Schwarze Löcher II

Vom Schwarzen Loch bis zum Urknall: Einsteins Astrophysik für Nicht-Physiker

Markus Pössel & Björn Malte Schäfer

Haus der Astronomie/Institut für Theoretische Astrophysik

7.1.2016

Globale Struktur und Geometrie

Lösungen, die einfache Schwarze Löcher beschreiben:

Schwarzschild-Lösung 1916: statisch, kugelsymmetrisch, keine elektrische Ladung

Reissner-Nordström-Lösung (Reissner 1916, Nordström 1918): kugelsymmetrisch, elektrische Ladung $Q \neq 0$

Kerr-Lösung (1963): Ungeladenes ($Q = 0$), rotierendes (Drehimpuls $J \neq 0$) Schwarzes Loch

Kerr-Newman-Lösung (Newman et al. 1965) Geladenes ($Q \neq 0$), rotierendes ($J \neq 0$) Schwarzes Loch

Globale Struktur und Geometrie

Ab den 1960er Jahren: Globale-geometrische Analysen von Schwarzen Löchern

Roger Penrose, Werner Israel, Brandon Carter, Stephen Hawking und andere

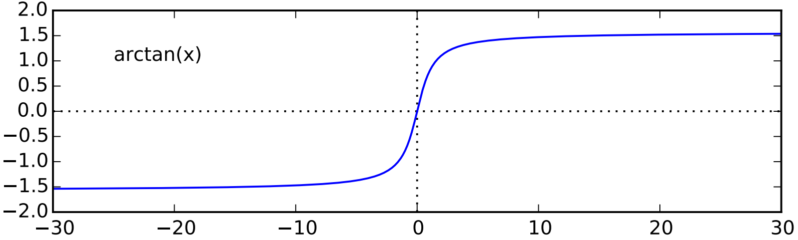
Sehr fortgeschrittenes Thema; die “Bibel” dazu: Stephen Hawking und George Ellis, *The Large-Scale Structure of Spacetime*. Cambridge Univ. Press 1973.

In dieser Vorlesung: Im wesentlichen Prosa, mit einer Ausnahme: Penrose-Diagramme

Penrose-Diagramme

Penrose-Diagramme (auch: konforme Diagramme, Carter-Penrose-Diagramme): Nutze die Schildkröte!

(Wir hatten in Teil I gesehen, wie ungünstig gewählte Koordinaten den Horizonte des Schwarzen Loches hin zu unendlichen Zeitkoordinatenwerten schieben. Jetzt machen wir es umgekehrt und holen die Unendlichkeiten zu uns heran!)



Penrose-Diagramme

Einfaches Beispiel: Minkoswki-Raum (flacher Raum der SRT); betrachte nur x und t.

Metrik der Speziellen Relativitätstheorie:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2.$$

Führe “Lichtkoordinaten” ein:

$$u = x - ct \quad \text{und} \quad v = x + ct$$

dann ist die Metrik in diesen Koordinaten:

$$ds^2 = du \cdot dv.$$

Penrose-Diagramme

Neue Koordinaten mit Schildkröten-Trick:

$$u = \tan(U)$$

$$v = \tan(V)$$

Metrik in den neuen Koordinaten:

$$ds^2 = du\, dv = \frac{1}{\cos^2(U)\ \cos^2(V)}\, dU\, dV$$

mit $-\infty < u < +\infty \Leftrightarrow -\pi/2 < U < \pi/2$ und analog für v vs. V

Zurück zu (gequetschten) Raum- und Zeitkoordinaten

Führe ein X, T via

$$U = X - cT \quad \text{und} \quad V = X + cT$$

also Wertebereich $-\pi/2 < X, cT < +\pi/2$.

