

Exkurs: Schwarze Löcher (3)

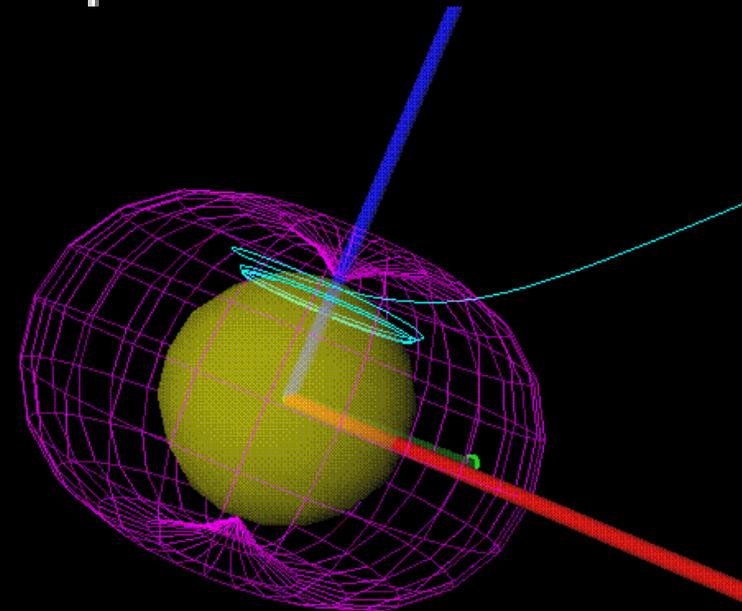
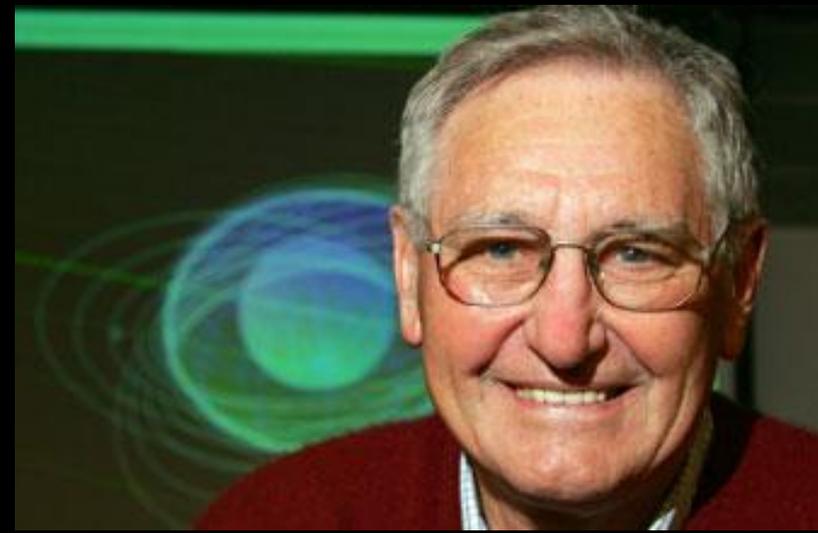
$$g_{11} = \frac{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}{r^2 + a^2 + Q^2 - 2mr}$$

$$g_{22} = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$$

$$g_{33} = \left[r^2 + a^2 - \frac{a^2(Q^2 - 2mr) \sin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta} \right] \sin^2 \theta$$

$$g_{34} = g_{43} = \frac{a(Q^2 - 2mr) \sin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}$$

$$g_{44} = - \left(1 + \frac{Q^2 - 2mr}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta} \right).$$

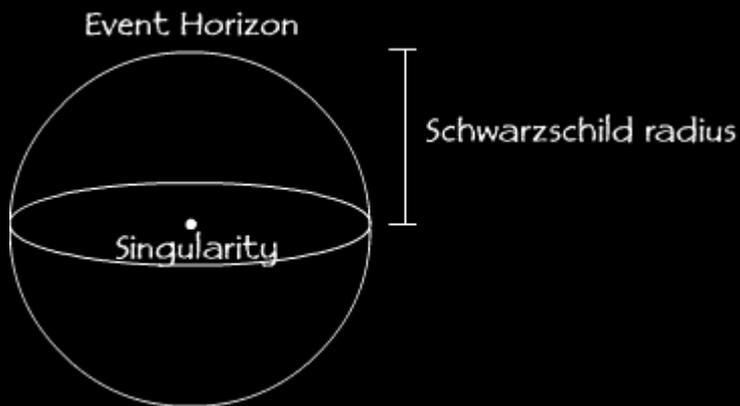


Ein paar Theoreme zur Physik (klassischer) Schwarzer Löcher

Erster Hauptsatz: Energieerhaltungssatz unter Berücksichtigung der relativistischen Energie-Masse-Äquivalenz. Zusätzlich gelten die anderen Erhaltungssätze der Mechanik und Elektrodynamik: Neben der Energie bleiben **Impuls**, **Drehimpuls** und **Ladung** erhalten.

Zweite Hauptsatz: (Stephen W. Hawking) Die Summe der Flächen der Ereignishorizonte der Schwarzen Löcher im Kosmos kann niemals abnehmen, egal was mit den Schwarzen Löchern auch passiert. Dies gilt nicht nur, wenn Materie in das Schwarze Loch fällt (was dessen Masse – und damit dessen Ereignishorizont – vergrößert), sondern auch beispielsweise für die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher und für jeden anderen denkbaren Prozess.

→ Dies entspricht dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, wobei die Fläche des Ereignishorizonts die Rolle der Entropie übernimmt.



Die Fläche der Sphäre mit dem Schwarzschild-Radius kann bei Materieeinfall nur anwachsen.

Einteilung Schwarzer Löcher nach ihrer Metrik

	statisch ($J = 0$)	rotierend ($J \neq 0$)
ungeladen ($Q = 0$)	Schwarzschild-Metrik	Kerr-Metrik
geladen ($Q \neq 0$)	Reissner-Nordström-Metrik	Kerr-Newman-Metrik

Q: elektrische Ladung, J: Drehimpuls

Bei einem Gravitationskollaps gehen alle Eigenschaften des Ursprungsterns bis auf dessen Masse, Ladung und Drehimpuls verloren (No-Hair Theorem).

