

Schüler treffen Astronomen: Schwarze Löcher in Fulda!

Andreas Müller

Max-Planck-Institut für
extraterrestrische Physik, Garching

31. Mai 2005

Besuch der
Rabanus-Maurus Schule
in Fulda

Organisation

- 11:30 - 12:10 Uhr
Schwarze Löcher
- kurze Pause
- 12:20 - 13:00 Uhr
Studium der Physik/Astrophysik
und Promotion

Übersicht

- Motivation
- Was ist ein Stern?
- Sternentstehung
- hydrostatisches Gleichgewicht
- Sternentwicklung
- Supernovae, Hypernovae, GRBs
- Kollaps zum Schwarzen Loch
- Eigenschaften Schwarzer Löcher
- Nachweismethoden eines Loches
- Verbogenes Licht
- Das Zentrum der Milchstraße
- Aktive Galaxien und Jets
- Zeitreisen



Schwarze Löcher

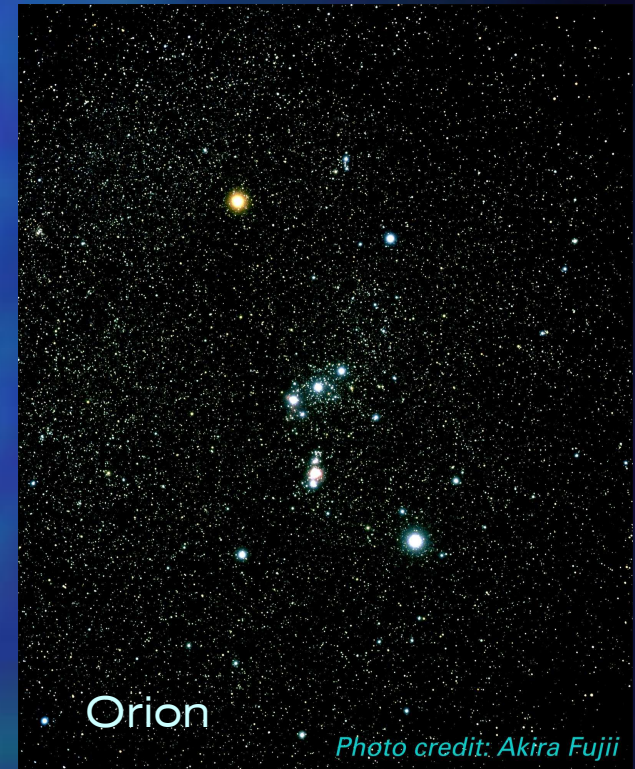
Kinder des Kosmos

- Wasser H_2O
- **Wasserstoff** (H) aus der Frühphase des Universums:
heisser Kosmos als Fusionsreaktor
in den ersten 3 min nach Urknall
(primordiale Nukleosynthese)
- **Sauerstoff** erst in ersten Sternen und Sternen späterer Generationen, 100 Mio. Jahre nach Urknall
(CNO-Zyklus, Sauerstoffbrennen)
- Bestandteile von Wasser bildeten sich zu sehr unterschiedlichen Epochen!
- Fazit: „*Wir sind Sternenstaub*“



Was ist ein Stern?

- ~~„ein selbstleuchtender Körper“~~ **Thermodynamik: Alles strahlt!**
 - „ein Plasmaball, der Strahlungsenergie aus thermonuklearer Fusion abstrahlt“
-
- Verschmelzung von Atomkernen: „Brennen“
 - Elementsynthese: Wasserstoff, Helium, ..., Silizium
 - Zwiebelschalenmodell



Entstehung der Sterne

Trifid Nebula



Hubble
Heritage

NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC04-17



HST 2004

Orion

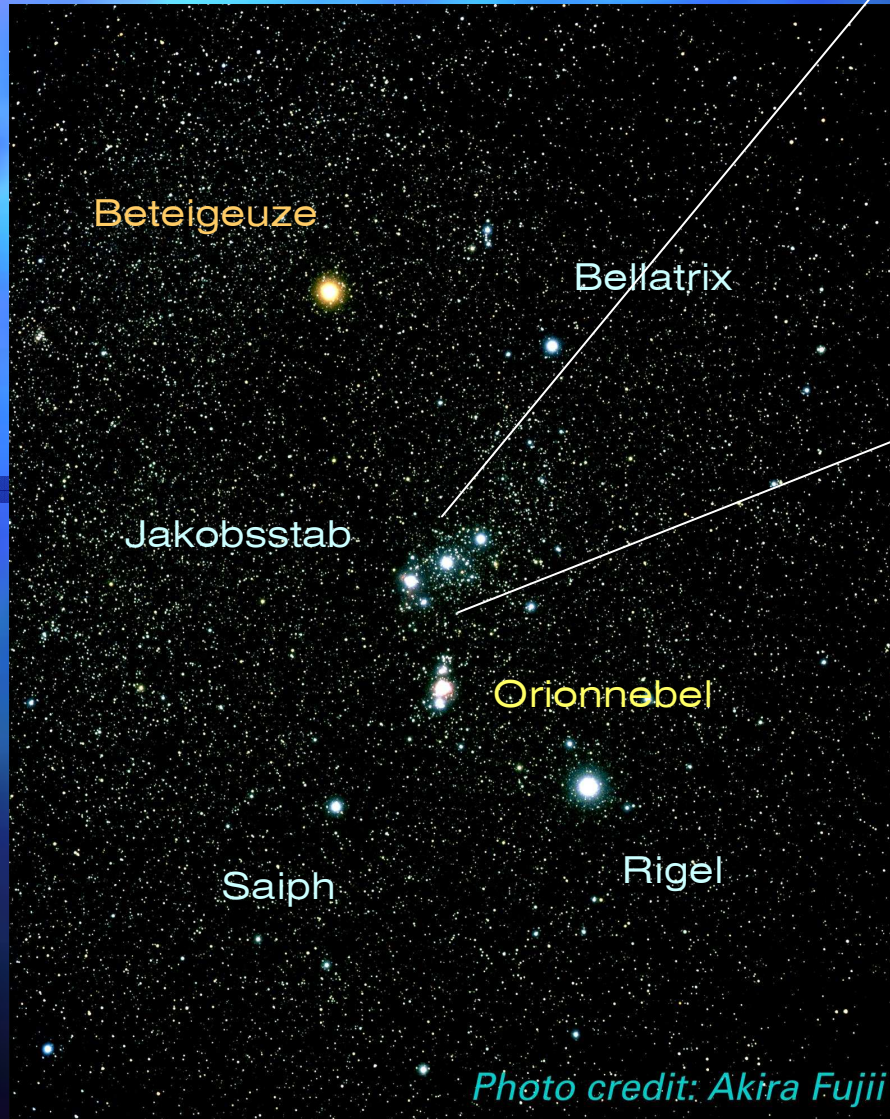
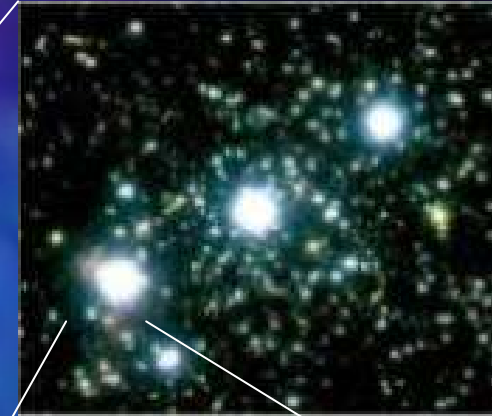


Photo credit: Akira Fujii



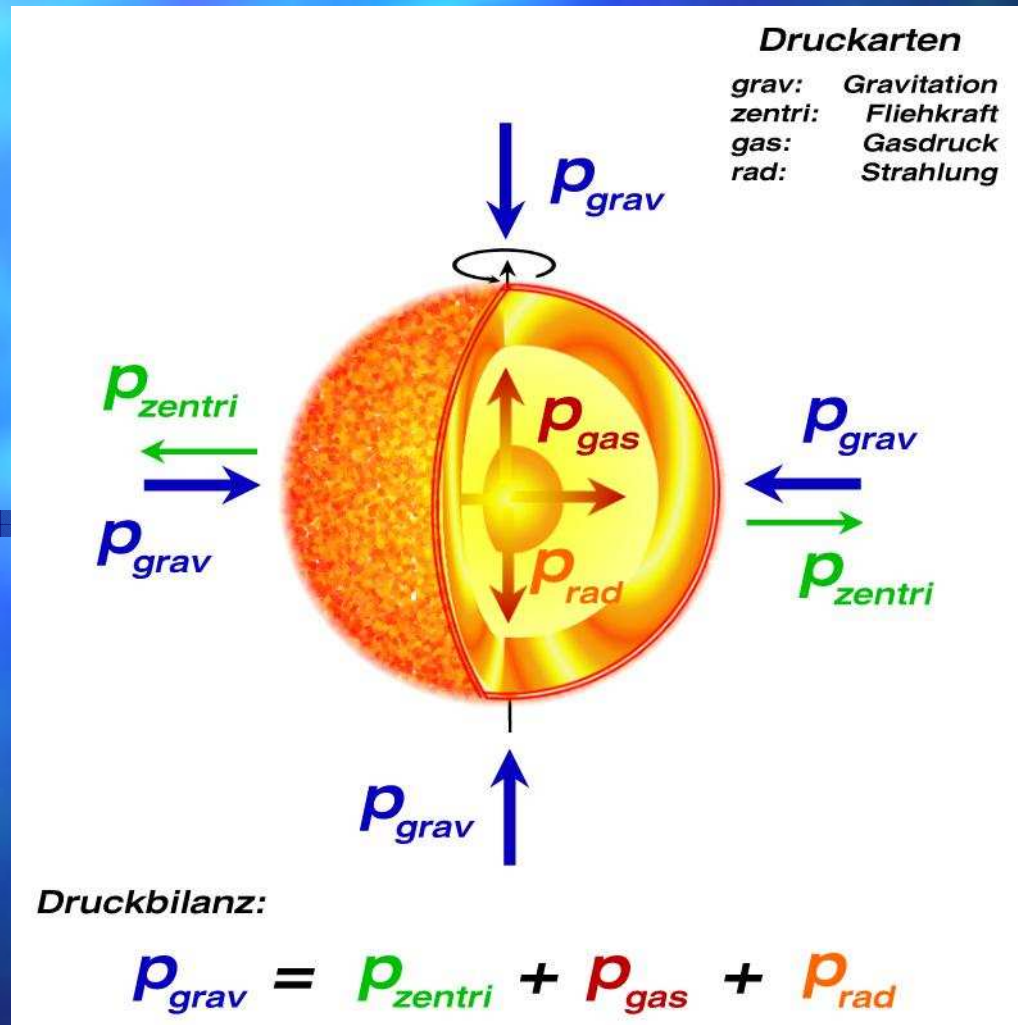
The Horsehead Nebula
(VLT KUEYEN + FORS 2)

