



Schwarze Löcher

Dr. Knud Jahnke

Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg



Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie

- Eine Lösung der ART Feldgleichungen:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Krümmung
des Raumes

Energie
(+Impuls)

Proportionalitäts-
konstante

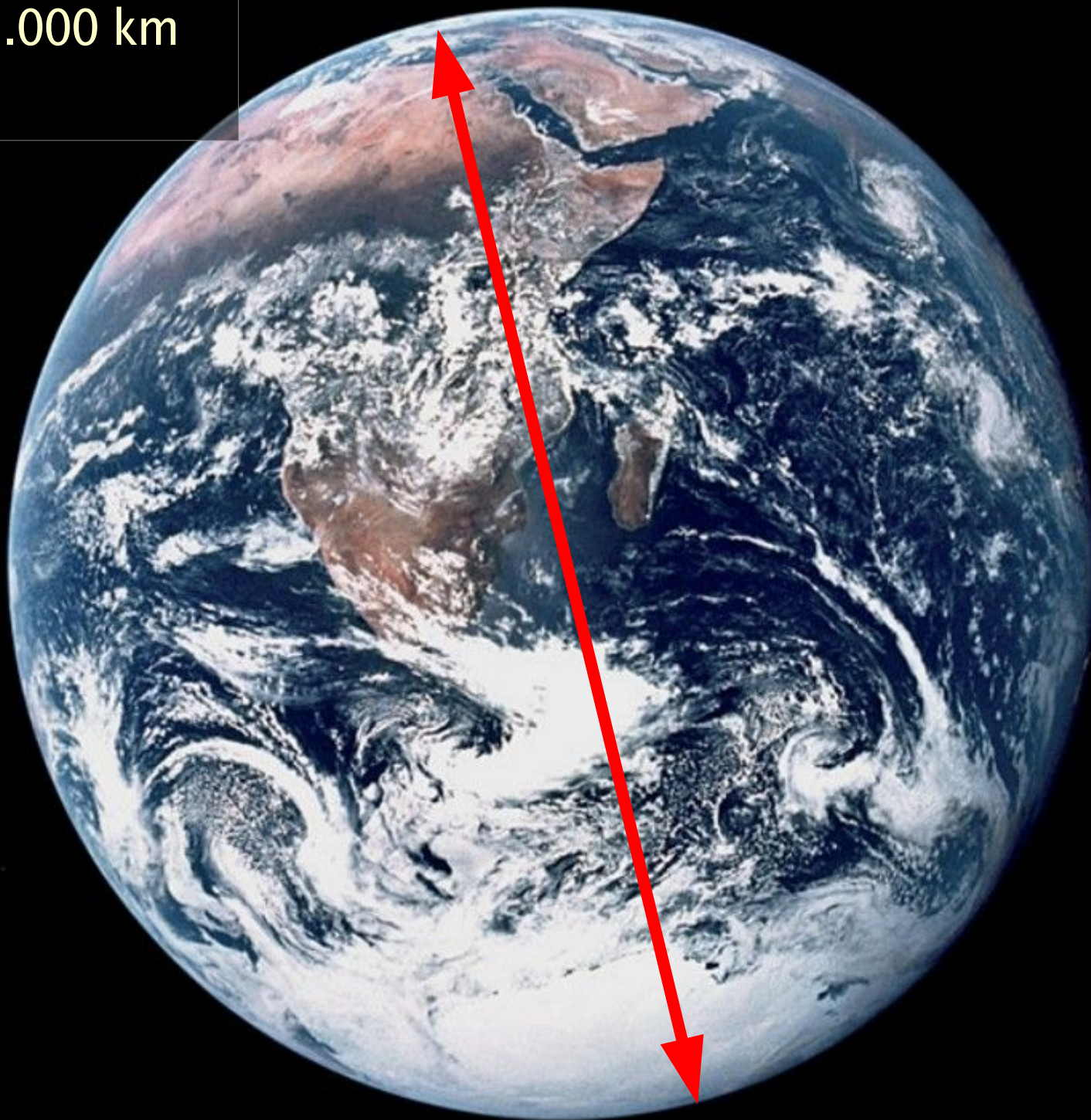
Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie

- Konkreter: Objekt mit Horizont
 - Fluchtgeschwindigkeit: Entkommen ins Unendliche

