



Monster im All: Schwarze Löcher

Jörn Wilms
Institut für Astronomie und Astrophysik

<http://astro.uni-tuebingen.de/~wilms>



Inhalt

- **Schwarze Löcher**
 - prä-Einstein
 - post-Einstein
- **Galaktische Schwarze Löcher**
 - kompakte Objekte
 - Akkretion
 - Stellare Schwarze Löcher
- **Das galaktische Zentrum**
 - ... ein $10^6 M_{\odot}$ schwarzes Loch!
- **Supermassive Schwarze Löcher im Universum**
 - Aktive Galaxien: $10^{6...8} M_{\odot}$ in anderen Galaxien
- **Zusammenfassung**



prä-Einstein, I

Rev. John Michell: *Phil. Trans. R. Soc. London*, **74**, 35–57 (1784):

VII. On the Means of discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in consequence of the Diminution of the Velocity of their Light, in case such a Diminution should be found to take place in any of them, and such other Data should be procured from Observations, as would be farther necessary for that Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.

Read November 27, 1783.

Über die Möglichkeit, die Entfernung, Größe usw. der Fixsterne zu bestimmen, als Ergebnis der Verringerung der Geschwindigkeit ihres Lichts, sollte eine solche Verringerung in einem von ihnen gefunden werden, und daß solche Daten von Beobachtungen gewonnen werden sollten, wie es notwendig wäre, um dieses Ziel zu erreichen.



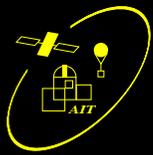
prä-Einstein, II

Rev. John Michell: *Phil. Trans. R. Soc. London*, **74**, 35–57 (1784):

42 *Mr. MICHELL on the Means of discovering the*

16. Hence, according to article 10, if the semi-diameter of a sphaere of the same density with the sun were to exceed that of the sun in the proportion of 500 to 1, a body falling from an infinite height towards it, would have acquired at its surface a greater velocity than that of light, and consequently, supposing light to be attracted by the same force in proportion to its vis inertiae, with other bodies, all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity.

... sollte der Halbmesser einer Kugel mit der gleichen Dichte wie der der Sonne den der Sonne um ein Verhältnis von 500 zu 1 übersteigen, ... dann würde alles von einem solchen Körper emittierte Licht zu ihm aufgrund der Gravitation zurückkehren.



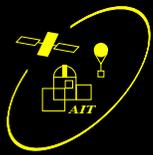
prä-Einstein, III



Pierre Simon Laplace (1749–1827)

“Es gibt . . . im Himmel dunkle Körper, die so groß und so zahlreich sind wie die Sterne. Strahlung eines leuchtenden Sterns mit der Dichte der Erde und einem Durchmesser des 250fachen der Sonne würde uns nicht erreichen wegen der Anziehungskraft der Gravitation; es ist möglich, daß die größten leuchtenden Körper im Universum aus diesem Grund unsichtbar sind.”

Exposition du système du monde,
2. Auflage, 1796



prä-Einstein, IV



Pierre Simon Laplace (1749–1827)

~~“Es gibt ... im Himmel dunkle Körper, die so groß und so zahlreich sind wie die Sterne. Strahlung eines leuchtenden Sterns mit der Dichte der Erde und einem Durchmesser des 250fachen der Sonne würde uns nicht erreichen wegen der Anziehungskraft der Gravitation; es ist möglich, daß die größten leuchtenden Körper im Universum aus diesem Grund unsichtbar sind.”~~

Exposition du système du monde,
3. Auflage, 1808



Was sind schwarze Löcher?, I

Apfel nach oben geworfen:

Gesamtenergie:

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$



Was sind schwarze Löcher?, II

Apfel nach oben geworfen:

Gesamtenergie:

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

$$E_{\text{pot}} = -G \frac{M_{\text{Erde}} m_{\text{Apfel}}}{r_{\text{Erde}}}$$

potentielle Energie



Was sind schwarze Löcher?, III

Apfel nach oben geworfen:

Gesamtenergie:

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

$$E_{\text{pot}} = -G \frac{M_{\text{Erde}} m_{\text{Apfel}}}{r_{\text{Erde}}}$$

potentielle Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_{\text{Apfel}} v^2$$

kinetische Energie



Was sind schwarze Löcher?, IV

Apfel nach oben geworfen:

Gesamtenergie:

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

$$E_{\text{pot}} = -G \frac{M_{\text{Erde}} m_{\text{Apfel}}}{r_{\text{Erde}}}$$

potentielle Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_{\text{Apfel}} v^2$$

kinetische Energie

Apfel kann dann Erde verlassen, wenn $E > 0$, d.h. für

$$v \geq v_{\text{Entweich}} = \sqrt{\frac{2GM_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}}}$$



Was sind schwarze Löcher?, V

Apfel nach oben geworfen:

Gesamtenergie:

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

$$E_{\text{pot}} = -G \frac{M_{\text{Erde}} m_{\text{Apfel}}}{r_{\text{Erde}}}$$

potentielle Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_{\text{Apfel}} v^2$$

kinetische Energie

Apfel kann dann Erde verlassen, wenn $E > 0$, d.h. für

$$v \geq v_{\text{Entweich}} = \sqrt{\frac{2GM_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}}}$$

Erde: $M_{\text{Erde}} = 5 \times 10^{24}$ kg, $r_{\text{Erde}} = 6378$ km,

$$v_{\text{Entweich, Erde}} = 11.2 \text{ km s}^{-1}$$



Was sind schwarze Löcher?, VI

Apfel nach oben geworfen:

Gesamtenergie:

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

$$E_{\text{pot}} = -G \frac{M_{\text{Erde}} m_{\text{Apfel}}}{r_{\text{Erde}}}$$

potentielle Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_{\text{Apfel}} v^2$$

kinetische Energie

Apfel kann dann Erde verlassen, wenn $E > 0$, d.h. für

$$v \geq v_{\text{Entweich}} = \sqrt{\frac{2GM_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}}}$$

Sonne: $M_{\text{Sonne}} = 2 \times 10^{30}$ kg, $r_{\text{Sonne}} = 695500$ km,

$$v_{\text{Entweich, Sonne}} = 620 \text{ km s}^{-1}$$



Was sind schwarze Löcher?, VII

Apfel nach oben geworfen:

Gesamtenergie:

$$E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$$

$$E_{\text{pot}} = -G \frac{M_{\text{Erde}} m_{\text{Apfel}}}{r_{\text{Erde}}}$$

potentielle Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_{\text{Apfel}} v^2$$

kinetische Energie

Apfel kann dann Erde verlassen, wenn $E > 0$, d.h. für

$$v \geq v_{\text{Entweich}} = \sqrt{\frac{2GM_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}}}$$

Schwarzes Loch: Körper mit Masse und Radius, bei dem die Entweichgeschwindigkeit größer ist als die Lichtgeschwindigkeit.



Einstein, I



Albert Einstein (1879–1955)

Spezielle Relativitätstheorie (1905):

- in *allen* Bezugssystemen hat die Lichtgeschwindigkeit c den gleichen Wert
- Beobachter mit konstanter Geschwindigkeit messen die gleichen physikalischen Gesetze

Daraus folgt:

⇒ Raum und Zeit sind relativ
("4D-Raumzeit")

⇒ $E = mc^2$
("Masse äquivalent zu Energie")



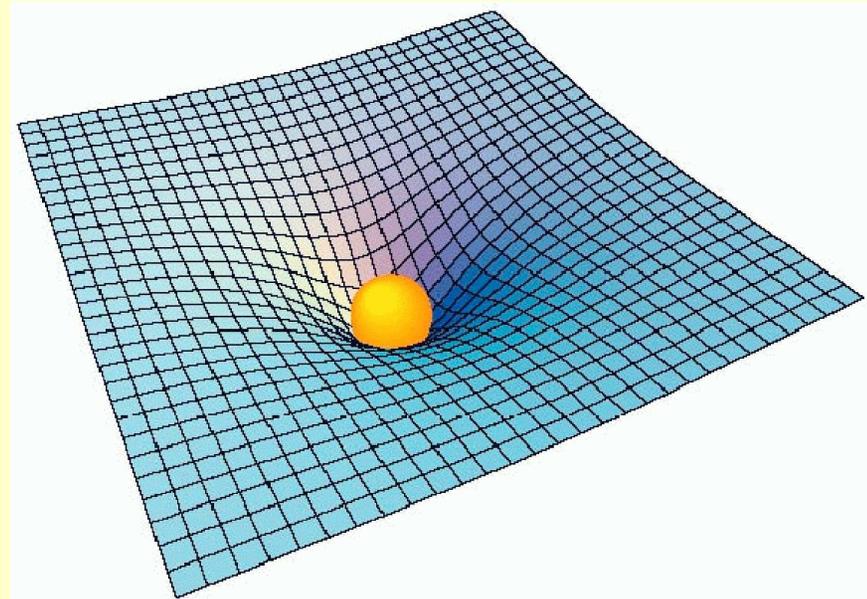
Einstein, II



Albert Einstein (1879–1955)

Allgemeine Relativitätstheorie (1916):

- Masse krümmt den Raum (“Metrik”)





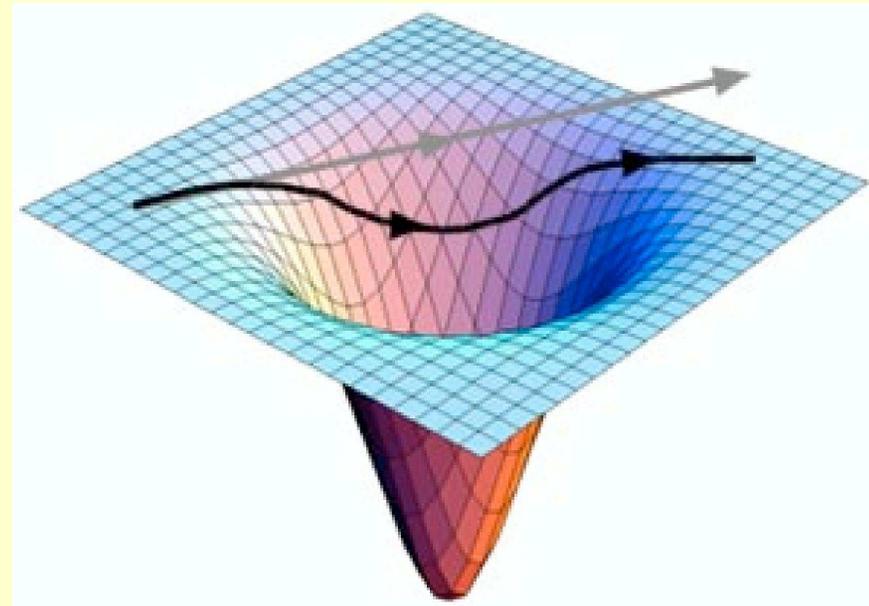
Einstein, III



Albert Einstein (1879–1955)

Allgemeine Relativitätstheorie (1916):

- Masse krümmt den Raum (“Metrik”)
- Licht bewegt sich durch gekrümmten Raum





post-Einstein



Karl Schwarzschild (1873–1916)

Direkt nach Veröffentlichung der ART:

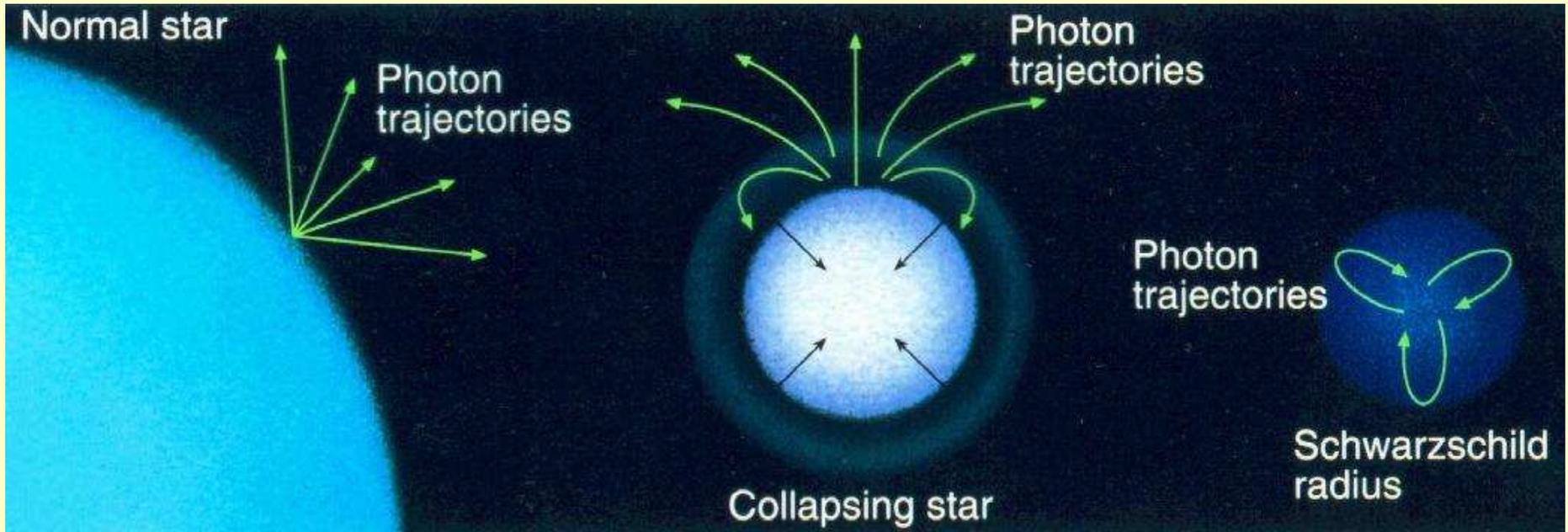
$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2$$

(Schwarzschild Metrik).

