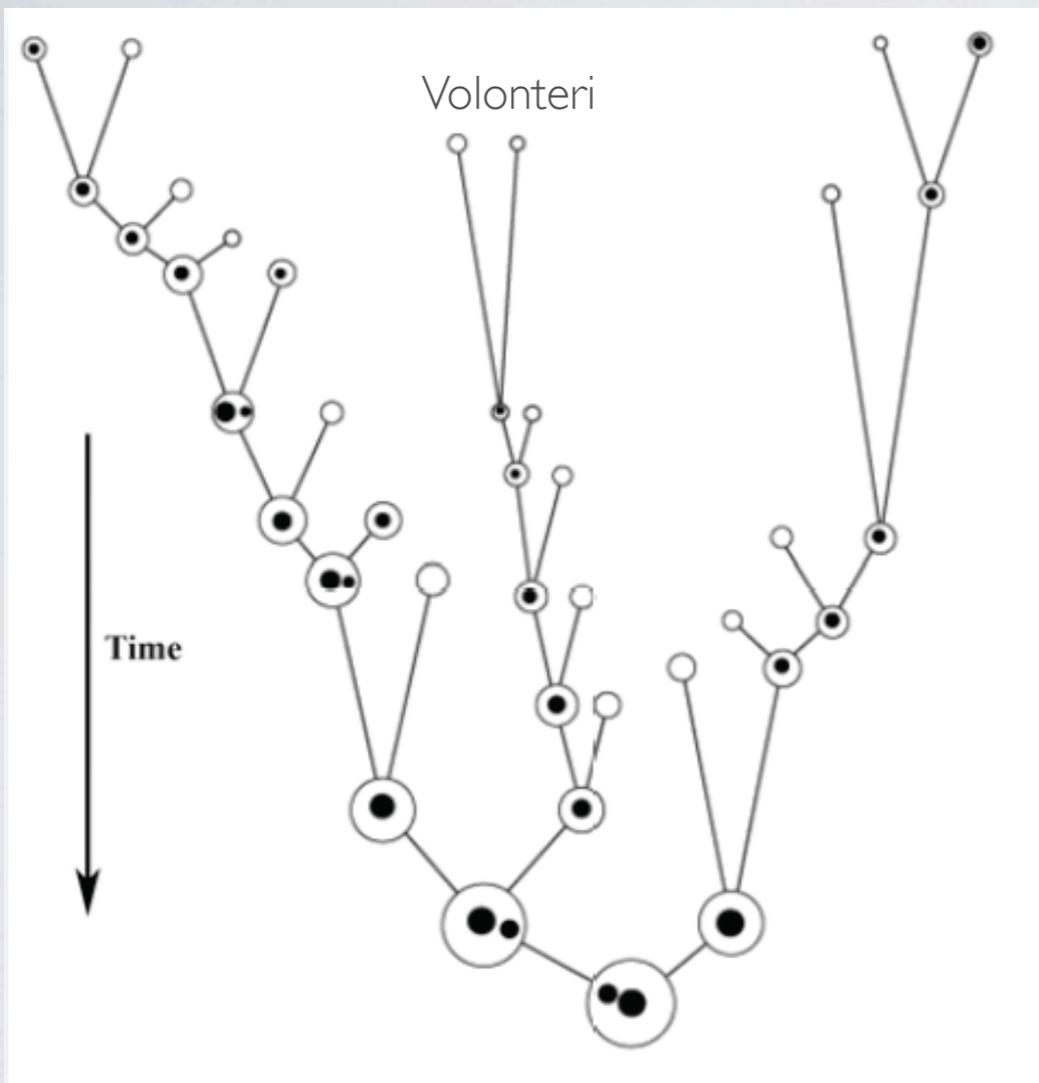
# DER DRSCHUNGEL: DIE GROSSE KERLS