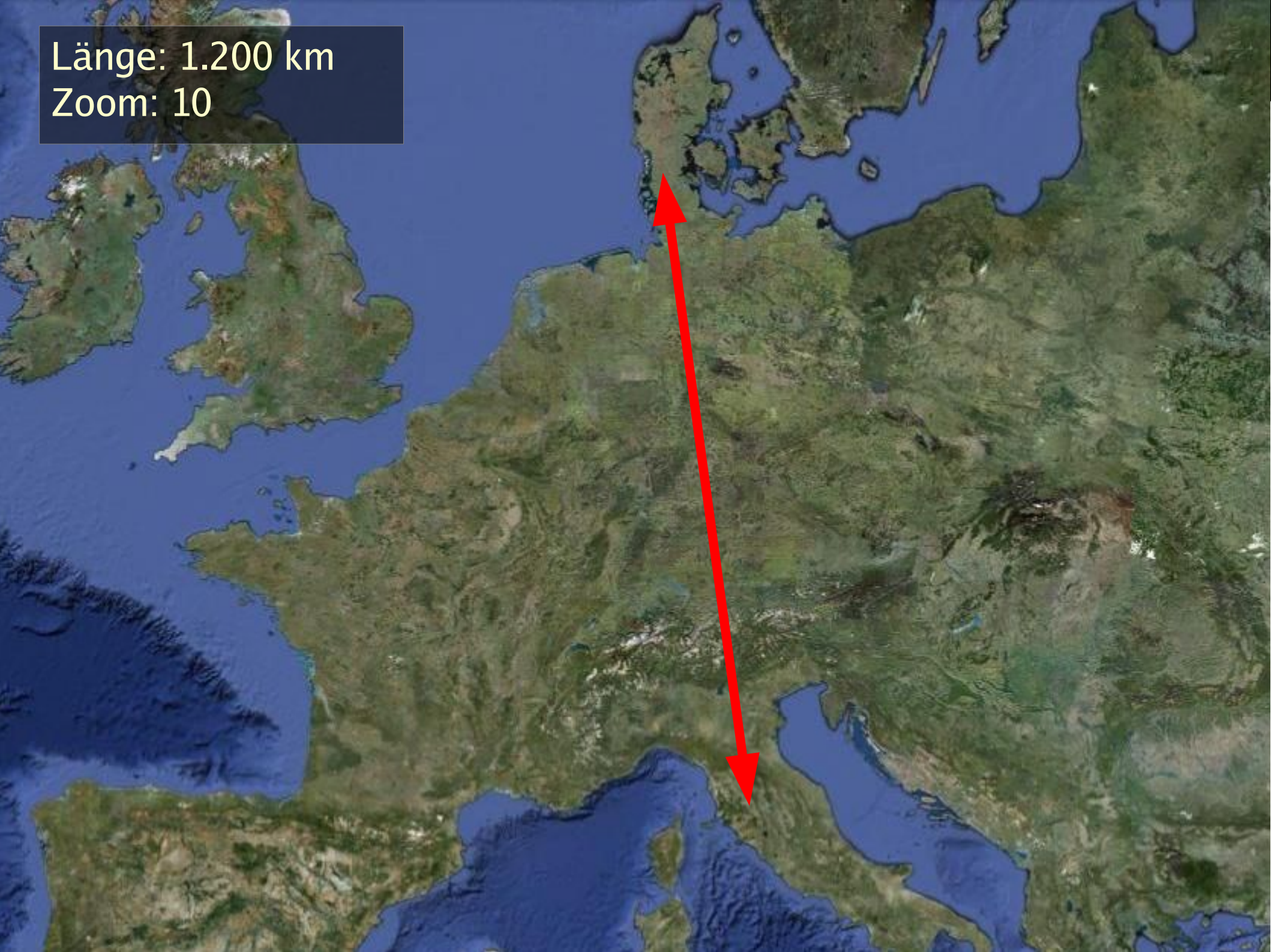
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \leq c$$

- Schwarzschildradius: $\Rightarrow r_s = \frac{2GM}{c^2}$
- “Nicht-rotierendes, ungeladenes Schwarzes Loch”
(Schwarzschild Schwarzes Loch)