ESO PR Photo 02/02 (25 January 2002)

© European Southern Observatory

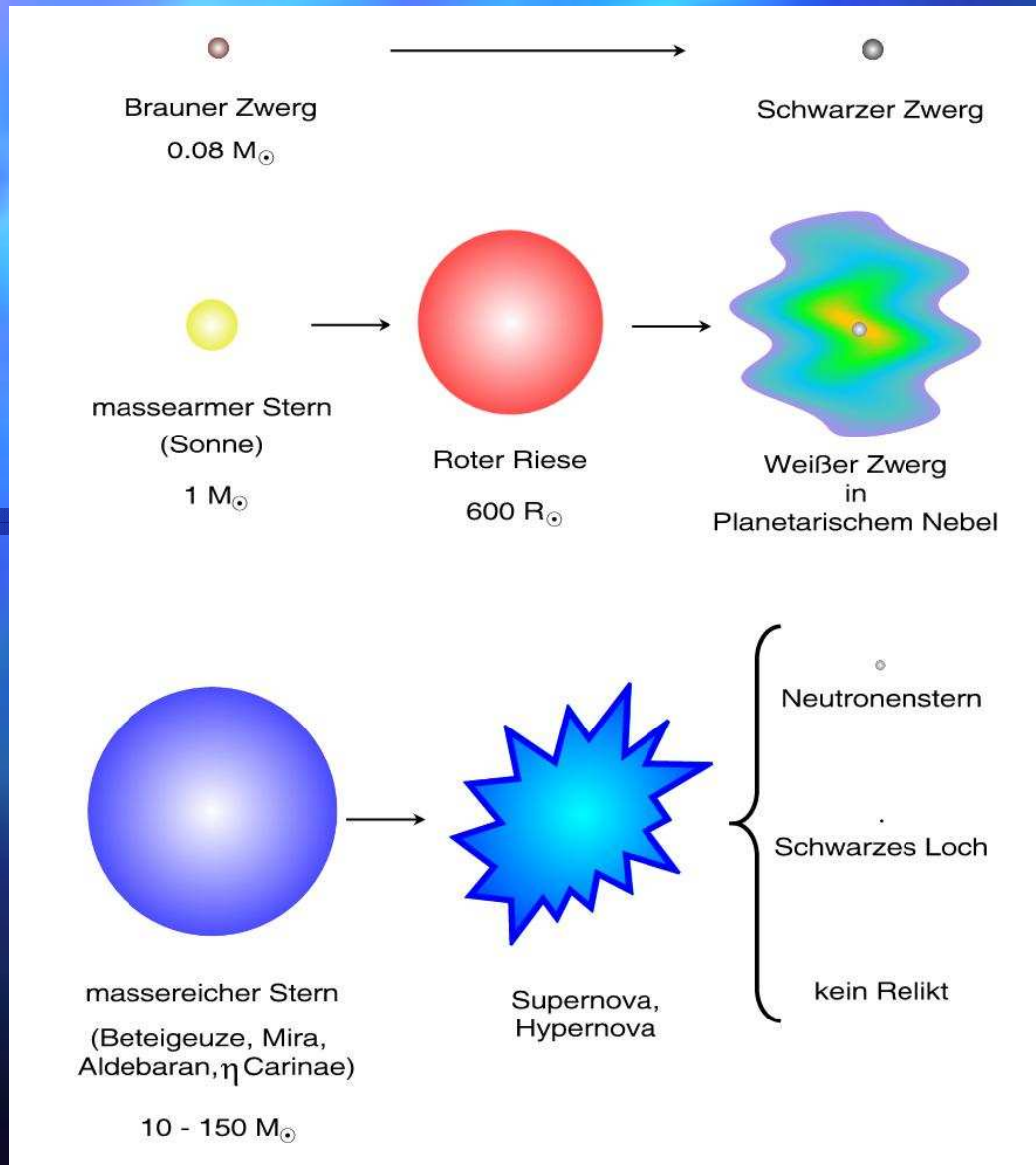


Im Gleichgewicht der Kräfte



Sterne unterliegen dem **hydrostatischen Gleichgewicht**

Sternentwicklung



Sterne sind
Wärmestrahler

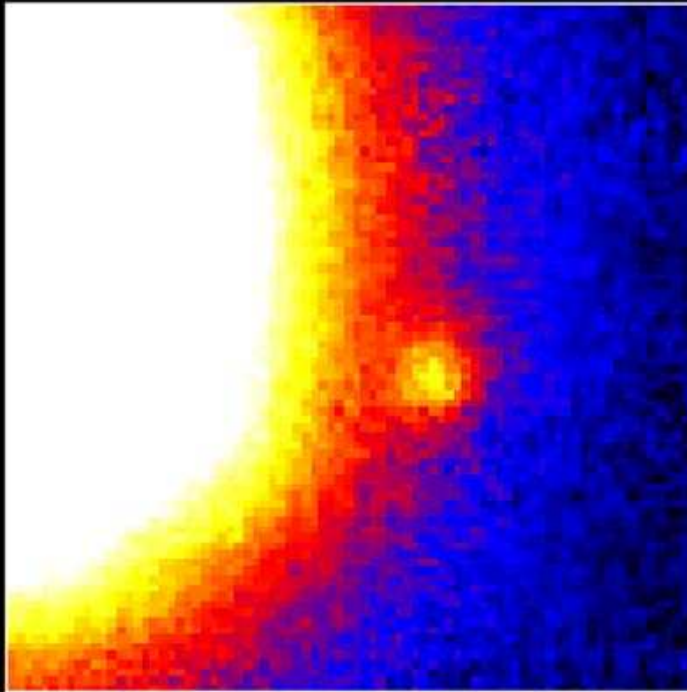
Sternfarben als Maß für
Oberflächentemperatur

**Spektraltypen
der Sterne**

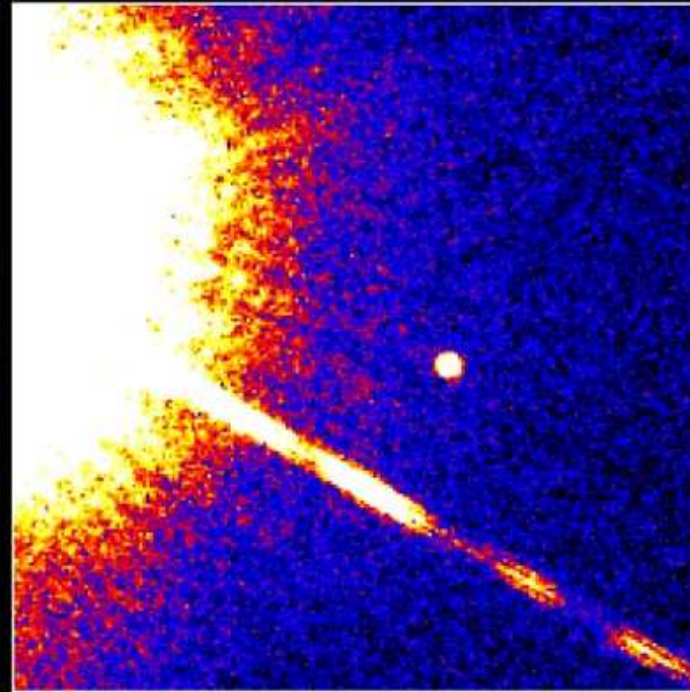
O B A F G K M L T
heiß ← —————→ kalt

Braune Zwerge

Brown Dwarf Gliese 229B



Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2
November 17, 1995

PRC95-48 · ST ScI OPO · November 29, 1995
T. Nakajima and S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance and D. Golimowski (JHU), NASA

$$M_{\text{BD}} < 0.08 M_{\odot} = 84 M_{\text{Jupiter}} \quad \text{„Jupiters“}$$

Sonne

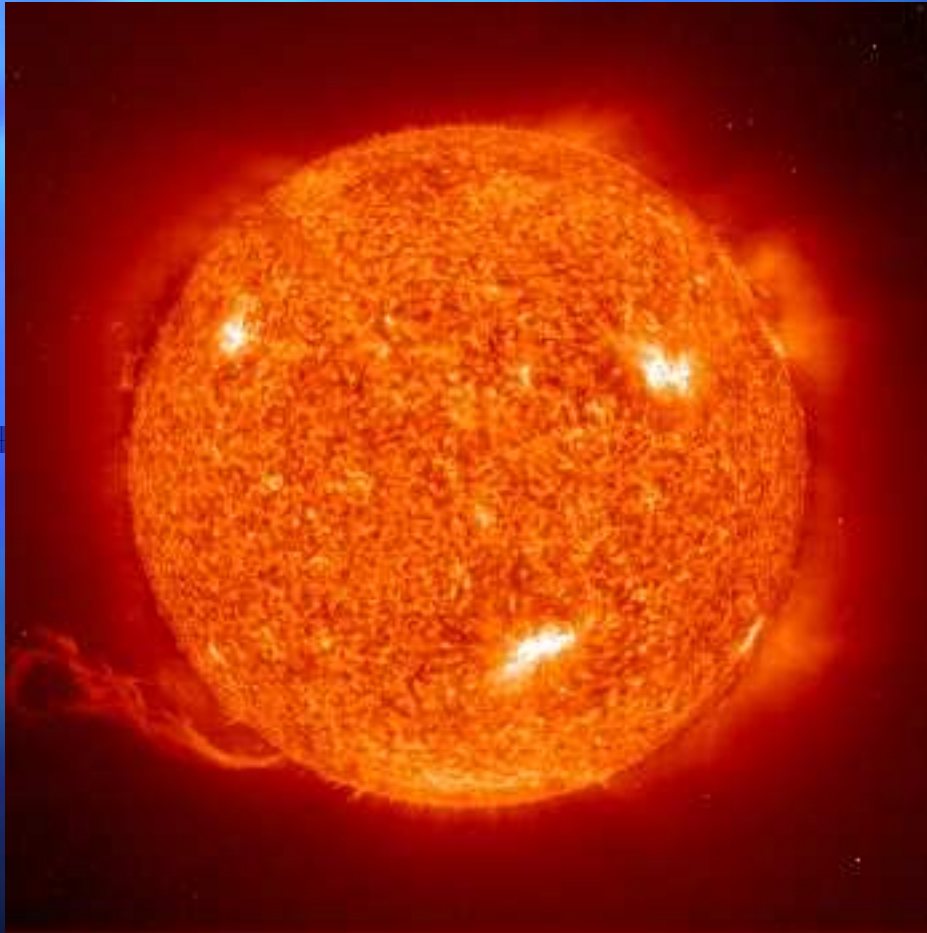


Bild des Sonnenobservatoriums
SOHO im UV-Licht der
He-Linie Hell

Granulation

mittlere Entfernung:
150 Mio km
(1 AU, 8 Lichtmin.)

