

“No Hair” Theorem: BHs haben nur Masse, Drehimpuls und Ladung (aber keine Haare)

Metrik: Unterschiede nicht-rotatierend und rotierend (Schwarzschild, Kerr)

Ereignishorizont:

$a = 0$: Schwarzschildradius $r_s = 2M$

$a = 1$: Gravitationsradius $r_g = M$

letzte stabile Bahn:

Schwarzschild: $r_{ms} = 3r_s$

Kerr: $r_{ms} = r_g$ (prograd), $r_{ms} = 9r_g$ (retrograd)

aber: in Kerr Metrik innerhalb von Ergosphäre r_E muß der Beobachter mitrotieren um auf stabiler Bahn zu sein \rightarrow Frame Dragging, kein Inertialsystem mehr

in Ergosphäre:

Orbits mit negativer Gesamtenergie möglich

Energiegewinn bis Größe $0.29M_{BH}$ aus Rotation möglich

Energiegewinnung aus rotierenden schwarzen Löchern:

Blandford-Znajek-Prozess: elektromagnetische Kopplung an BH

Vier Gedankenexperimente:

1. BH in konstantem elektrischen Feld
 - löse Maxwell-Gleichungen in Schwarzschildmetrik
 - BH ist elektrischer Leiter (Horizont Equipotentialfläche)
2. BH in magnetisierter (\mathbf{B}, \mathbf{E}) Wolke → Akkretion
 - \mathbf{B}, \mathbf{E} -Fluktuationen, Zerfallszeit $\tau \sim r_g/c$

$$\rightarrow \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \simeq -\frac{E}{r_g} \simeq -\frac{j R_h}{r_g} \simeq -\frac{B R_h}{4\pi r_g}$$

→ “Widerstand” des BH R_h , mit

$$\frac{\partial B}{\partial t} \simeq -\frac{B}{\tau} \quad \rightarrow \quad R_h = 4\pi = 377 \Omega$$

3. Schwarzschild-BH, konstantes \mathbf{B} , mit Batterie verbunden
 - Elektrischer Strom $I \simeq V/R_h$ quer zu \mathbf{B}
 - Lorentz-Kraft $\mathbf{F}_L \sim \mathbf{j} \times \mathbf{B}$, Drehmoment $\simeq IB$
4. Rotierendes BH, konstantes \mathbf{B}
 - Da Leiter → Induktion einer Potential-Differenz
 - $V \simeq \Omega_h r_g^2 B \simeq r_g B$
 - bei externem elektrischen Strom zwischen Pol und Äquator
Arbeitsleistung im externen Medium / Energie aus BH

Blandford-Znajek-Prozess: Arbeitsleistung

Abschätzung: Ohm'sche Heizung

$$L_{BZ} \simeq I^2 R_h + I^2 R_{\text{ext}}$$

Für $R_h \simeq R_{\text{ext}}$ maximale externe Leistung:

$$\rightarrow L_{BZ} \simeq I^2 R_{\text{ext}} \simeq r_g^2 B^2 / R_h$$

Blandford-Znajek-Prozess: Anwendung auf AGN:

- Magnetfeld, aus Akkretionsscheibe:
Dynamoprozess oder Advektion (?)
 \rightarrow Equipartition ($P_{\text{gas}} \simeq P_{\text{mag}}$) $\rightarrow B \simeq 10^4$ G
- BH-Masse: $10^8 M_\odot$

daraus

- Spannung eines rotierenden BH:

$$V \sim r_g B = 10^{19} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right)^2 \left(\frac{B}{10^4 \text{G}} \right)^2 \text{ V}$$

- Arbeitsleistung eines rotierenden BH:

$$L_{BZ} \simeq 10^{45} \left(\frac{a}{M} \right)^2 \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right)^2 \left(\frac{B}{10^4 \text{G}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1}$$

- Zum Vergleich: “Freie Energie”:

$$M - M_{\text{err}} \simeq 4M^3 \Omega_h^2 \simeq 10^{61} \left(\frac{a}{M} \right)^2 \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right)^2 \text{ erg}$$

Schwarze Löcher außerhalb von AGN

- stellare Schwarze Löcher nach Supernova-Kollaps oder Verschmelzung von Neutronendoppelsternen $\rightarrow 1-3 M_{\odot}$
- in Sternhaufen Verschmelzung und Akkretion $\rightarrow 10^3-10^4 M_{\odot}$?
möglicherweise in Frühzeit “Saat” für galaktische BHs
- galaktische BHs $\rightarrow 10^5-10^{10} M_{\odot}$