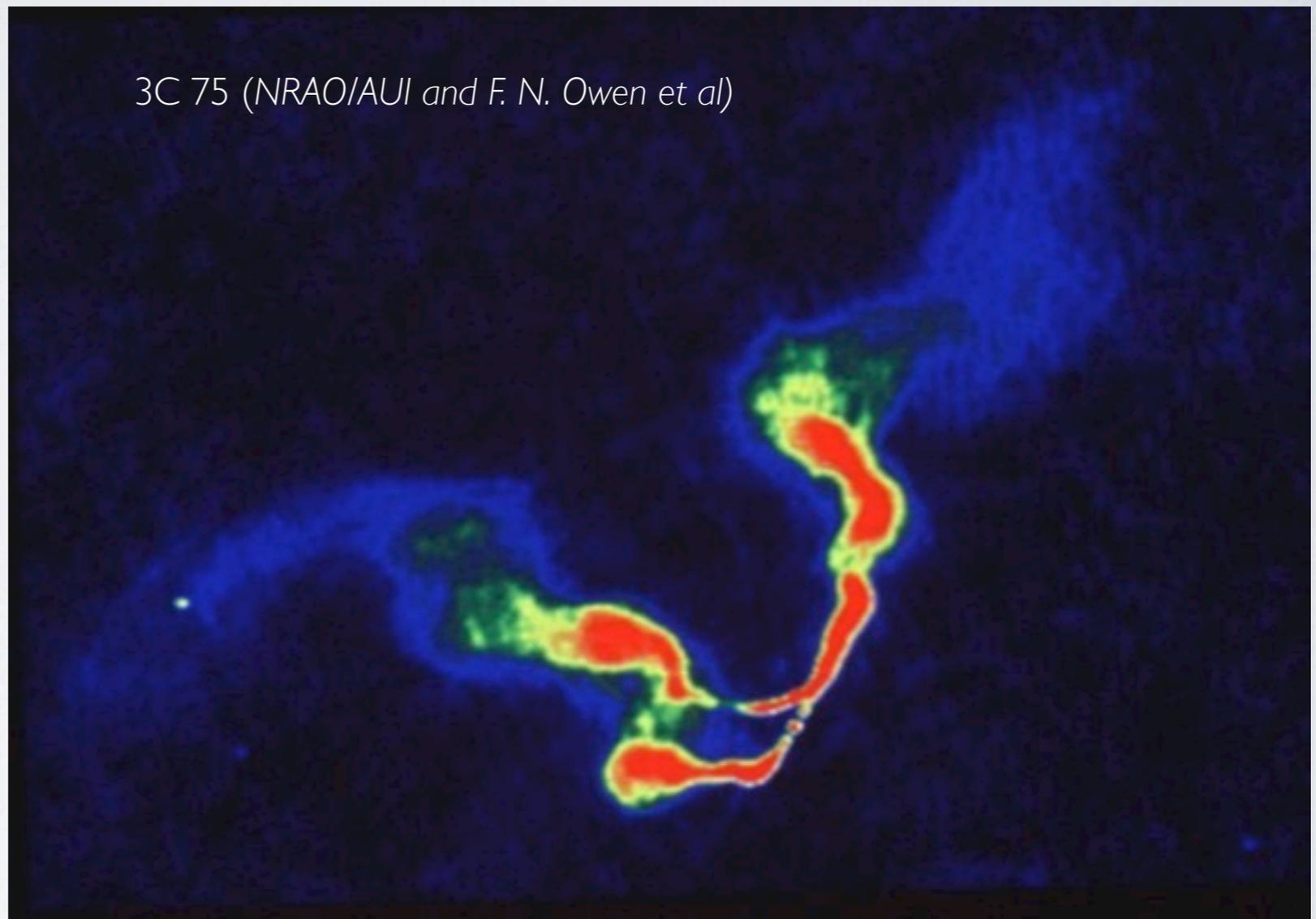
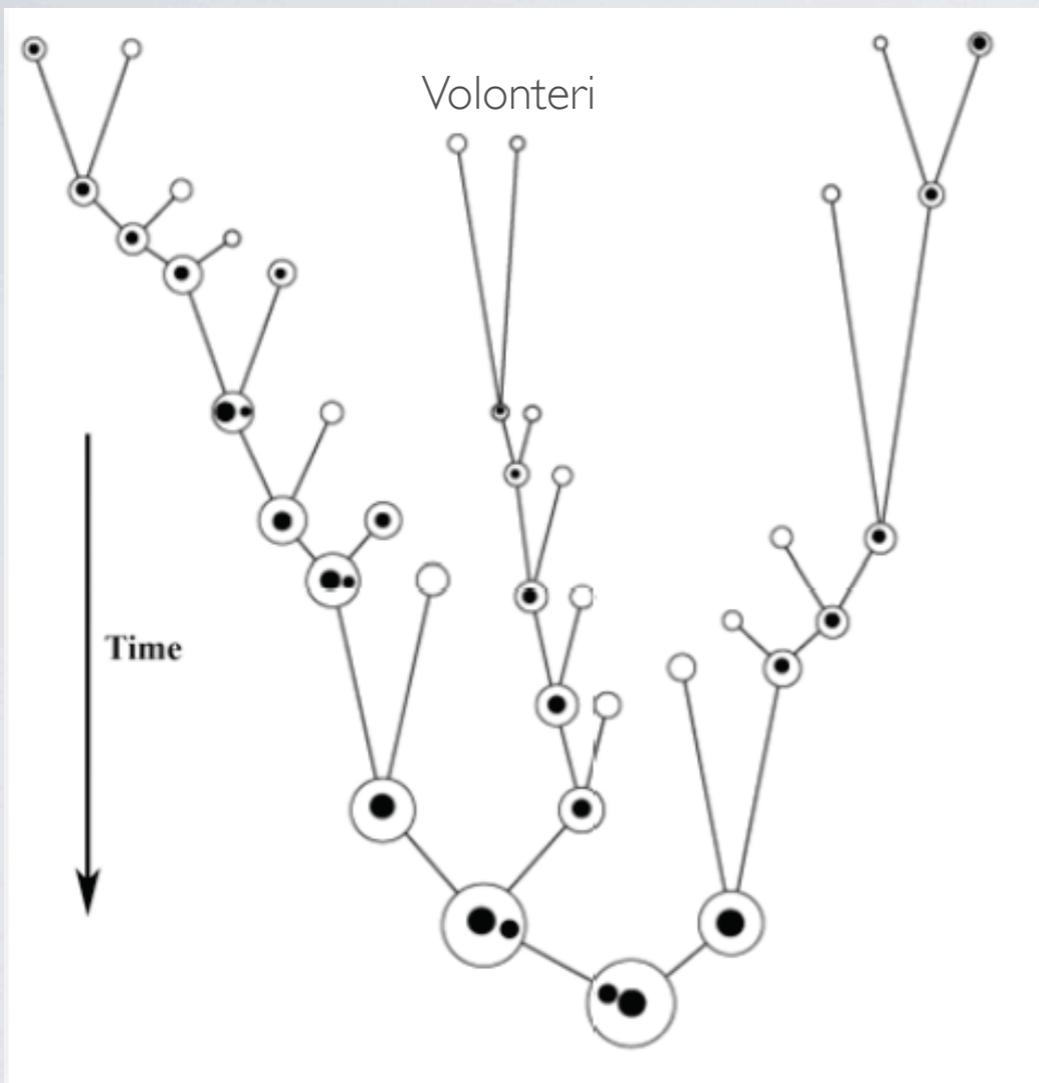
# DER DSCHUNGEL: DIE GROSSE KERLS