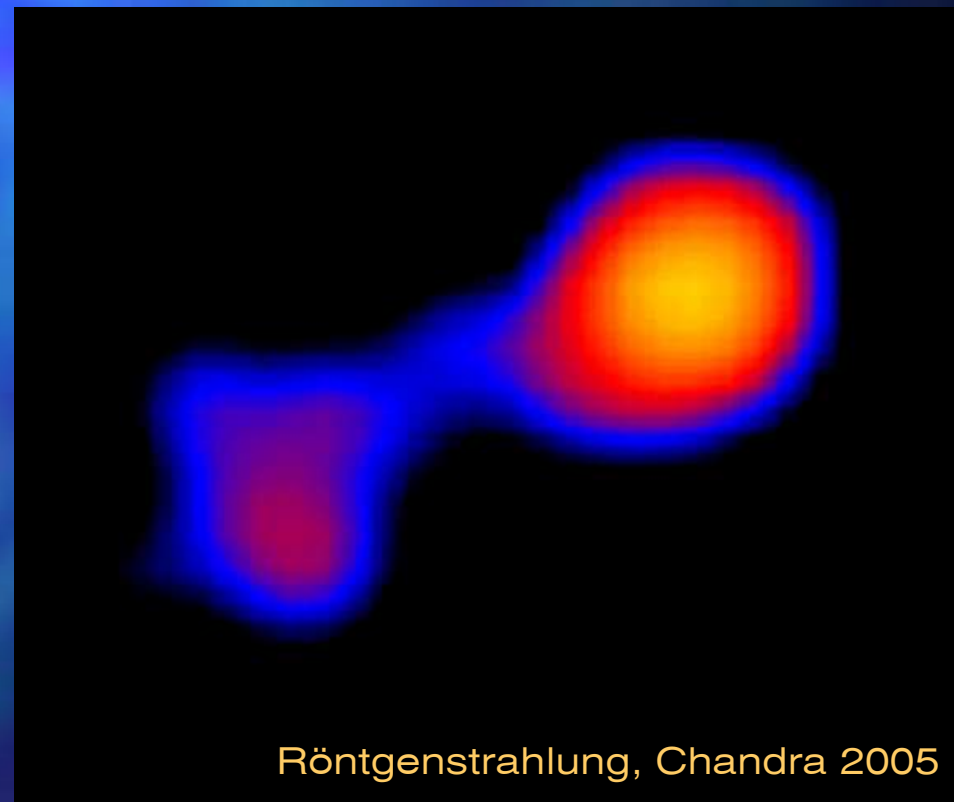
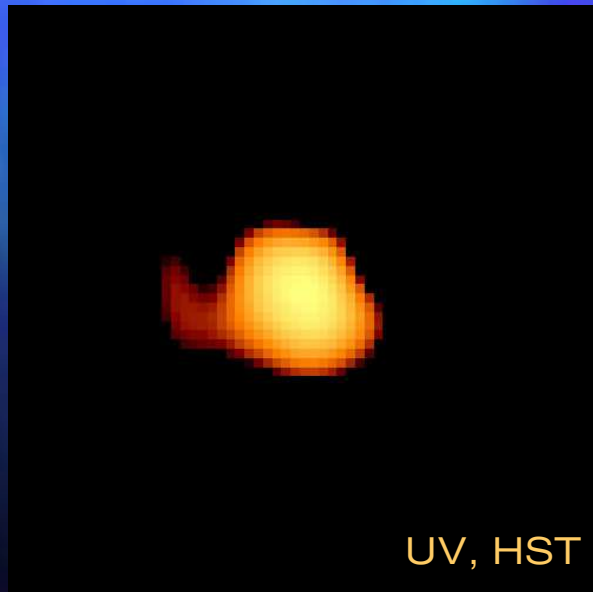
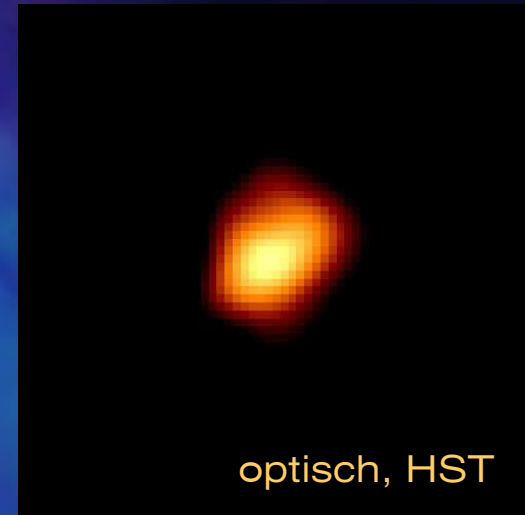
Masse:
 $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$

Radius:
 $1 R_{\odot} = 696\,000 \text{ km}$

Roter Riese

Mira A

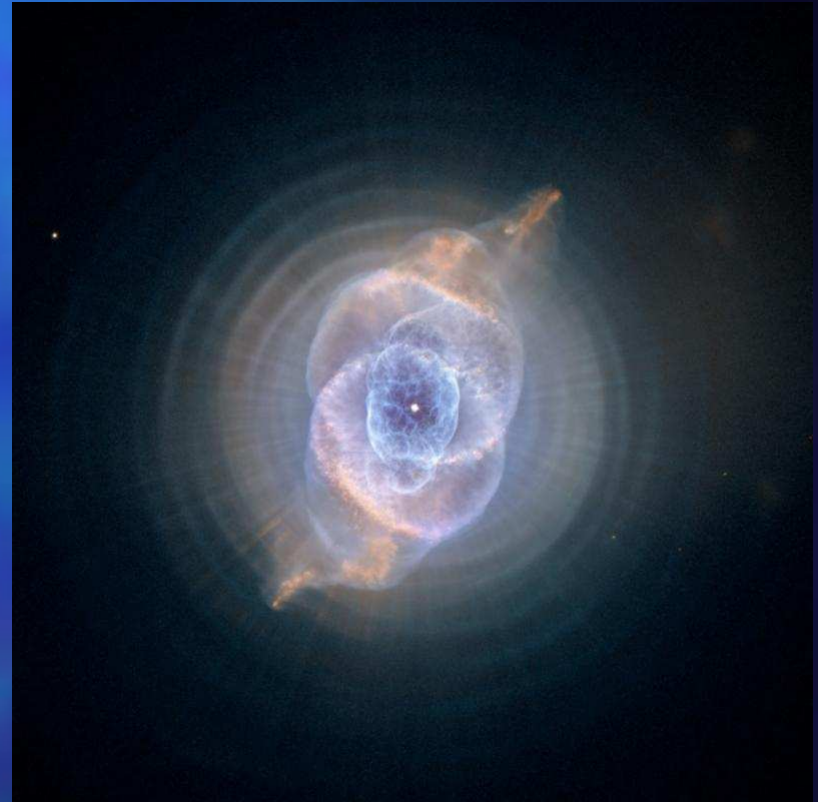
- Sternbild Walfisch
- Doppelsternsystem, 70 AU Abstand
- Mira A: Pulsationsveränderlicher
- Mira B: Weißer Zwerg
- Entfernung: 420 Lj
- Masse: $5M_{\odot}$
- Radius: max. $600 R_{\odot}$



Blowing in the wind: Planetarische Nebel



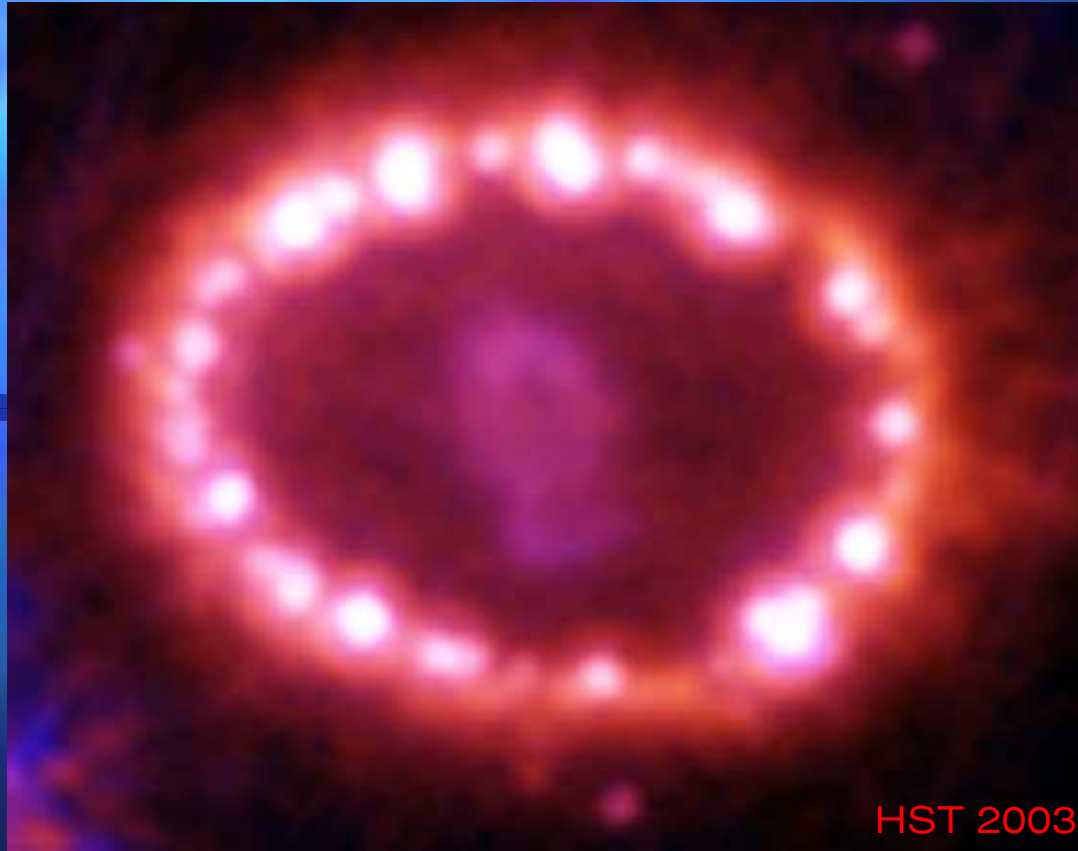
Eskimonebel



Katzenaugennebel

HST 2000 & 2004

Supernova SN 1987A



HST 2003

23.02.1987 entdeckt

Ort:

Große Magellanische
Wolke (LMC),
Nachbargalaxie der
Milchstraße

Entfernung:

160 000 Lj

SN Typ II

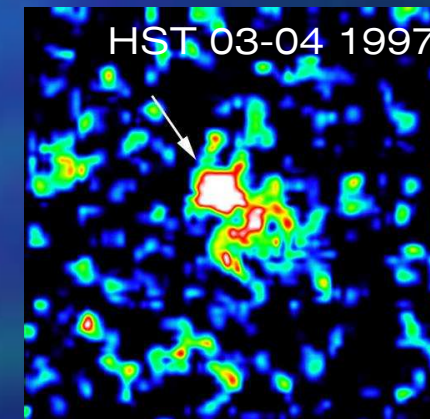
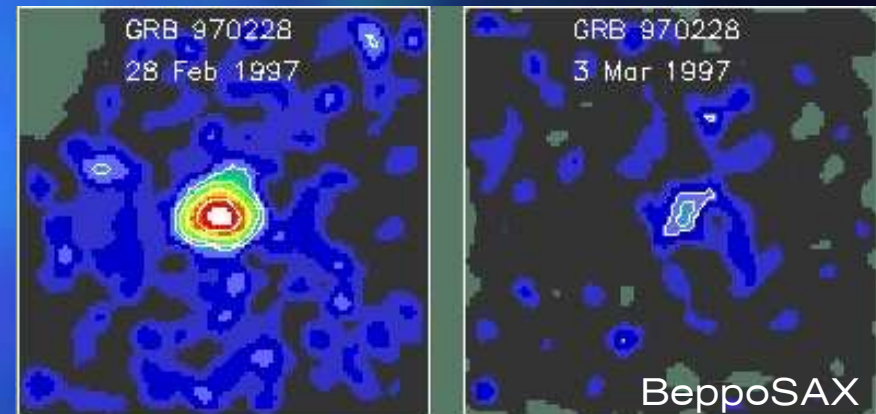
auslaufende
Schockwelle, 3000
km/s, hot spots

99% der SN-Energie
in Neutrinos!

Hypernova

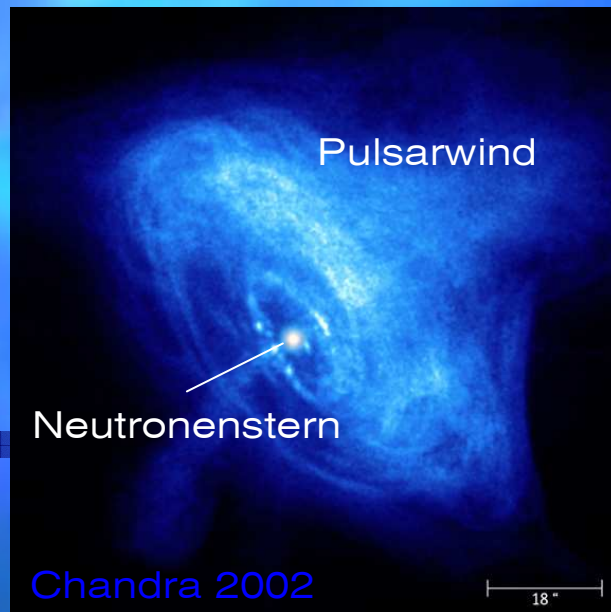


Hypernova-Kandidat:
Superstern η Carinae
100 bis 150 $M_{\odot}$

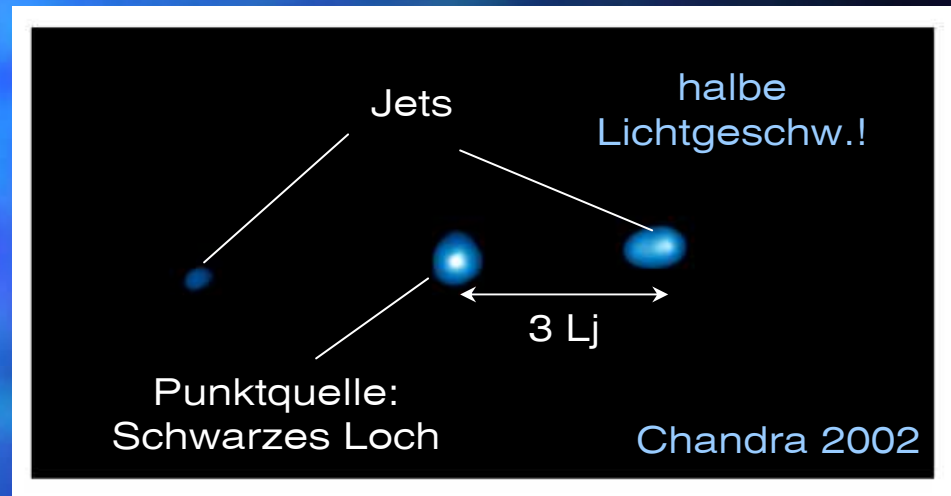


hochenergetischer Strahlenblitz
Gamma Ray Burst (GRB) :
Röntgen- und optisches Nachleuchten

Das Ende massereicher Sterne



Neutronenstern
Crab-Pulsar
Sternbild Stier

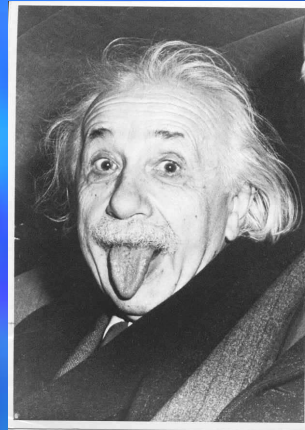


	
Neutronenstern	Schwarzes Loch
Radius ~10 km	Radius < 3 km
Neutronenflüssigkeit Quarkkern exotische Teilchen	Singularität "Masse ohne Materie"

Röntgendoppelstern
XTE J1550-564

Was ist ein Schwarzes Loch?

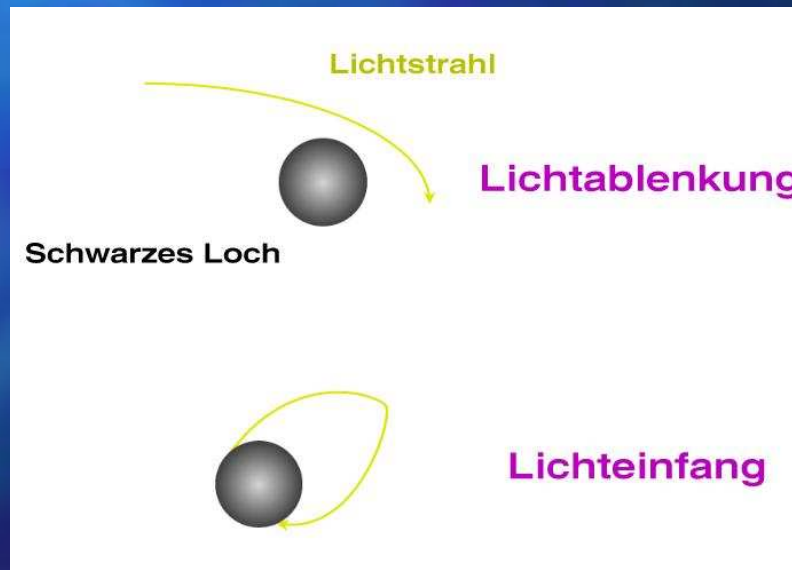
- Einstein: Massen krümmen die Raumzeit
- Licht fällt ähnlich im Gravitationsfeld wie ein Stein
- Massen verbiegen Lichtstrahlen (*Gravitationslinse*)