Länge: 12.000 km
Zoom: 1



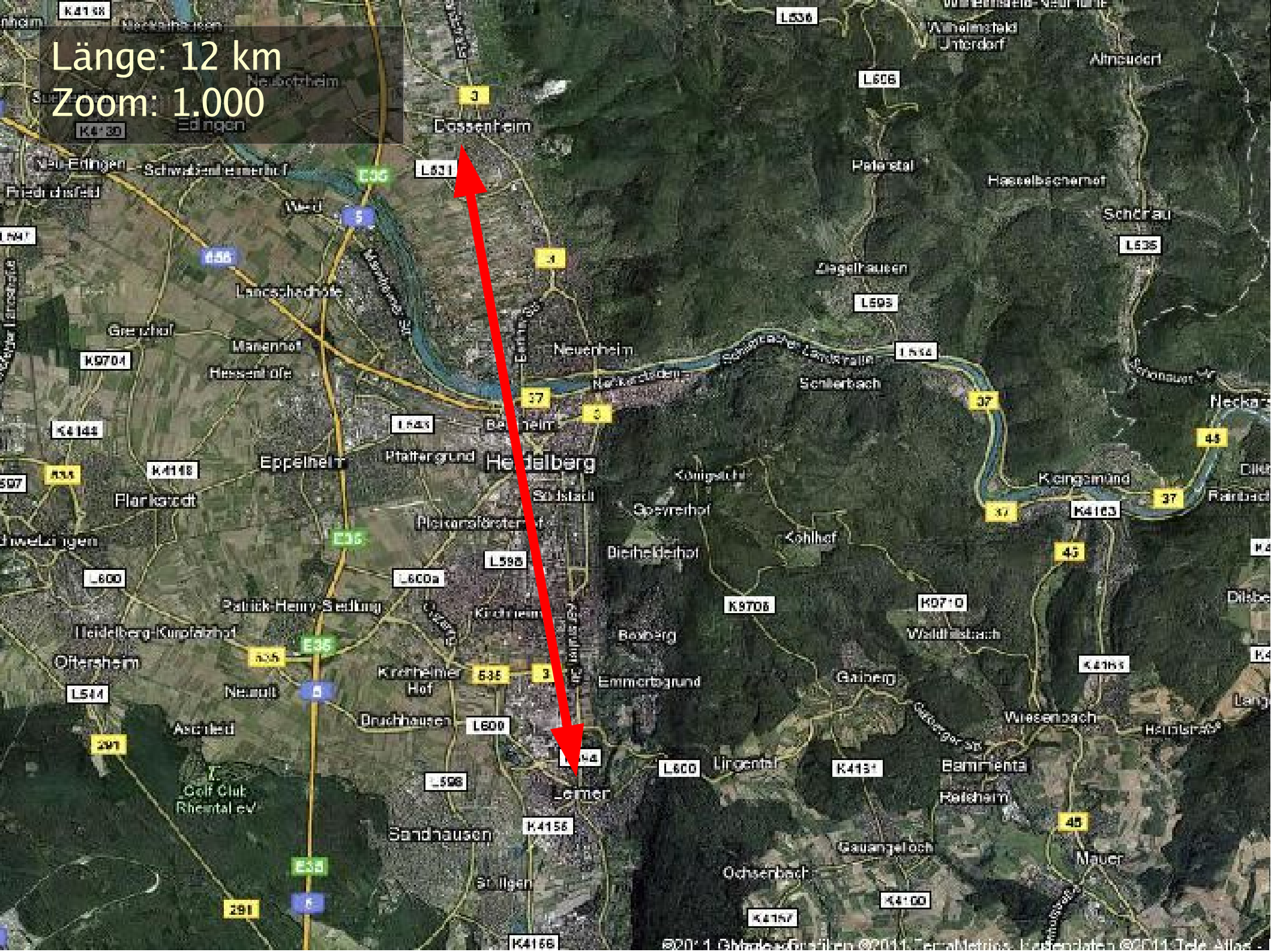
Länge: 1.200 km
Zoom: 10



Länge: 120 km
Zoom: 100



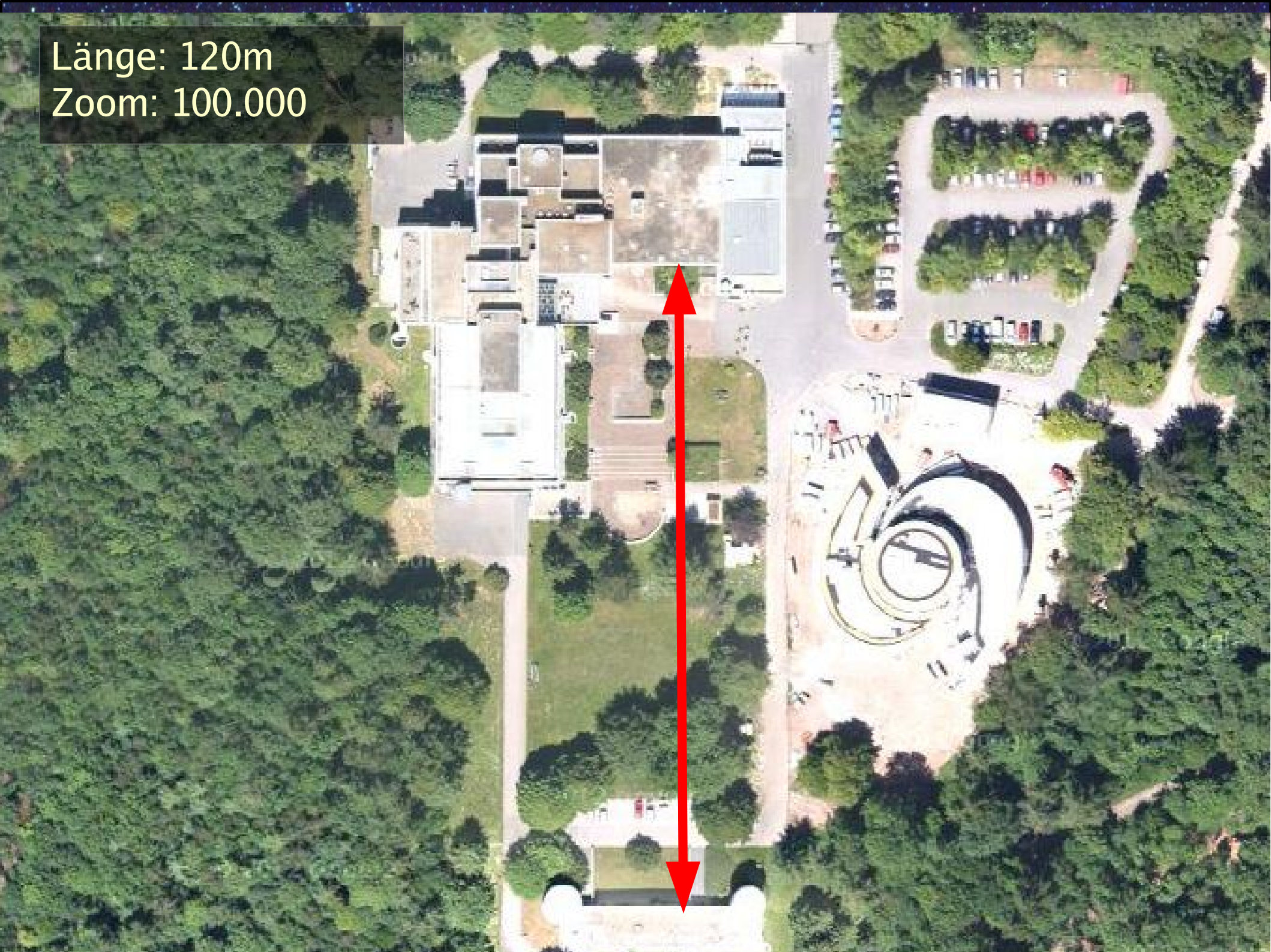
Länge: 12 km
Zoom: 1.000



Länge: 1,2 km
Zoom: 10.000



Länge: 120m
Zoom: 100.000

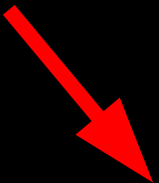




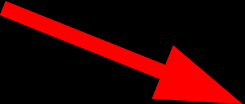
Länge: 12m
Zoom: 1.000.000



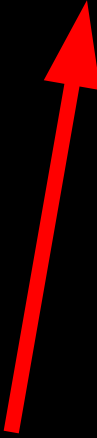
Länge: 1,20m
Zoom: 10.000.000



Länge: 12cm
Zoom: 100.000.000



Länge: 1,8cm
Zoom: 667.000.000



Masse der Erde =
6.000.000.000.000.000.000.000 Tonnen
in 1,8 cm Kugel = Schwarzes Loch

Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie

- Eigenschaften Schwarzer Löcher?