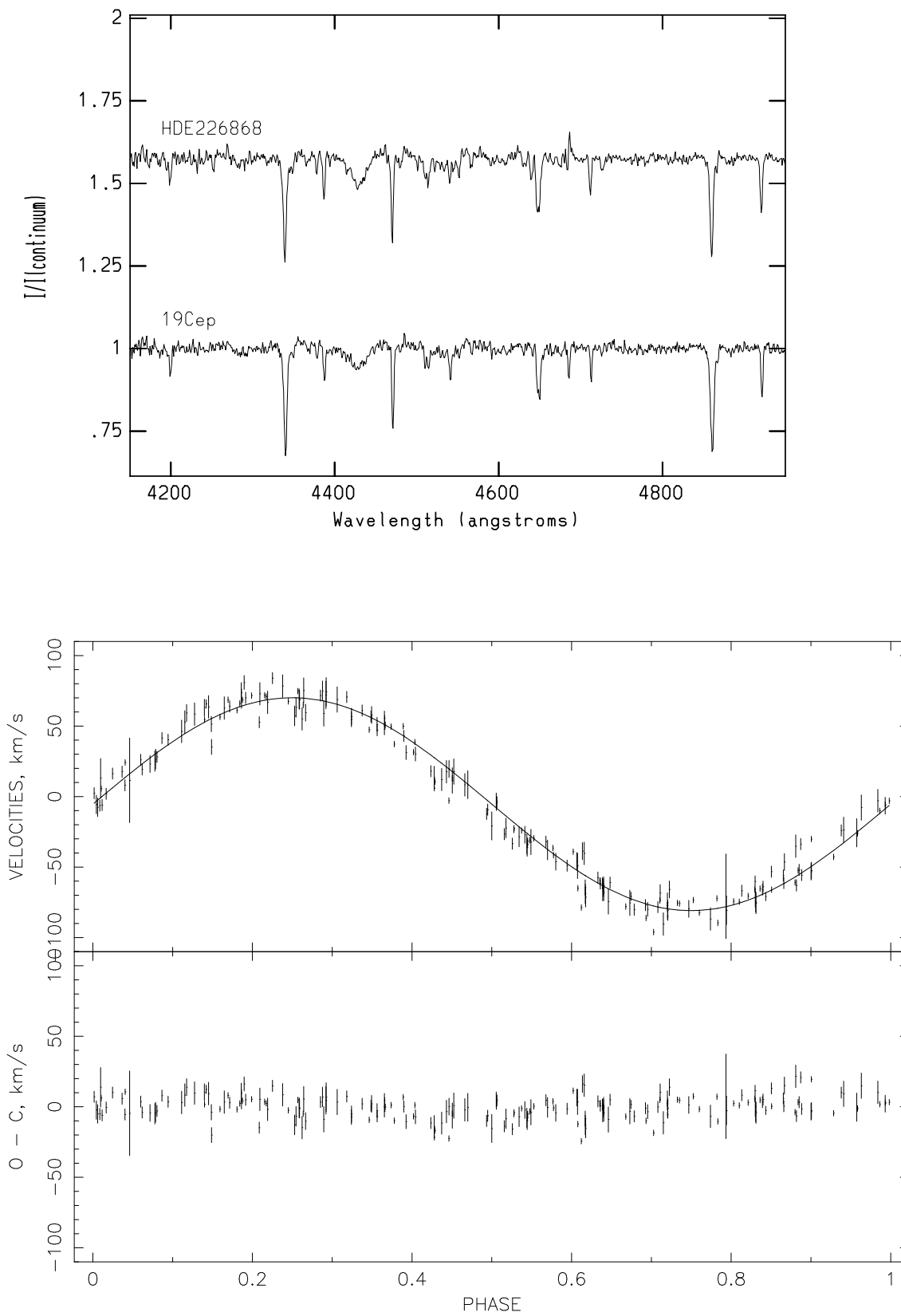
Stellare BHs:

Röntgendoppelsterne (X-ray binaries, XRB)