→ J. A. Wheeler: „Schwarze Löcher haben keine Haare“

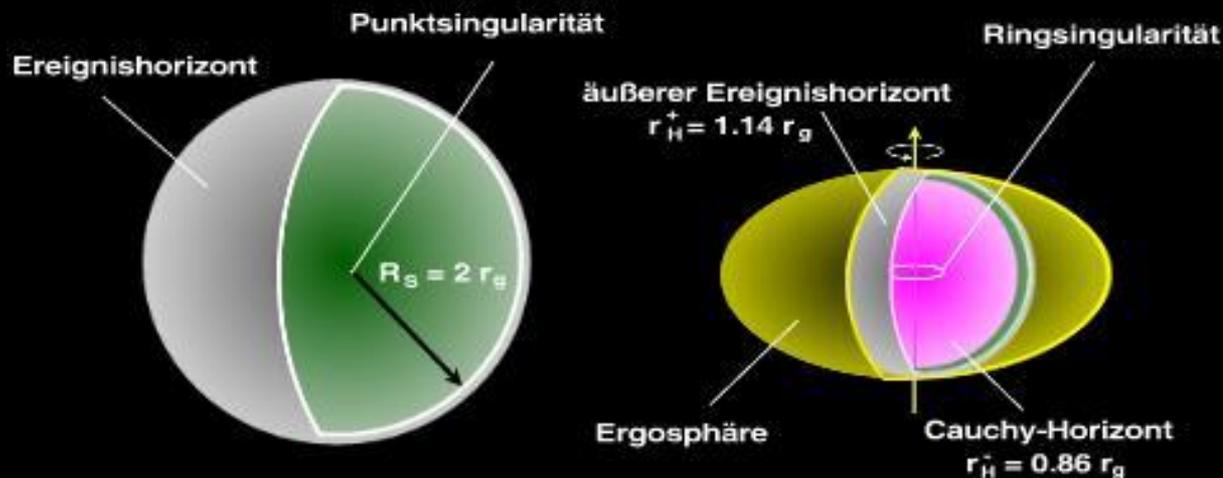
Der Drehimpuls kommt mit ins Spiel – Kerr-Löcher

Der Drehimpuls eines isolierten physikalischen Systems bleibt unverändert, egal welche Kräfte und Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen des Systems wirken. Er ist Ausdruck für die Isotropie des Raumes. Er bleibt auch beim Gravitationskollaps erhalten:

→ „rotierende Schwarze Löcher“

Exakte Lösung der Einsteinschen Gravitationsfeldgleichungen für eine homogene rotierende Masse – Roy Kerr 1963

Die Kerr-Lösung ist weitaus komplizierter als die statische Schwarzschild-Lösung.



Schwarzschild

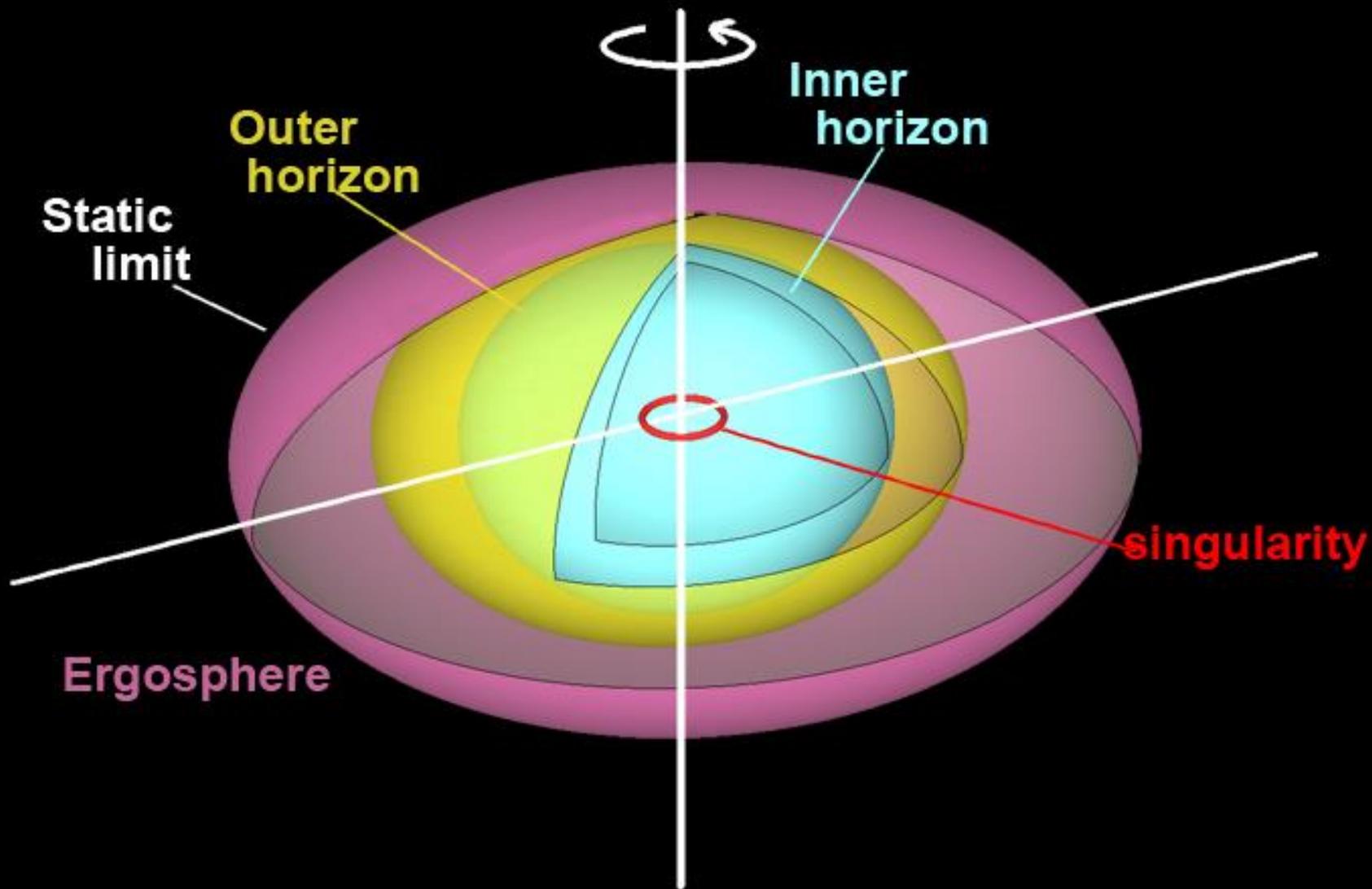
$a = 0$

Kerr

$a = 0.99 M$

Es gibt im Bereich eines Kerr-Lochs mehrere seltsame Hyperflächen sowie eine torusförmige Ringsingularität um das Zentrum

Axis of rotation

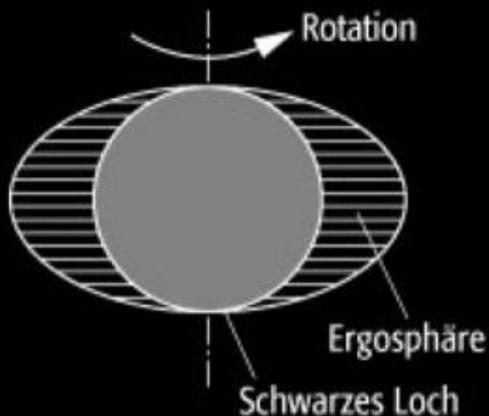


Eigenschaften eines Kerr-Lochs

- In der Kerr-Lösung gibt es im Unterschied zur Schwarzschildlösung einen **inneren Horizont** oder Cauchy-Horizont sowie einen **äußeren Horizont**. Der Letztere ist der eigentliche Ereignishorizont, weil er festlegt, ab welchem Abstand ein rotierendes Loch für einen Außenbeobachter völlig schwarz erscheint. Beide Horizonte hängen nur von der Masse und dem Drehimpuls des Loches ab!
- Um die beiden Horizonte herum gibt es eine sogenannte **Ergosphäre**, d.h. eine Region, wo die Rotation der Raumzeit extrem stark wird. Alles, was sich lokal in der Ergosphäre befindet (Sterne, Akkretionsscheiben, Beobachter, Licht!), wird von der rotierenden Raumzeit mitgezogen

→ Frame-Drag.