# DER DRSCHUNGEL: DIE GROSSE KERLS



# DER DRSCHUNGEL: DIE GROSSE KERLS



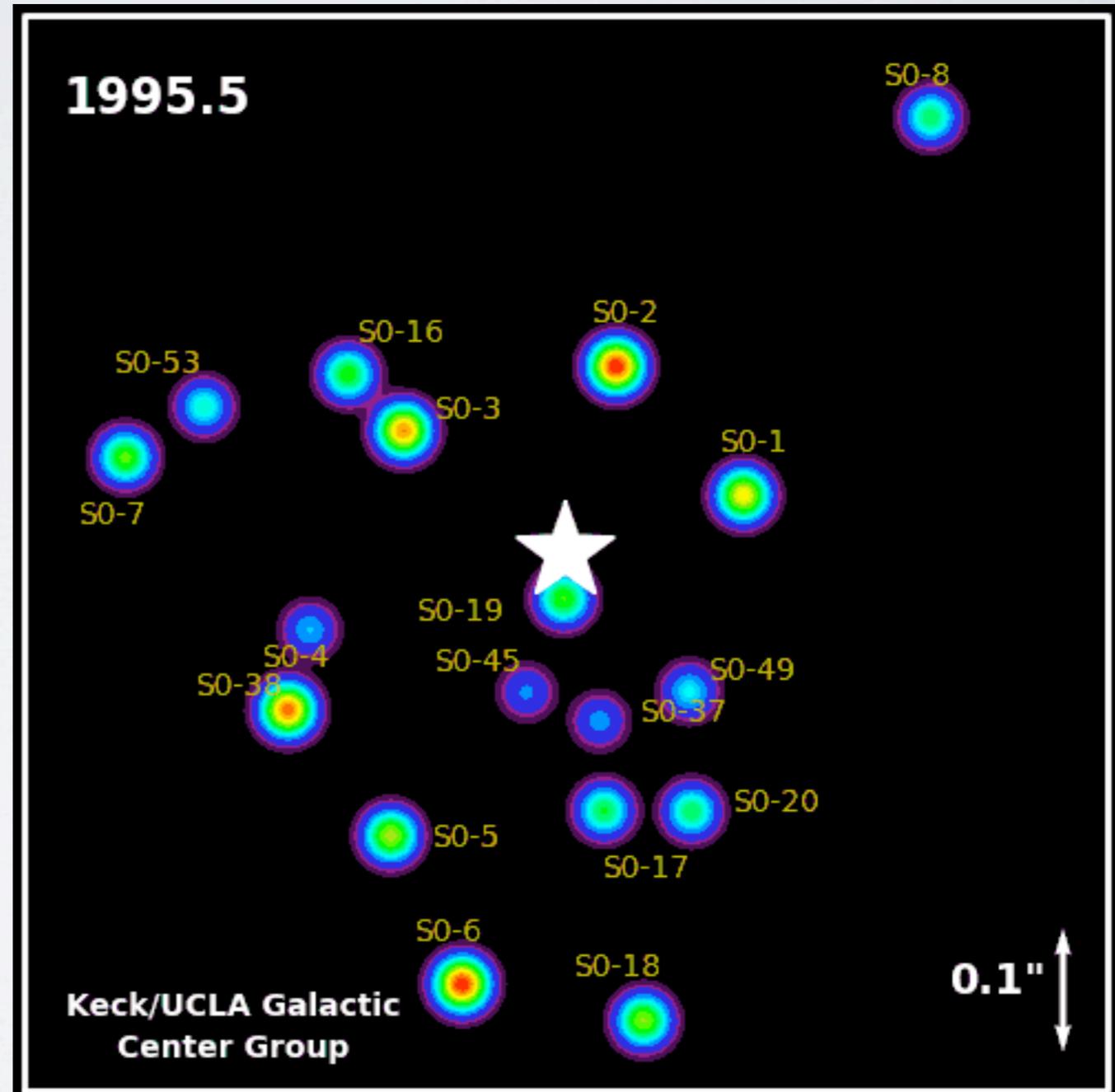
Fast alle Galaxien haben ein gigantisches schwarzes Loch versteckt in dem Zentrum:  $10^6 - 10^9$  Sonnenmassen schwer