Beschreibt “Form des Raumes” in Umgebung einer Masse M .



post-Einstein



$$R > R_s$$

$$R \sim R_s$$

$$R < R_s$$

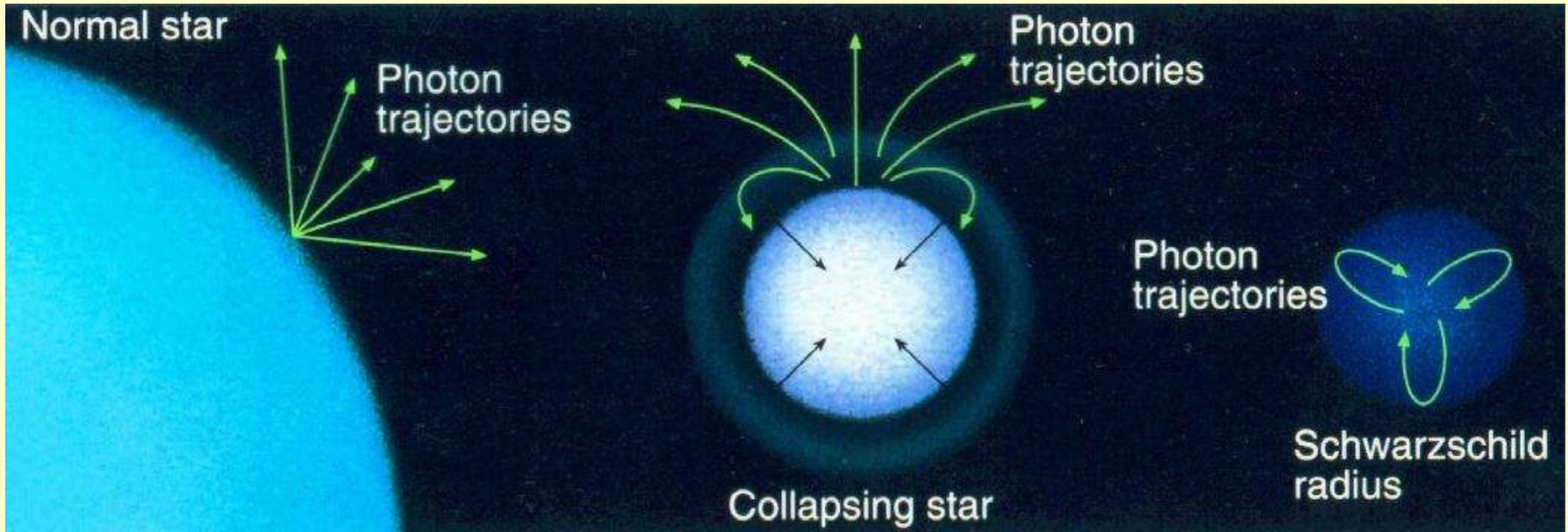
Verhalten von Licht bestimmt von Emissionsort, in Abhängigkeit vom **Schwarzschildradius:**

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \sim 3 \text{ km} \frac{M}{M_\odot}$$

J.N. Imamura



post-Einstein



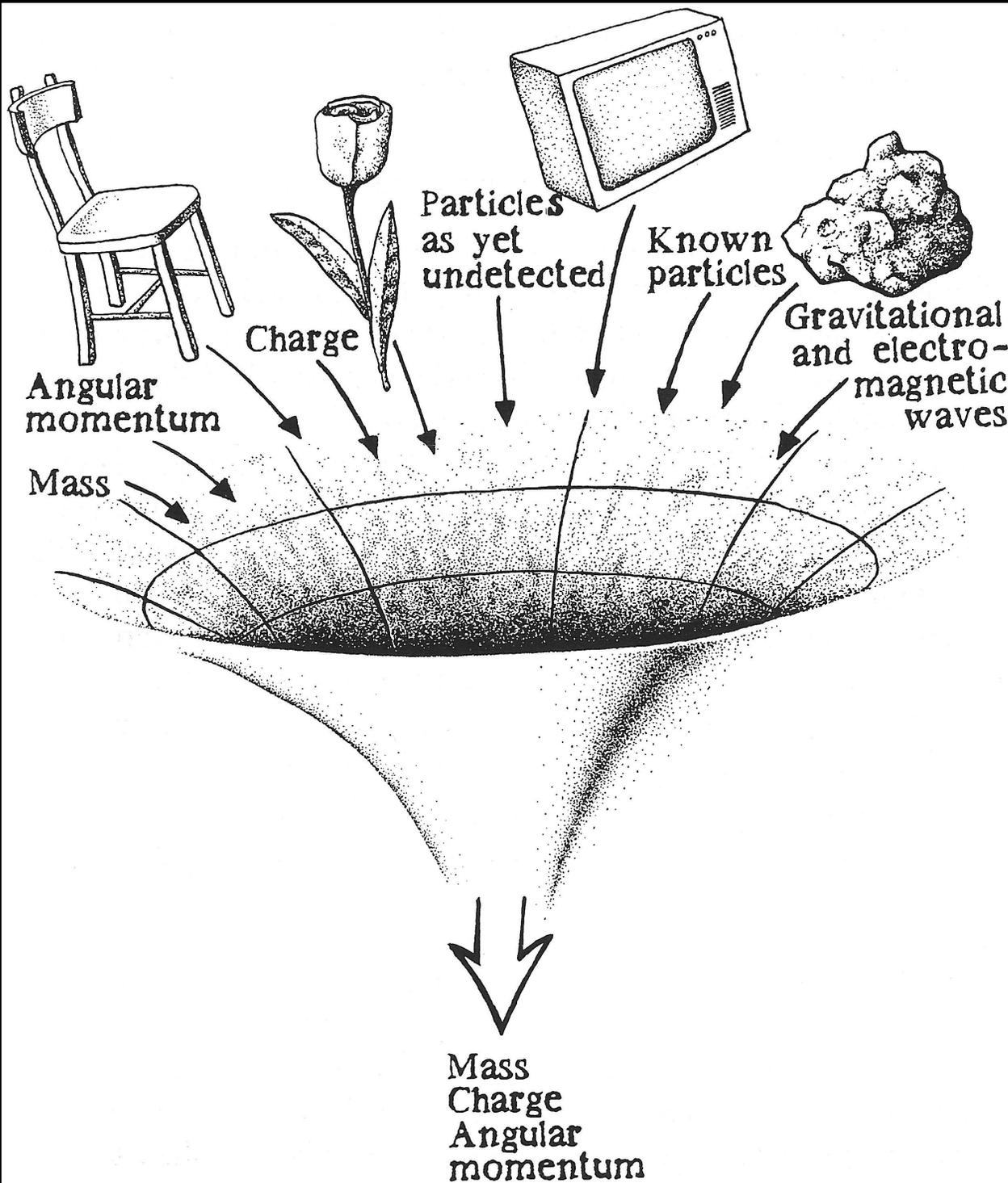
$$R > R_s$$

$$R \sim R_s$$

$$R < R_s$$

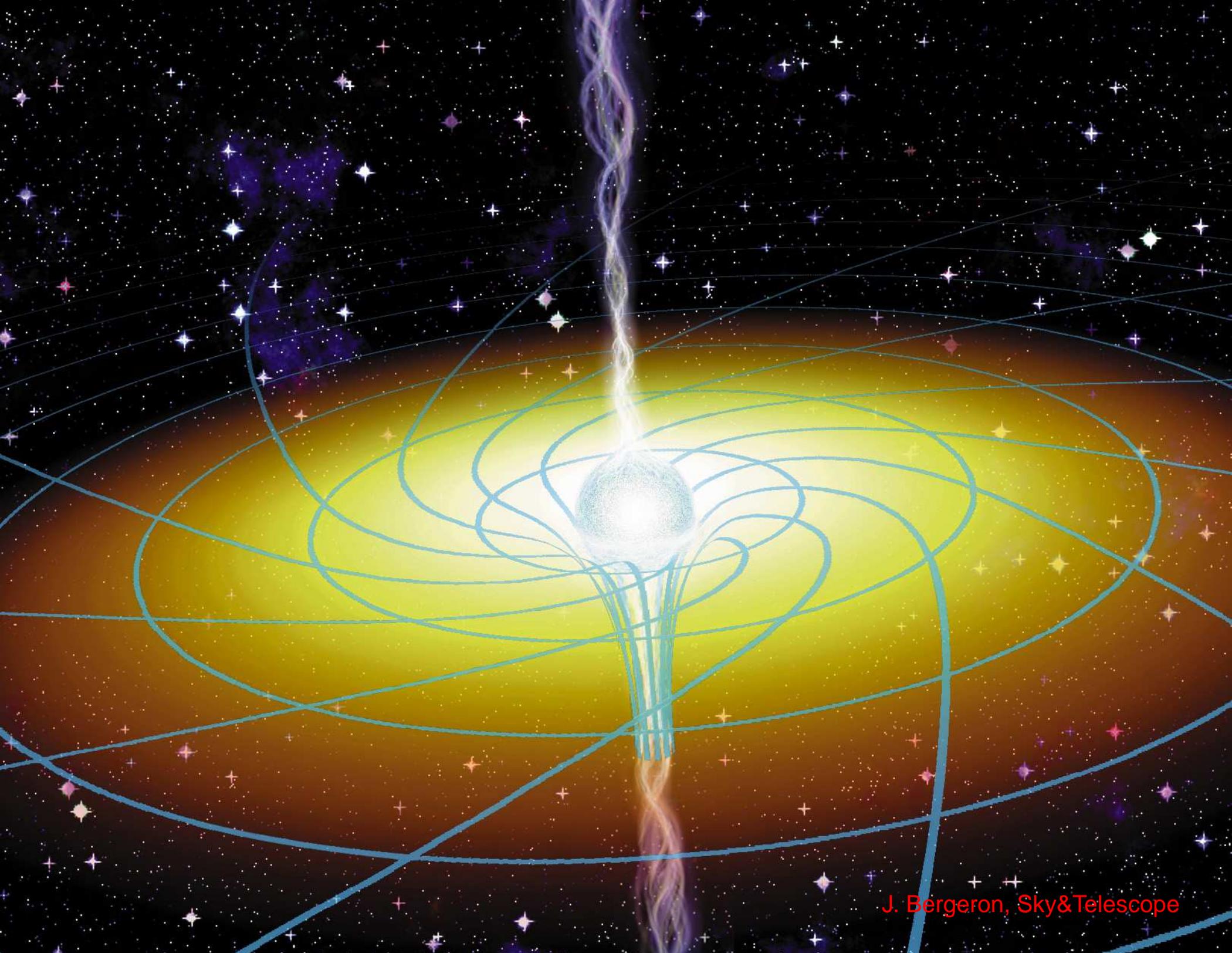
Schwarzes Loch in der Relativitätstheorie: Körper, der kleiner ist als sein Schwarzschildradius

J.N. Imamura



Schwarze Löcher sind sehr einfache physikalische Objekte, bestimmt durch

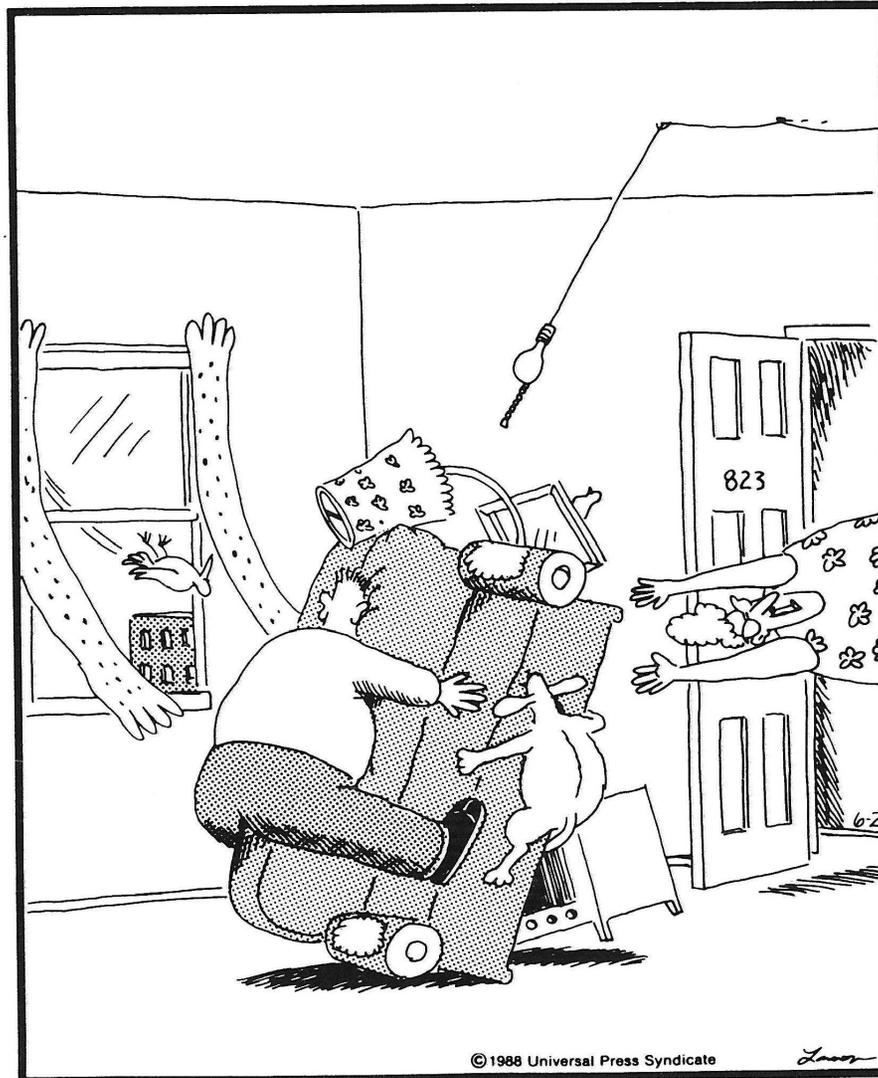
- Masse
- Drehimpuls
- (Ladung)



J. Bergeron, Sky&Telescope

THE FAR SIDE

By GARY LARSON



Urplötzlich verwandelte sich aufgrund noch nicht vollständig verstandener Ursachen das Apartment von Darren Belsky in das Zentrum eines schwarzen Lochs.



Kompakte Objekte, I

Sterne beenden ihr Leben als eines von drei verschiedenen **kompakten** Objekten:

Weißer Zwerg: $\rho \sim 10^5 \dots 10^6 \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim R_{\text{Erde}}$, Gleichgewicht zwischen Gravitation und Gas durch Druck ([relativistisch] entarteter) Elektronen, $M < 1.44 M_{\odot}$ (**Chandrasekhar-Grenze**).



Kompakte Objekte, II

Sterne beenden ihr Leben als eines von drei verschiedenen **kompakten** Objekten:

Weißer Zwerg: $\rho \sim 10^5 \dots 10^6 \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim R_{\text{Erde}}$, Gleichgewicht zwischen Gravitation und Gas durch Druck ([relativistisch] entarteter) Elektronen, $M < 1.44 M_{\odot}$ (**Chandrasekhar-Grenze**).

Neutronenstern: $\rho \sim 10^{13} \dots 10^{16} \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim 10 \text{ km}$, bei dieser Dichte inv. β -Zerfall ($p + e^{-} \rightarrow n$), d.h. Stern hat hohen Neutronenanteil. $1.44 M_{\odot} < M \lesssim 3 M_{\odot}$ (**Oppenheimer-Volkoff Grenze**).



Kompakte Objekte, III

Sterne beenden ihr Leben als eines von drei verschiedenen **kompakten** Objekten:

Weißer Zwerg: $\rho \sim 10^5 \dots 10^6 \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim R_{\text{Erde}}$, Gleichgewicht zwischen Gravitation und Gas durch Druck ([relativistisch] entarteter) Elektronen, $M < 1.44 M_{\odot}$ (**Chandrasekhar-Grenze**).

Neutronenstern: $\rho \sim 10^{13} \dots 10^{16} \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim 10 \text{ km}$, bei dieser Dichte inv. β -Zerfall ($p + e^- \rightarrow n$), d.h. Stern hat hohen Neutronenanteil. $1.44 M_{\odot} < M \lesssim 3 M_{\odot}$ (**Oppenheimer-Volkoff Grenze**).