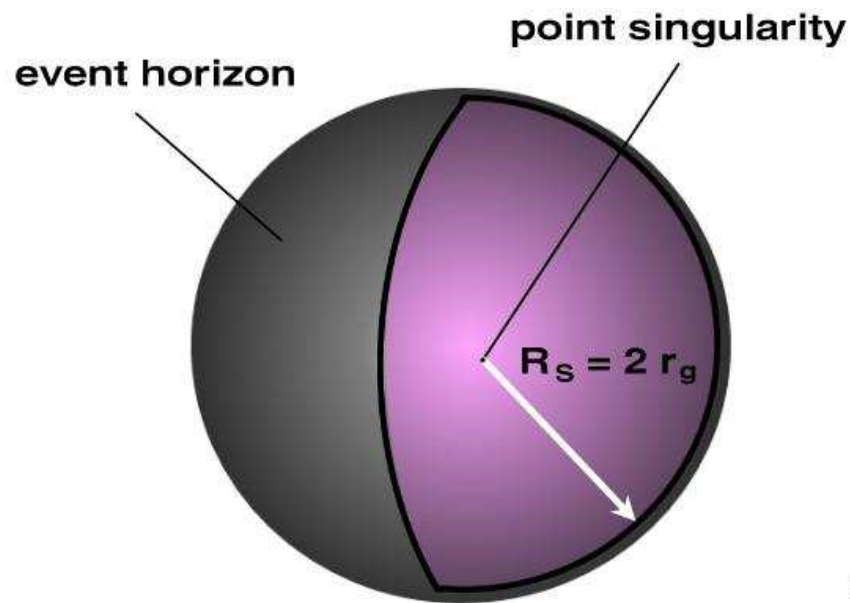
Albert Einstein
1879 - 1955

100 Jahre
Relativitätstheorie
Einsteinjahr 2005

- **Schwarzes Loch:**
„kompakte Masse die Licht verschluckt“



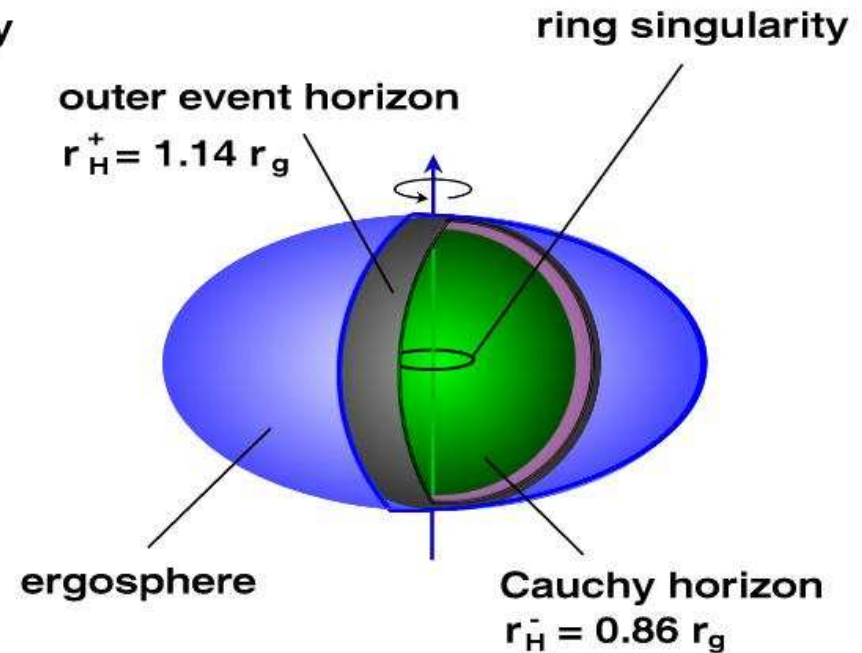
Struktur eines Loches



Schwarzschild

$$a = 0$$

statisch



Kerr

$$a = 0.99 M$$

rotierend

So sieht ein Loch aus:

rotierende
Gasscheibe

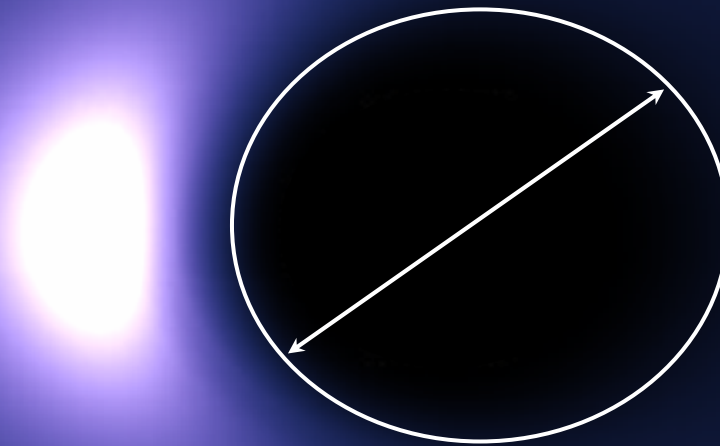
Beaming
Fleck

Loch

gleichmäßig leuchtende, geneigte, rotierende
Gasscheibe um ein rotierendes Schwarzes Loch
(Computersimulation)



Großer Schwarzer Fleck



Müssen bekannt sein:
scheinbare Größe,
Entfernung

$$D \sim 4GM/c^2$$

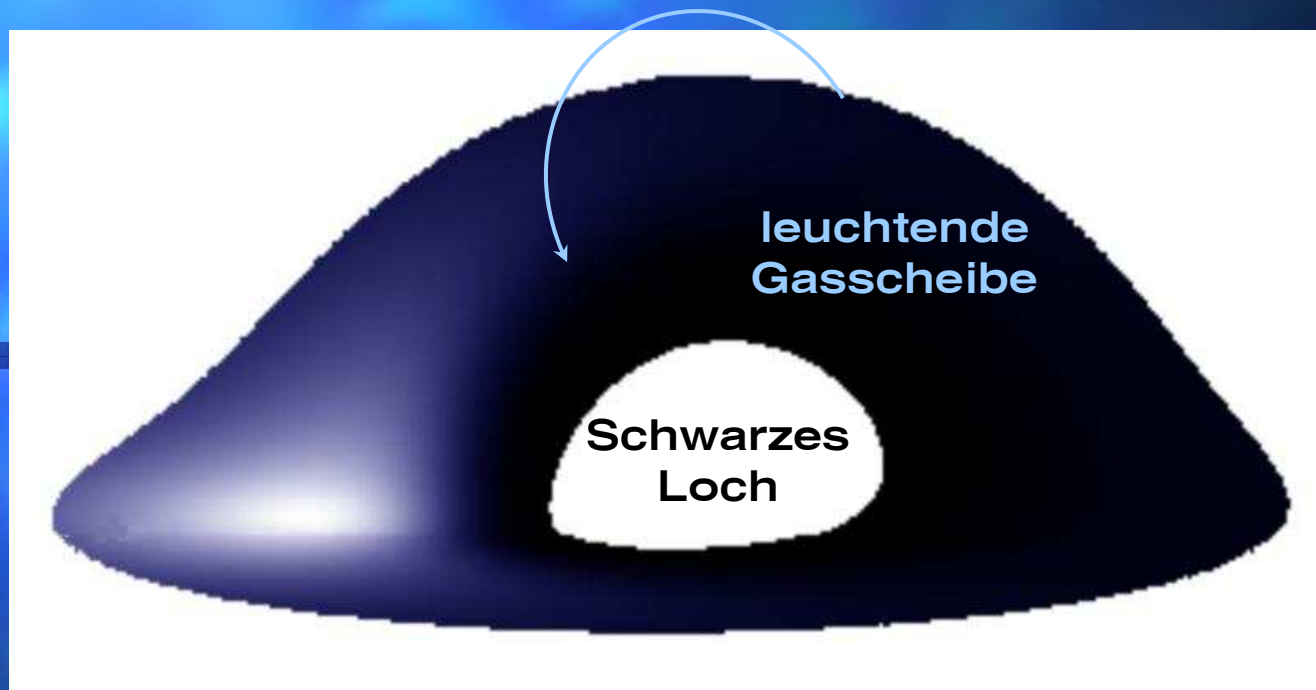


Löcher wiegen!

G: Gravitationskonstante
c: Vakuumlichtgeschwindigkeit

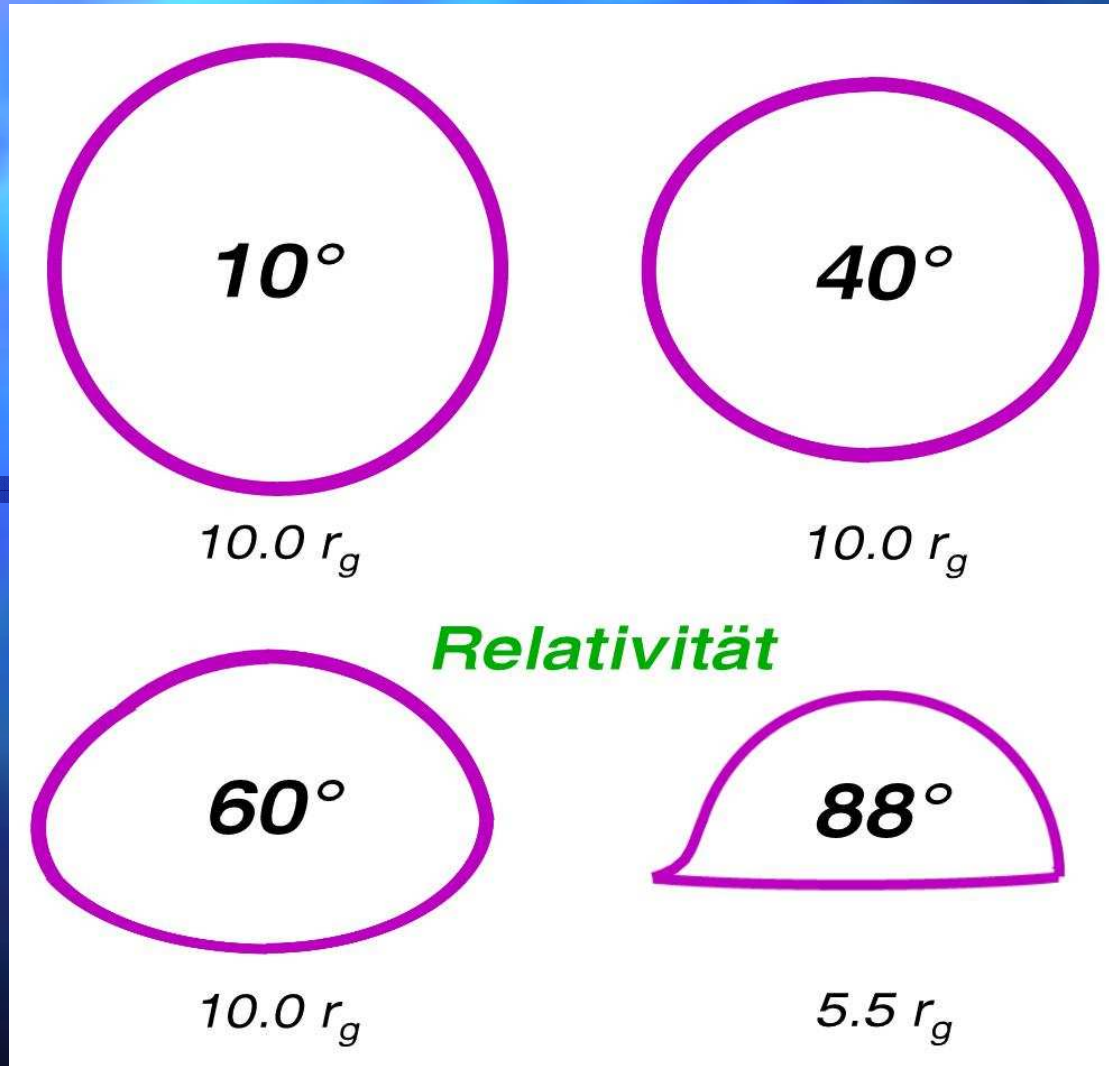
obskurative Nachweismethode
(*obscuratio*, lat.: Dunkelheit)

Löcher sind Gravitationslinsen



(Computersimulation)

Verbogene Kreisbahnen



abhängig von
Neigung der
Bahnebene!