# MONSTER IN DER MILCHSTRASSE



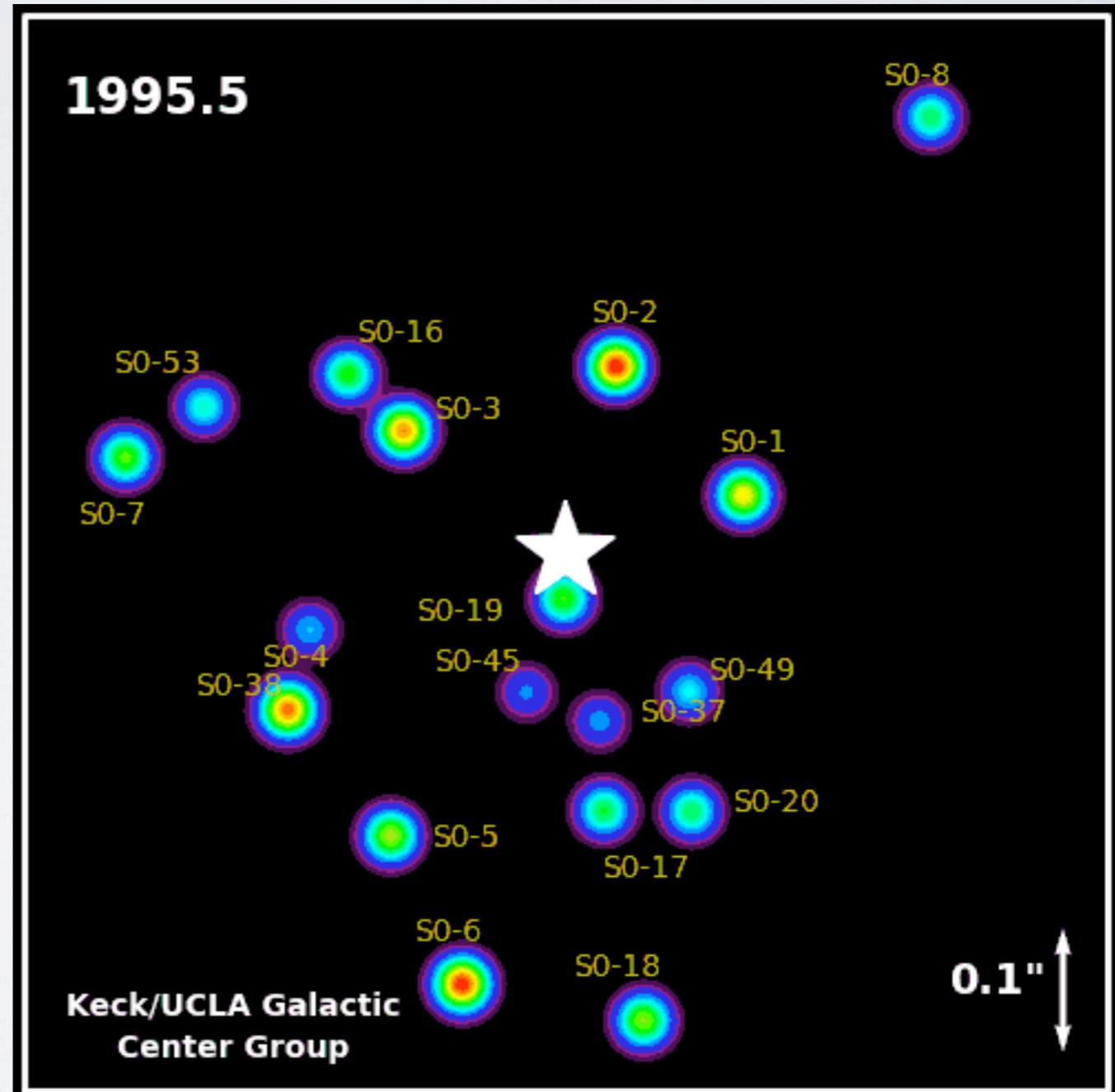
# MONSTER IN DER MILCHSTRASSE

- Selbst unsere Milchstrasse hat ein schwarzes Loch mit 4 Mio Sonnenmassen.