Schwarzes Loch: Für $M \gtrsim 3 M_{\odot}$. kein stabiler Zustand bekannt

⇒ Stern fällt vollständig in sich zusammen

⇒ **Schwarzes Loch**

Ereignishorizont bei $R_S = 3(M/M_{\odot}) \text{ km}$



Kompakte Objekte, IV

Sterne beenden ihr Leben als eines von drei verschiedenen **kompakten** Objekten:

Weißer Zwerg: $\rho \sim 10^5 \dots 10^6 \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim R_{\text{Erde}}$, Gleichgewicht zwischen Gravitation und Gas durch Druck ([relativistisch] entarteter) Elektronen, $M < 1.44 M_{\odot}$ (**Chandrasekhar-Grenze**).

Neutronenstern: $\rho \sim 10^{13} \dots 10^{16} \text{ g cm}^{-3}$, $R \sim 10 \text{ km}$, bei dieser Dichte inv. β -Zerfall ($p + e^- \rightarrow n$), d.h. Stern hat hohen Neutronenanteil. $1.44 M_{\odot} < M \lesssim 3 M_{\odot}$ (**Oppenheimer-Volkoff Grenze**).

Schwarzes Loch: Für $M \gtrsim 3 M_{\odot}$. kein stabiler Zustand bekannt

⇒ Stern fällt vollständig in sich zusammen

⇒ **Schwarzes Loch**

Ereignishorizont bei $R_S = 3(M/M_{\odot}) \text{ km}$

Wird ein kompaktes Objekt mit $M > 3 M_{\odot}$ beobachtet:

Schwarzkandidat



Akkretion, I

Astrophysikalische Energiequellen:

1. Kernfusion

Typische Reaktionen à la



Freiwerdende Energie:

Fusion erzeugt

$$\sim 6 \times 10^{18} \text{ erg g}^{-1} = 6 \times 10^{11} \text{ J g}^{-1}$$

$$(\Delta E_{\text{nuc}} \sim 0.007 m_p c^2)$$



Akkretion, II

Astrophysikalische Energiequellen:

1. Kernfusion

Typische Reaktionen à la



Freiwerdende Energie:

Fusion erzeugt

$$\sim 6 \times 10^{18} \text{ erg g}^{-1} = 6 \times 10^{11} \text{ J g}^{-1}$$

$$(\Delta E_{\text{nuc}} \sim 0.007 m_p c^2)$$

2. Gravitation

Akkretion von Masse m von ∞ nach R_S auf Schwarzes Loch M liefert

$$\Delta E_{\text{acc}} = \frac{GMm}{R_S} \text{ wo } R_S = \frac{3GM}{c^2}$$

Akkretion erzeugt

$$\sim 10^{20} \text{ erg g}^{-1} = 10^{13} \text{ J g}^{-1}$$

$$(\text{d.h.}, \Delta E_{\text{acc}} \sim 0.1 m_p c^2)$$



Akkretion, III

Astrophysikalische Energiequellen:

1. Kernfusion

Typische Reaktionen à la



Freiwerdende Energie:

Fusion erzeugt

$$\sim 6 \times 10^{18} \text{ erg g}^{-1} = 6 \times 10^{11} \text{ J g}^{-1}$$

$$(\Delta E_{\text{nuc}} \sim 0.007 m_p c^2)$$

2. Gravitation

Akkretion von Masse m von ∞ nach R_S auf Schwarzes Loch M liefert

$$\Delta E_{\text{acc}} = \frac{GMm}{R_S} \text{ wo } R_S = \frac{3GM}{c^2}$$

Akkretion erzeugt

$$\sim 10^{20} \text{ erg g}^{-1} = 10^{13} \text{ J g}^{-1}$$

$$(\text{d.h., } \Delta E_{\text{acc}} \sim 0.1 m_p c^2)$$

⇒ Akkretion von Material ist die **effizienteste** astrophysikalische Energiequelle.

... daher sind akkretierende Objekte auch die leuchtkräftigsten im ganzen Universum.

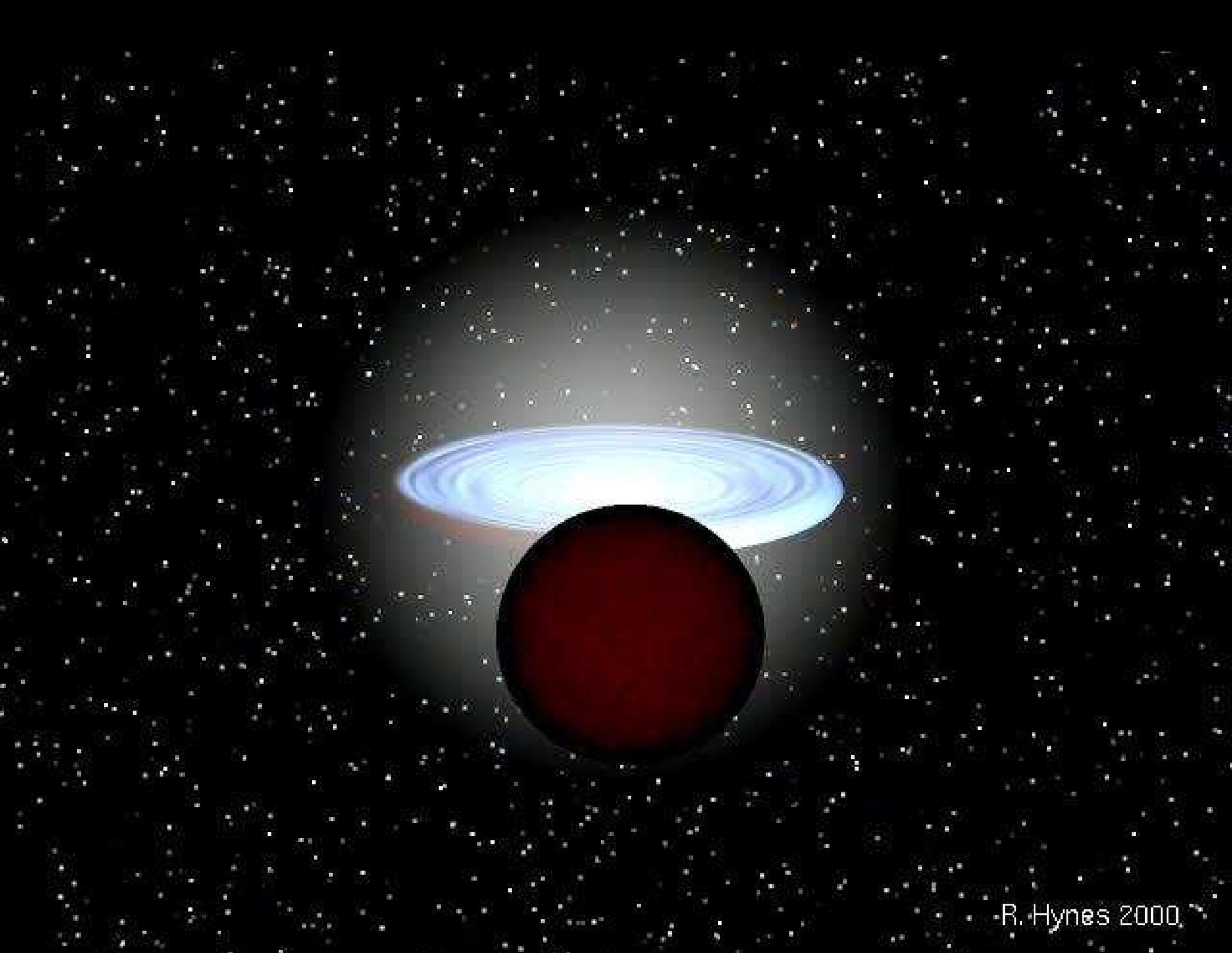


Material fließt von normalem Stern über inneren Lagrangeunkt, L_1 , auf kompaktes Objekt

⇒ Ausbildung einer Akkretionsscheibe, mit Temperatur $\sim 10^7$ K

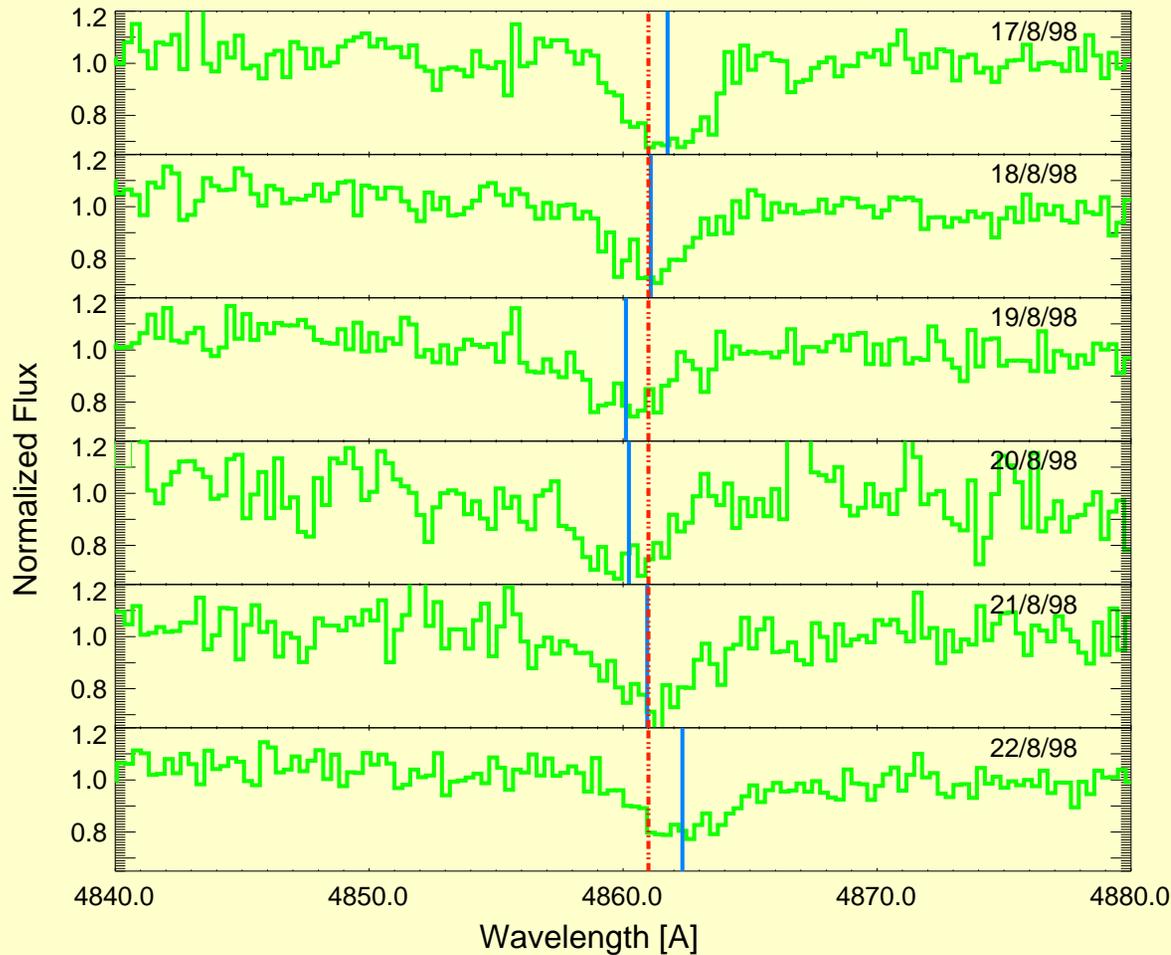
⇒ Röntgenstrahlung.

⇒ Vortrag Staubert letzte Woche





Massenbestimmung



Bewegung der $H\beta$ Linie in HDE 226868/Cyg X-1
(Pottschmidt, Wilms, et al., in Vorb.)

In **Doppelsternsystem**: Masse des kompakten Objekts aus

3. Keplerschen Gesetz

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2}$$

bestimmbar (a : große Halbachse, T : Umlaufzeit, $M_{1,2}$: Massen).

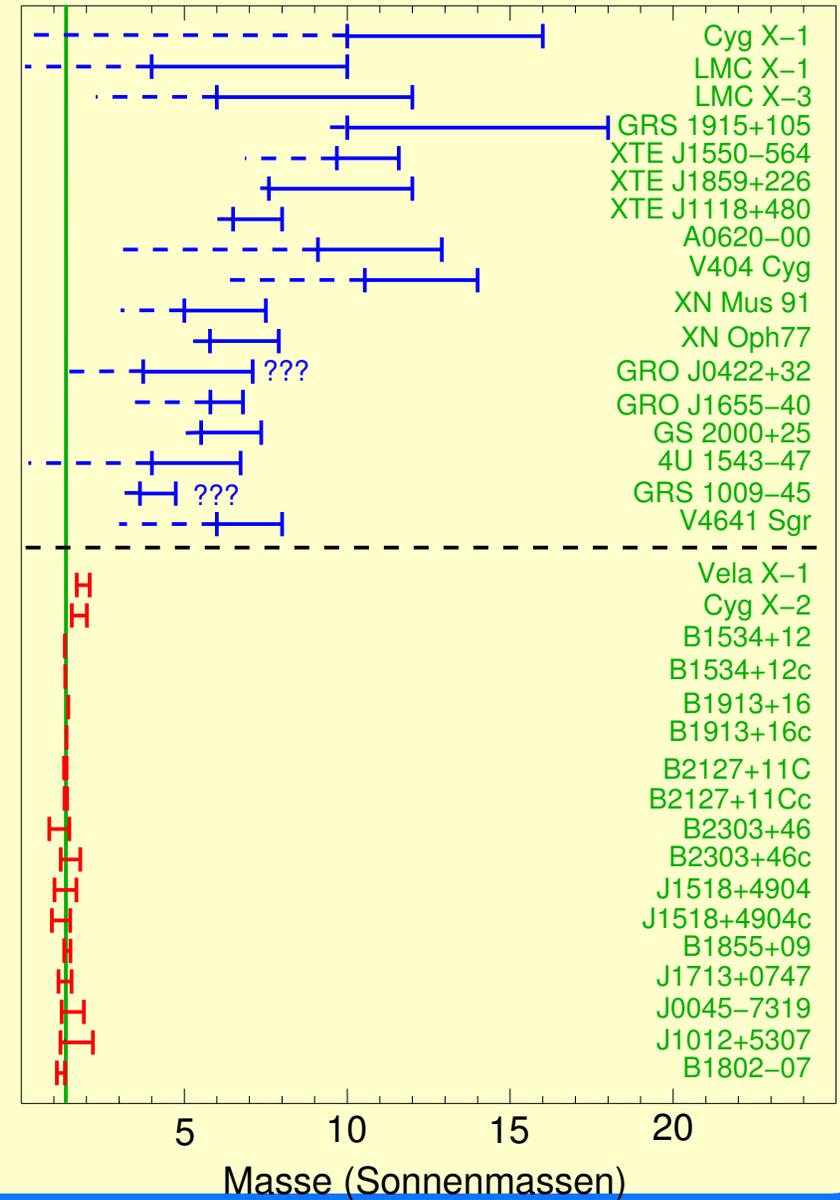
Daraus ableitbar: **Massenfunktion**

$$MF = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{a_1^3 \sin^3 i}{U^2}$$

MF ist **untere Grenze** für M_2 .