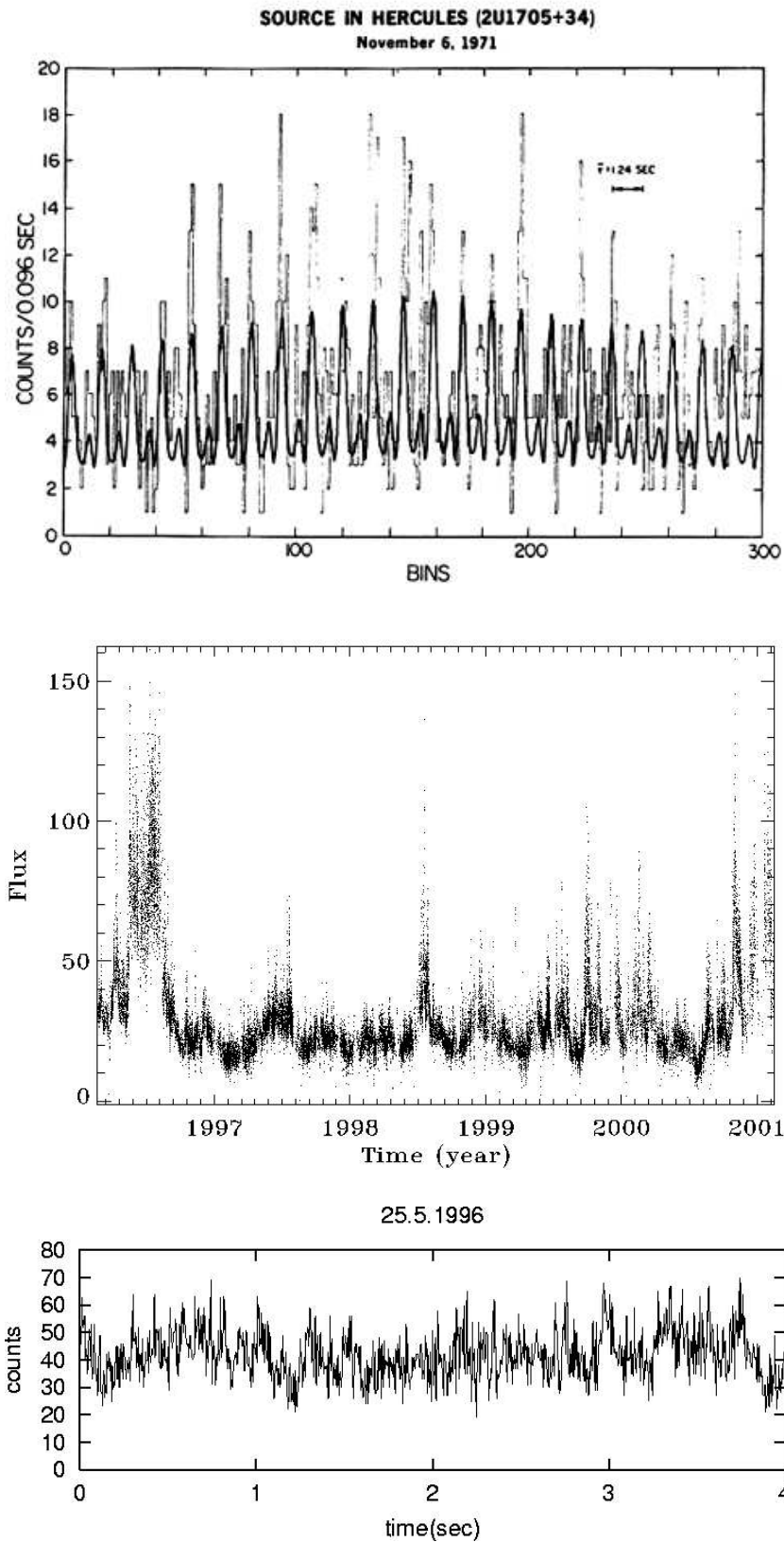
- früher 1970er: Entdeckung sehr heller Röntgenquelle im Sternbild Schwan (Cygnus): Cygnus X-1
- damals Position sehr ungenau: optisches Gegenstück?
- Frühjahr 1972: plötzliches Auftauchen einer Radioquelle, gleichzeitig Ausbruch von Cyg X-1 im Röntgenbereich
- Eindeutige Identifikation der Radioquelle mit OB Überriese HDE 226868 (O9.7 Iab) \rightarrow sehr wahrscheinlich Doppelstern
- Messungen: 5.6 Tage Periodizität in Radialgeschwindigkeit und Röntgenlichtkurve
- Röntgenvariation nicht *periodisch* variabel \rightarrow Röntgenquelle hat keine feste Oberfläche! \rightarrow kein Neutronenstern sondern Schwarzes Loch mit Akkretionsscheibe
- aus Orbits: $10 M_{\odot}$

Mikroquasare

- Röntgenquellen und Jets wie bei “echten” Quasaren
- Jet-Ausdehnung statt 100 Kiloparsec nur im Parsecbereich
- Röntgendoppelsterne mit einem stellaren BH im Zentrum, Akkretionsscheibe überträgt Masse, relativistische Elektronen in Jets produzieren Radiostrahlung
- alle Vorgänge laufen im Vergleich zu QSOs sehr schnell ab \rightarrow Testlaboratorien für Teile der AGN-Physik



Optisches Spektrum (oben) und Radialgeschwindigkeitsperiodizität (unten) von HDE 226868, 5.6 Tage (LaSala et al. 1998)

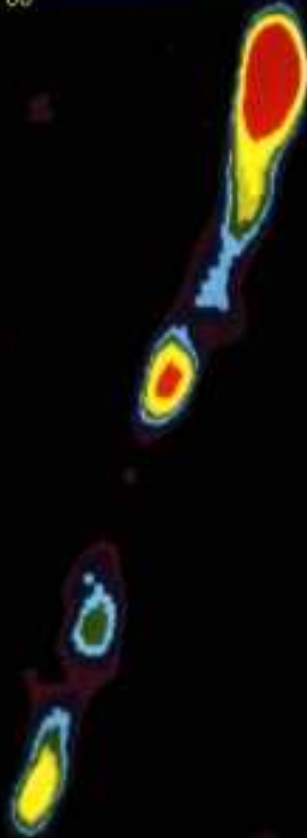


Röntgenemission: Periodischer Neutronenstern Hercules X-1 (oben), aperiodisches BH Cygnus X-1 (Mitte, unten)