Innerhalb der Ergosphäre kann insbesondere kein Beobachter mehr statisch sein und muss rotieren. Die Struktur der rotierenden Raumzeit zwingt einfach alles, Materie und Strahlung, mit ihm zu rotieren! Am äußeren Horizont dreht sich alles mit der Winkelgeschwindigkeit des Loches



Ein Teilchen, welches in die Ergosphäre eindringt, kann sie unter gewissen Bedingungen auch wieder verlassen (Penrose-Prozeß)

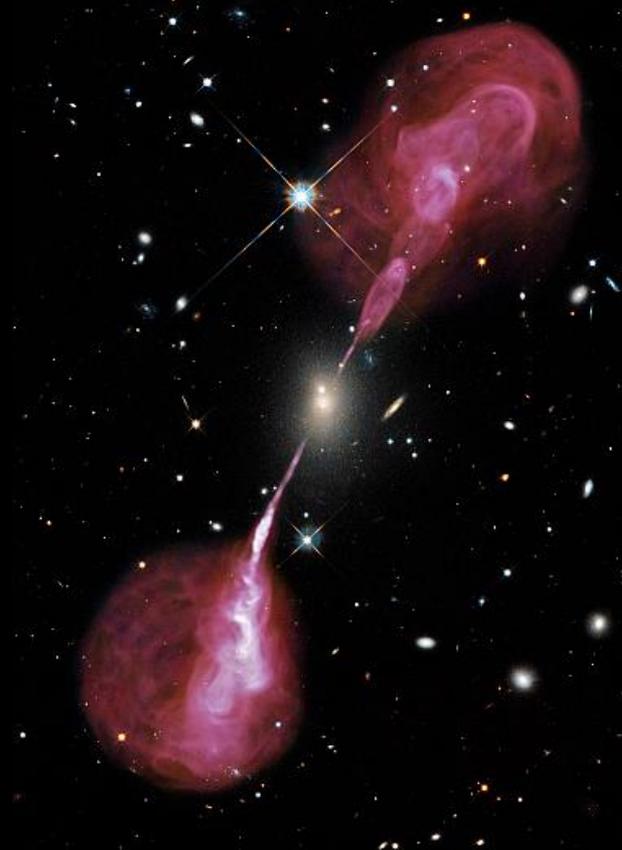
Kerr-Löcher sind astronomisch besonders von Interesse, da nur sie „realistisch“ genug sind, um eine Vielzahl sonst unerklärlicher astrophysikalischer Prozesse zu erklären – wie z. B.:

- Erzeugung von Jets in Galaxienkernen (relativistische Hydrodynamik)
- Relativistische Verbreiterung von Spektrallinien, deren Emissionsgebiete nahe an einem Schwarzen Loch liegen
- Lense-Thirring-Effekt in Akkretionsscheiben
- Frame dragging
- Blandford-Znajek-Mechanismus (Anzapfen der Rotationsenergie eines Kerr-Lochs)
- Penrose-Prozeß (Anzapfen der Rotationsenergie eines Kerr-Lochs)

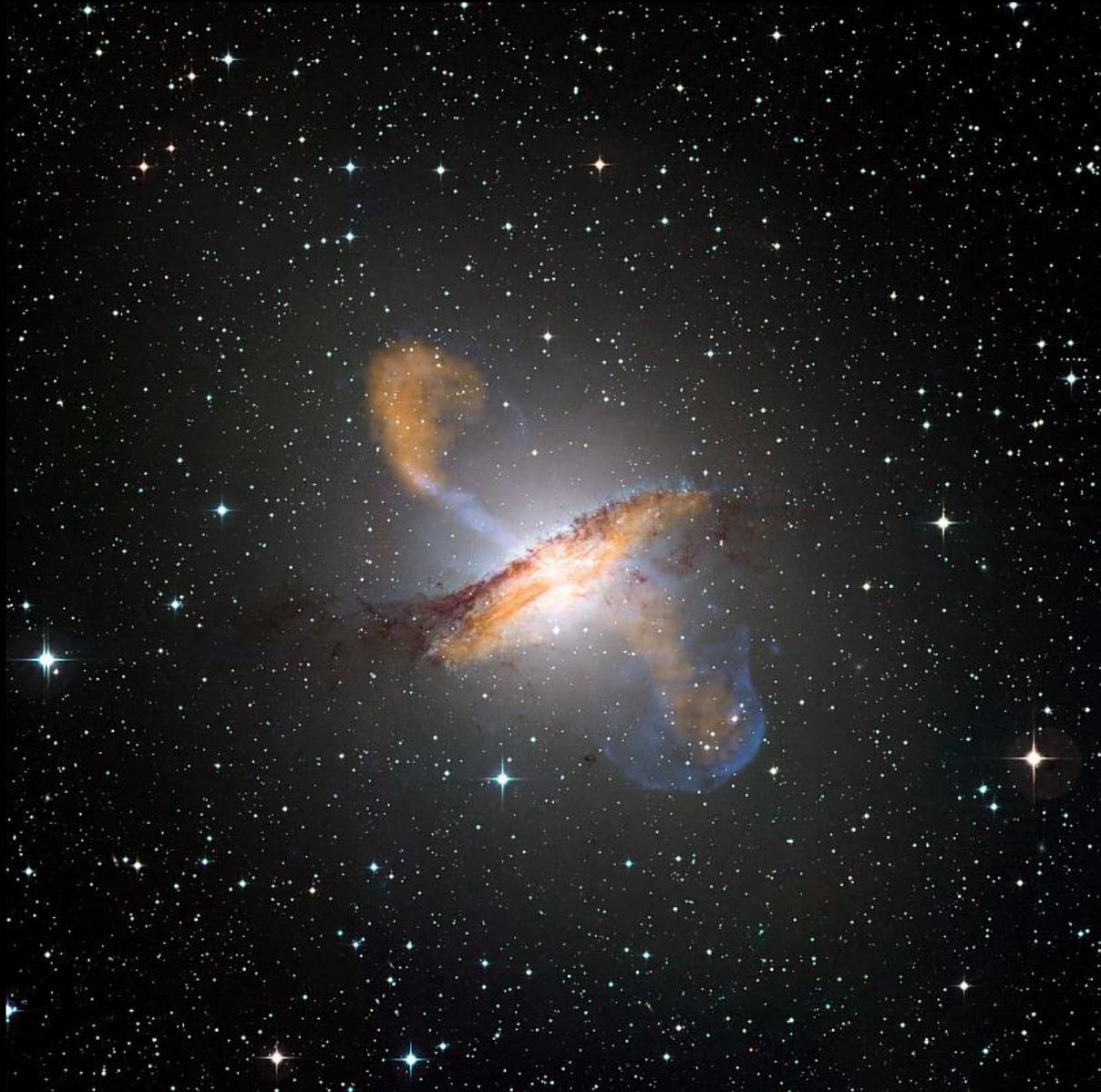
Nur Kerr-Löcher sind in der Lage, durch Akkretionsprozesse so große Mengen an Energie freizusetzen, daß sich damit die Verhältnisse bei aktiven Galaxienkernen erklären lassen.