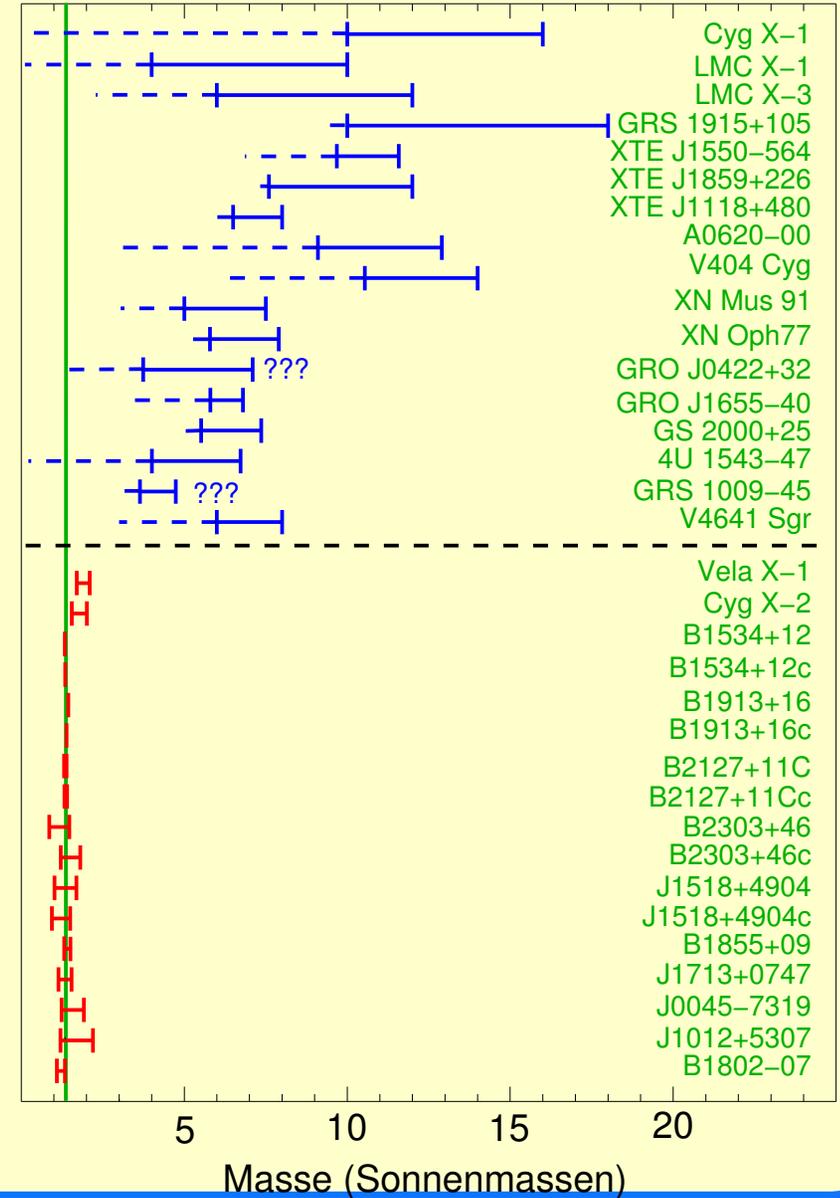
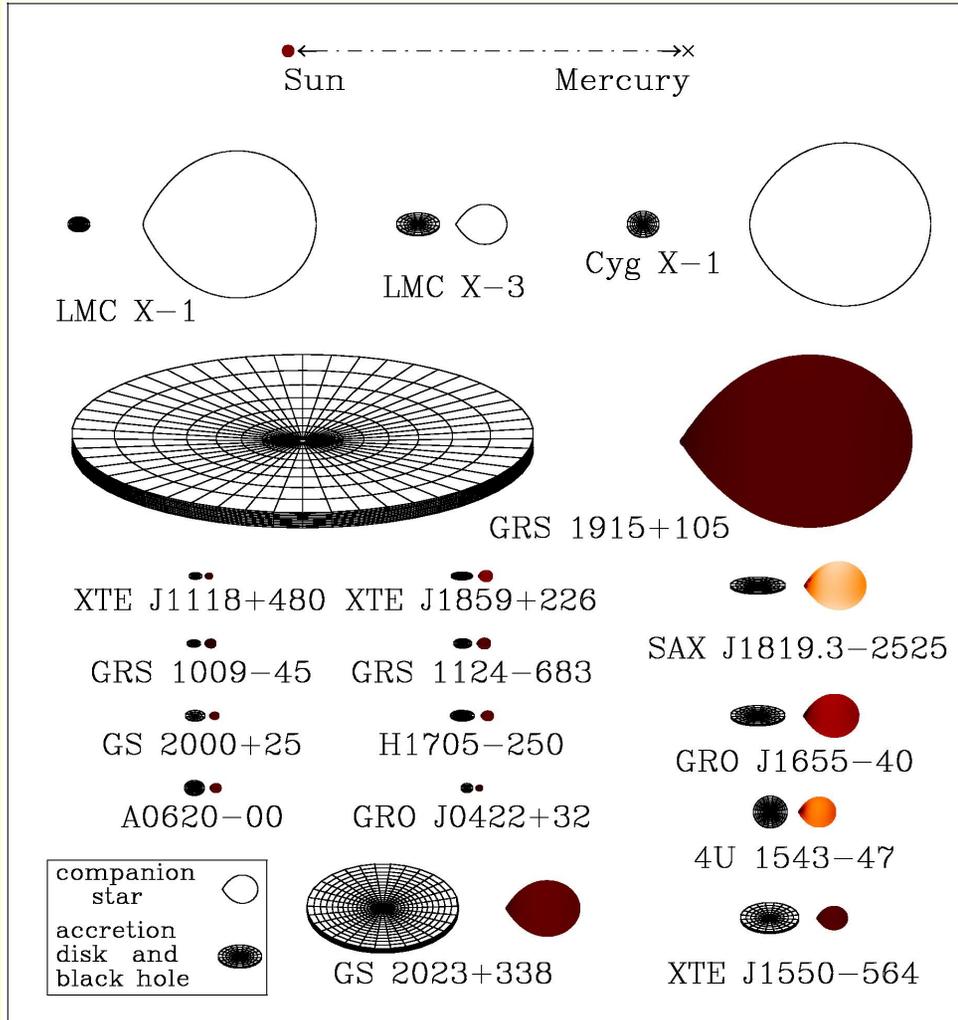


Massenbestimmung



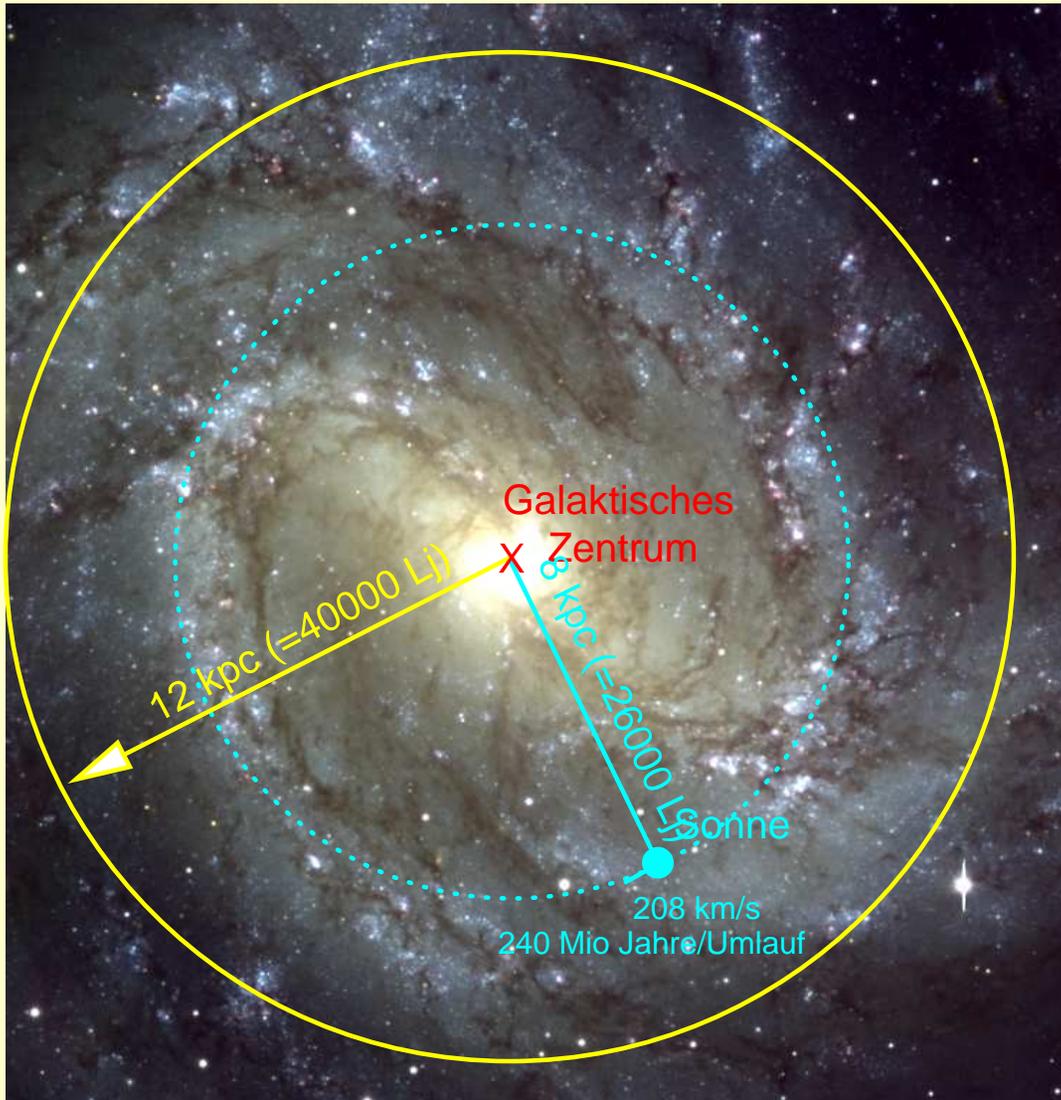


Massenbestimmung





Milchstraße als Galaxie, I



M83: ESO [VLT ANTU+FORs1]

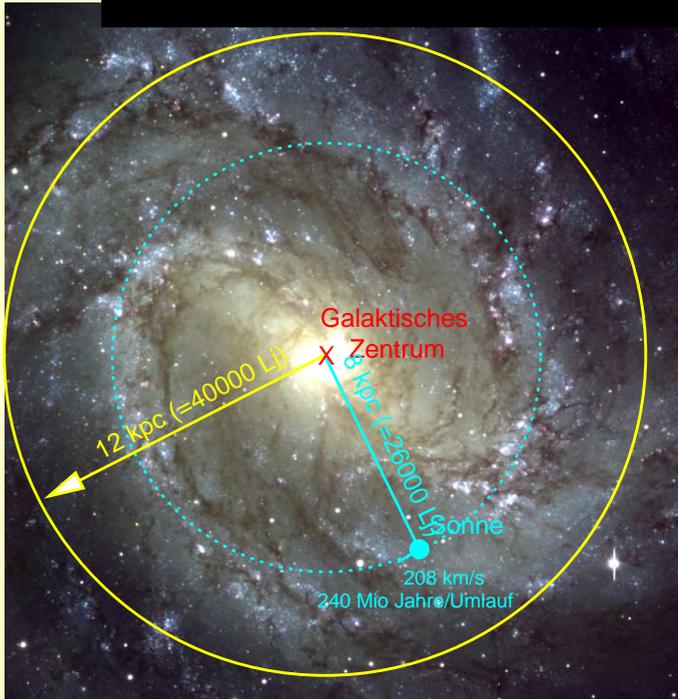
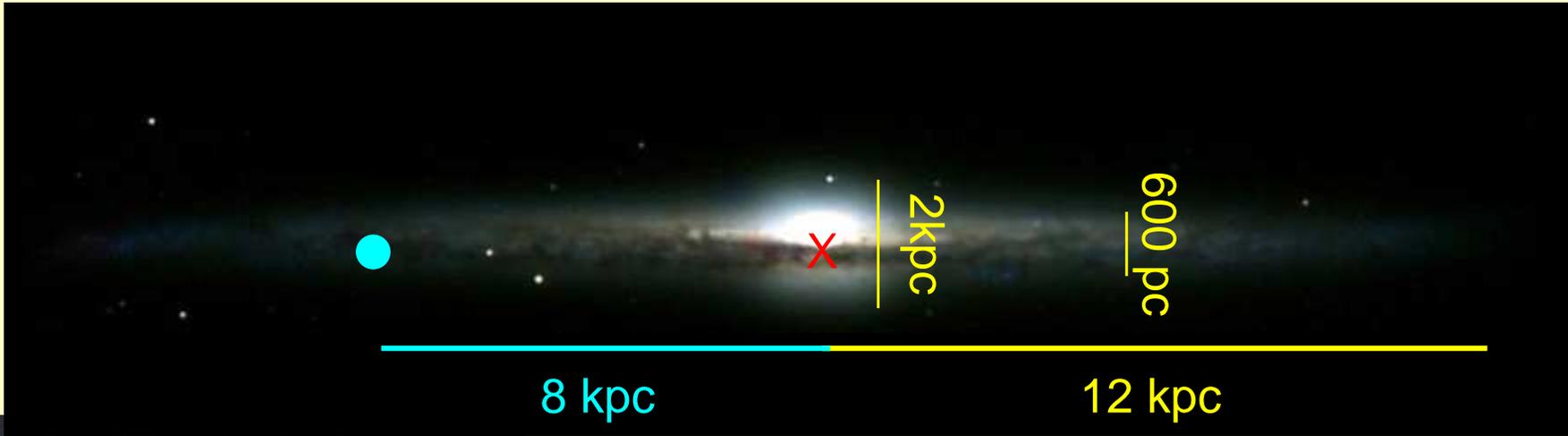
IAAT

Leuchtkraft: $\sim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$
Masse: $\sim 10^{11} M_{\odot}$ (leuchtend)
 $\sim 10^{12} M_{\odot}$ (insges.)
Sterndichte: $\sim 0.3 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$

$1 M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{g} = 2 \times 10^{30} \text{kg}$,
 $1 L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{erg s}^{-1} = 4 \times 10^{26} \text{W}$