nature

INTERNATIONAL WEEKLY JOURNAL OF SCIENCE

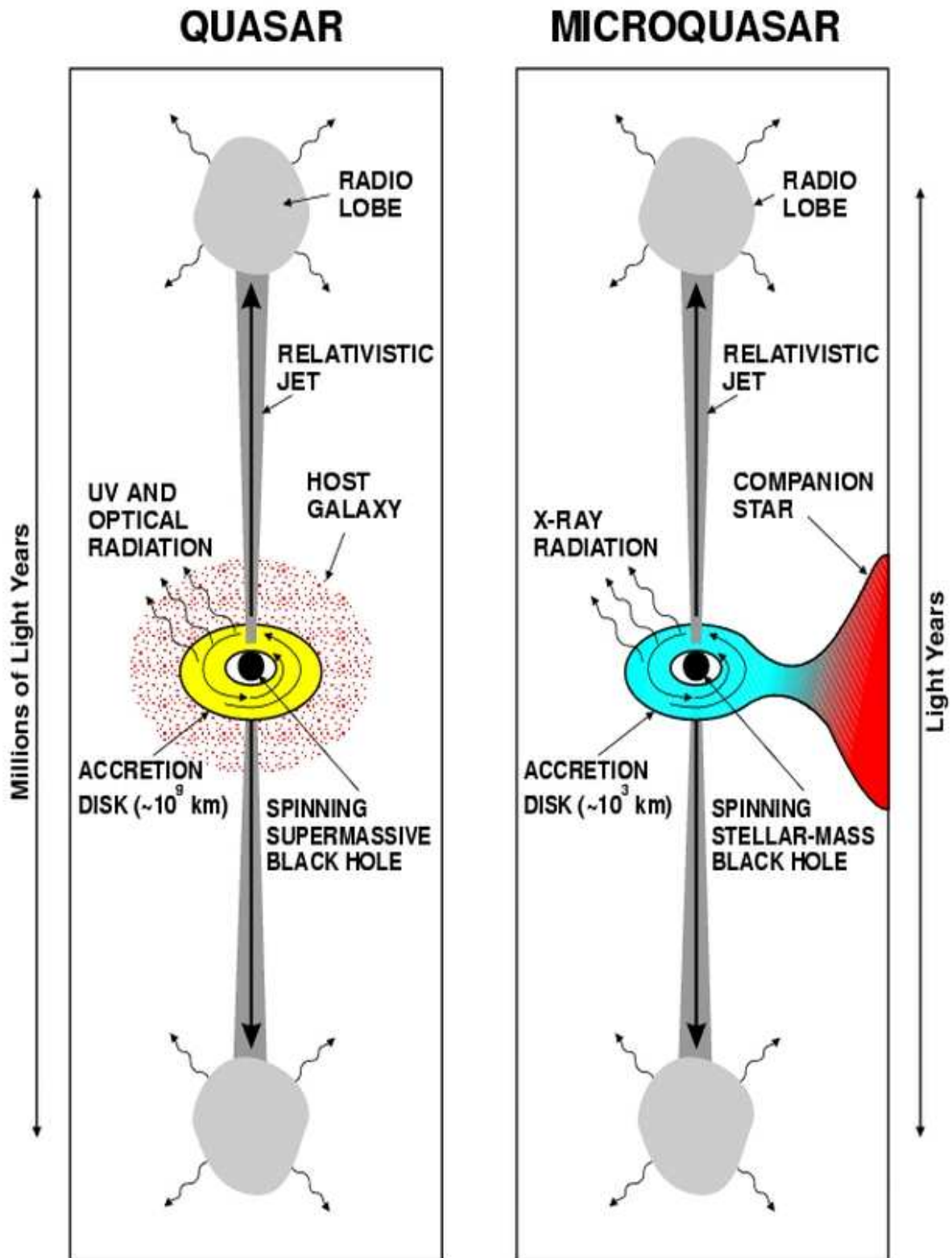
Volume 358 No. 6383 16 July 1992 £3.00



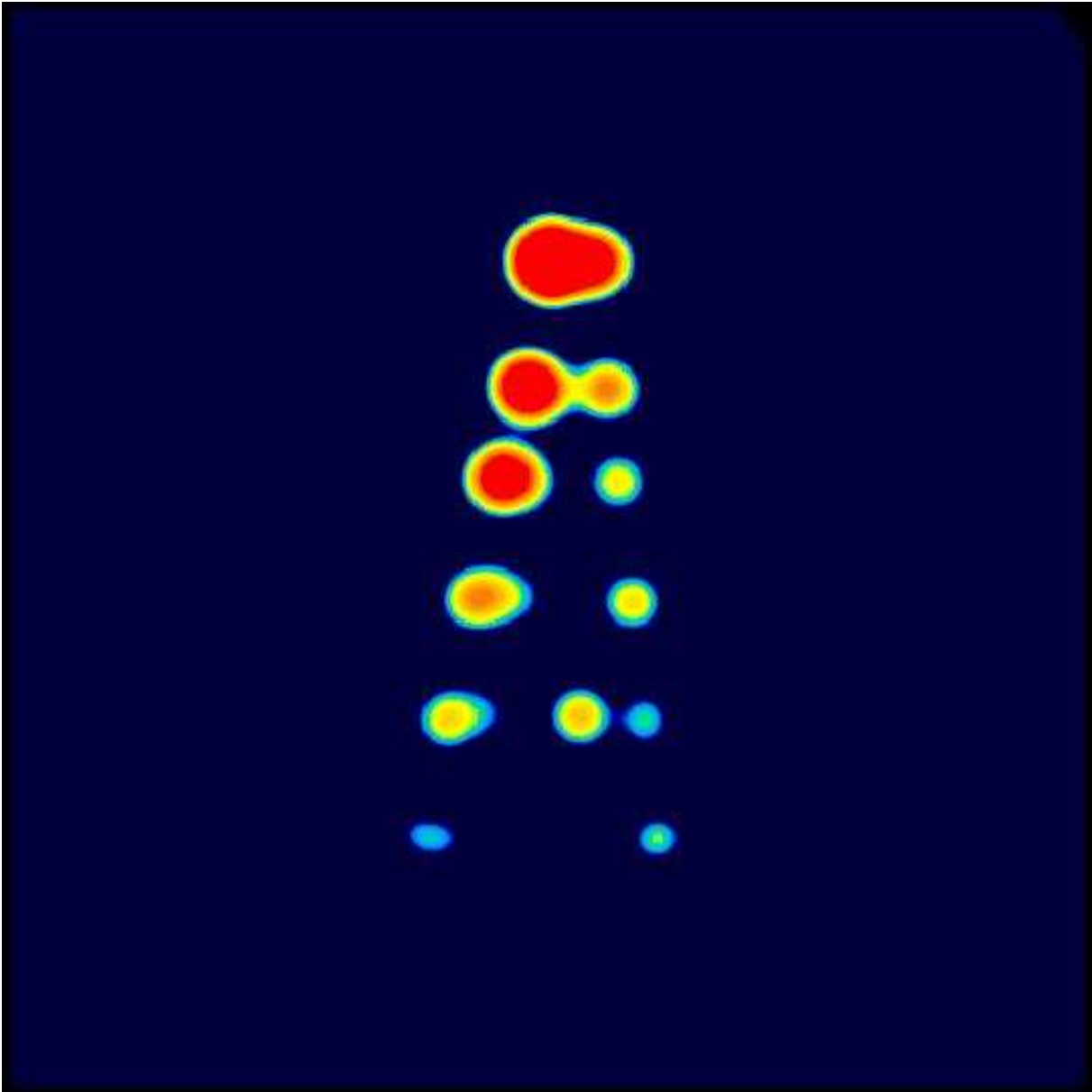
A 'MICROQUASAR' AT THE GALACTIC CENTRE

Probing the heart of human serum albumin
Hox genes in limb development