Metrik ist

$$\begin{aligned} ds^2 &= \frac{1}{\cos^2(U)\ \cos^2(V)}\, dU\, dV \\ &= \frac{1}{\cos^2(X - cT)\ \cos^2(X + cT)}\, (dX^2 - c^2 dT^2) \\ &= \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\,[\cos(2X) + \cos(2cT)]\right)^2}\, (dX^2 - c^2 dT^2) \end{aligned}$$

Lichtausbreitung in den neuen Koordinaten

$$0 = \mathrm{d}s^2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\left[\cos(2X) + \cos(2cT)\right]\right)^2} \left(\mathrm{d}X^2 - c^2\mathrm{d}T^2\right)$$

hängt nicht von dem Vorfaktor ab - um Lichtausbreitung und damit auch kausale Struktur zu verstehen kann man den Vorfaktor weglassen und

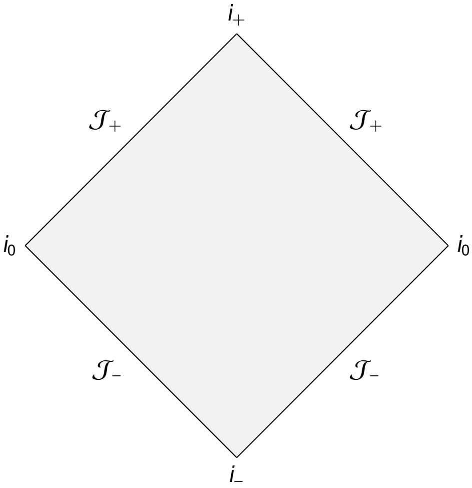
$$\mathrm{d}\tilde{s}^2 = \left(\mathrm{d}X^2 - c^2\mathrm{d}T^2\right)$$

betrachten – auch in den X, T-Koordinaten ist Lichtausbreitung einfach und linear; in geeigneten Einheiten: Diagonalen im Raumzeit-Diagramm!

„Unendlichkeiten hinzunehmen“ bei $X, cT = \pm\pi/2$

Konformes Minkowski-Diagramm

T in Jahren, X in Lichtjahren, $c = 1$:



Verschiedene Arten von Unendlichkeit:

Räumliche Unendlichkeit i_0 bei t endlich, $|x|$ unendlich

Zeitliche Zukunfts-Unendlichkeit i_+ bei $t \to +\infty$, $|x|$ endlich

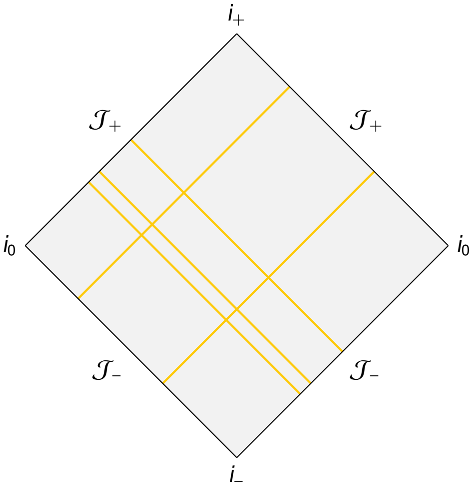
Zeitliche Vergangenheits-Unendlichkeit i_- bei $t \to -\infty$, $|x|$ endlich

Lichtartige Vergangenheits-Unendlichkeit $\mathcal{J}_-$ bei $t \to -\infty, |x| \to \infty$, aber $|x| + ct$ endlich

Lichtartige Zukunfts-Unendlichkeit $\mathcal{J}_-$ bei $t \to \infty, |x| \to \infty$, aber $|x| - ct$ endlich

Konformes Minkowski-Diagramm

T in Jahren, X in Lichtjahren, $c = 1$:

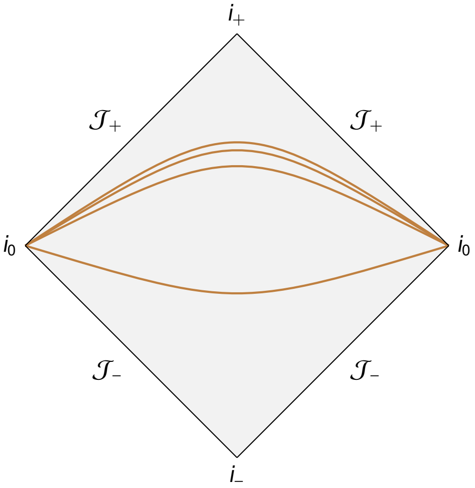


Lichtstrahlen sind in diesem Diagramm nach wie vor diagonal, $X \pm cT = const$.