Milchstraße als Galaxie, II

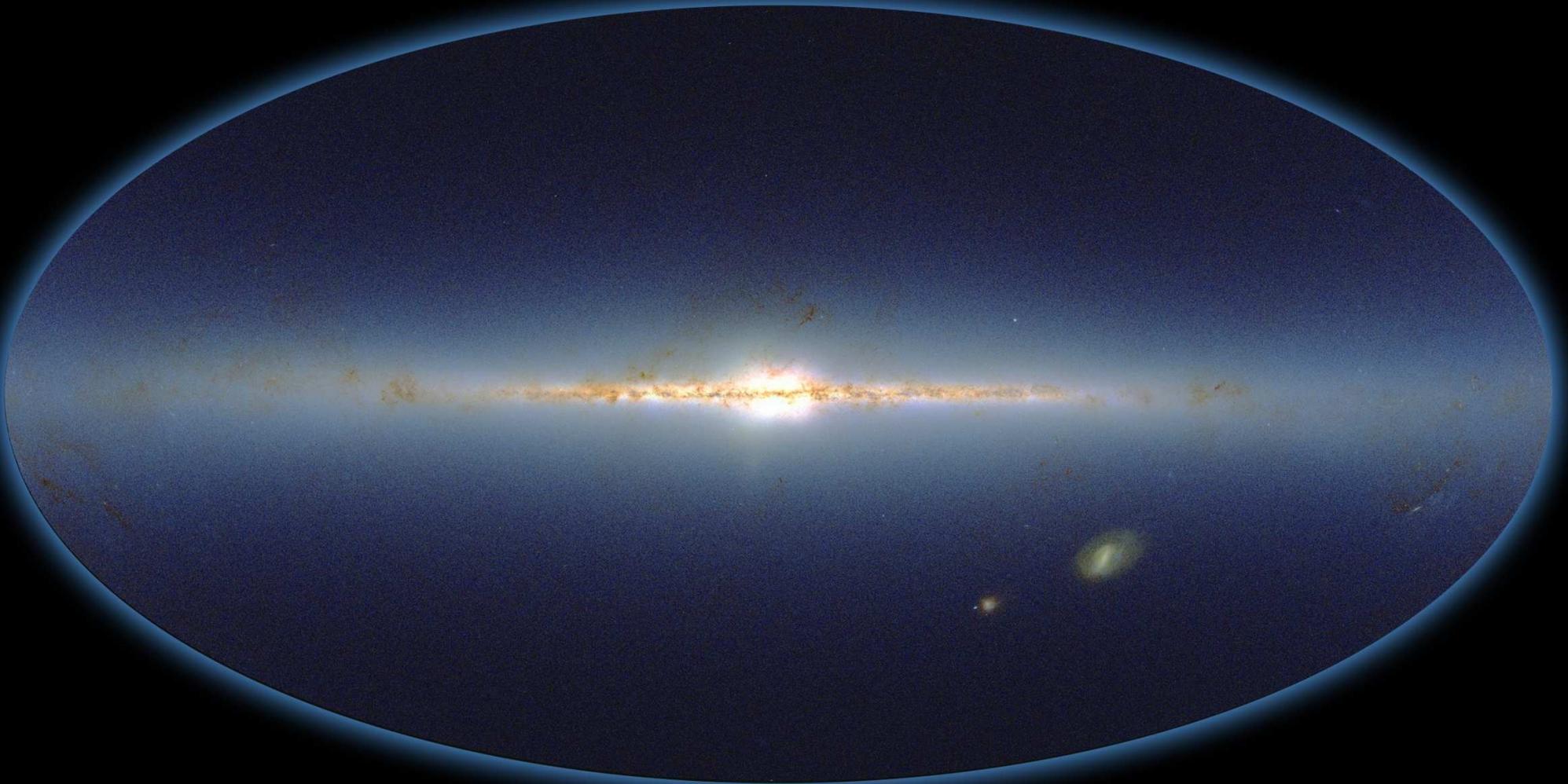


- Leuchtkraft: $\sim 2 \times 10^{10} L_{\odot}$
- Masse: $\sim 10^{11} M_{\odot}$ (leuchtend)
 $\sim 10^{12} M_{\odot}$ (insges.)
- Sterndichte: $\sim 0.3 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$

$1 M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g} = 2 \times 10^{30} \text{ kg},$
 $1 L_{\odot} = 4 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1} = 4 \times 10^{26} \text{ W}$

NGC 4565: W. McLaughlin

2MASS Covers the Sky

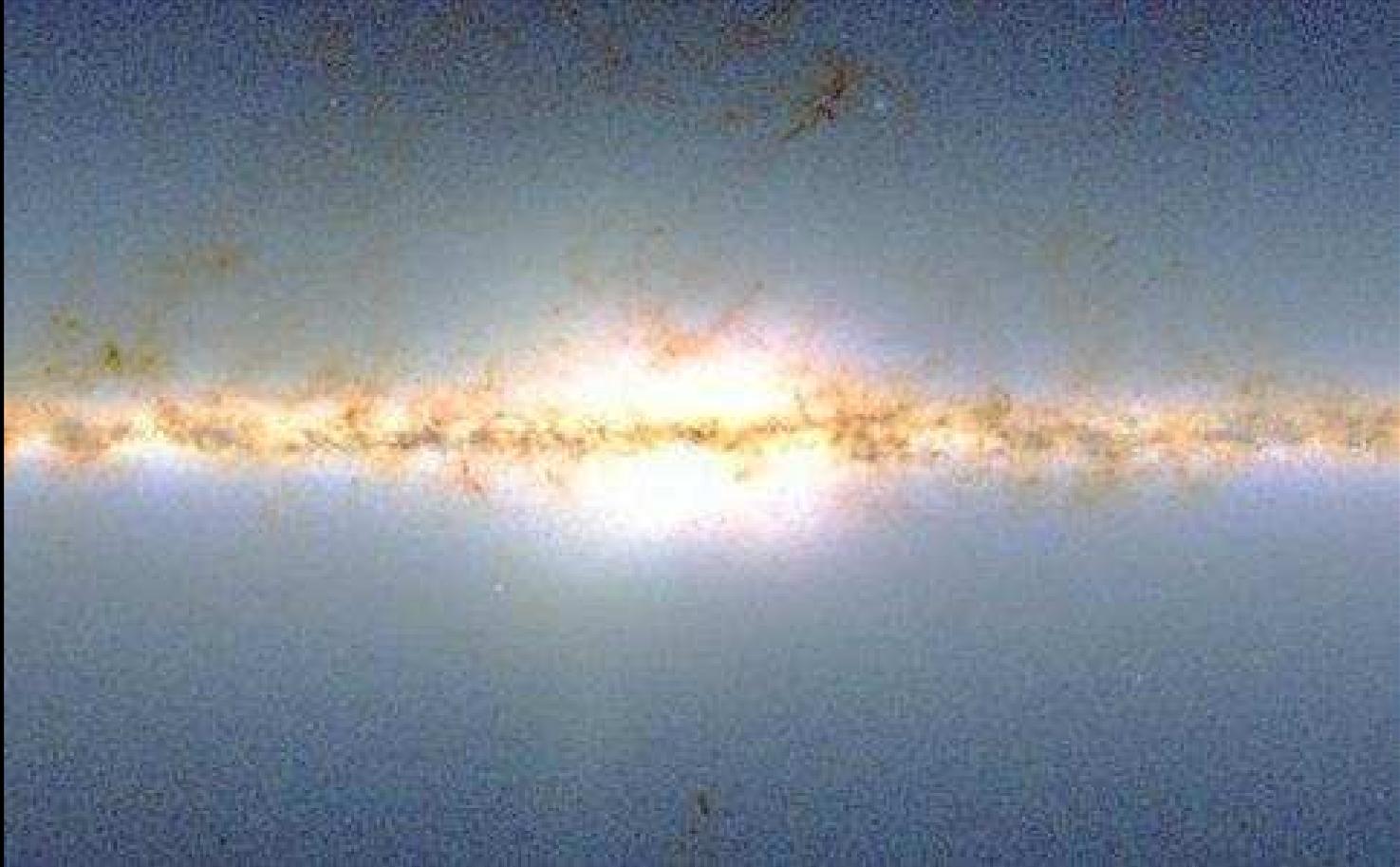


The Two Micron All Sky Survey

Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & Univ. of Massachusetts

Infrarot: Staub in MW wird durchlässig!

2MASS: 3 IR Bänder: J ($1.25 \mu\text{m}$), H ($1.65 \mu\text{m}$), K_s ($2.17 \mu\text{m}$)



2MASS: Innere $60^\circ \times 45^\circ$



Der innere Parsec: Zentraler Sternhaufen, I



Zentrum von Sgr A enthält
massereichen und dichten
Sternhaufen

($> 10^6 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$, vgl.

Sonnenumgebung: $0.1 M_{\odot} \text{pc}^{-3}$)



Der innere Parsec: Zentraler Sternhaufen, II



Beobachtungen sehr aufwendig:
Verschlechterung der Auflösung
durch **astronomisches Seeing**
($\sim 0.7'' = 0.2 \text{ pc}$)

Gemini North/AURA

IAAT



Der innere Parsec: Zentraler Sternhaufen, III



Gemini North/AURA

IAAT

Beobachtungen sehr aufwendig:
Verschlechterung der Auflösung
durch **astronomisches Seeing**
($\sim 0.7'' = 0.2 \text{ pc}$)
... das durch **adaptive Optiken**
korrigiert werden kann
 \implies Auflösung: **Beugungslimit!**

$$\theta = 1.22 \text{ rad} \cdot \lambda/d \sim 1 \text{ mas}$$

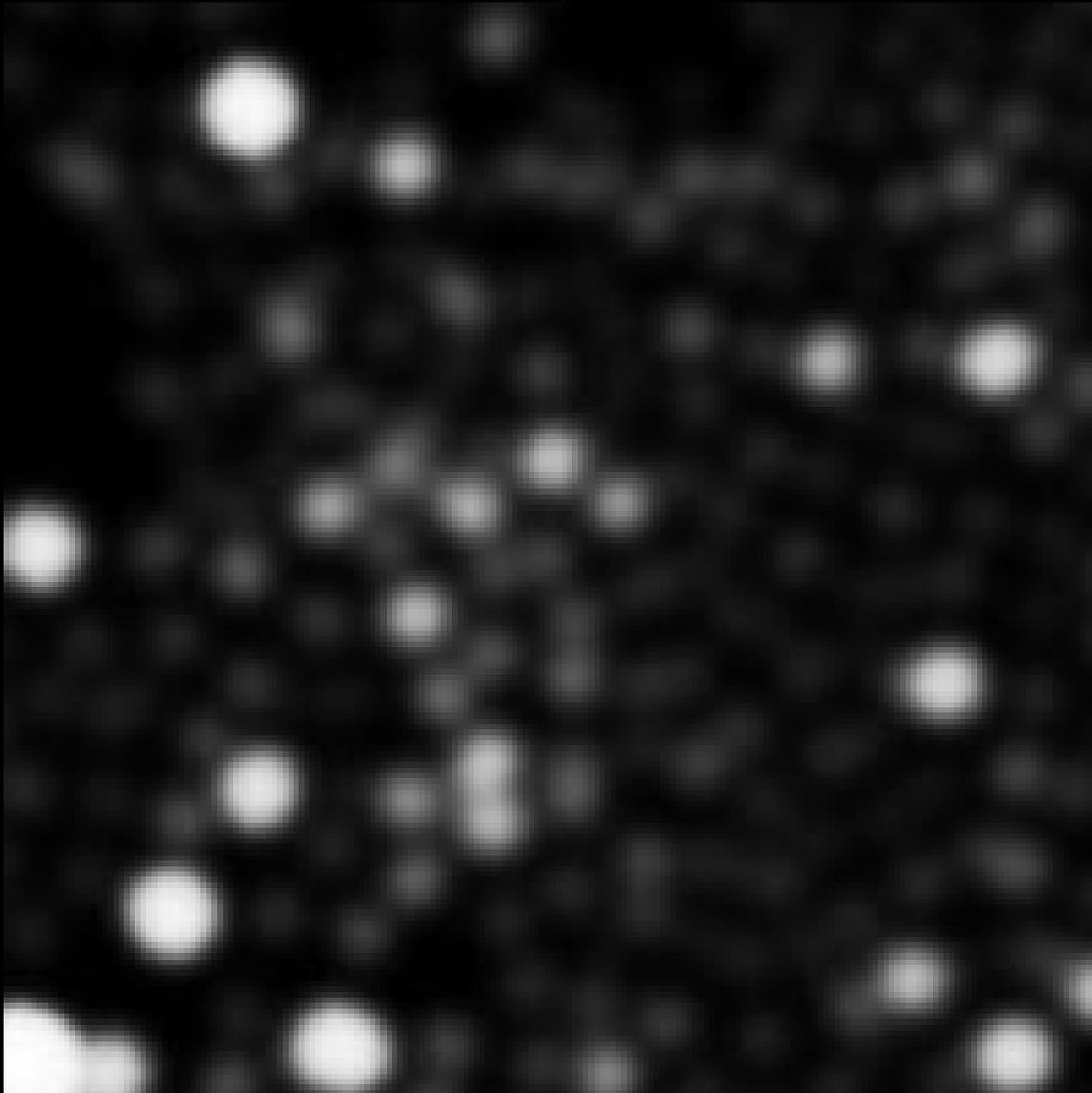
(für $d = 8 \text{ m}$, $\lambda = 2.2 \mu\text{m}$)