Carbon nanotubes in bulk
Chemical replicators





Mikro- vs. Makroquasar, skalierbare Physik, ähnliche Phänomene (Mirabel et al. 1998)



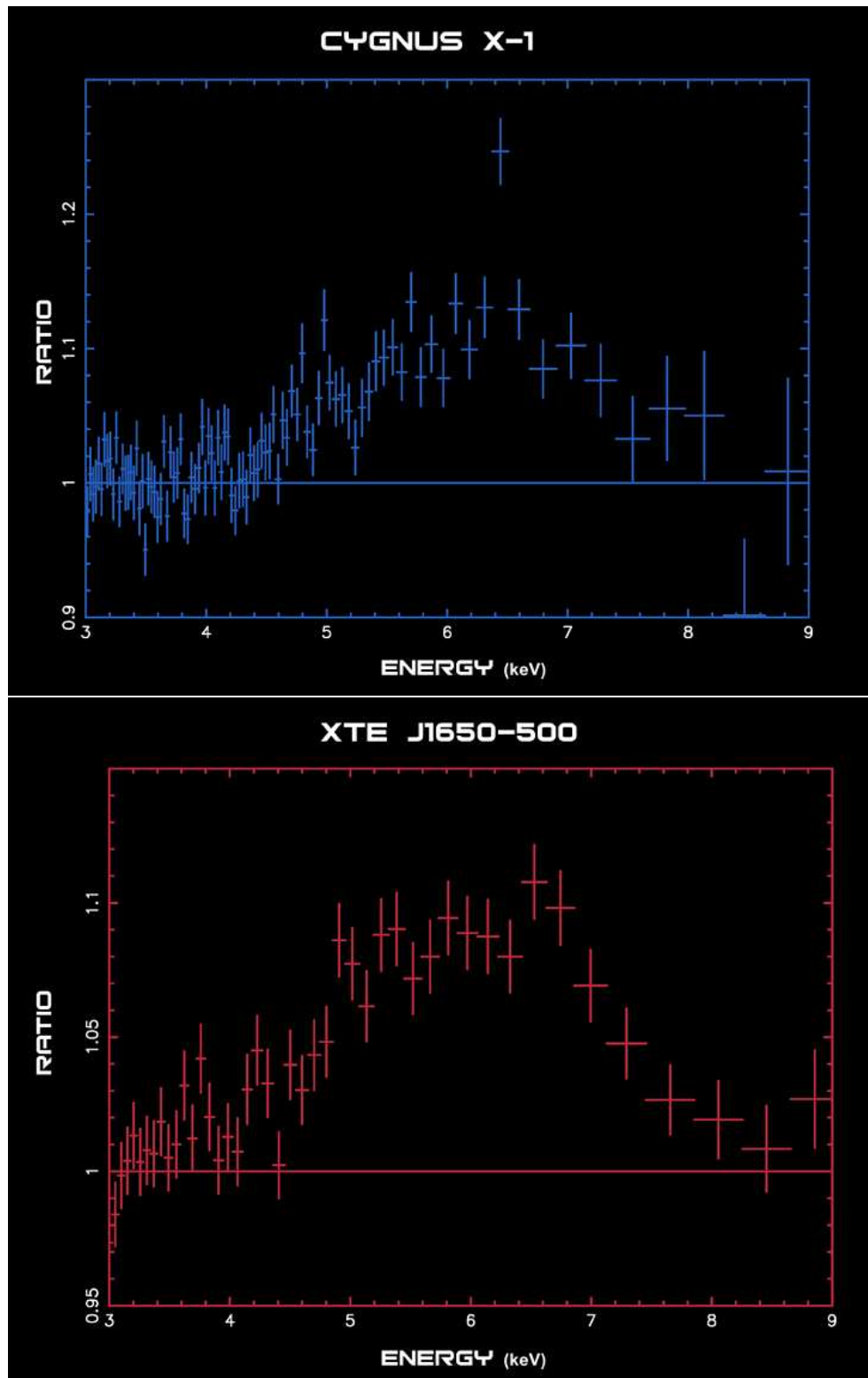
Superluminale Geschwindigkeiten im Mikroquasar GRS 1915+105
(Mirabel et al. 1994)