Akkretionsscheiben und relativistische Jets

Viele Galaxien mit aktiven
Kernen zeigen die Präsenz
von riesigen bidirektionalen
Jets an (Radiobereich)

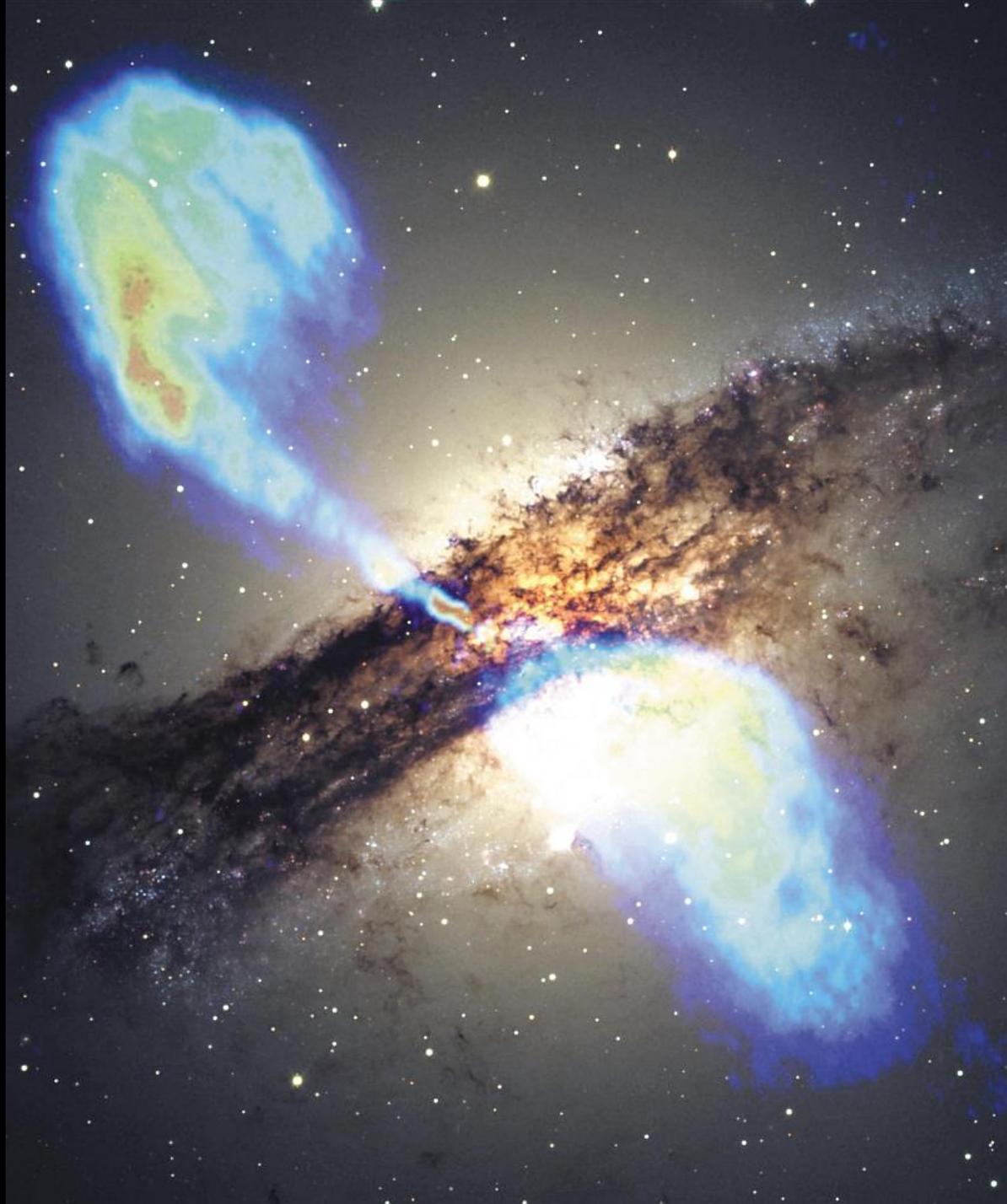


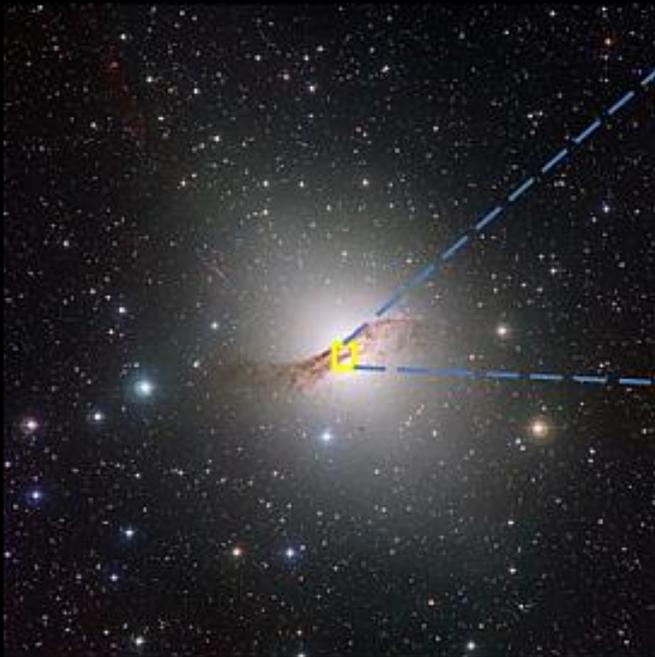
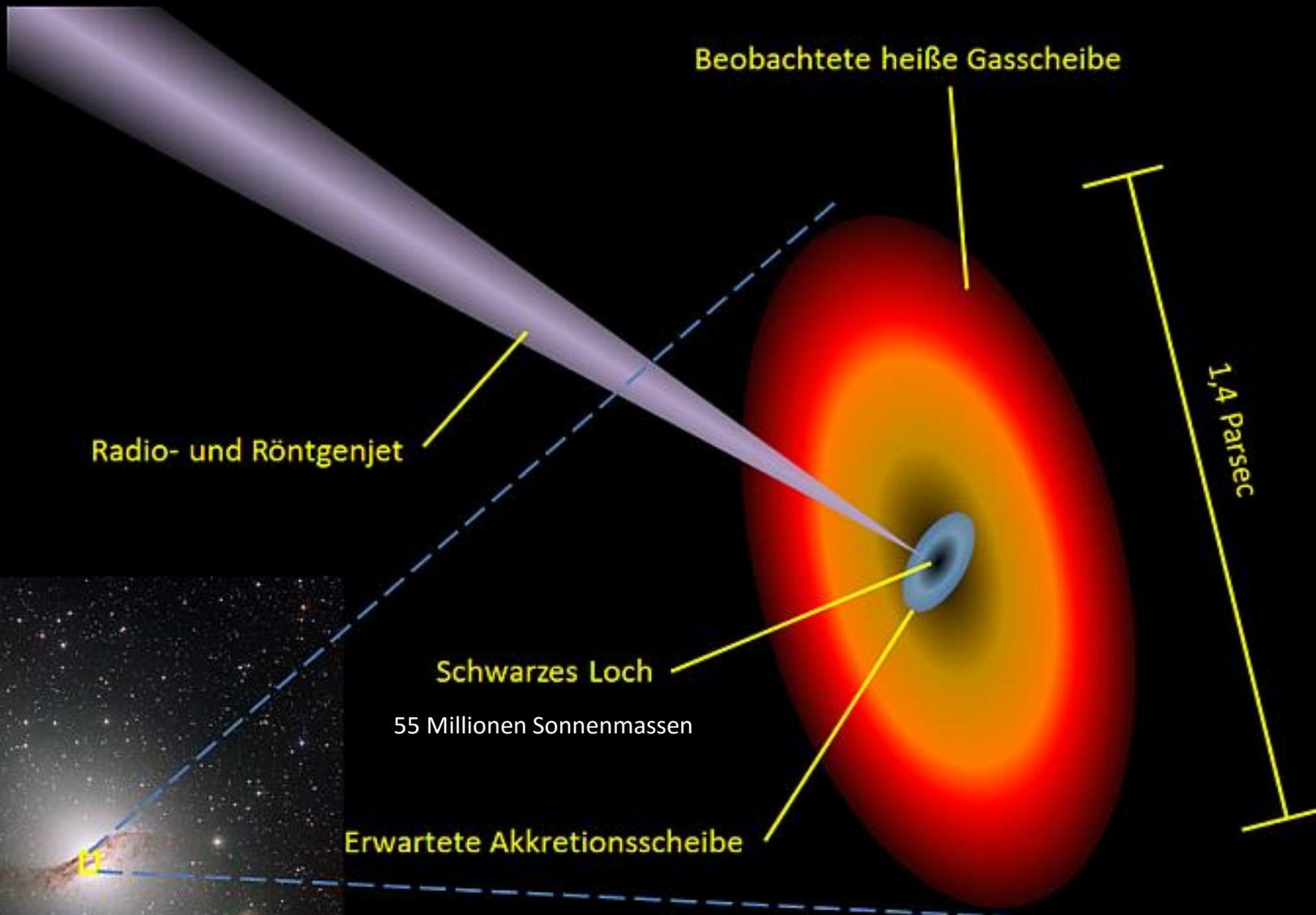