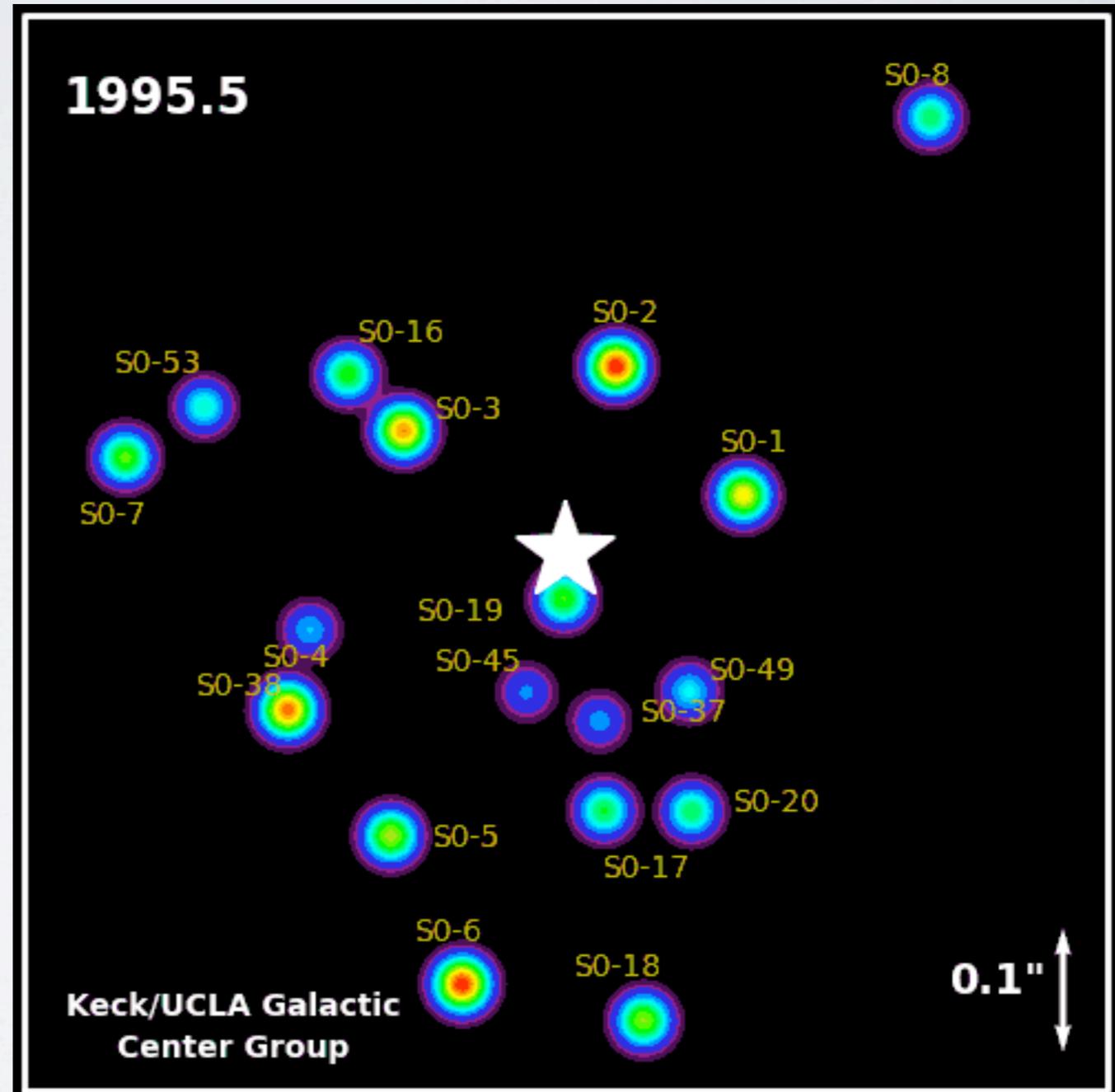
# MONSTER IN DER MILCHSTRASSE

- Selbst unsere Milchstrasse hat ein schwarzes Loch mit 4 Mio Sonnenmassen.
- Der Beweis: extreme Geschwindigkeiten als einige Sterne bewegen sich in Umlaufbahnen um ein unsichtbares Objekt herum.



# MONSTER IN DER MILCHSTRASSE

- Selbst unsere Milchstrasse hat ein schwarzes Loch mit 4 Mio Sonnenmassen.
- Der Beweis: extreme Geschwindigkeiten als einige Sterne bewegen sich in Umlaufbahnen um ein unsichtbares Objekt herum.