Fe $K\alpha$ Emissionslinie im Röntgenbereich

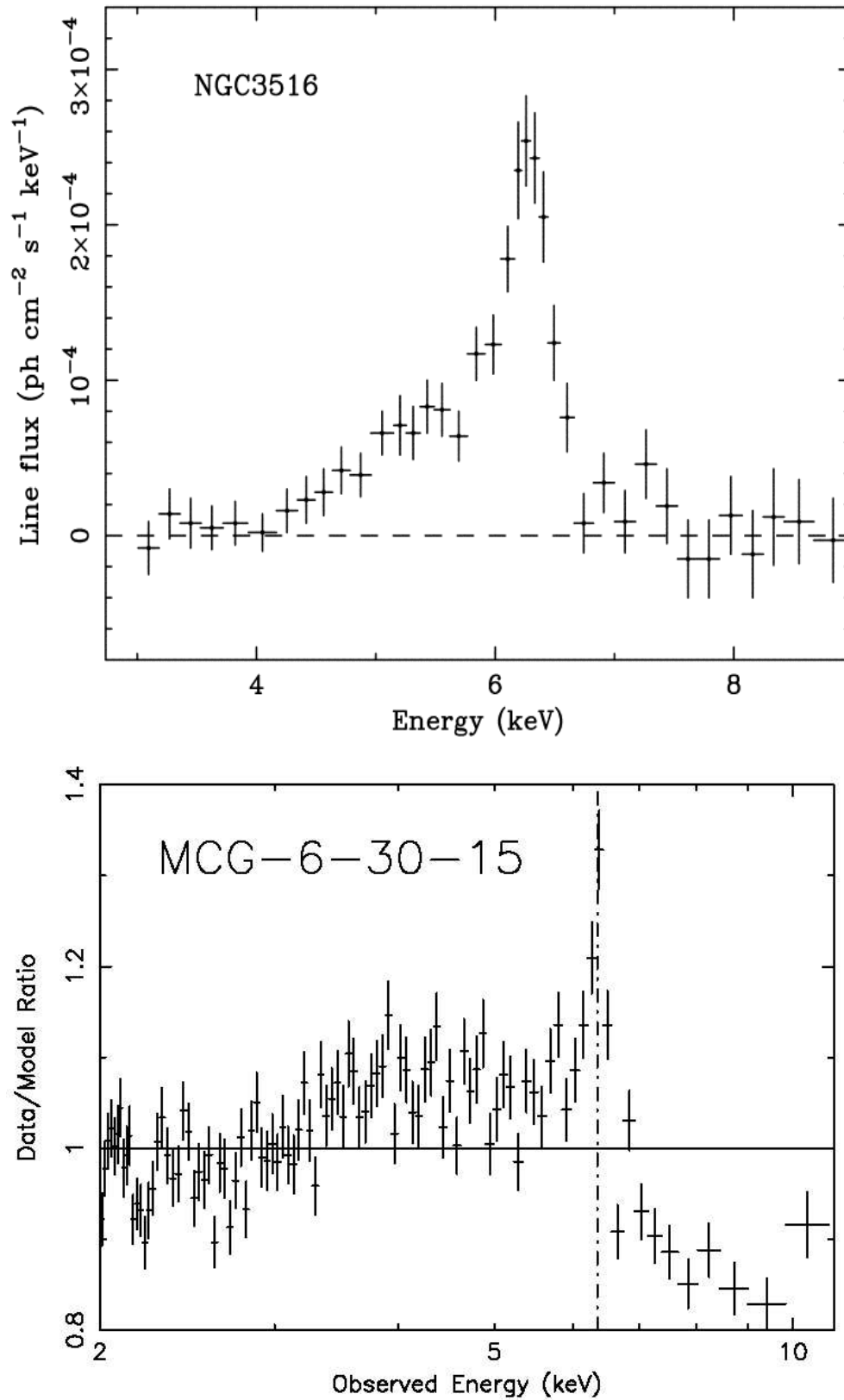
- Fluoreszenzlinie Fe K bei 6.4 keV
- natürliche Breite $\lesssim 200$ eV
- beobachtet sowohl bei AGN, XRB: sehr breite Linie (>2 keV)
- Linienbreite wie im optischen/UV durch tiefen Potentialtopf und großen Rotationsgeschwindigkeiten
- Energien <4 keV nur mit rotierendem Kerr BH möglich