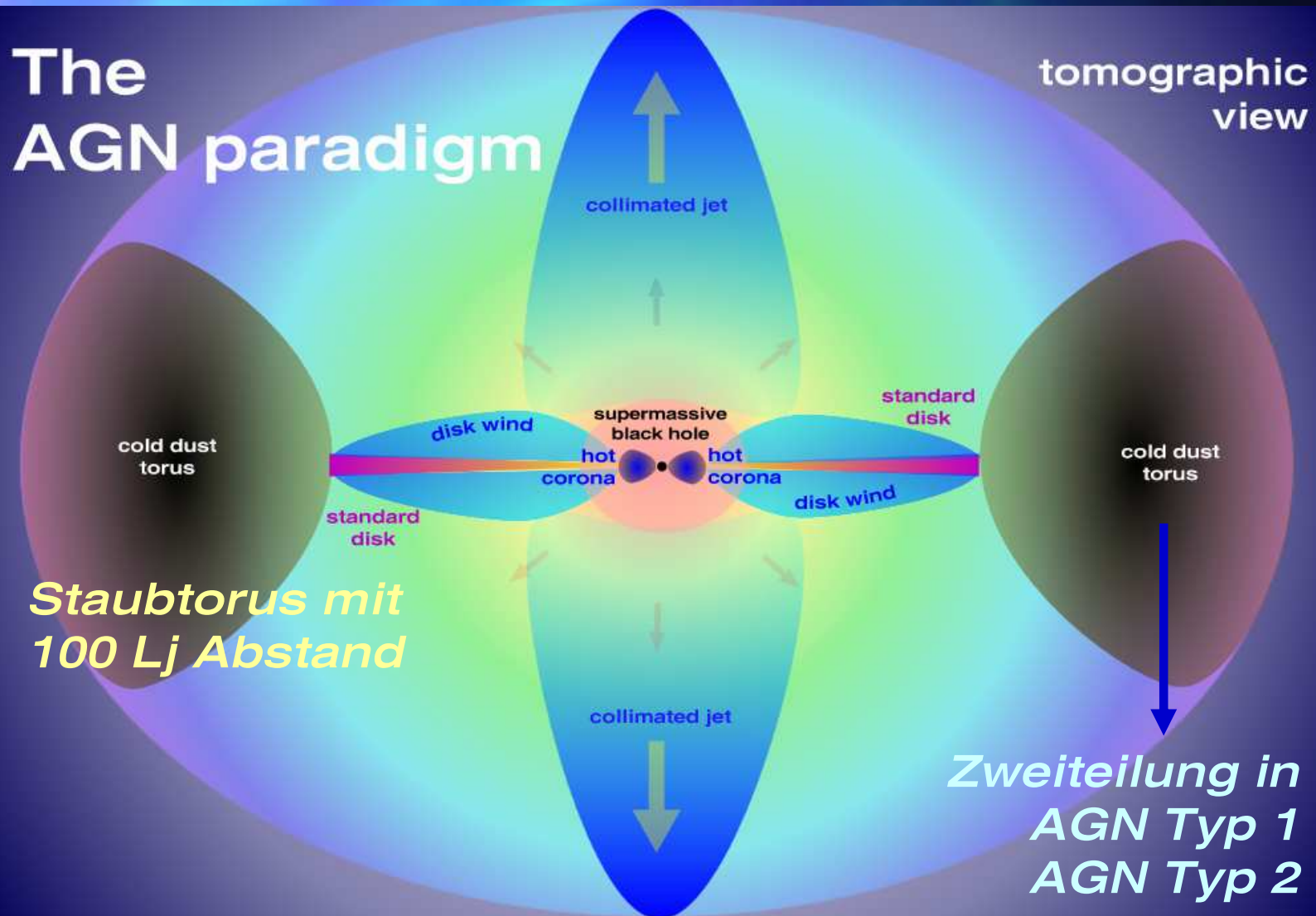
„Nichts ist
wie es scheint.“

aberrative
Nachweismethode

(*aberratio*, lat.:
Ablenkung)

(Computersimulation)