# ALS SCHWARZE LÖCHER IN EINANDER VERSCHMELZEN



# ALS SCHWARZE LÖCHER IN EINANDER VERSCHMELZEN

- Zwei schwarze Löcher werden schließlich in einander verschmelzen, wie die Binärpulsaren.
  - *Die GW tragen viel Information: die Massen und Drehimpulse der Löcher, die Exzentrizität und Orientierung der Laufbahn, und selbst die Entfernung des Systems.*
  - *Binäre Systeme sind einfach und sauber.*

# ALS SCHWARZE LÖCHER IN EINANDER VERSCHMELZEN

- Zwei schwarze Löcher werden schließlich in einander verschmelzen, wie die Binärpulsaren.
  - *Die GW tragen viel Information: die Massen und Drehimpulse der Löcher, die Exzentrizität und Orientierung der Laufbahn, und selbst die Entfernung des Systems.*
  - *Binäre Systeme sind einfach und sauber.*
- Die Verschmelzung strahlt starke Gravitationswellen aus, macht ein größeres Loch.
  - *Die Leuchtkraft der GW während der Verschmelzung ist größer als die Leuchtkraft (in Licht) des gesamten Universums!*
  - *GWs sind unsere beste Probe der ultrastarken Schwerkraftfeld.*

# ALS SCHWARZE LÖCHER IN EINANDER VERSCHMELZEN

- Zwei schwarze Löcher werden schließlich in einander verschmelzen, wie die Binärpulsaren.
  - *Die GW tragen viel Information: die Massen und Drehimpulse der Löcher, die Exzentrizität und Orientierung der Laufbahn, und selbst die Entfernung des Systems.*
  - *Binäre Systeme sind einfach und sauber.*
- Die Verschmelzung strahlt starke Gravitationswellen aus, macht ein größeres Loch.
  - *Die Leuchtkraft der GW während der Verschmelzung ist größer als die Leuchtkraft (in Licht) des gesamten Universums!*
  - *GWs sind unsere beste Probe der ultrastarken Schwerkraftfeld.*
- Die Verschmelzung schafft ein größeres und deformiertes Loch, das sich schließlich zu ein glattes Kerr Loch abspannt.
  - *Dieser Prozess strahlt “ringdown” GW aus. Wir können die Masse und den Drehimpuls des Lochs von diese Wellen messen.*

# DIE VERSCHMELZUNG

# NEUTRONENSTERNE AUCH!



# NEUTRONENSTERNE AUCH!

- Die Binärpulsaren werden in ungefähr 100 Mio Jahr auch in einander verschmelzen: nur 1% des Alters unserer Milchstrasse.

# NEUTRONENSTERNE AUCH!

- Die Binärpulsaren werden in ungefähr 100 Mio Jahr auch in einander verschmelzen: nur 1% des Alters unserer Milchstrasse.
- Solche Verschmelzungen geschehen in der Milchstrasse vielleicht einmal pro  $10^5$  Jahre.

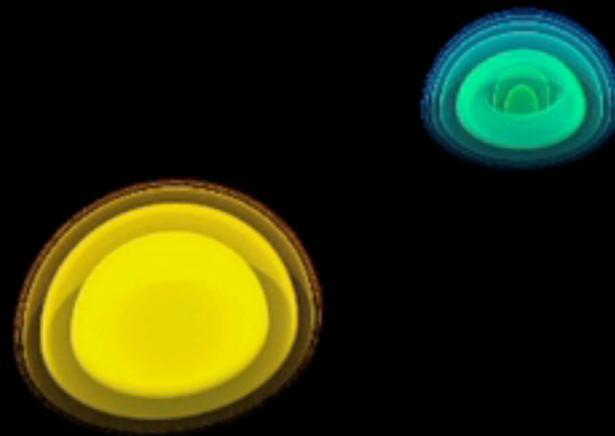
# NEUTRONENSTERNE AUCH!

- Die Binärpulsaren werden in ungefähr 100 Mio Jahr auch in einander verschmelzen: nur 1% des Alters unserer Milchstrasse.
- Solche Verschmelzungen geschehen in der Milchstrasse vielleicht einmal pro  $10^5$  Jahre.
- Dieses Ereignis kann ein Gamma-Ray Burst ausstrahlen. Satelliten wie *Swift* und *Fermi* beobachten Bursts mehrmals pro Woche; vielleicht 10% sind Verschmelzungen.

# NEUTRONENSTERNE AUCH!

- Die Binärpulsaren werden in ungefähr 100 Mio Jahr auch in einander verschmelzen: nur 1% des Alters unserer Milchstrasse.
- Solche Verschmelzungen geschehen in der Milchstrasse vielleicht einmal pro  $10^5$  Jahre.
- Dieses Ereignis kann ein Gamma-Ray Burst ausstrahlen. Satelliten wie *Swift* und *Fermi* beobachten Bursts mehrmals pro Woche; vielleicht 10% sind Verschmelzungen.
- Die Detektoren LIGO und VIRGO werden Verschmelzungen nach 2020 wochentlich mit GW beobachten. Nach die Indianer und Japaner mitmachen, kann es fast täglich sein.