Wenn sie nicht unterbrochen (absorbiert, gestreut etc.) werden, laufe Lichtstrahlen im konformen Diagramm von $\mathcal{J}_-$ bis $\mathcal{J}_+$.

Konformes Minkowski-Diagramm

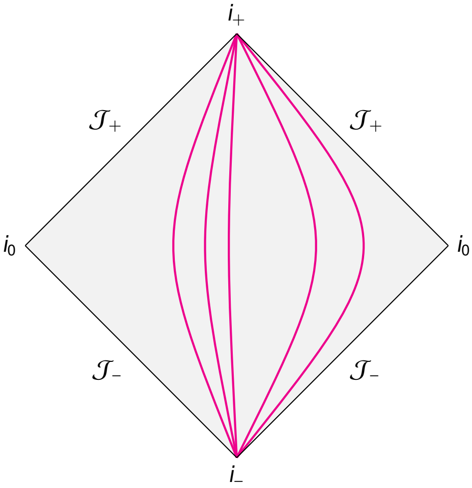
T in Jahren, X in Lichtjahren, $c = 1$:



Jeder Schnappschuss eines unendlich ausgedehnten Objekts endet im Unendlichen bei i_0.

Konformes Minkowski-Diagramm

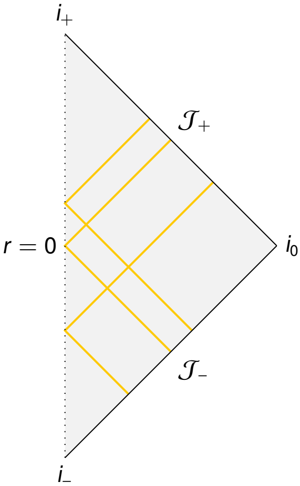
T in Jahren, X in Lichtjahren, $c = 1$:



Jede ununterbrochene Weltlinie eines Teilchens mit Masse $m > 0$ (zeitartige Bahn) führt von i_- nach i_+.

Konformes Minkowski-Diagramm: Radialkoordinaten

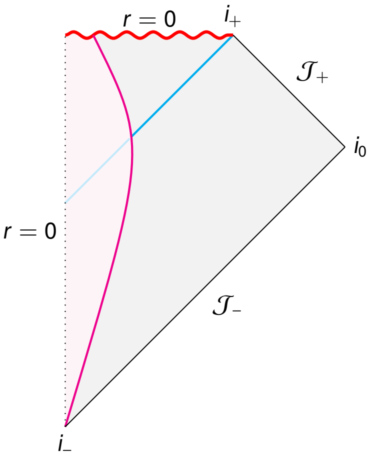
T in Jahren, R (Radialkoordinate, anstatt von X) in Lichtjahren, $c = 1$:



Die senkrechte gepunktete Linie ist eine Symmetrielinie - was dort an Licht-Weltlinien hineingeht, kommt senkrecht zur ursprünglichen Richtung wieder heraus

Konformes Minkowski-Diagramm: Schwarzes Loch

T in Jahren, R (Radialkoordinate, anstatt von X) in Lichtjahren, $c = 1$, schematische Darstellung:



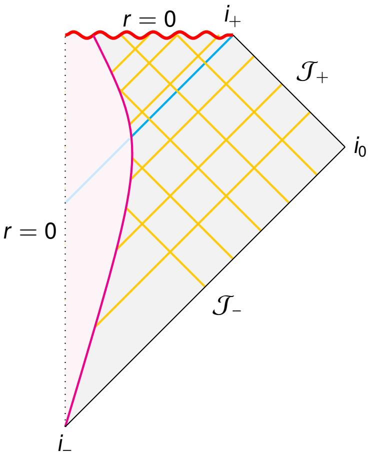
Stern mit Mittelpunkt $r = 0$ kollabiert. (Dass es am Anfang so aussieht, als expandiere er, ist ein Koordinatenartefakt).

Unterschreitet der Stern den Schwarzschildradius, entsteht ein Horizont.

Hinter dem Horizont verbirgt sich eine Singularität. Die Singularität ist raumartig!

Konformes Minkowski-Diagramm: Schwarzes Loch

T in Jahren, R (Radialkoordinate, anstatt von X) in Lichtjahren, $c = 1$, schematische Darstellung:



Lichtstrahlen, die außerhalb des Horizonts nach außen laufen, können ins Unendliche entkommen (lichtartige Zukunfts-Unendlichkeit $\mathcal{J}_+$).