Hercules A



Centaurus A

NGC 5128 = Centaurus A





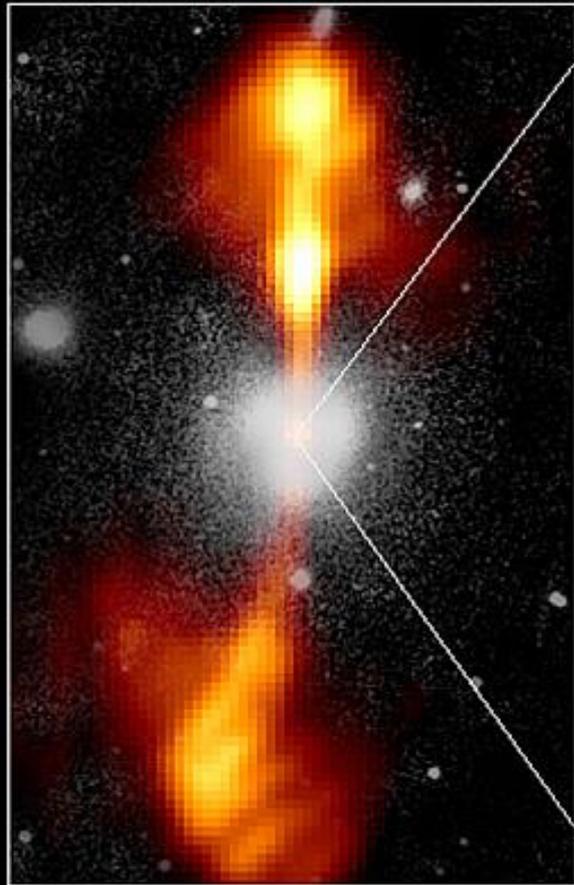
Zentraler Bereich von Centaurus A

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

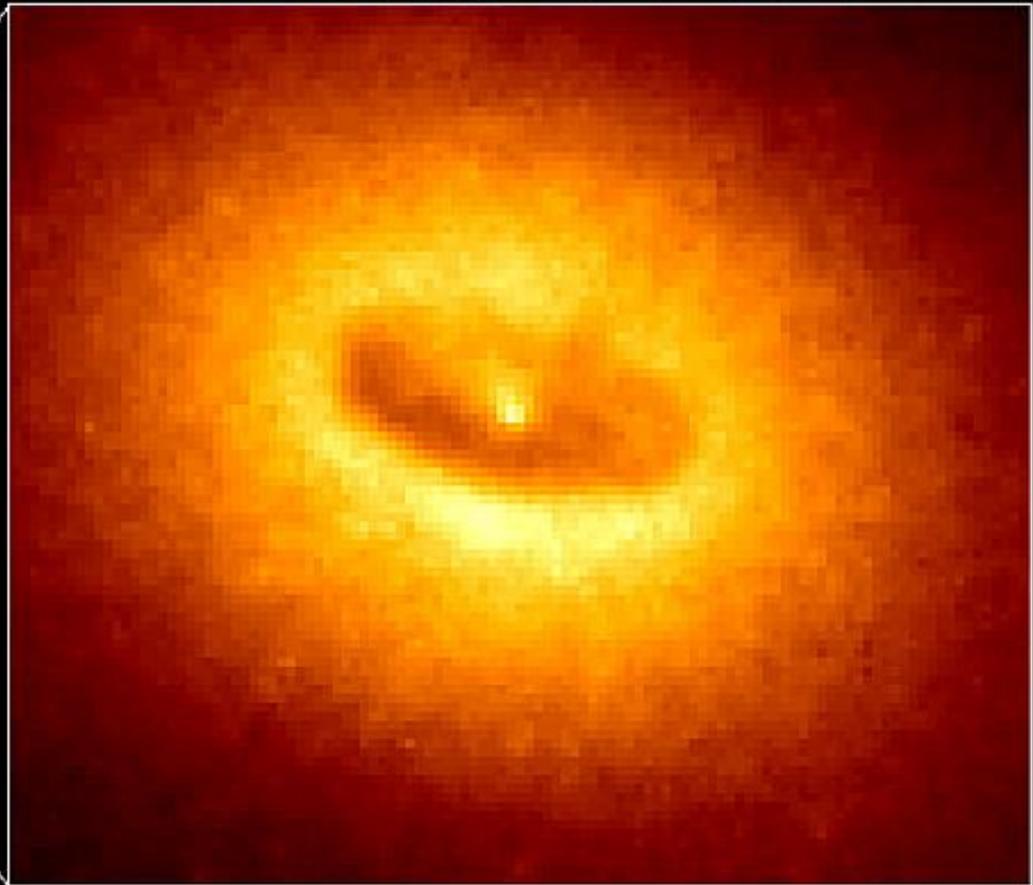
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