# NS VERSCHMELZUNG

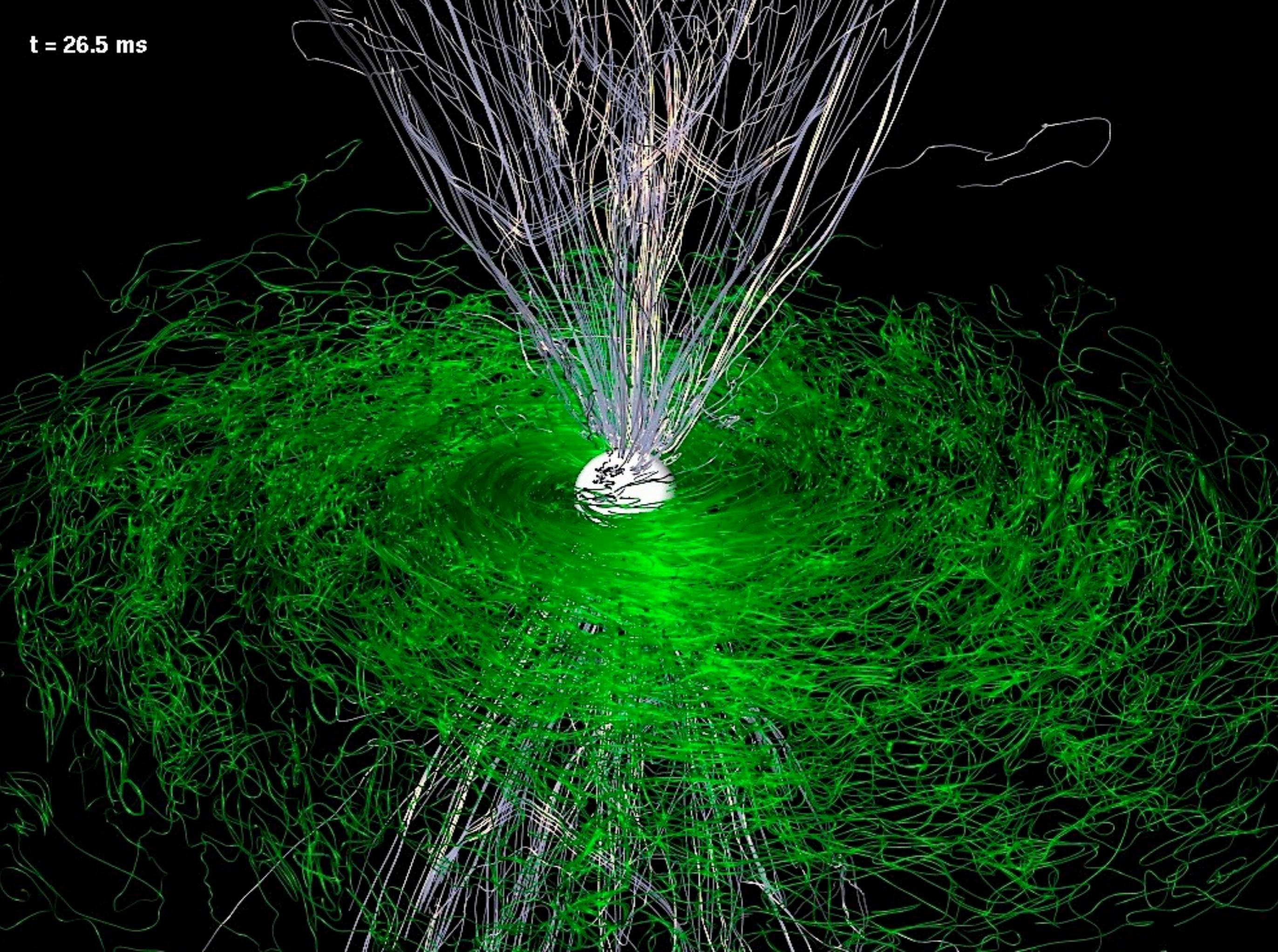


9 11.75 14.5  
 $\lg(\rho_0) [\text{g}/\text{cm}^3]$

9.5 12 14.5  
 $\lg(|B|) [\text{Gauss}]$

Rezzolla, et al, AEI

$t = 26.5 \text{ ms}$



# MULTIMESSENGER ASTRONOMIE



# MULTIMESSENGER ASTRONOMIE

- Die Benutzung von GW Detektoren und Gamma-Satelliten ist eine Beispiel von Multimessenger Astronomy.

# MULTIMESSENGER ASTRONOMIE

- Die Benutzung von GW Detektoren und Gamma-Satelliten ist ein Beispiel von Multimessenger Astronomy.
- GW Beobachtungen werden auch mit optische, radio, und Röntgen Teleskopen koordiniert werden.

# MULTIMESSENGER ASTRONOMIE

- Die Benutzung von GW Detektoren und Gamma-Satelliten ist ein Beispiel von Multimessenger Astronomy.
- GW Beobachtungen werden auch mit optische, radio, und Röntgen Teleskopen koordiniert werden.
- Gravitationswellen sind komplementär: sie erlauben die Messung von Entfernungen, Massen, Größen. Sie werden eine völlig unabhängige Messung der Größe und Beschleunigung des Universums ermöglichen.