Lichtstrahlen innerhalb des Horizonts landen in der Singularität, auch wenn sie eigentlich nach außen laufen.

Radial nach innen laufendes Licht endet auf der Sternoberfläche oder an der Singularität.

Globale Geometrie

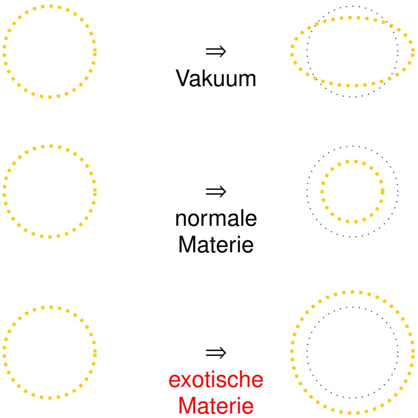
Weitere allgemeine geometrische Überlegungen:

Wie ändern sich Bündel von Lichtstrahlen in einer allgemeinen Raumzeit?

Daraus lassen sich allgemeine Aussagen folgern!

Bestimmte Resultate hängen nur von Energiebedingungen ab (etwa: „keine exotische Materie“)

Blick von vorne auf Bündel (Querschnitt):



Globale Geometrie

Aus solchen allgemeinen Überlegungen folgen Eindeutigkeitsbeweise, Singularitätentheoreme, Analogien zur Thermodynamik.

Dazu in der letzten Vorlesung als Übergang zur Quantengravitation mehr!

Jetzt erst einmal zurück zu astrophysikalischen Beobachtungen

Nachweis Schwarzer Löcher?

Bislang haben wir zu Schwarzen Löchern kennengelernt:

- Grundlegende Definition
- Spezielle Lösung (Schwarzschild)
- Geometrische Eigenschaften
- Stabilitätsbetrachtungen und Sternevolution: Wir erwarten Schwarze Löcher als Endzustände massereicher Sterne

Aber wie kann man Schwarze Löcher **nachweisen**? (Direkt sehen per Definition nicht!)

Energiegewinn durch Akkretion

Umkehrung unserer Fluchtgeschwindigkeits-Überlegungen in Teil 1: Körper der Masse m, der aus dem Unendlichen auf einen kompakten Körper mit Masse M und Radius R fällt.

Energieerhaltung (klassische Mechanik, hier als gute Näherung angewandt):

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - m\frac{GM}{r_1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - m\frac{GM}{r_2}$$

Einfall aus dem Unendlichen (bzw. aus so großer Entfernung, dass mGM/r sehr klein ist): $v_1 = 0$, $1/r_1 \approx 0$): Beim Aufprall auf Körper der Größe R

$$E_{kin} = m\frac{GM}{R}.$$

Einige Werte für die Energieeffizienz

Definiere die (massenbezogene) Energieeffizienz einer Reaktion als

$$\eta \equiv \frac{\text{freigesetzte Energie}}{\text{Ruheenergie der beteiligten Teilchen}}$$

mit Ruheenergie $E_0 = m_0 c^2$, mit m_0 der Ruhemasse.

Akkretion von Materie auf einen kompakten Körper (theoretische Obergrenzen):

$$\eta = \frac{GM}{c^2 R} = \begin{cases} 10^{-9} & \text{Erde} \\ 10^{-6} & \text{Sonne} \\ 0{,}2\,‰ & \text{Weißer Zwerg} \\ 20\% & \text{Neutronenstern} \\ 50\% & \text{Schwarzes Loch} \end{cases}$$

Energieeffizienz Akkretion bei Schwarzen Löchern

Theoretische Obergrenzen sind allerdings zu hoch angesetzt — wirkliche Prozesse mit richtige Akkretionsscheibe ineffizienter. Realistisch:

$$\eta_{SL} \leq 6\%$$

Andererseits: Bei rotierenden Schwarzen Löchern wird die umgebende Raumzeit bei der Rotation “mitgeführt”; das kann den Wert wieder etwas anheben (sog. *Penrose-Prozess*). Im Extremfall (Vorhandensein eines Horizonts schränkt Drehimpuls ein als Funktion der Masse):

$$\eta_{SL,rotmax} \leq 42\%$$

Einige Werte für die Energieeffizienz

Sind 6-42% viel oder wenig?