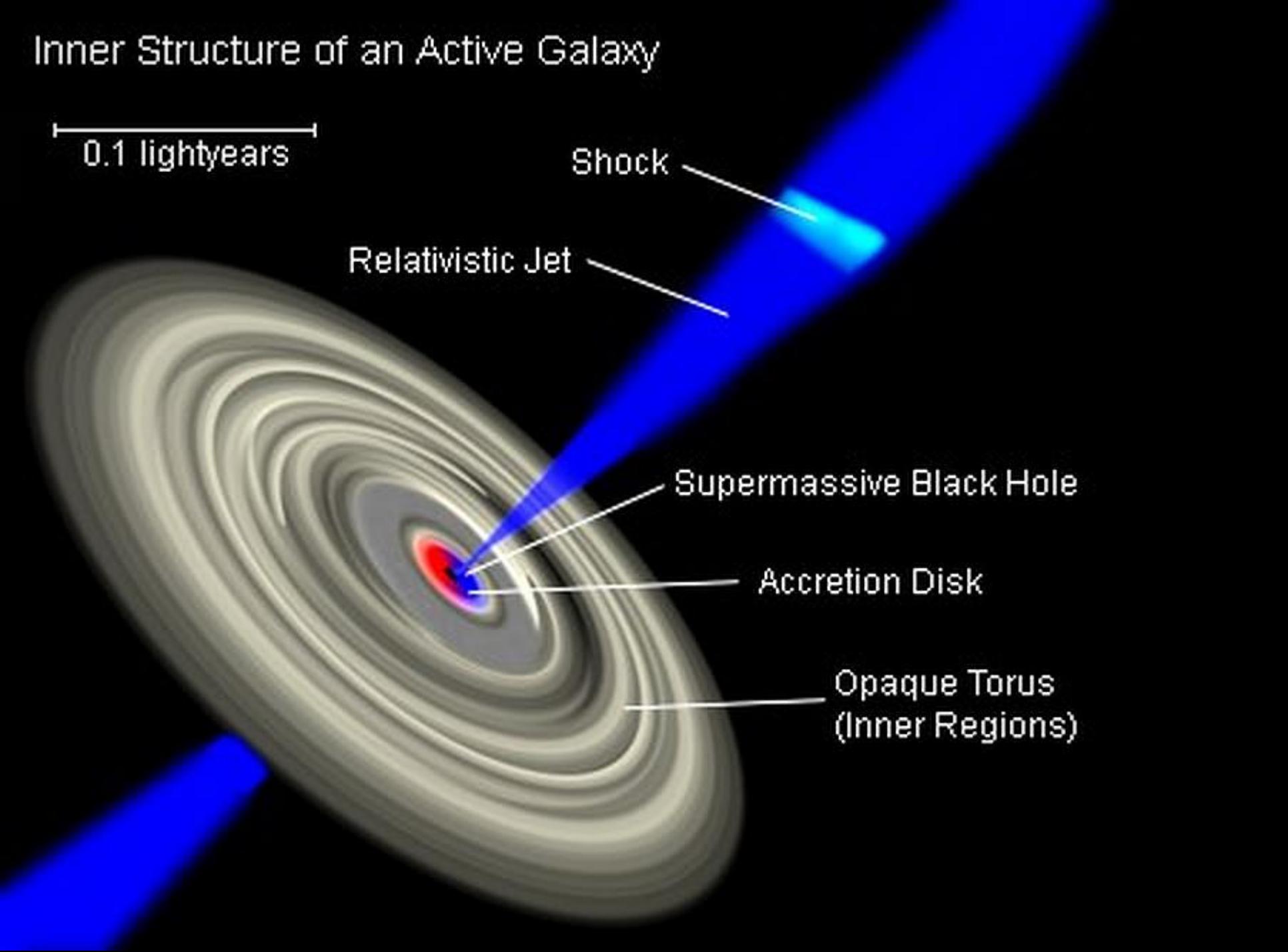
HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