BHs mittlerer Masse:*Ultraleuchtkräftige Röntgenquellen (ULX)*

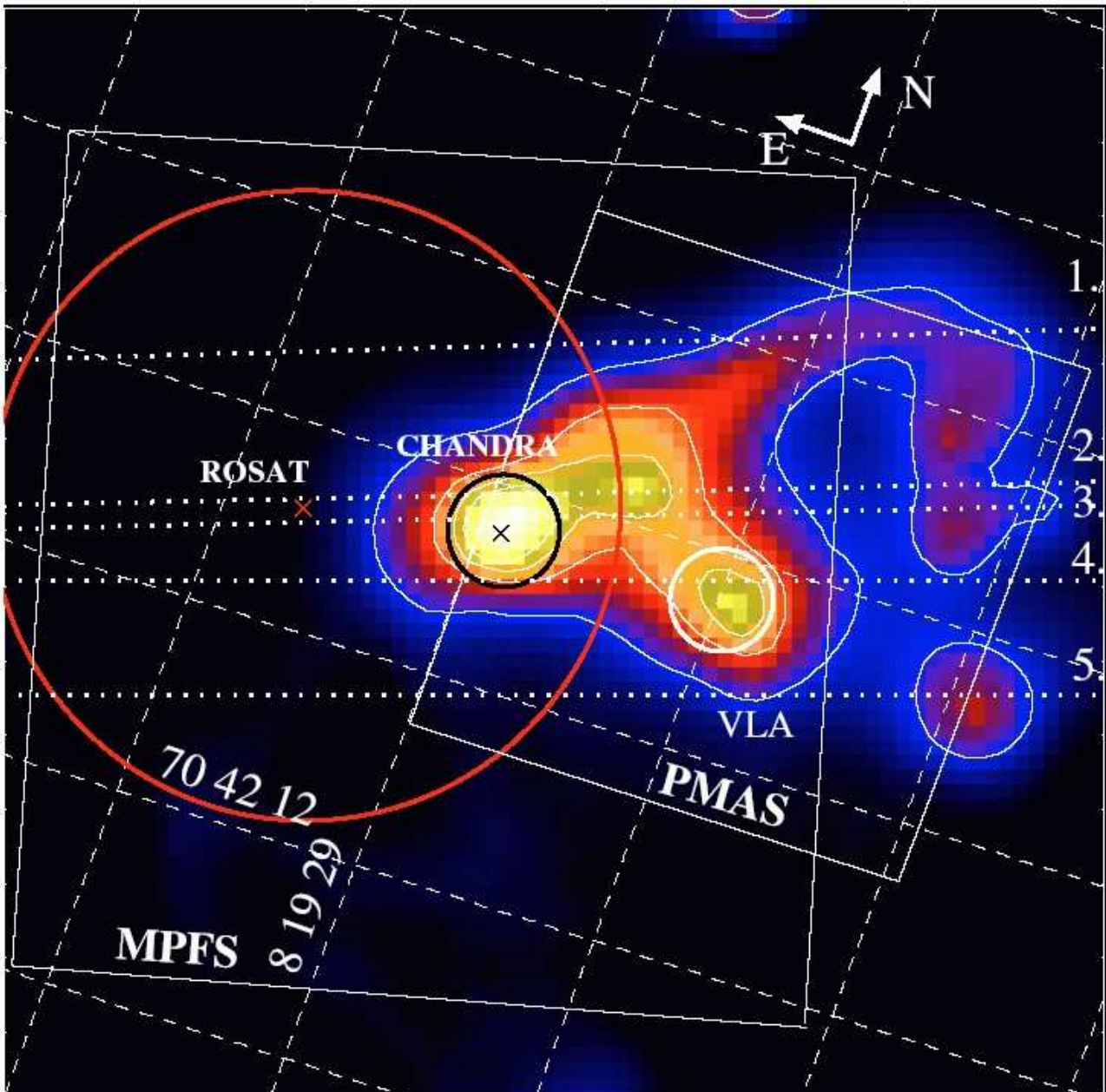
- optische Gegenstücke und integrierte Röntgenleuchtkraft deuten auf sehr energetische Röntgenquelle hin
- Masse größer als stellares BH
- evtl. Überreste von Cluster?



Fe K α Linie, Ruhewellenlänge 6.4keV. Stellare Röntgenquellen Cyg X-1 und XTE J1650-500; nichtrotierendes BH oben, rotierendes BH unten.