“Schwarze Löcher haben keine Haare”



Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie

- Eigenschaften Schwarzer Löcher?
 - “No Hair-Theorem”: SL sind sehr einfach
 - 1. Masse → Größe: Schwarzschild-Radius
 - 2. Ladung
 - 3. Drehimpuls

Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie

- Andere Lösungen:
 - Rotierend: Kerr-Metrik
 - Geladen: Reisner-Nordström-Metrik
 - Geladen + rotierend: Kerr-Newman-Metrik

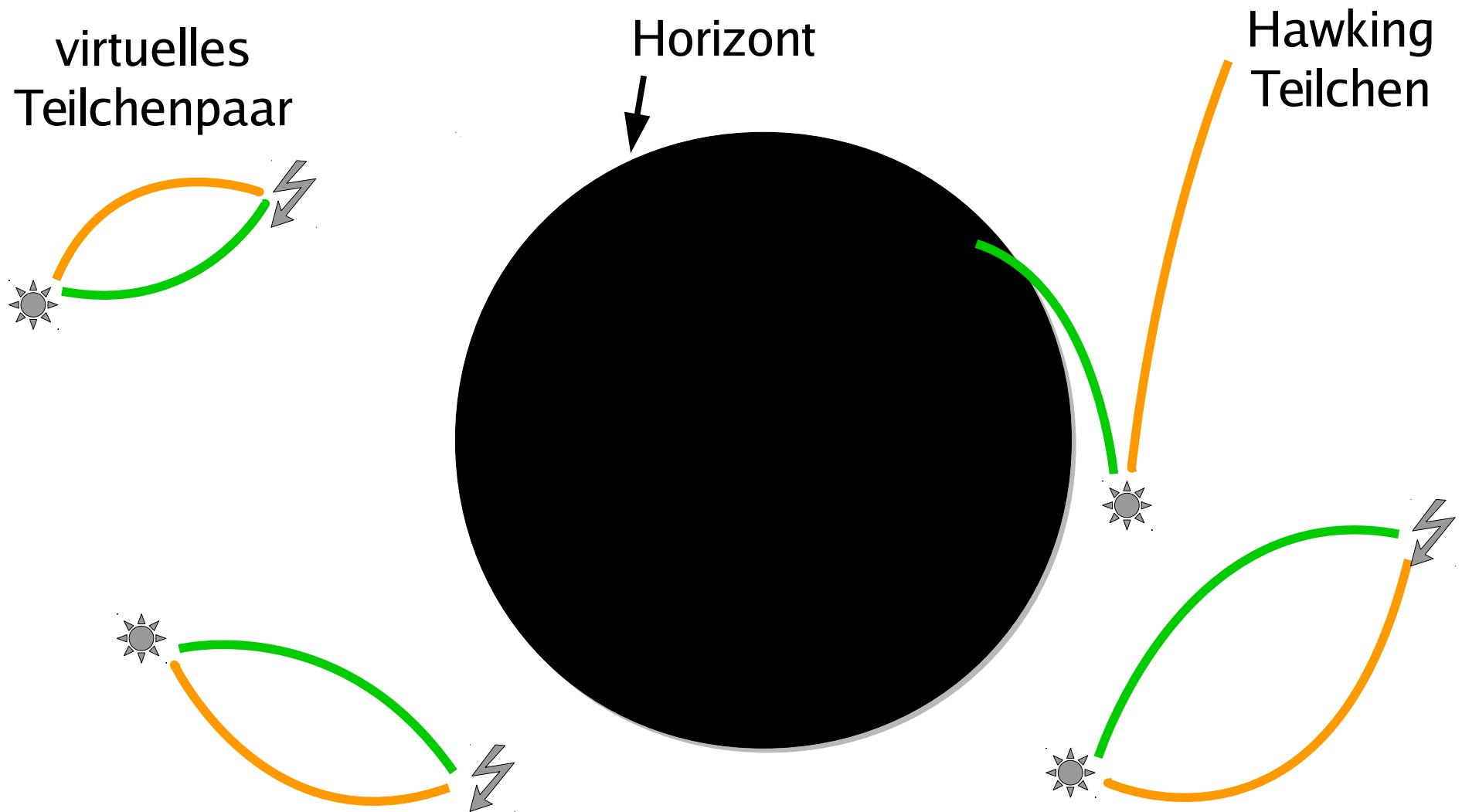


Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie

- Informationsverlust?
 - Anhaltende Debatte
 - Horizont: Zensur!
 - Stephen Hawking 1975: Hawking-Strahlung:
 - Virtuelle Teilchen durch Horizont getrennt



Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie



Was ist ein Schwarzes Loch: Theorie

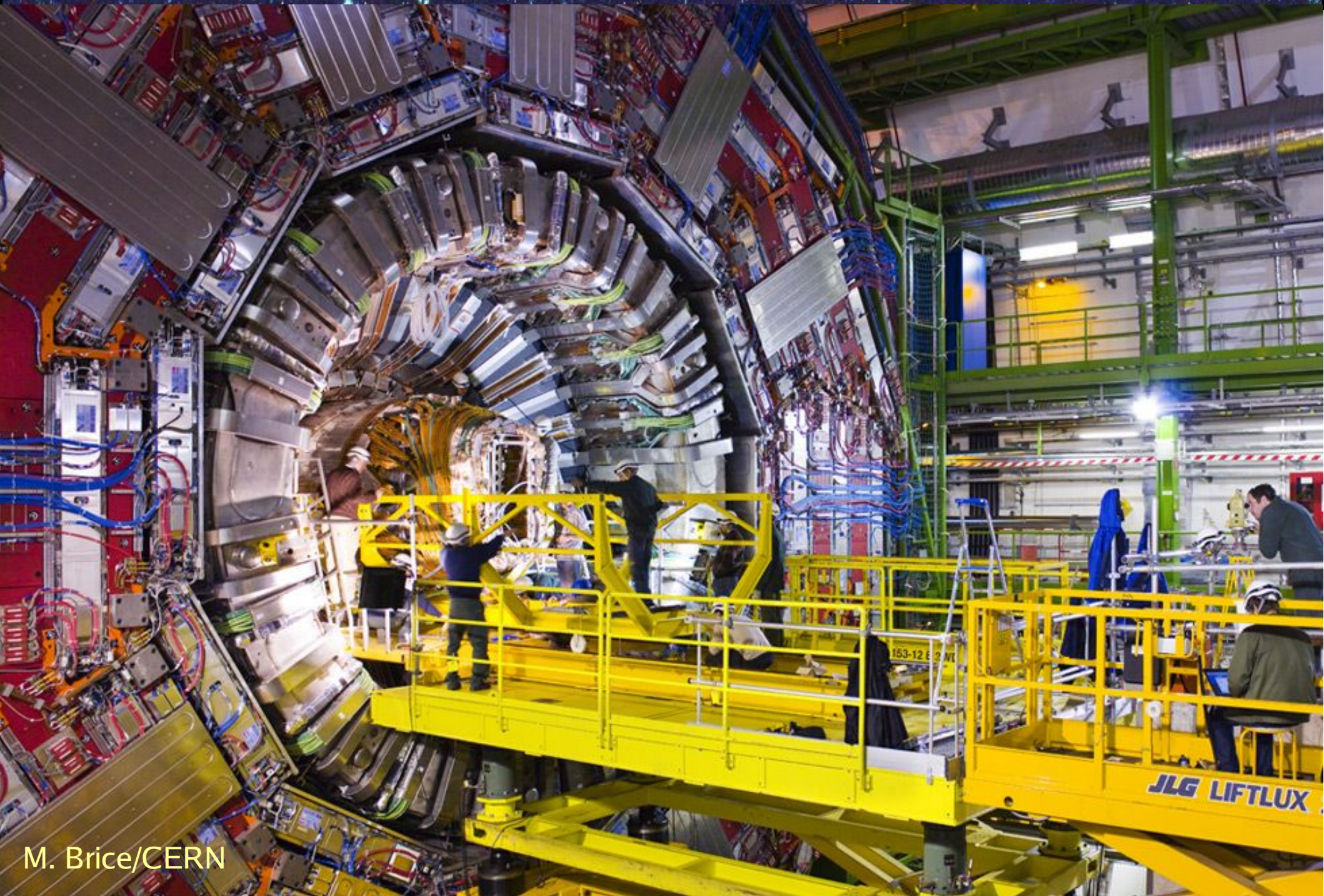
- Informationsverlust?