Alltagsbeispiele: Brennwerte typischer Stoffe

Stoff	Energie pro Masse [MJ/kg]	Effizienz η
Holz	< 25	$3 \cdot 10^{-16}$
Kohle	< 35	$4 \cdot 10^{-16}$
Öl / Benzin	< 50	$6 \cdot 10^{-16}$
Wasserstoff	140	$2 \cdot 10^{-15}$
Dynamit	7,5	$8 \cdot 10^{-17}$
TNT	4,7	$5 \cdot 10^{-17}$

Einige Werte für die Energieeffizienz

Kernspaltung (hier: U-235):

$$\eta_{ks} = \frac{200\ MeV}{235 \cdot 938\ MeV} = 0{,}9\ ‰$$

Kernfusion: pp I (Sonne):

$$\eta_{kf} = \frac{26\ MeV}{4 \cdot 938\ MeV} = 0{,}7\%$$

Mit anderen Worten: **6-42% ist *extrem* effizient im Vergleich mit allem anderen!**

Prolog: Durchlässigkeit der Atmosphäre

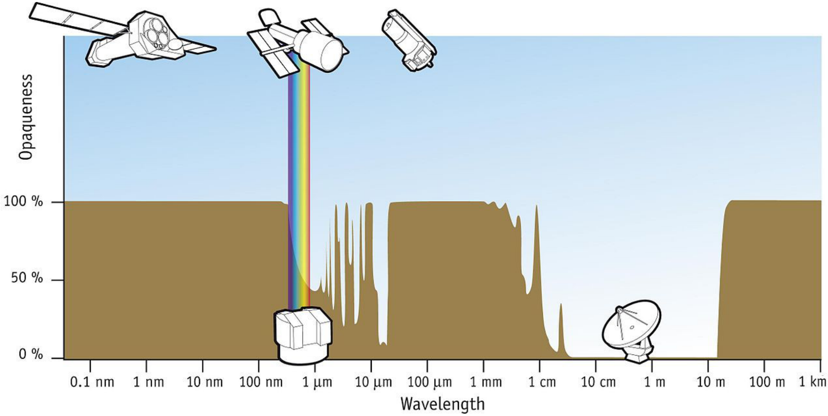
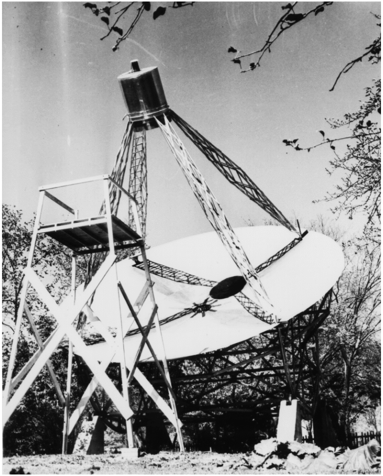


Bild: F. Granato (ESA/Hubble)

Prolog: Radio- und Röntgenastronomie

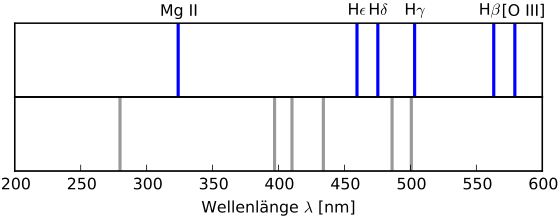


Grote Rebers Antenne in Wheaton
Bild Public Domain via Wikimedia Commons

Uhuru-Röntgensatellit (1970–1973)
Bild: NASA via Wikimedia Commons

Der erste Quasar: 3C 273

Maarten Schmidt 1963: Untersucht Radioquelle 3C 273



Objekt sieht aus wie Stern (d.h. strukturlos): Schmidt benennt es “Quasistellare Radioquelle”, kurz *Quasar*

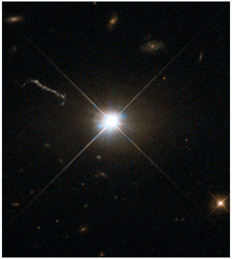


Bild: NASA/ESA Hubble

3C 273

Rotverschiebung $z = 0.158$ entspricht Abstand von rund 2 Milliarden Lichtjahren — mit die entferntesten Objekte überhaupt!