# SUPERMASSIVE VERSCHMELZUNGEN



# SUPERMASSIVE VERSCHMELZUNGEN

- GW von supermassive schwarze Löcher haben niedrige Frequenzen: mHz oder niedriger. Die können wir nur vom Weltall hören: eLISA.

# SUPERMASSIVE VERSCHMELZUNGEN

- GW von supermassive schwarze Löcher haben niedrige Frequenzen: mHz oder niedriger. Die können wir nur vom Weltall hören: eLISA.
- Ein GW Detektor im Weltall wird außerordentliche Sensibilität haben. Es wird weit entfernte Verschmelzungen beobachten:  $z > 15$ .
  - *Weit entfernt* bedeutet *sehr früh* -- diese Verschmelzungen zeichnen die Entstehung von Galaxien bevor sie mit Teleskope sichtbar sind.
  - Verschmelzungen in unserer kosmologischer Umgebung ( $z = 1$ ) dürfen mit Genauigkeit beobachtet werden; ultrastarke Schwerkraftfelder können wir genauer als 0.1% testen.

# EINZELNE LÖCHER



# EINZELNE LÖCHER

- Regelmäßig fallen normale schwarze Löcher (10 Sonnenmassen) in supermassive Löcher. Wir nennen diese Ereignisse Extreme Mass-Ratio Inspiral events (EMRIs).

# EINZELNE LÖCHER

- Regelmäßig fallen normale schwarze Löcher (10 Sonnenmassen) in supermassive Löcher. Wir nennen diese Ereignisse Extreme Mass-Ratio Inspiral events (EMRIs).
- Das kleinere Loch macht Millionen von Orbits im mHz Bereich, bevor es hineinfällt. eLISA zuhört für Jahre.

# EINZELNE LÖCHER

- Regelmäßig fallen normale schwarze Löcher (10 Sonnenmassen) in supermassive Löcher. Wir nennen diese Ereignisse Extreme Mass-Ratio Inspiral events (EMRIs).
- Das kleinere Loch macht Millionen von Orbits im mHz Bereich, bevor es hineinfällt. eLISA zuhört für Jahre.
- Die Wellenformen sind komplex und reich in Information. Man kann davon bestimmen, ob das zentrale Object wirklich ein Kerr schwarzes Loch ist, wie in der ART.

# EINZELNE LÖCHER

- Regelmäßig fallen normale schwarze Löcher (10 Sonnenmassen) in supermassive Löcher. Wir nennen diese Ereignisse Extreme Mass-Ratio Inspiral events (EMRIs).
- Das kleinere Loch macht Millionen von Orbits im mHz Bereich, bevor es hineinfällt. eLISA zuhört für Jahre.
- Die Wellenformen sind komplex und reich in Information. Man kann davon bestimmen, ob das zentrale Object wirklich ein Kerr schwarzes Loch ist, wie in der ART.
- Mit Duzende von Beobachtungen lernen wir vieles über die Löcherpopulation und die zentrale Sternenhaufen.

# EMRI ZUHÖREN



# EMRI ZUHÖREN

Large black hole:  
shown to scale  
3,000,000 solar masses  
90% maximal spin

Small black hole:  
shown enlarged  
270 solar masses  
negligible spin

Trace duration:  
1 day

Steve Drasco  
Cal Poly, San Luis Obispo  
sdrasco@calpoly.edu



# DIE DUNKLE SEITE



# DIE DUNKLE SEITE

- Wir kennen einige Monsters in dem Universums-Dschungel.

# DIE DUNKLE SEITE

- Wir kennen einige Monsters in dem Universums-Dschungel.
- Aber GWs werden hoffentlich ganz neue Monsterarten entdecken.

# DIE DUNKLE SEITE

- Wir kennen einige Monsters in dem Universums-Dschungel.
- Aber GWs werden hoffentlich ganz neue Monsterarten entdecken.
- Das ist immer mit anderen astronomischen Technologien geschehen: Radio-, Infrarot-, Röntgen-, und Gamma-Astronomie haben große Überraschungen vermittelt.

# DIE DUNKLE SEITE

- Wir kennen einige Monsters in dem Universums-Dschungel.
- Aber GWs werden hoffentlich ganz neue Monsterarten entdecken.
- Das ist immer mit anderen astronomischen Technologien geschehen: Radio-, Infrarot-, Röntgen-, und Gamma-Astronomie haben große Überraschungen vermittelt.
- Wir wissen dass 96% des Universums dunkel ist: dunkel in Licht, aber vielleicht nicht in Gravitationswellen.

# DIE DUNKLE SEITE

- Wir kennen einige Monsters in dem Universums-Dschungel.
- Aber GWs werden hoffentlich ganz neue Monsterarten entdecken.
- Das ist immer mit anderen astronomischen Technologien geschehen: Radio-, Infrarot-, Röntgen-, und Gamma-Astronomie haben große Überraschungen vermittelt.
- Wir wissen dass 96% des Universums dunkel ist: dunkel in Licht, aber vielleicht nicht in Gravitationswellen.
- **Was lauert in der dunkle Seite des Universums?**