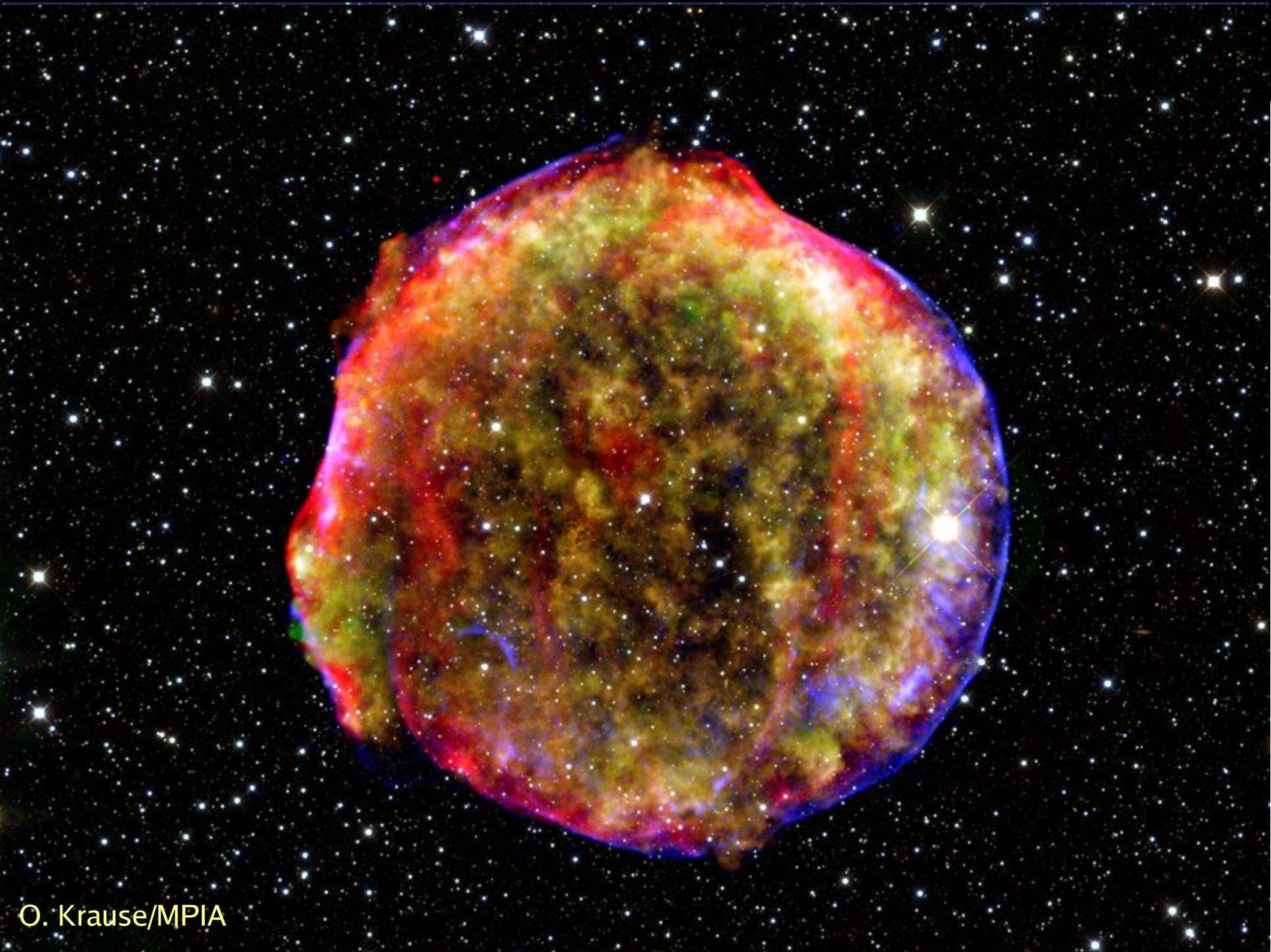
- Anhaltende Debatte
- Horizont: Zensur!
- Stephen Hawking 1975: Hawking-Strahlung:
 - Virtuelle Teilchen durch Horizont getrennt
 - Entweichen von Informationen

- Aber Lebenszeit: $\tau = 2,1 \cdot 10^{67} \frac{M^3}{M_o^3} \text{ Jahre}$
- Nur für sehr kleine SL
- Was ist in ferner ferner Zukunft?



Primordial vs. stellar vs. super-massereich



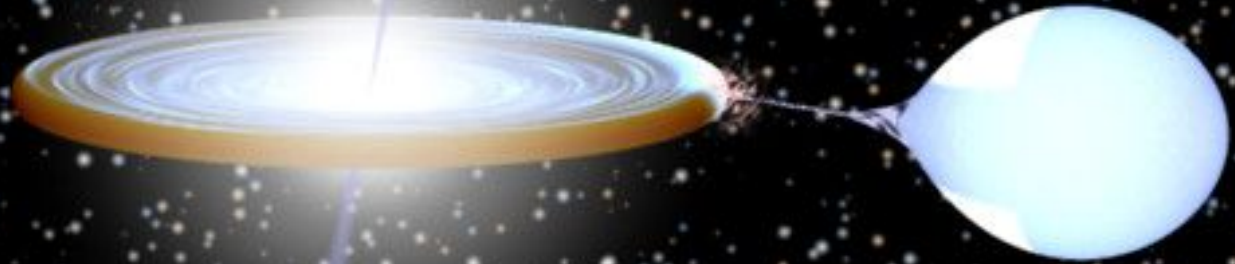


Primordial vs. stellar vs. super-massereich

- Super-massereiche SL:
 - Ursprung unklar: Vorgänger $\sim 10^3$ – 10^5 Sonnenmassen
 - Sterne 1. Generation?
 - Ort: Zentren von Galaxien
 - Jetzt 10^6 – 10^{10} Sonnenmassen