Fe K α Linie, Ruhewellenlänge 6.4keV. Seyfertgalaxien NGC3516 und MCG 6-30-15; nichtrotierendes BH oben, rotierendes BH unten.



Ultraleuchtkräftige Röntgenquelle in Galaxie Holmberg II: Röntgen, Radio und optische Integral-Field Spektroskopie (Lehmann et al. 2005)

Direkter Nachweis von Schwarzen Löchern: Gravitationswellen

Interferometrischer Nachweis

- Michelson Interferometer mit großer Armlänge
- sehr konstanter Laserstrahl
- sich verschiebende Interferenzmuster bei unterschiedlicher Längenänderung in den beiden Armen → Licht in Photodiode
- Nachweisempfindlichkeit \propto Schenkellänge und Lichtleistung
- Signalverstärkung durch mehrfaches Durchlaufen der Arme
- Empfindlichkeit von 10–5000Hz (entsprechend Umlauffrequenz von engen Binärsystemen)
- angestrebte Genauigkeit: 10^{-21} → ein Atomdurchmesser auf 1km Armlänge!

Resonanzdetektoren

- Längenänderung eines Metallzylinders durch durchlaufende GW → Änderung der Eigenfrequenz
- ständige Messung der Eigenfrequenz
- empfindlich nur auf Signale nahe Eigenfrequenz → von Masse abhängig
- war erste GW-Meßmethode in den 1960ern

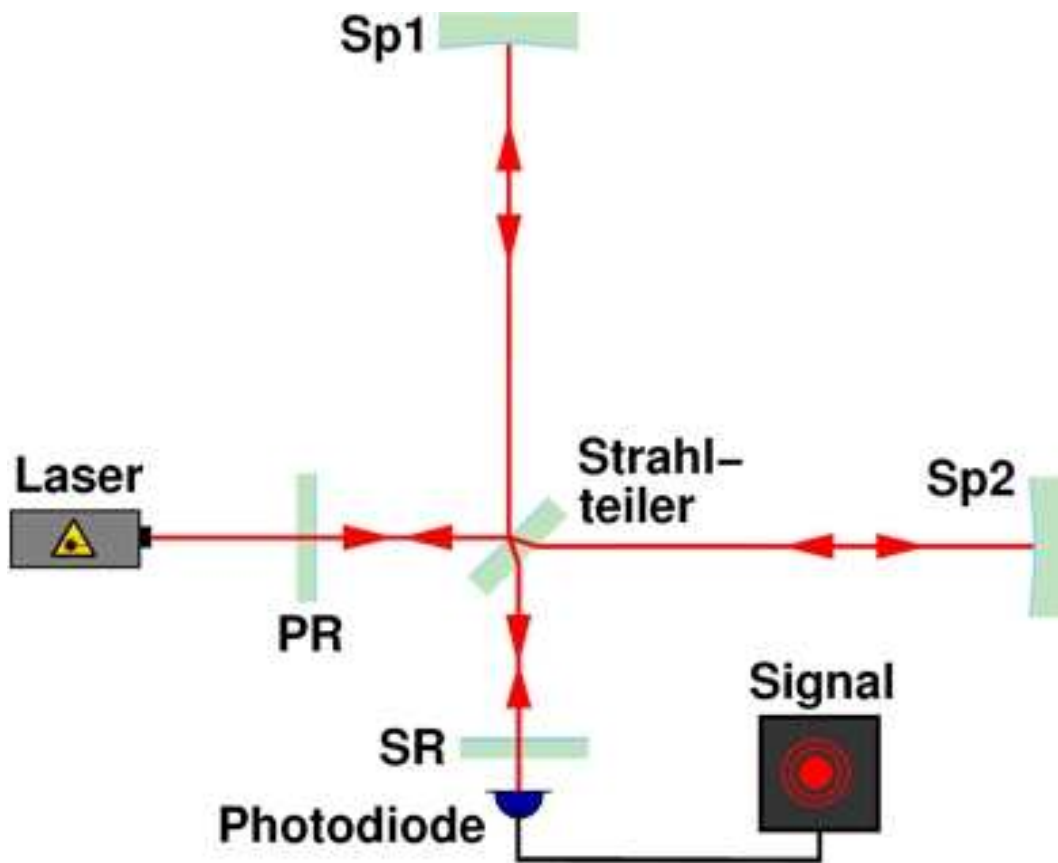
Bestehende Detektoren

- Geo600 (bei Hannover, 600 Meter Armlänge)
- LIGO (Hanford+Livingston/USA, 4km, 4km, 2km)
- VIRGO (bei Pisa, 3km)
- TAMA300 (Tokyo, 300 Meter Länge)
- einige Resonanzdetektoren

Geplante Detektoren

- LISA (Weltraum, 5 Millionen km), ESA/NASA, 2013–15

Bis jetzt kein Nachweis von GW! Die Meßgenauigkeiten sind aber so groß, daß bald (5 Jahre) erste Signale erwartet werden: verschmelzende stellare BHs



GW-Interferometer Grundprinzip (oben), Nautilus Resonanzdetektor (unten)