Helligkeit von 3C 273 im optischen: $m = 12.9$ – zum Vergleich: αCen hat $m = -0.27$ bei Abstand 4.3 Lichtjahren.

Astronomische Helligkeitsskala: Von αCen erreicht uns

$$10^{0.4(12.9-(-0.27))} \sim 185000$$

mehr an Strahlung, trotz der großen Entfernung. Sprich: 3C 273 muss

$$\left(\frac{2 \cdot 10^9}{4.3}\right)^2 \frac{1}{185000} \sim 10^{12}$$

mehr Strahlung aussenden als αCen. Vergleich: Milchstraße $\sim 10^{10}\ L_\odot$

3C 273

Typisch für Quasare: Helligkeitsvariationen!
Argument: Plötzliche Veränderung an Objekt mit Ausdehnung Δx erreicht uns (Lichtlaufzeitverzögerung!) über einen Zeitraum $\Delta x/c$ hinweg $\Rightarrow$ Zeitskalen für Veränderungen geben Obergrenze für die Größe!

Für Quasare: Variation auf Größenskala von Wochen $\Rightarrow$ $\Delta x \sim 1000$ AU (also beim Sonnensystem: Innerhalb der Oort'schen Wolke!)

Oft assoziiert mit Ausflüssen, Jets (im exzellenten HST-Bild zu sehen, ca. 200 000 Lj lang!)

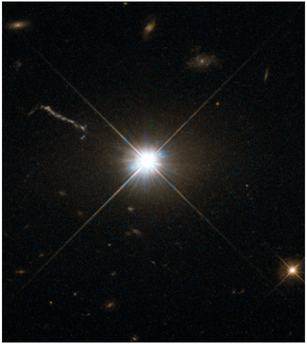


Bild: NASA/ESA Hubble

Radiogalaxien

Radiogalaxien mit großen Jet- und Lobenstrukturen, hier: Hercules A

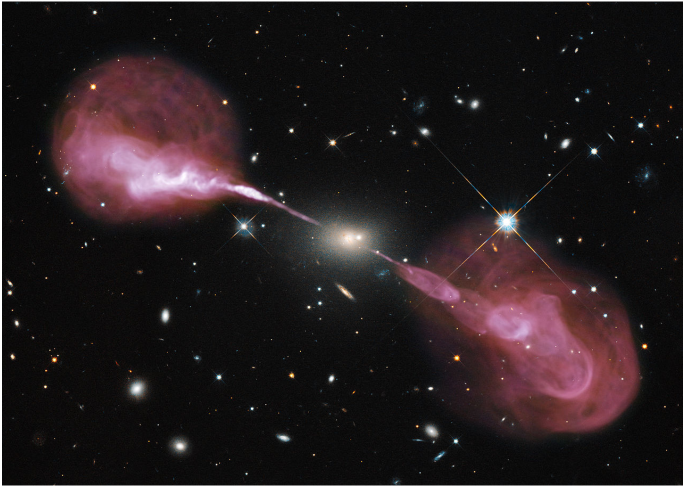
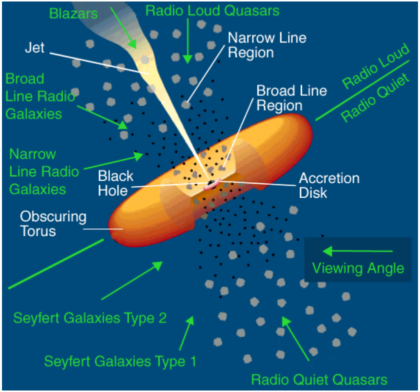


Bild: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Aktive Galaxienkerne

Ab 1960er Jahren: Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (vgl. Schücking 1989)



Heimatgalaxien, Jets, Blickrichtungen etc.: Viele weitere Informationen im Wikipedia-Artikel Aktiver Galaxienkern

Mikroquasare

Dieselben Prozesse gibt es auch auf kleineren Skalen:
Mikroquasare bzw. Röntgendoppelsterne wie z.B. Cygnus X-1