Phänomenologie

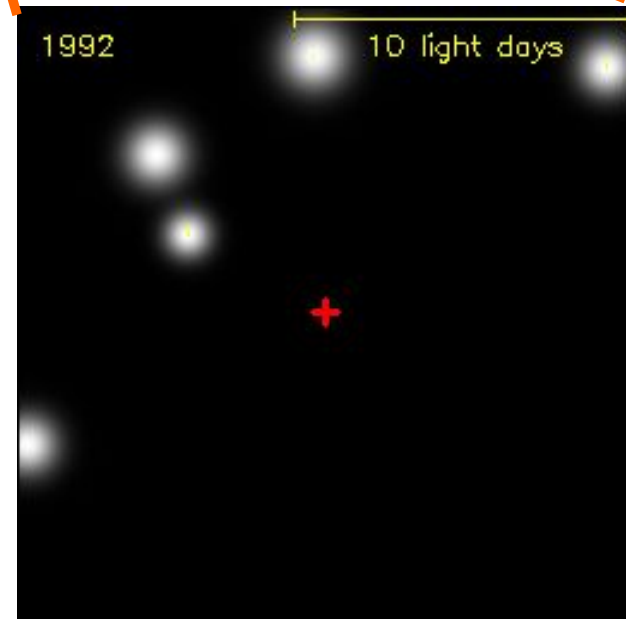
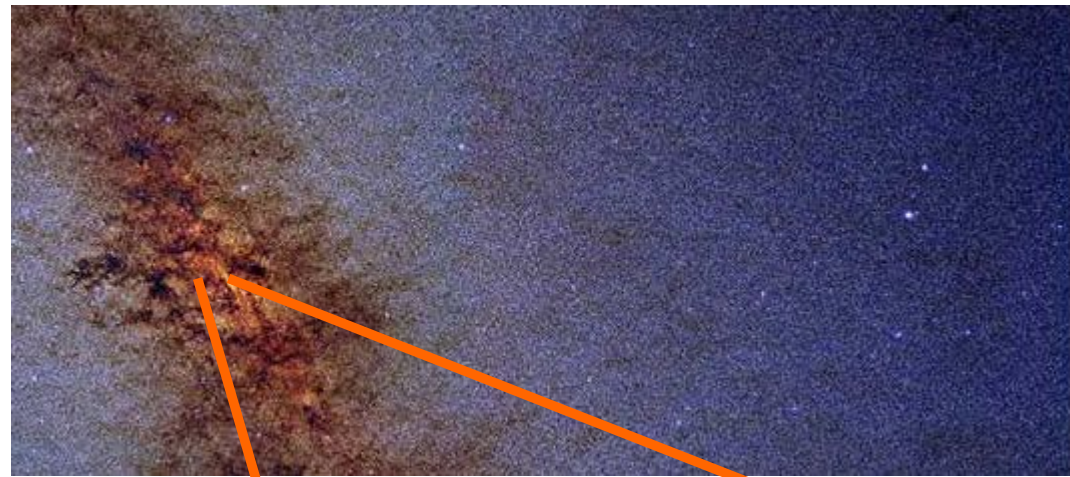
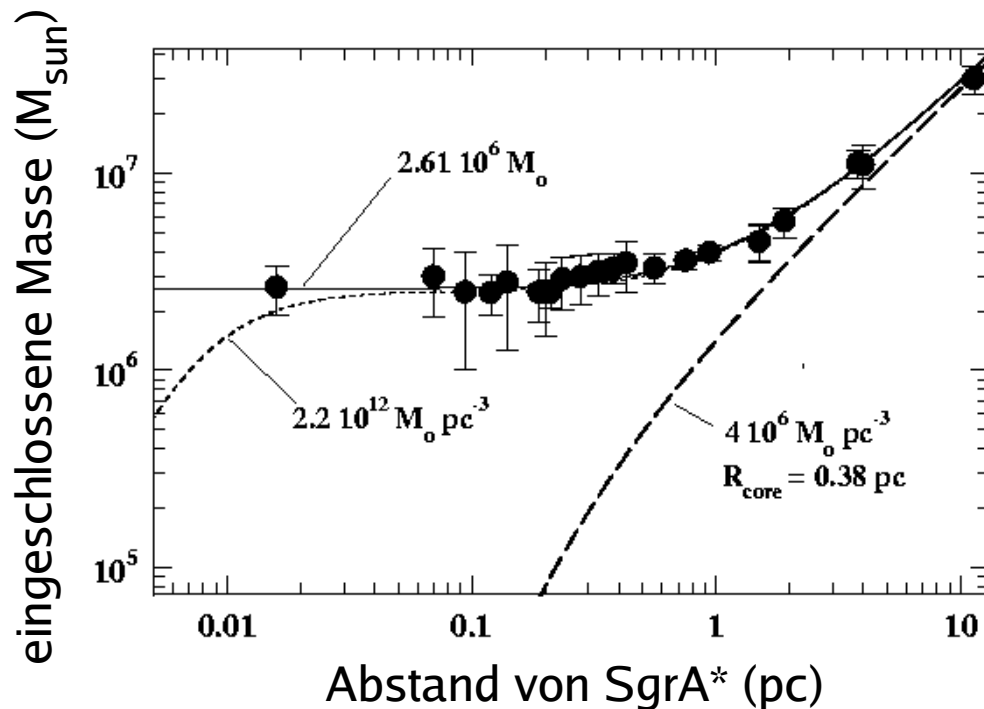