Inner Structure of an Active Galaxy

0.1 lightyears



Shock

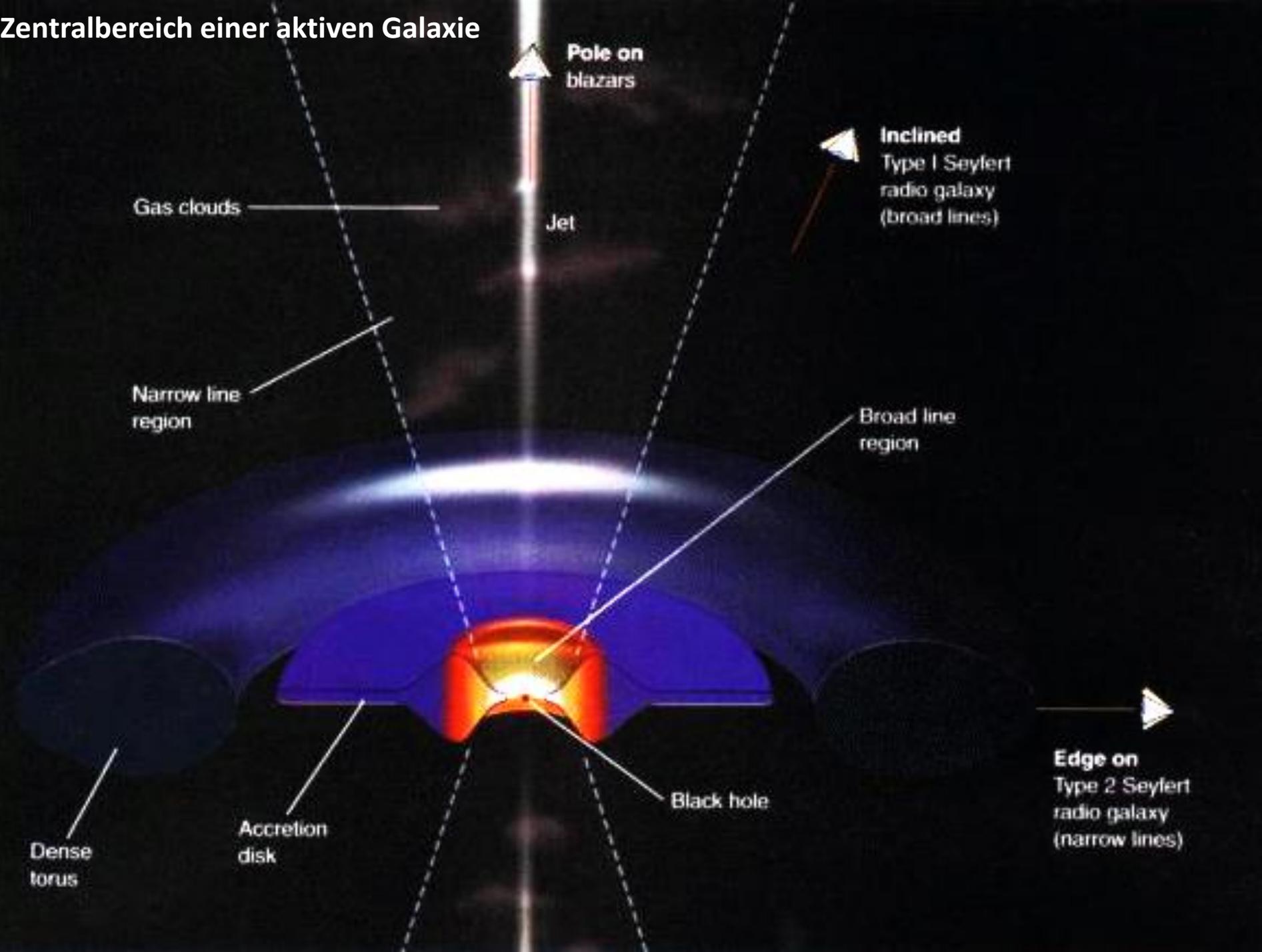
Relativistic Jet

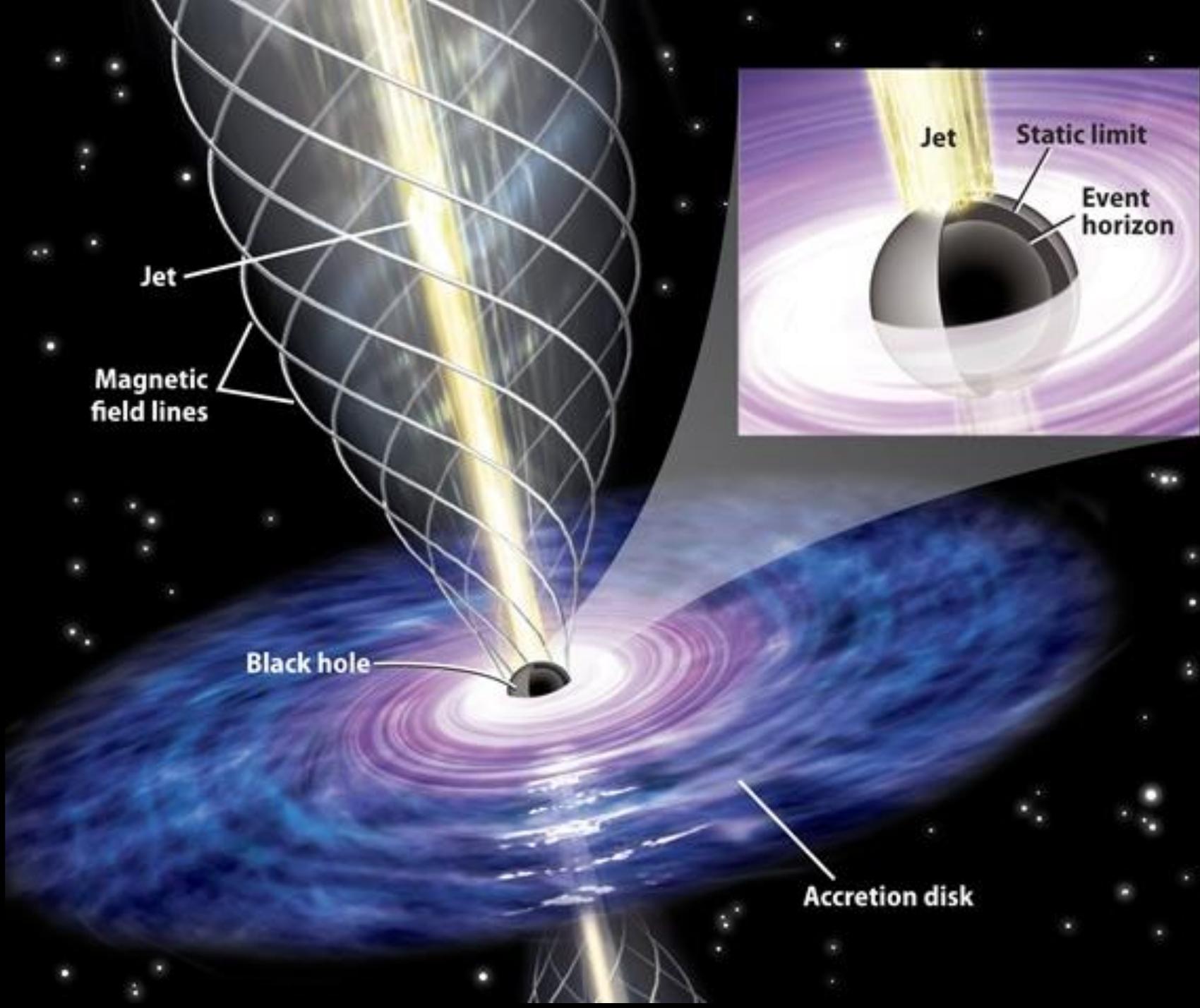
Supermassive Black Hole

Accretion Disk

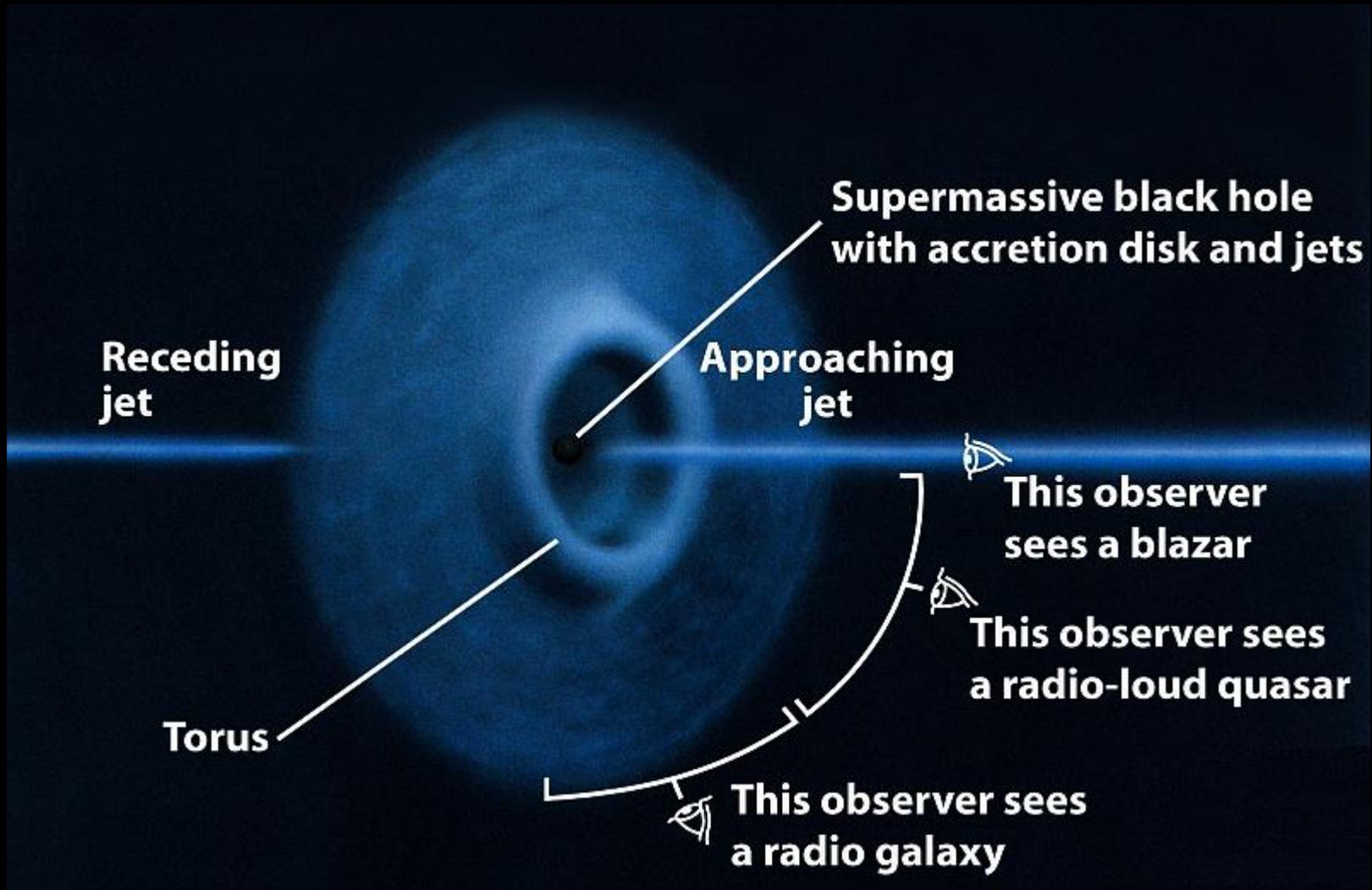
Opaque Torus
(Inner Regions)

Zentralbereich einer aktiven Galaxie

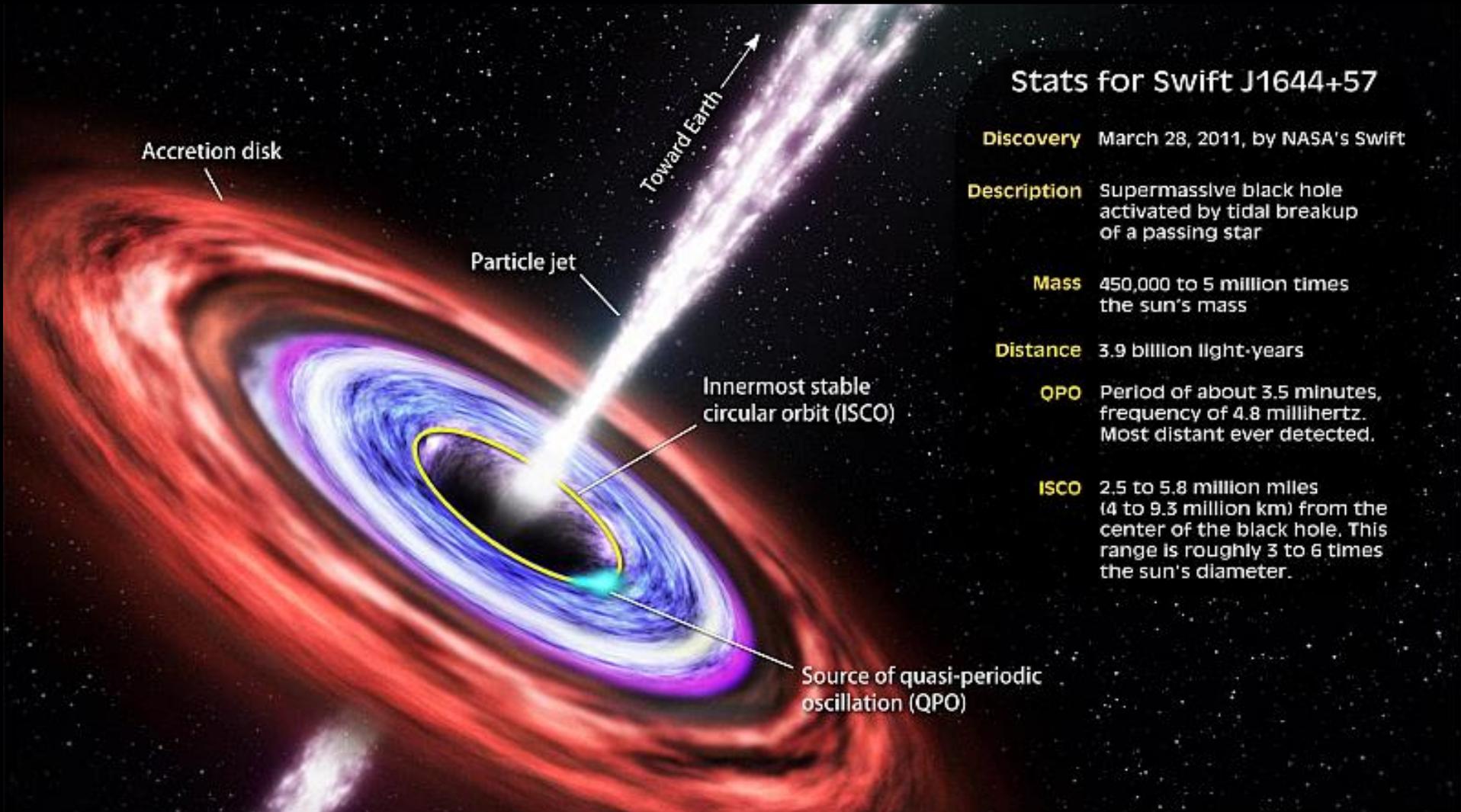




Arten von aktiven Galaxienkernen (AGN – Active Galaxy Nucleus)



Gamma Ray Burster



Stats for Swift J1644+57

Discovery March 28, 2011, by NASA's Swift

Description Supermassive black hole activated by tidal breakup of a passing star

Mass 450,000 to 5 million times the sun's mass

Distance 3.9 billion light-years

QPO Period of about 3.5 minutes, frequency of 4.8 millihertz. Most distant ever detected.

ISCO 2.5 to 5.8 million miles (4 to 9.3 million km) from the center of the black hole. This range is roughly 3 to 6 times the sun's diameter.