\implies **140 AU für gal. Zentrum!**



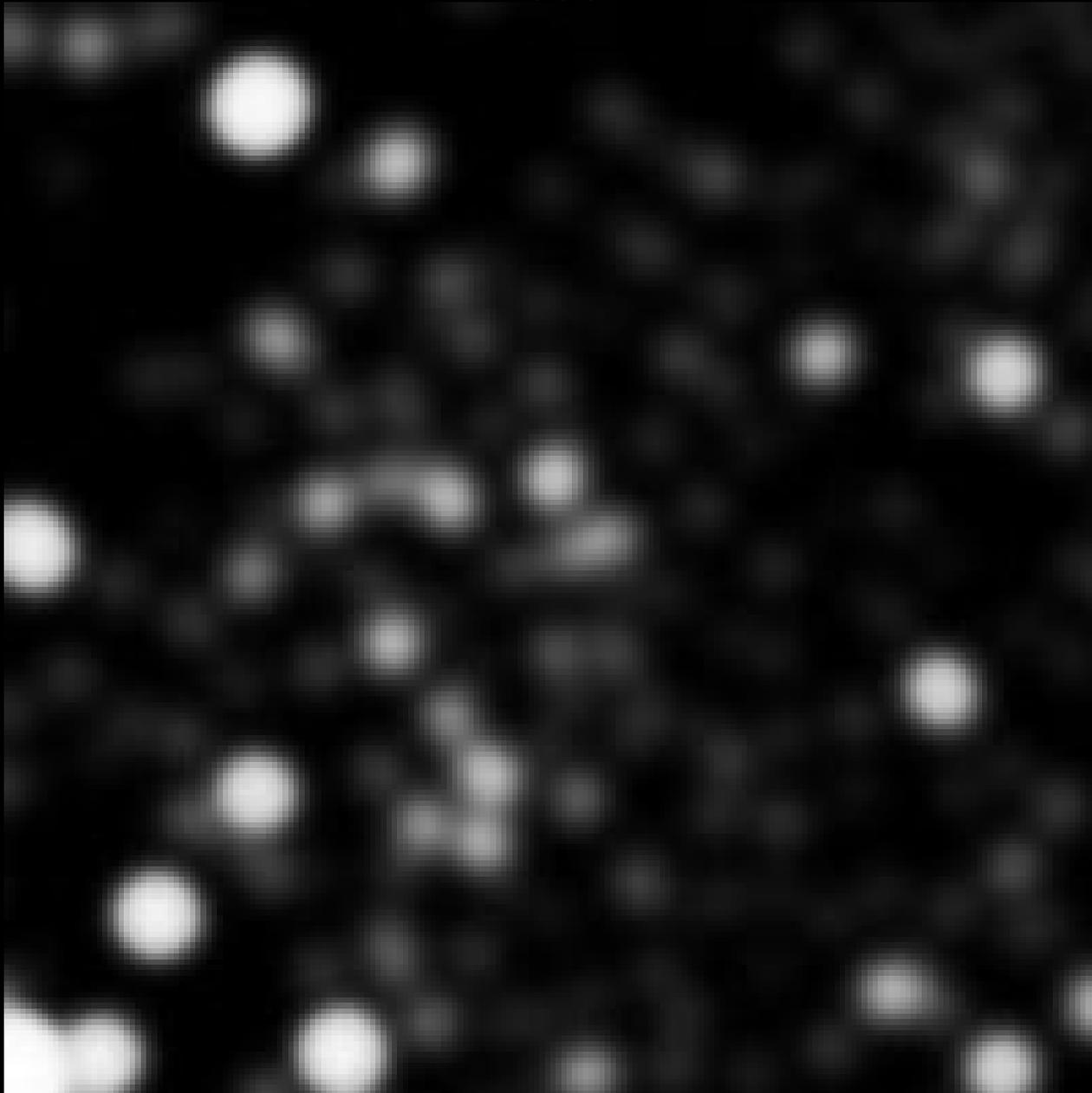
Schödel

1994



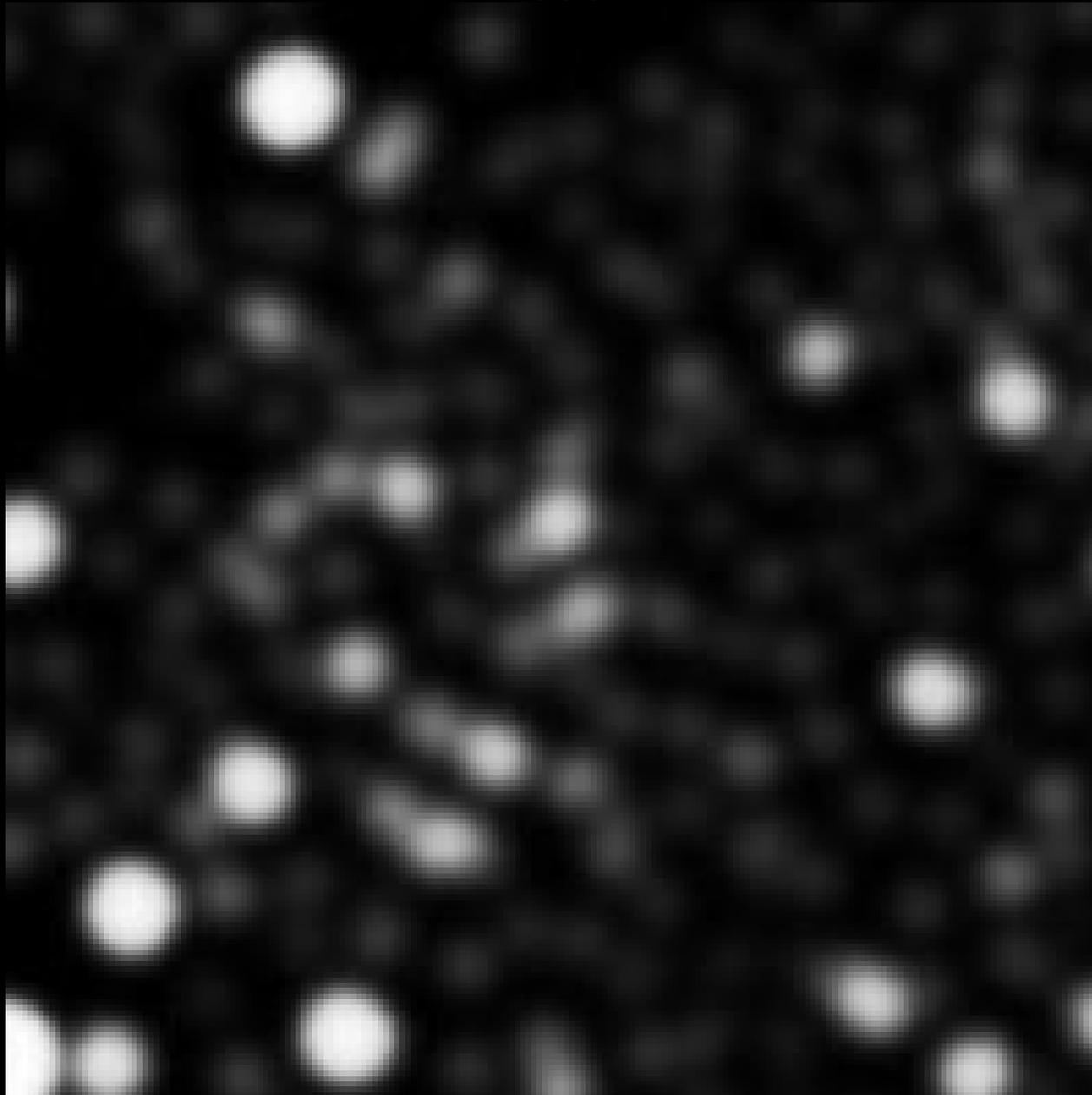
Genzel/Eckart

1996



Genzel/Eckart

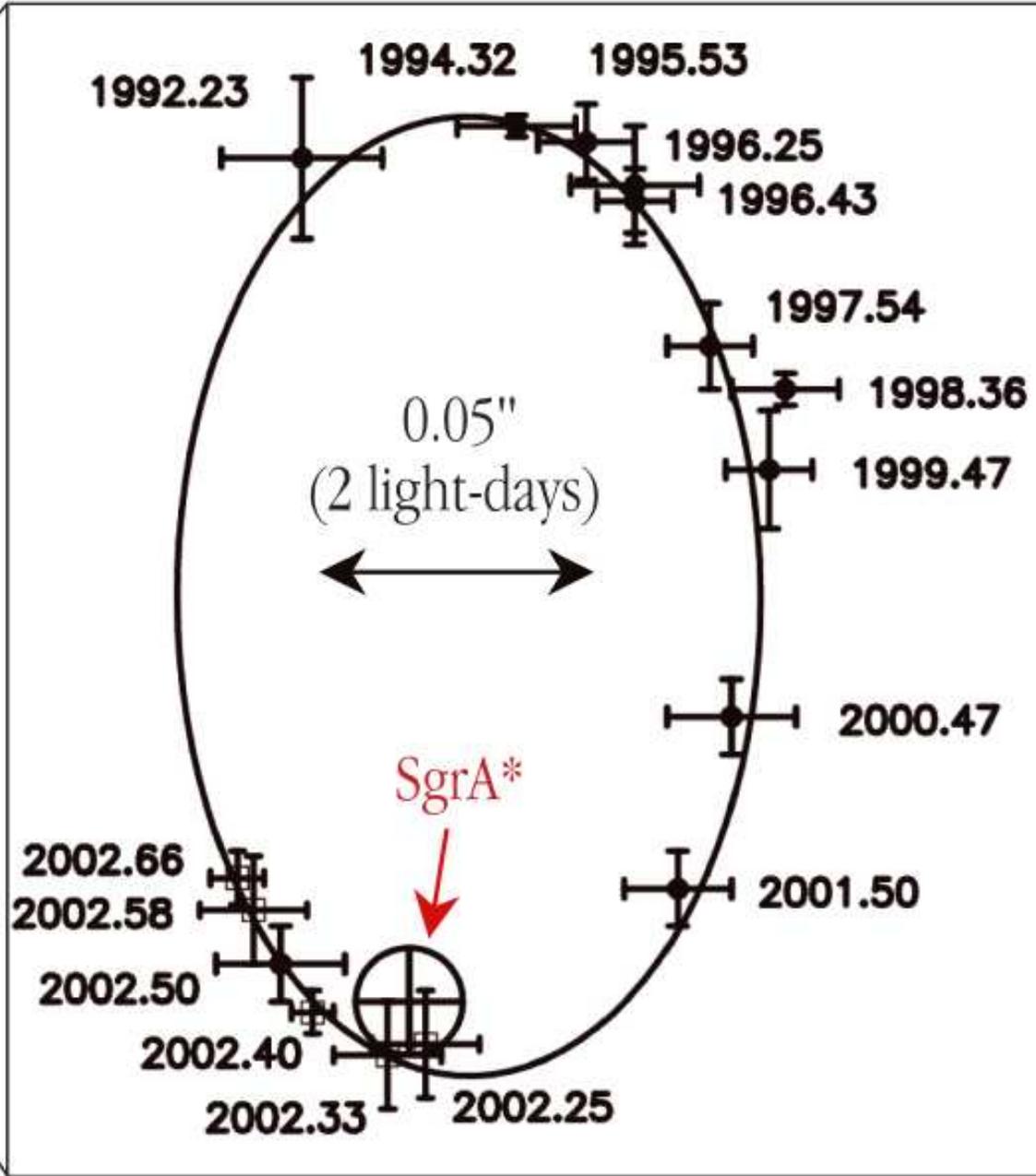
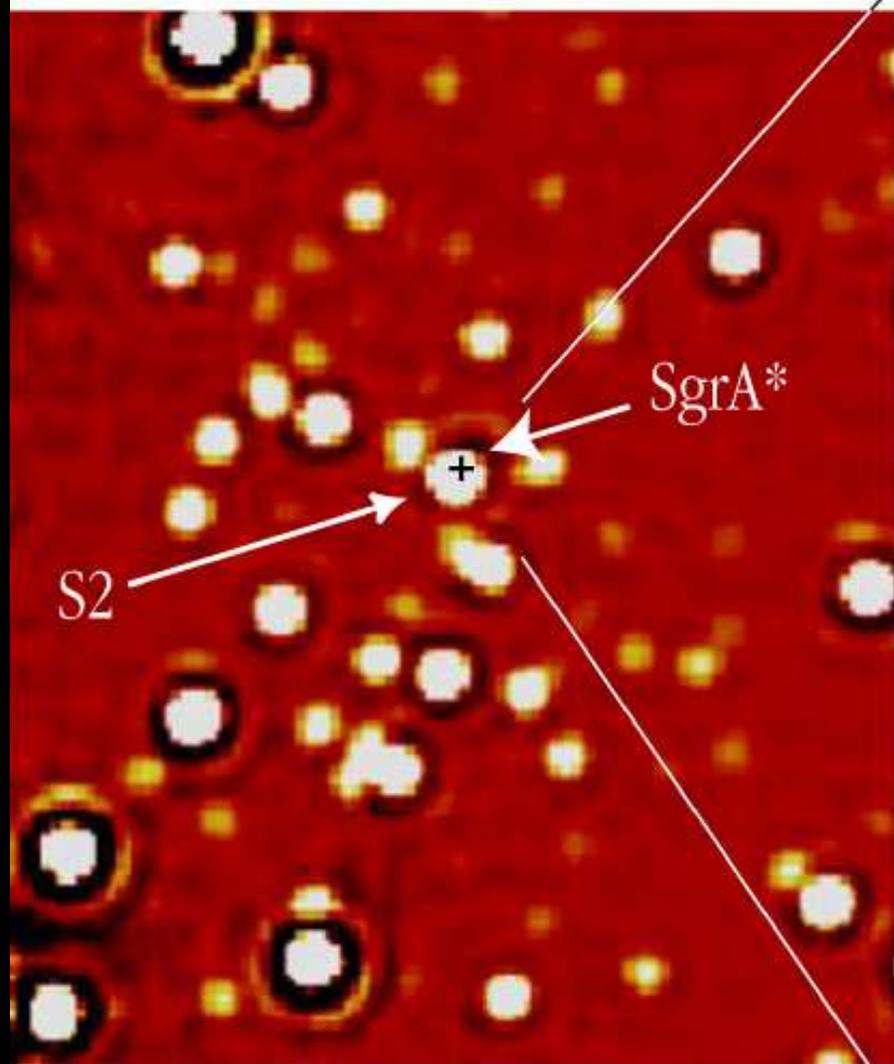
2000



Genzel/Eckart

NACO May 2002

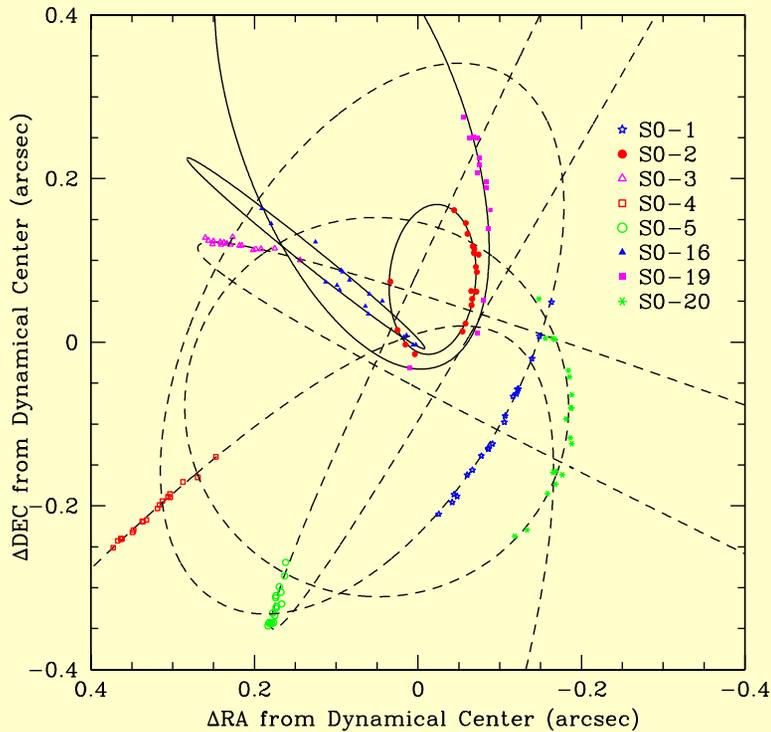
S2 Orbit around SgrA*



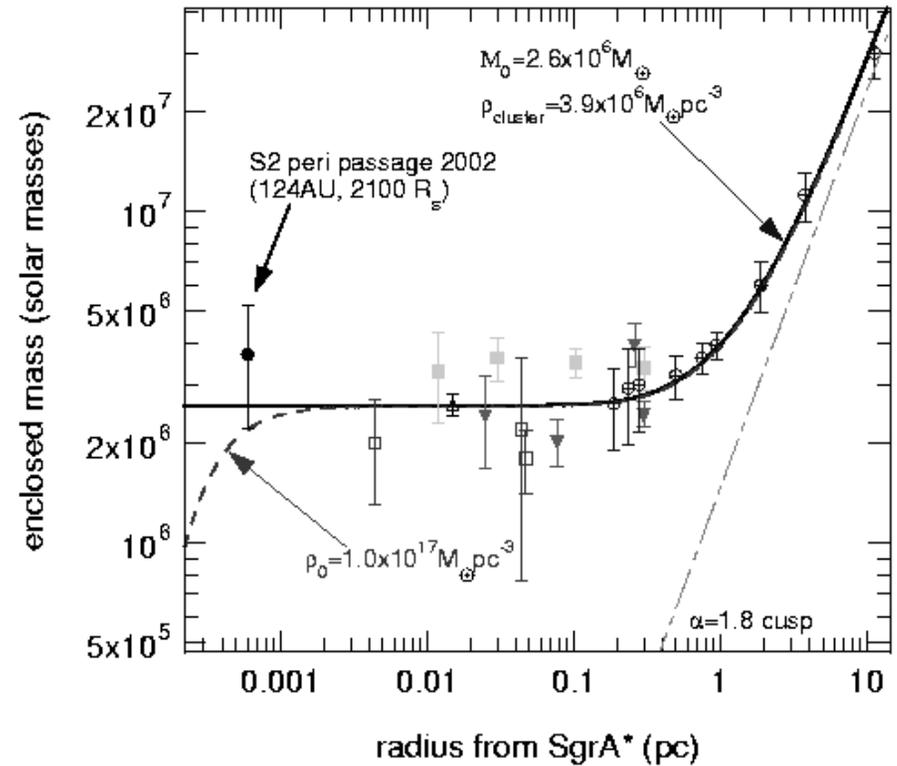
ESO, Oct 2002



Der innere Parsec: Massenbestimmung



Ghez et al. (2003, ApJ, in press)