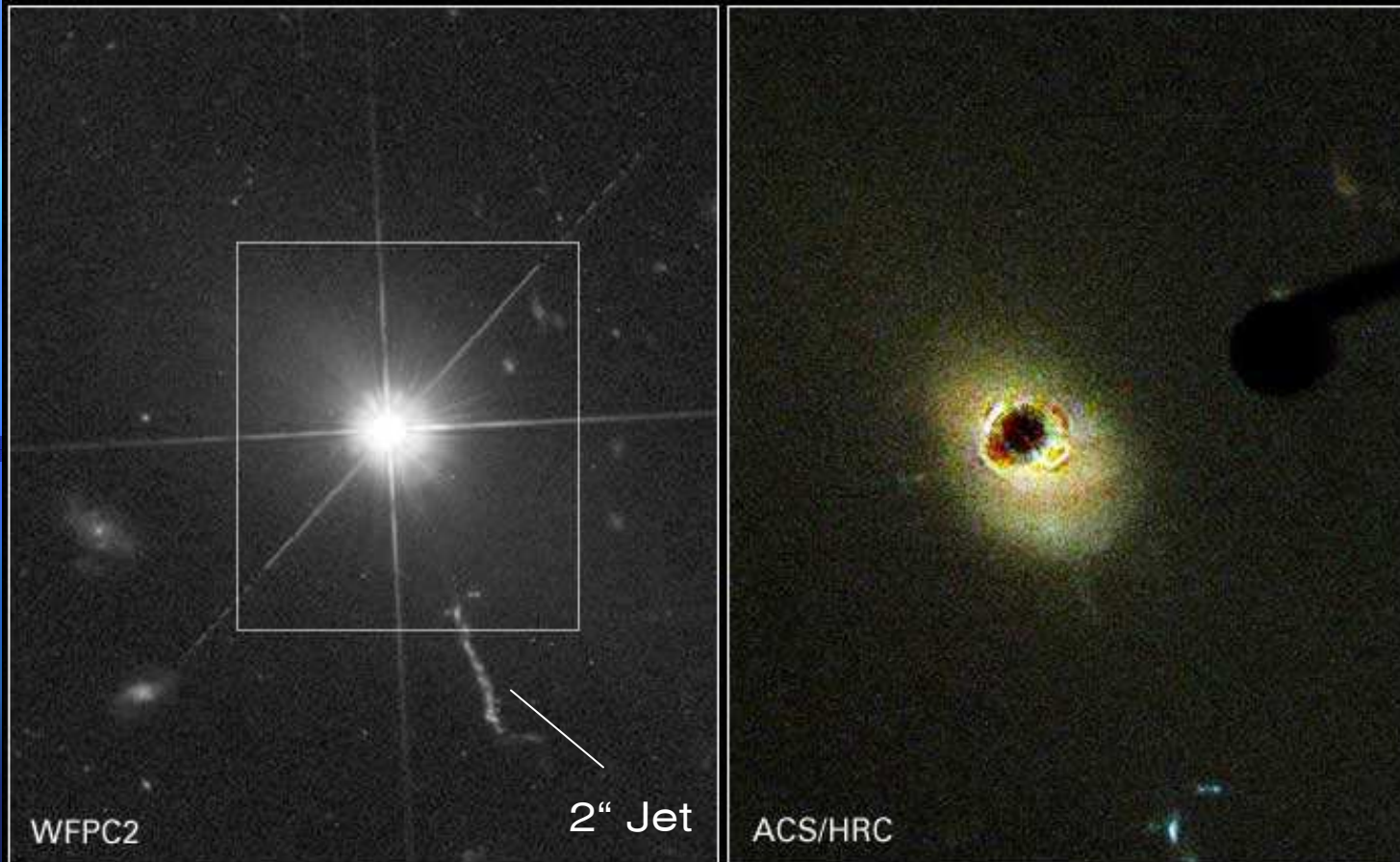
Schwarze Löcher in Galaxien



Quasare - Aktive Galaxien

Quasar 3C 273

HST • WFPC2, ACS

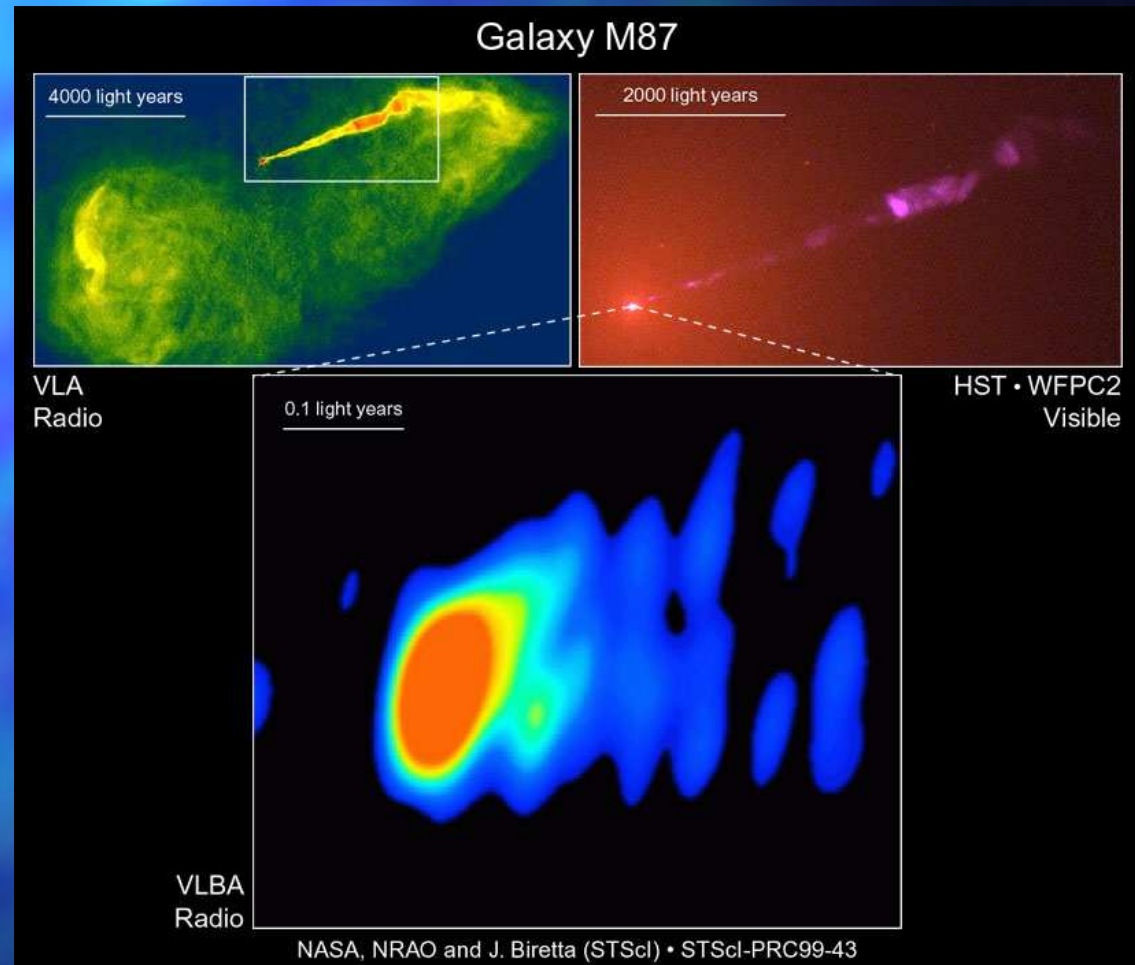


NASA, A. Martel (JHU), the ACS Science Team, J. Bahcall (IAS) and ESA

STScI-PRC03-03

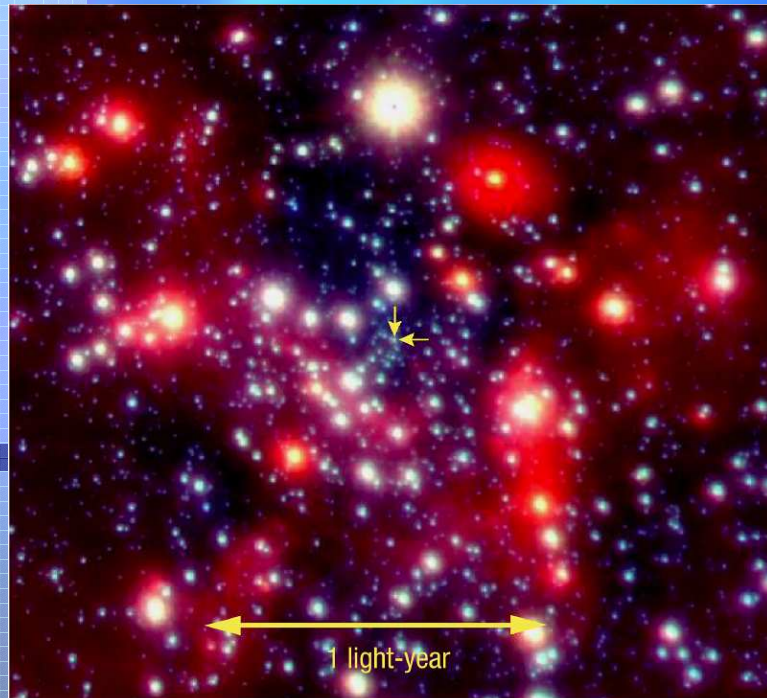
Kunstwort *Quasar*: quasi-stellares Objekt,
Sternbild Jungfrau, 2.5 Mrd. Lj entfernt!

Jets aktiver Galaxienkerne



Antriebsquelle der Jets:
ein Materie aufsammlendes, supermassereiches, rotierendes **Schwarzes Loch**

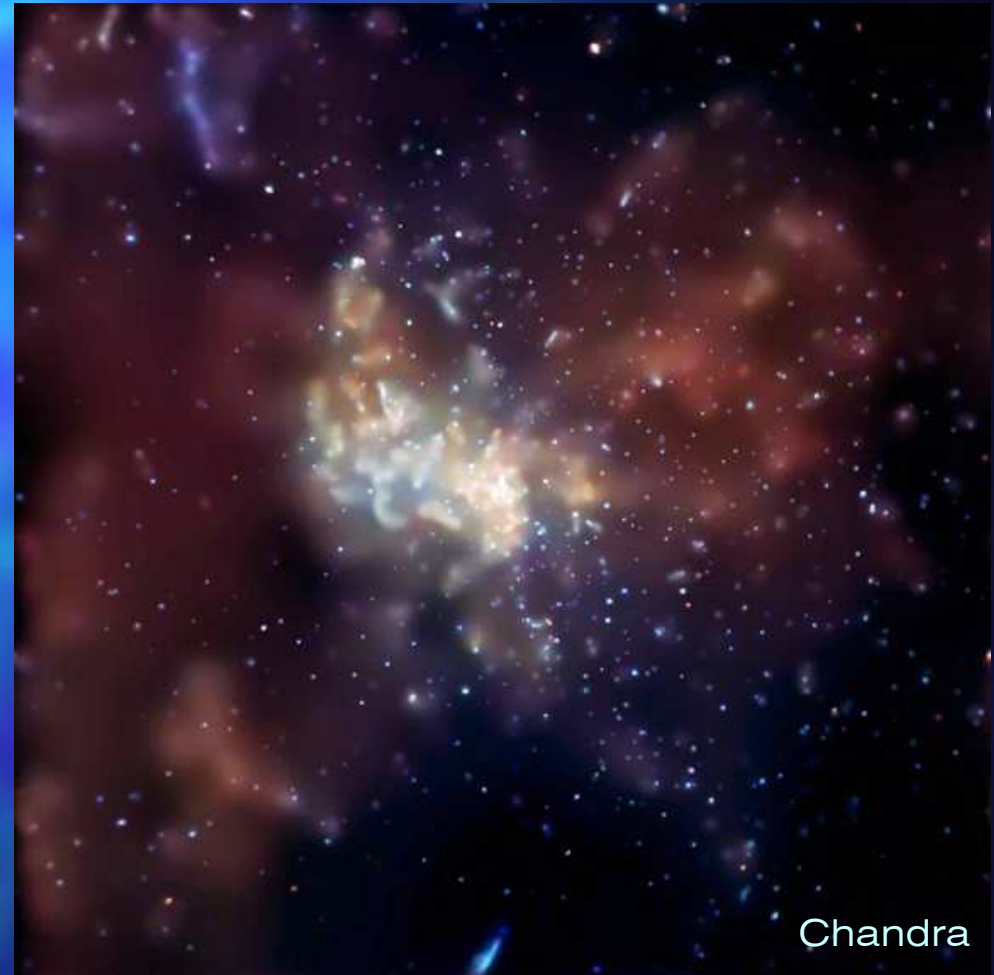
Zentrum der Milchstraße



The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

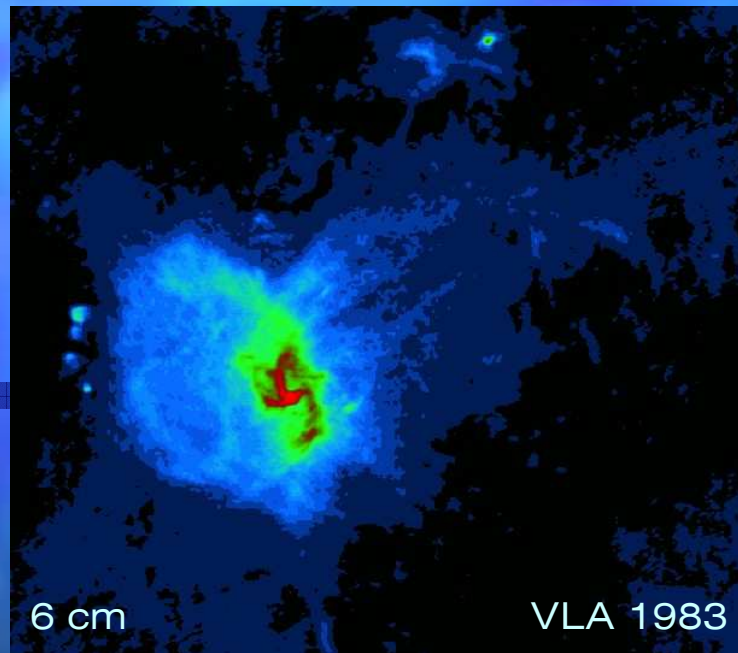
© European Southern Observatory



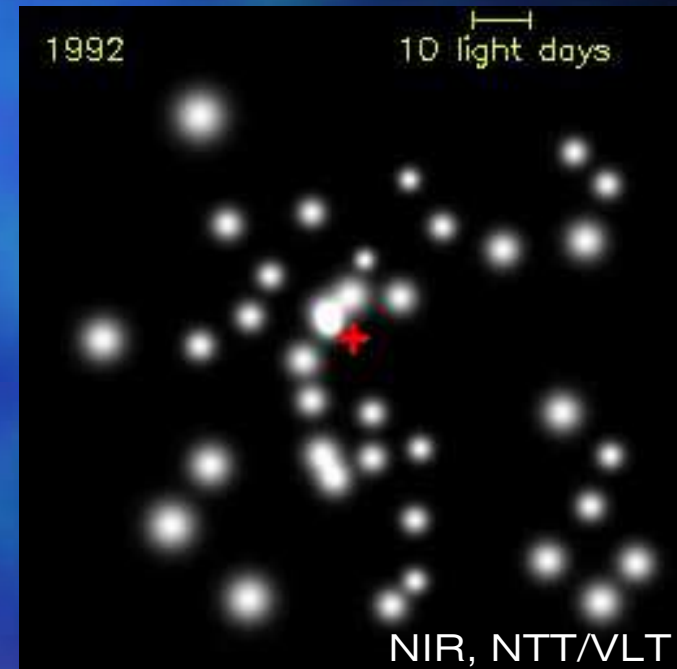
Chandra

„hungerndes“, „schlafendes“ Schwarzes Loch mit etwa 3 Mio. Sonnenmassen
Rotation des Loches nachgewiesen: halbe bis maximale Rotation