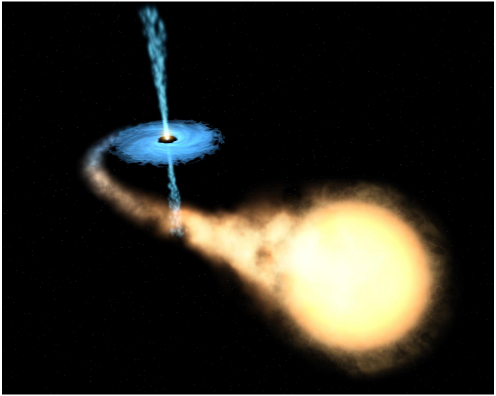
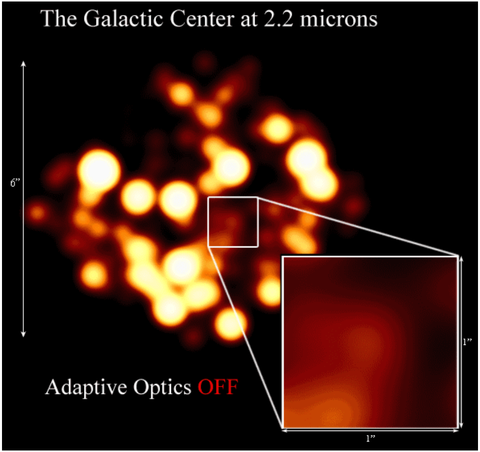


Bild: NASA/ESA

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

Bild: ESO/S. Guisard (www.eso.org/ sguisard)

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße



Animation: Ghez et al. / UCLA

In den 1990er Jahren dank Adaptiver Optik an Großteleskopen:

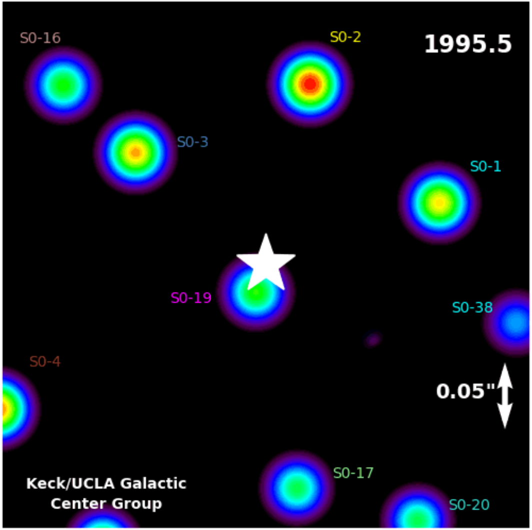
Reinhard Genzel (MPI Extraterrestrische Physik, VLT der ESO)

und

Andrea Ghez (UCLA, Keck-Teleskope)

nehmen das Zentrum der Milchstraße auf's Korn: Sagittarius A*

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße



Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

Sterne seit mittlerweile 20 Jahren verfolgt:

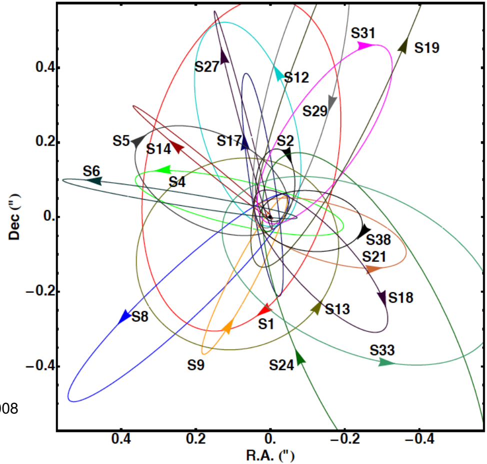


Bild: Gillessen et al. 2008

Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße

Sterne seit mittlerweile 20 Jahren verfolgt – Massenbestimmung via Kepler: 2,6 Millionen Sonnenmassen

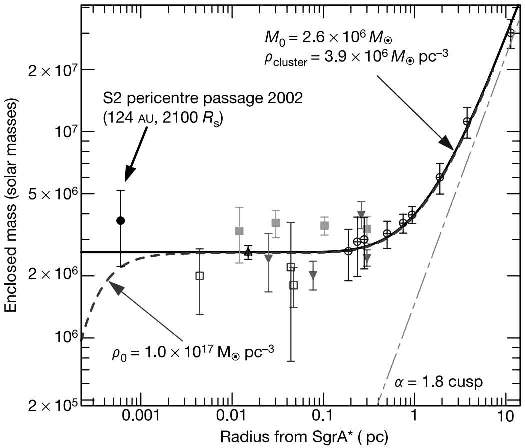


Bild aus Schödel et al. 2002

Event Horizon Telescope

Haben wir schwarze Löcher tatsächlich nachgewiesen?