Schödel et al. (2002)

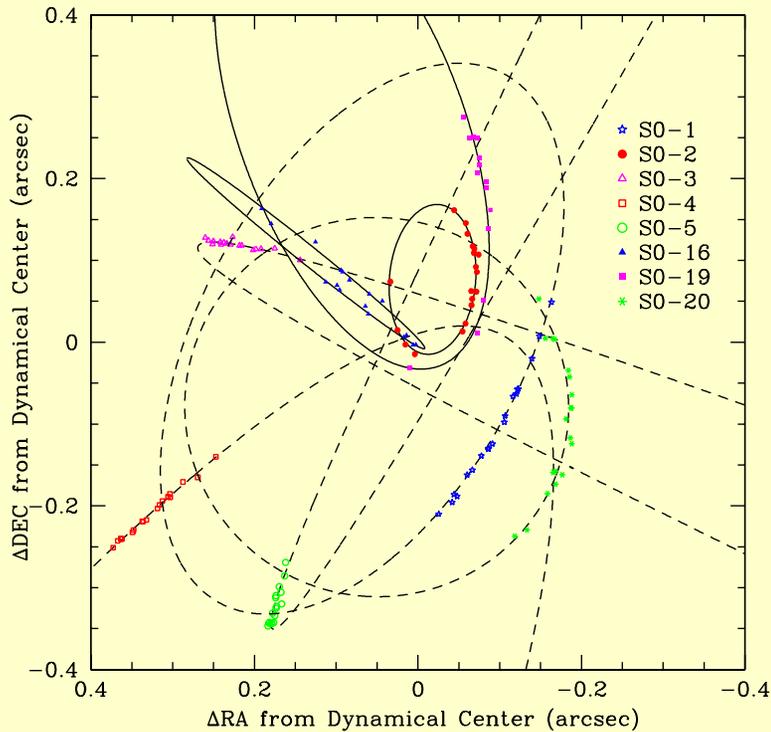
Massenbestimmung: 3. Kepler'sches Gesetz:

$$\begin{aligned}
 a &= 5.5 \text{ Lichttage} \\
 P &= 15.2 \text{ Jahre}
 \end{aligned}
 \implies
 \frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G(m_* + M_{\text{BH}})}$$

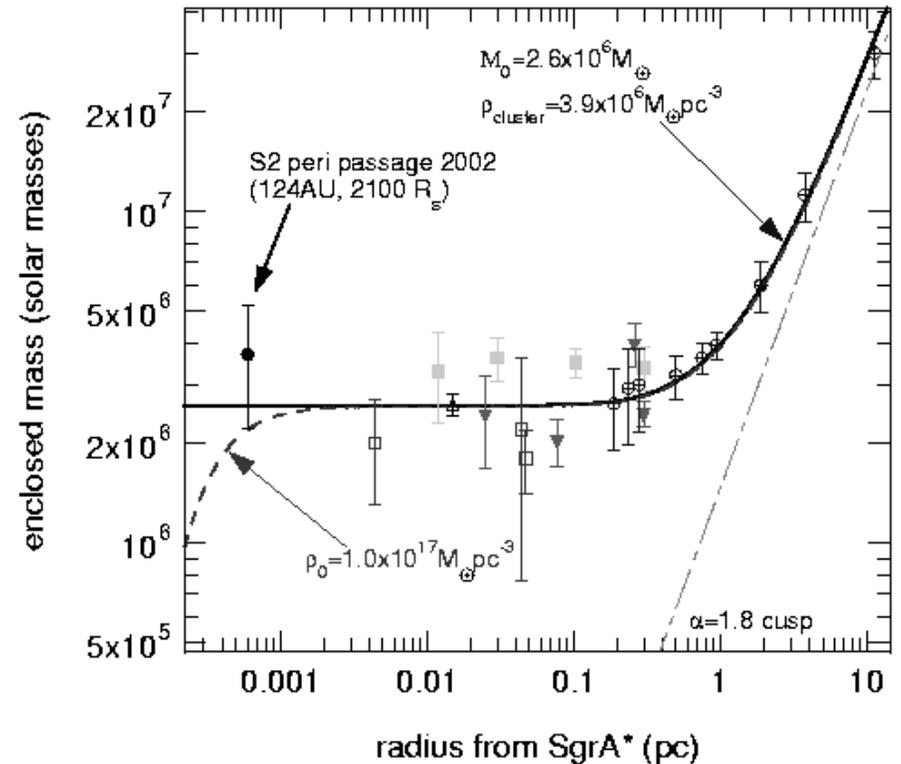
IAAT



Der innere Parsec: Massenbestimmung



Ghez et al. (2003, ApJ, in press)



Schödel et al. (2002)

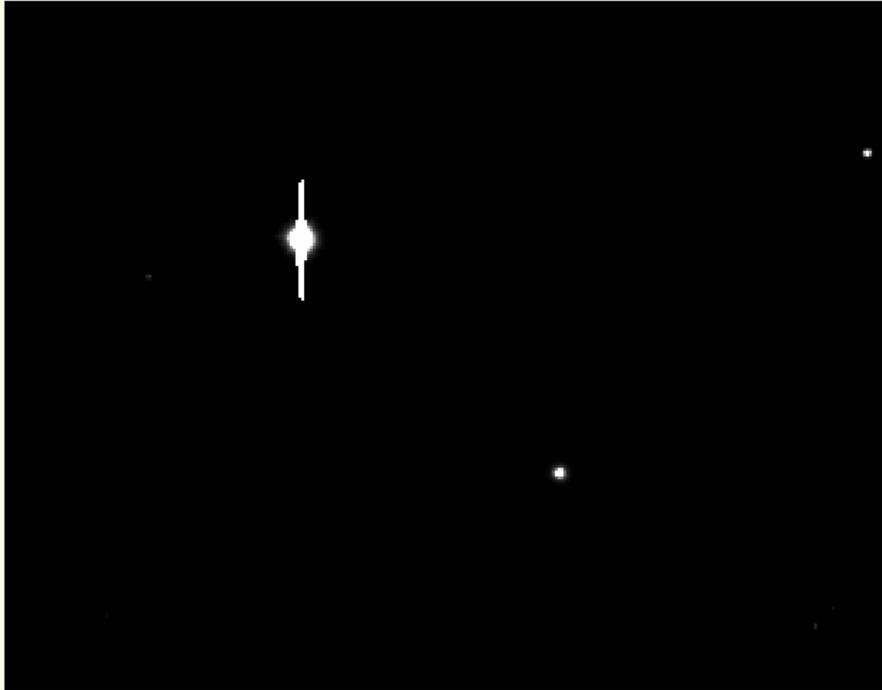
Im Zentrum der Milchstraße befindet sich ein schwarzes Loch mit