Das dunkle Herz unserer Heimatgalaxie - Sgr A*



kompakte Radioquelle,
Turbulenz



Sterne umkreisen den
schwarzen Schlund

kinematische Nachweismethode
(*kinesis*, grch.: Bewegung)

Zeitreisen I

- Das Teleskop als Zeitmaschine:
*„Ein Blick an den Nachthimmel
ist eine Zeitreise!“*
- Licht bewegt sich mit endlicher Geschwindigkeit, im Vakuum mit knapp **300 000 km/s**
- **Entfernungen - Blicke in die Vergangenheit**
 - Mond: eine gute Lichtsekunde
 - Sonne: 8 Lichtminuten
 - nächster Stern *Proxima Centauri*: 4 Lichtjahre
 - Zentrum der Milchstraße: 26 000 Lichtjahre
 - Nachbargalaxie *Andromeda*: 2 Mio. Lichtjahre
 - Galaxienhaufen *Virgo*: 52 Mio. Lichtjahre
 - hellster Quasar *3C273*: 2 Mrd. Lichtjahre
 - Urknall: 13,7 Mrd. Lichtjahre



Zeitreisen II

- Science-Fiction: H.G. Wells „Die Zeitmaschine“, Star Trek
- Zeitdehnung (Zeitdilatation)...
 - ...durch hohe Geschwindigkeiten (Spezielle RT)
 - Myonen in der Höhenstrahlung
 - Alltag im Teilchenbeschleuniger
 - ...durch kompakte Massen (Allgemeine RT)
 - im Tal gegenüber Bergen
 - nahe am Schwarzen Loch extrem
- **Relativität:** Frage des Bezugssystems
- Zwillingsparadoxon
- Was ist eigentlich Zeit?
(Essay: <http://www.mpe.mpg.de/~amueller/zeit.html>)

Wer mehr wissen will...

- Dieser Vortrag zum Download im WWW:
http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_ppt.html
- Astro-Lexikon im WWW:
<http://www.mpe.mpg.de/~amueller/lexdt.html>
Mehr als 400 Begriffe aus der Astrophysik
- Schwarze Löcher im Internet:
http://www.mpe.mpg.de/~amueller/astro_sl.html
Das dunkelste Geheimnis der Gravitation

Bildreferenzen I

- S.5 Sternentstehungsregion N11B, HST, NASA/ESA, AURA/STScI 1999
- S.6 Sternbild Orion, HST Website, Akira Fujii. 2002
- S.7 Trifidnebel, HST, NASA/STScI/AURA, Yusev-Zadeh et al. 2001/2002
- S.7 Adlernebel, HST, NASA/ESA/STScI/AURA 2004
- S.11 BZ Gliese 229B, Palomar Obs., Nakajima & Durrance 1994, HST, Kulkarni & Golimowski, NASA 1995
- S.12 Sonne, SOHO, ESA/NASA
- S.13 Roter Riese Mira A, HST, NASA, Karovska et al. 1997
- S.13 Roter Riese Mira A, Chandra, NASA/CXC/SAO, Karovska et al. 2005
- S.14 Eskimonebel, HST, NASA, Fruchter et al., ERO 2000
- S.14 Katzenaugennebel, HST, NASA/ESA/HEIC, STScI/AURA, Corradi & Tsvetanov 2004
- S.15 SN 1987A, HST, NASA/STScI, Challis et al. 2003
- S.16 η Car, HST, NASA, Morse et al. 1996
- S.16 GRB970228, BeppoSAX & Piro, IAS, CNR, Rom 1997
- S.16 GRB970228, HST, NASA/STScI, Sahu et al. 1997

Bildreferenzen II

- S.17 Crab-Pulsar, Chandra, *NASA/CXC/ASU, Hester et al. 2002*
- S.17 XTE J1550-564, Chandra, *NASA/CXC, Corbel et al. 2002*
- S.25 Quasar 3C273, HST/WFPC2, *NASA, Bahcall 2003*,
HST/ACS, *NASA/ESA/ACS, Martel et al. 2003*
- S.26 AGN M87, HST, *NASA/STScI/AURA 2000*
- S.26 AGN M87, HST, *NASA, Biretta 1998*
- S.26 AGN M87, VLA, *NRAO 1989*
- S.26 AGN M87, VLBA, *NASA, NRAO, Biretta 1999*
- S.27 Zentrum der Milchstraße, VLT/NACO, *Genzel et al. 2002*
- S.27 Zentrum der Milchstraße, Chandra, *NASA/CXC/MIT*
Baganoff et al. 2002
- S.28 Zentrum der Milchstraße, VLA, *NRAO/AUI*,
Yusev-Zadeh & Morris 1983
- S.28 Zentrum der Milchstraße, NTT/SHARP I & VLT/NAOS/CONICA,
Genzel et al. (MPE) 1992-2004, Link zum Film:
<http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/images/movie2003.mpg>

Websites

von Teleskopen und Instrumenten

- Weltraumteleskop *Hubble* (HST)
<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/category/>
- Sonnenobservatorium *Solar & Heliospheric Observatory* (SOHO)
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>
- Röntgensatellit *Chandra*
<http://chandra.harvard.edu/photo/category.html>
- Hochenergiesatellit *BeppoSAX*
http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/sax/shp_gallery.html
- Radioteleskopanlage *Very Large Array* (VLA)
<http://www.nrao.edu/imagegallery/php/level1.php>
- optisches und NIR-Teleskop *Very Large Telescope* (VLT)
<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/astroimages.html>

The background of the slide is a cosmic image, possibly a deep-field photograph of galaxies, rendered in shades of blue and purple. A semi-transparent grid pattern is overlaid on the left side of the image. The text is arranged in four lines, with each word in a different color and font style.

Studium der Astrophysik und Promotion

Dt. Universitäten: Physik mit Astrophysik

- Bochum <http://www.physik.ruhr-uni-bochum.de/>
- Bonn <http://www.uni-bonn.de/Studium/Studierende.html>
- Darmstadt <http://www.physik.tu-darmstadt.de/>
- Heidelberg <http://www.physik.uni-heidelberg.de/>
- Jena http://www.uni-jena.de/Physik___Astronomie.html
- München <http://www.physik.tu-muenchen.de/studium>
- Potsdam <http://www.physics.uni-potsdam.de/index.m4>
- Tübingen <http://astro.uni-tuebingen.de/>
- Würzburg <http://www.uni-wuerzburg.de/fakultaet/?w=phys>
- Numerus clausus und Studiengebühren beachten
- gute Alternative: ab ins **Ausland!**

Physikstudium

- **Grundstudium:** Basiswissen
- Grundpraktikum
- Vordiplom, etwa nach 3.-5. Semester
- internat. Abschluss: *Bachelor*
- **Hauptstudium:** Fachrichtungen vertiefen, Wahlmöglichkeiten!
- Fortgeschrittenenpraktikum
- Abschluss mit dem Diplom
- Projektierte Studienzeit: 10 Semester
- Regelstudienzeit: 13 Semester

Studieninhalte

- experimentelle und theoretische Physik

Grundstudium:

- Mathematik: Analysis, Lineare Algebra
- klassische Physik: Mechanik, Thermodynamik, Elektrodynamik
- Vorbereitung auf die Quantenmechanik

Hauptstudium:

- Quantenmechanik (QM), Statistische Physik
- Quantenfeldtheorien (QFT): Quantenelektrodynamik (QED), Quantenchromodynamik (QCD)
- Kernphysik
- Teilchenphysik
- Festkörperphysik
- Angewandte Physik (Optik, Laserphysik)

Uni Leben

Besuch von...

- ...Vorlesungen (*passiv*, empfohlen: mitschreiben)
- ...Übungen (*aktiv*, rechnen, rechnen, rechnen...)
- ...Seminaren, Oberseminaren, Kolloquien
- ...Praktika (Experimente in 2er-Gruppen, Auswertung von experimentellen Daten, Diskussion)

„Schein“:

Testat für erfolgreich besuchte Übungen, Seminare, Praktika

Scheine ermöglichen Fortschritt im Studium.

Weitere Prüfungen erst mit bestimmten Scheinen möglich.

la dolce vita ;-)

Diplom-Prüfung

- Diplom, etwa nach 10.-12. Semester:
 - schriftliche Abschlussarbeit
(experimentelles oder theoretisches Thema)
 - mündliche Prüfung in vier Fächern:
Experimentalphysik,
theoretische Physik,
physikalisches Wahlfach,
und nicht-physikalisches Wahlfach
(häufig Mathematik)
- externe Diplomarbeit (auf Antrag)
- dt. Abschluss als *Diplom-Physiker*
- internat. Abschluss: *Master of Science*

Promotion

- qualifiziert erst zum Astrophysiker
 - selbstständiges, wissenschaftliches Arbeiten
 - Betreuung durch Doktorvater/Doktormutter
 - Arbeit in der Gruppe eines Professors
-
- halbes Gehalt der Besoldungsgruppe BAT IIa (~1000 – 1300 Euro netto)
 - 19,25 Stunden-Woche...aber Arbeit für 30 Stunden
 - Dauer: 3 bis 5 Jahre (je nach Fähigkeiten, äußeren Umständen)

IMPRS student

- außeruniversitäre Alternative
bei Max-Planck Gesellschaft (MPG):

International Max-Planck Research School (IMPRS)

- strafferes Programm, internat. Flair

- z.B. bei Max-Planck-Institut für...
...extraterrestrische Physik, Garching
...Astrophysik, Garching
...Astronomie, Heidelberg
...Radioastronomie, Bonn
...Gravitationsphysik, Golm

MPE

MPA

MPIA

MPIfR

AEI

Doktorprüfung

Abschluß mit

- schriftlicher, wissenschaftlicher Arbeit: **Dissertation**
- mündlicher Prüfung: **Disputation/Rigorosum**

- **Erlangung der Doktorwürde:**

Dr. rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

Doktor der Naturwissenschaften

international: *PhD (Philosophae Doctorae)*