Großer Teil des bisherigen Nachweise insbes. bei galaktischen Zentrum: Zu klein für alternative Möglichkeiten (Sternhaufen etc.) – aber einige exotische Möglichkeiten noch nicht ganz ausgeschlossen (Bosonensterne etc.)

Wichtiger Unterschied: Beim Aufprall von Materie schauen, ob das Objekt eine Oberfläche hat

Event Horizon Telescope

Nachweis Horizont durch direkte Abbildung – Ablenkungseffekte plus Schwarzes Loch? ⇒ Event Horizon Telescope

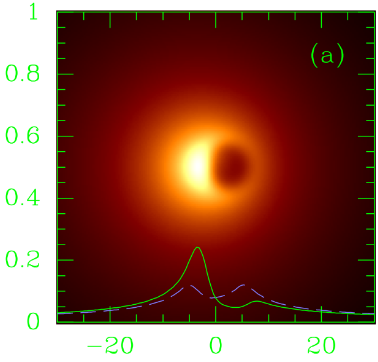
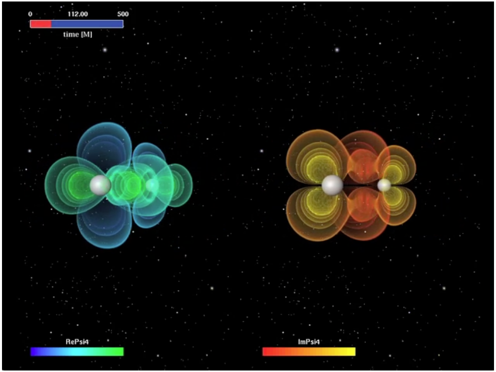


Bild: Falcke et al. 2001

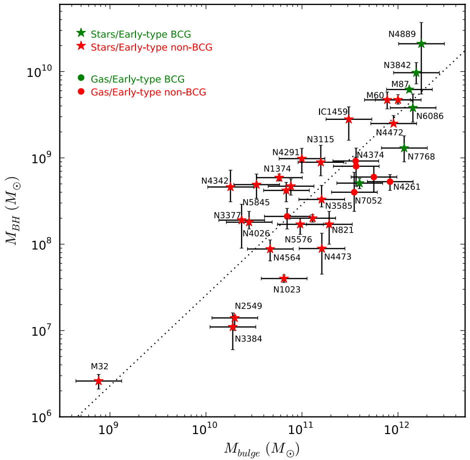
Gravitationswellen

Nachweis von Gravitationswellen verschmelzender Schwarzer Löcher – Detektoren wie LIGO (Advanced LIGO geht jetzt gerade online), GEO600 etc. sollten Nachweis in den nächsten Jahren führen können



Ökologie (supermassereicher) Schwarzer Löcher

Zusammenhang Masse der Sterne der Galaxie und Masse zentrales Schwarzes Loch:



Grafik: McConnell & Ma 2013

Ökologie (supermassereicher) Schwarzer Löcher

Evt. Feedback-Mechanismen in der AGN-Phase?

Rekonstruktion dieser Wechselwirkungen und der Ko-Evolution Galaxien/Schwarze Löcher ist aktuelles Forschungsthema!

Zusammenfassung

- Schwarze Löcher wichtiger Baustein heutiger Astrophysik
- Stellare Schwarze Löcher als Endzustände massereicher Sterne
- Supermassereiche Schwarze Löcher als Galaxienbausteine
- Aktive Galaxienkerne: Dahinter stecken Schwarze Löcher
- Spannende Beobachtungen in der Zukunft: Gravitationswellen, Horizont