$$M_{\text{BH}} = (3.7 \pm 1.0) \times 10^6 M_{\odot}$$





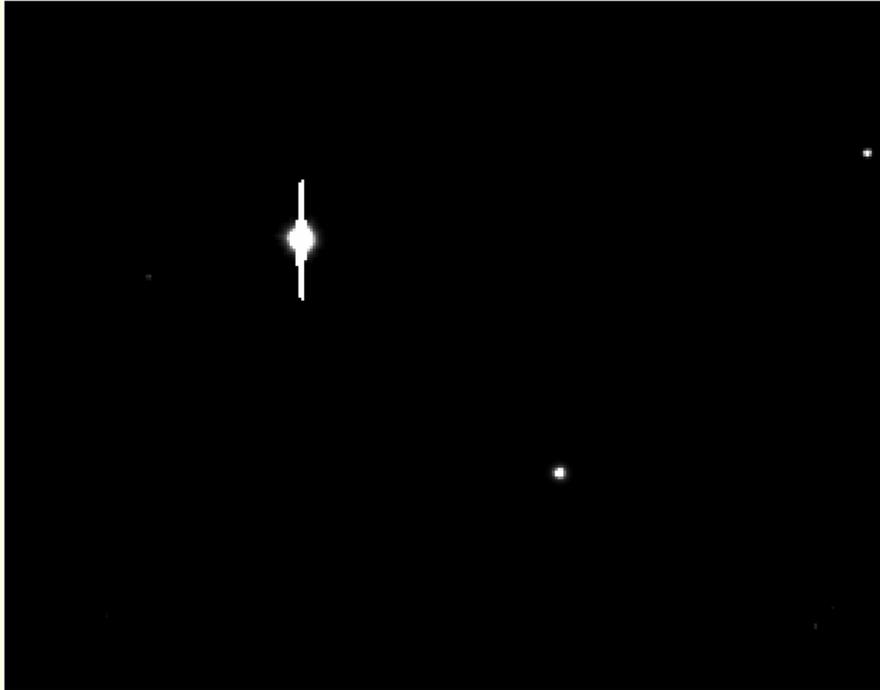
Aktive Galaktische Kerne, II



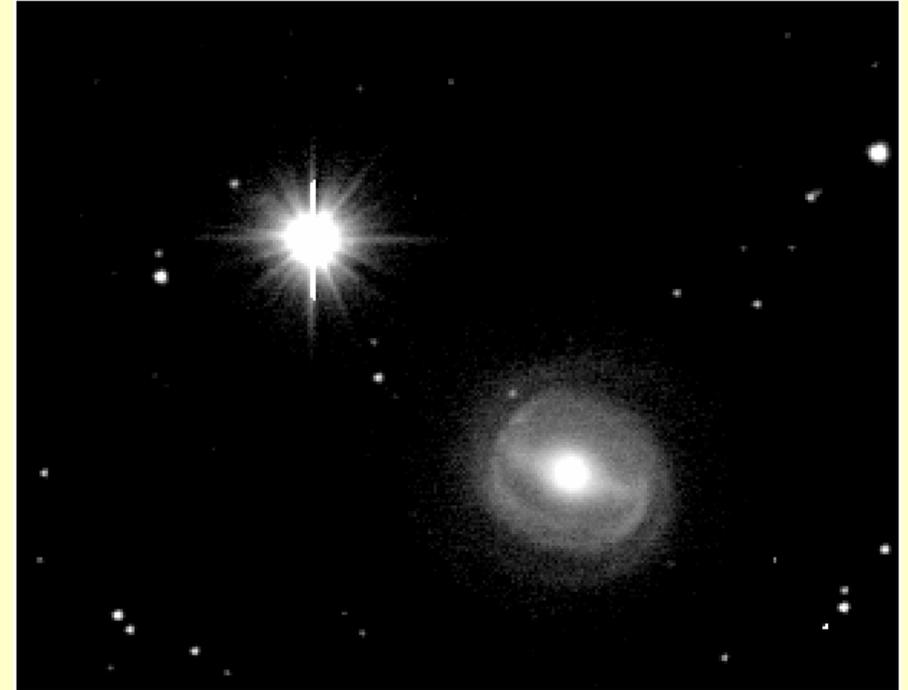
NGC 3783: *lineare* Intensitätsskala



Aktive Galaktische Kerne, III



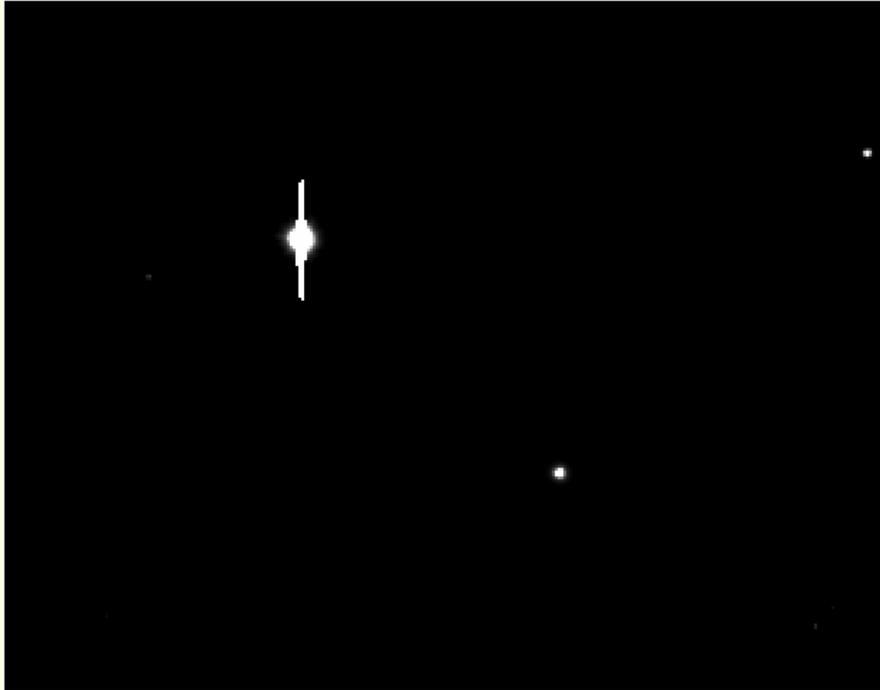
NGC 3783: *lineare* Intensitätsskala



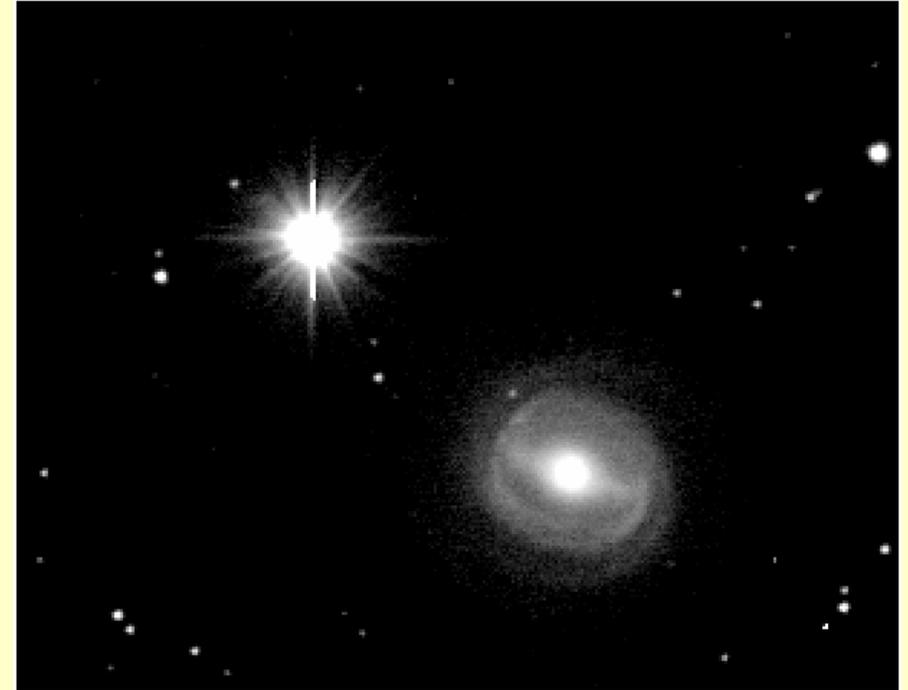
logarithmische Intensitätsskala



Aktive Galaktische Kerne, IV



NGC 3783: *lineare* Intensitätsskala

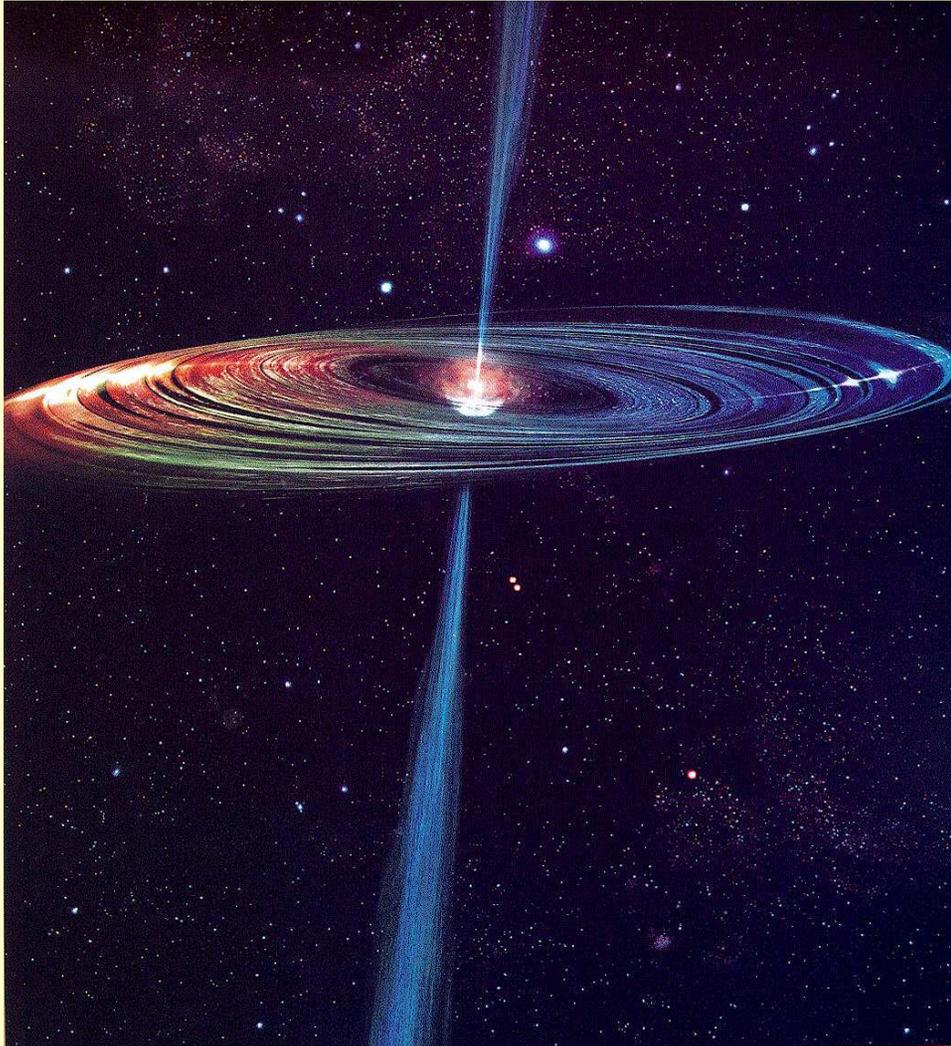


logarithmische Intensitätsskala

Aktive galaktische Kerne (active galactic nuclei; AGN): **supermassive Schwarze Löcher** ($M \sim 10^{6 \dots 8} M_{\odot}$), die **1 ... 2 M_{\odot} /Jahr** akkretieren
 \Rightarrow **Leuchtkraft $\sim 10^{10} L_{\odot}$** (vergleichbar mit Galaxienleuchtkraft)



Aktive Galaktische Kerne, V

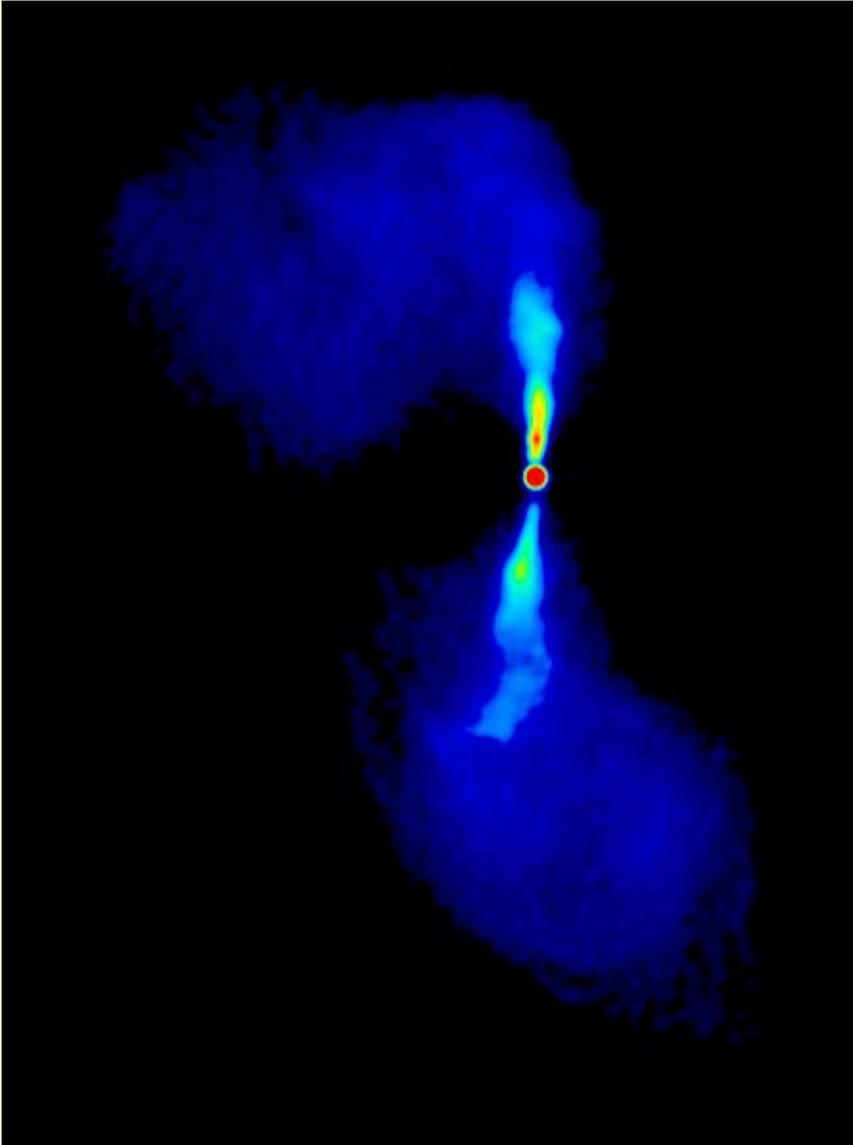


Aufbau der **aktiven Galaxienkerne** ähnlich wie galaktische schwarze Löcher, aber insgesamt etwas beeindruckender. . .

- **supermassives schwarzes Loch** ($10^7 M_{\odot}$)
- **Akkretionsscheibe** ($\dot{M} \sim 1 \dots 2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)
- **Leuchtkraft hoch** ($L \sim 10^{10} L_{\odot}$)
- **Schwarzschildradius** jetzt $\sim 1 \text{ AU}$

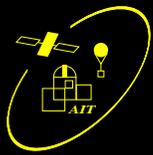


Aktive Galaktische Kerne, VI

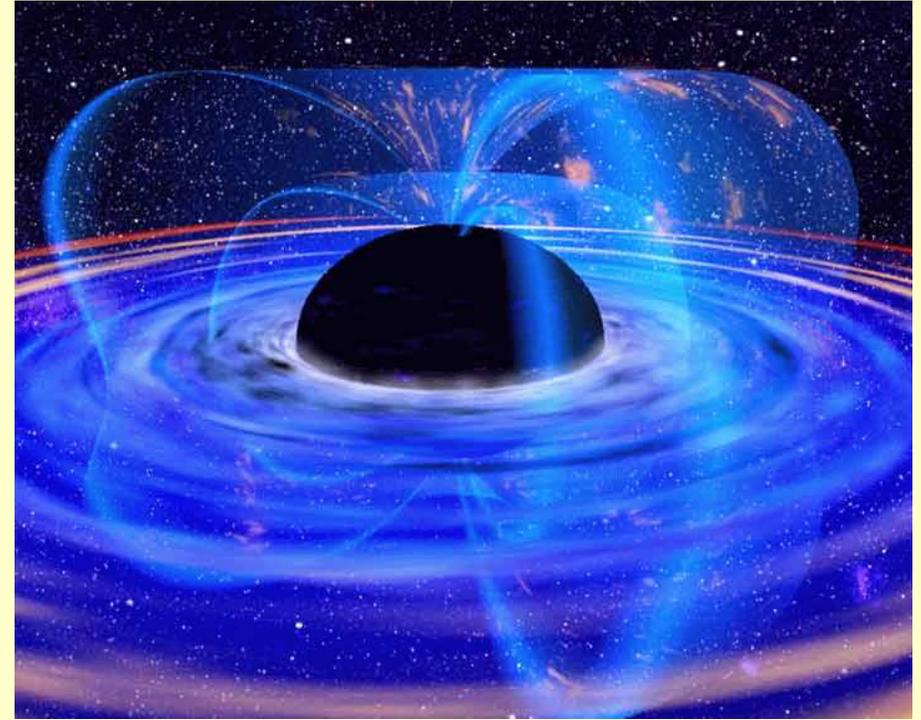
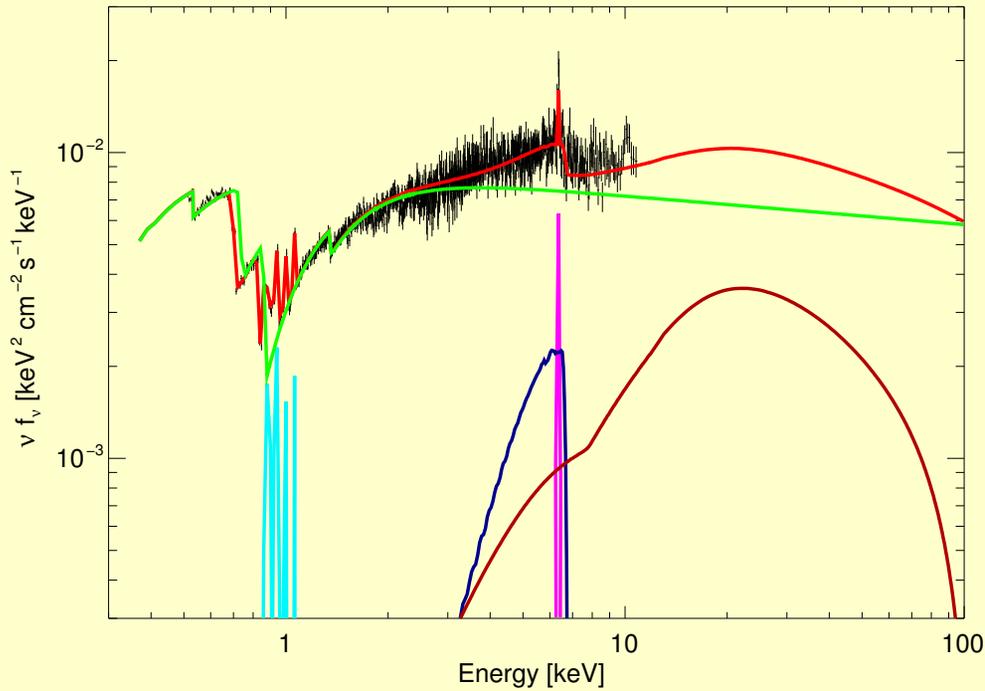


Aufbau der **aktiven Galaxienkerne** ähnlich wie galaktische schwarze Löcher, aber insgesamt etwas beeindruckender. . .

- **supermassives schwarzes Loch** ($10^7 M_{\odot}$)
- **Akkretionsscheibe** ($\dot{M} \sim 1 \dots 2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)
- **Leuchtkraft hoch** ($L \sim 10^{10} L_{\odot}$)
- **Schwarzschildradius** jetzt $\sim 1 \text{ AU}$
- häufig auch **relativistische Jets**, in denen Material auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wird



Extreme Effekte



Wilms et al., 2001, 2003

MCG-6-30-15: Emission von Spektrallinien im Röntgenbereich aus der nächsten Nähe des schwarzen Lochs.

Standardtheorien für Akkretion liefern keine Erklärung:

⇒ **Extraktion von Spin** aus magnetisiertem schwarzen Loch?



Chandra Deep Field
South: 1 Msec (10.8 Tage)
Beobachtung im
Röntgenbereich in einer
Region im Sternbild
Fornax \implies Alle Objekte
sind aktive Galaxien!



Zusammenfassung, I

Wichtige Punkte dieses Vortrags:

- Schwarze Löcher sind **einfache Objekte**: M, J
- Es gibt alle Arten schwarzer Löcher:
 - **Stellare (Galaktische) Schwarze Löcher** ($M \sim 10 M_{\odot}$)
 - **Zentren normaler Galaxien** ($M \sim 10^6 M_{\odot}$)
 - **Zentren aktiver Galaxien** ($M \sim 10^6 \dots 10^8 M_{\odot}$)
- Astrophysikalische Methoden erlauben es, das Verhalten von Materie unter extremsten Bedingungen zu studieren.
- **Schwarze Löcher kommen im ganzen Universum vor**



"It's black, and it looks like a hole. I'd say it's a black hole."