- Supermassereich SL:
 - Milchstraße

Schwarzes Loch in der Milchstraße

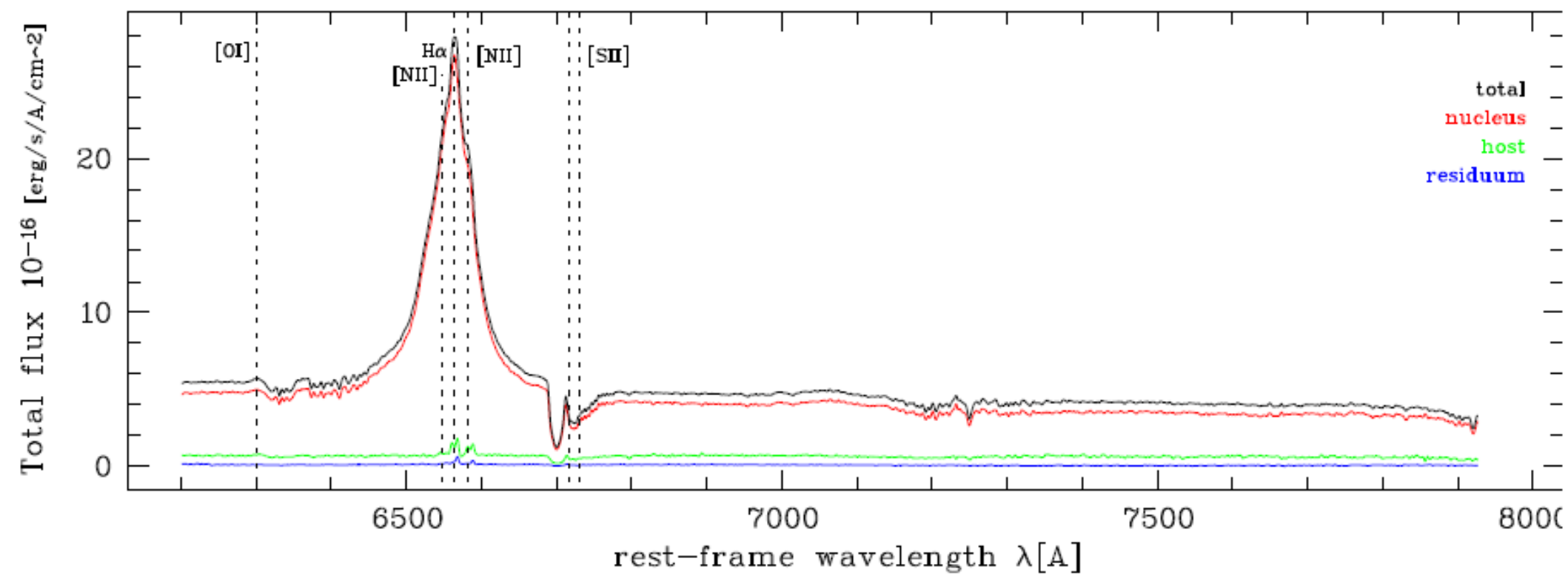
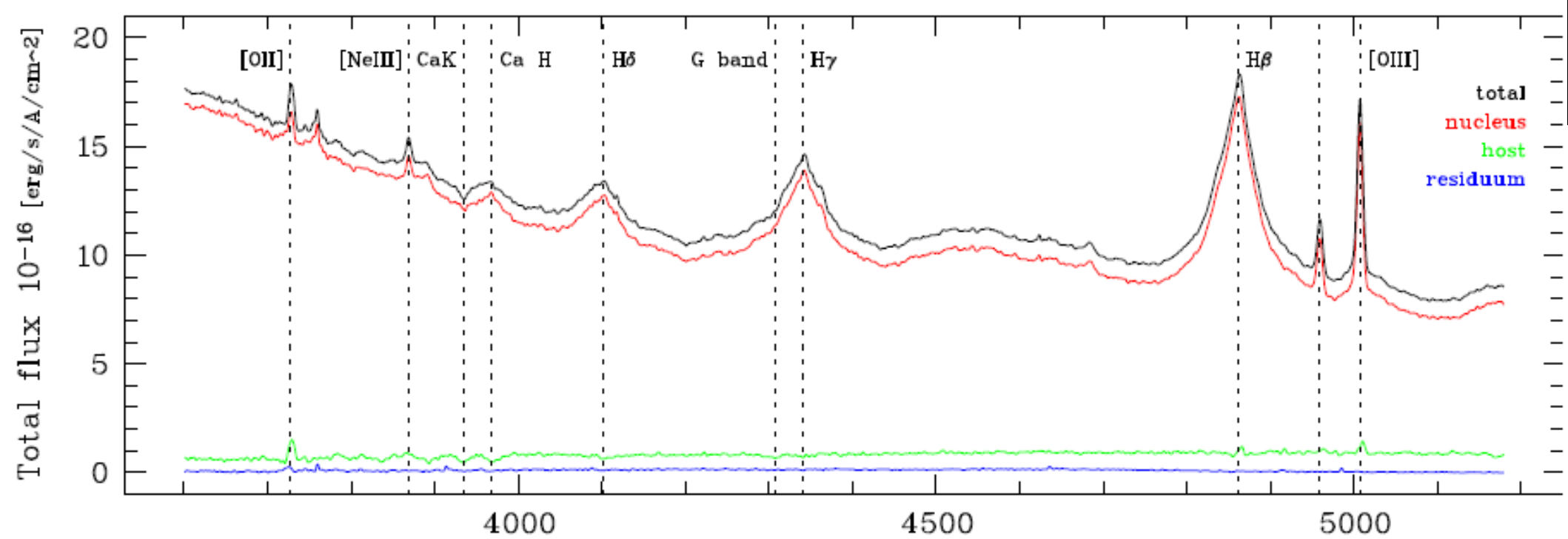


Schwarzes Loch in der Milchstraße: $3 \cdot 10^6 M_{\text{sun}}$



Genzel et al. 1998...2005, und andere

- Supermassereich SL:
 - Milchstraße
 - aktive Galaxienkerne (*active galactic nuclei*, AGN)
 - breite Emissionslinien → hohe Geschwindigkeiten ($0.1c$)

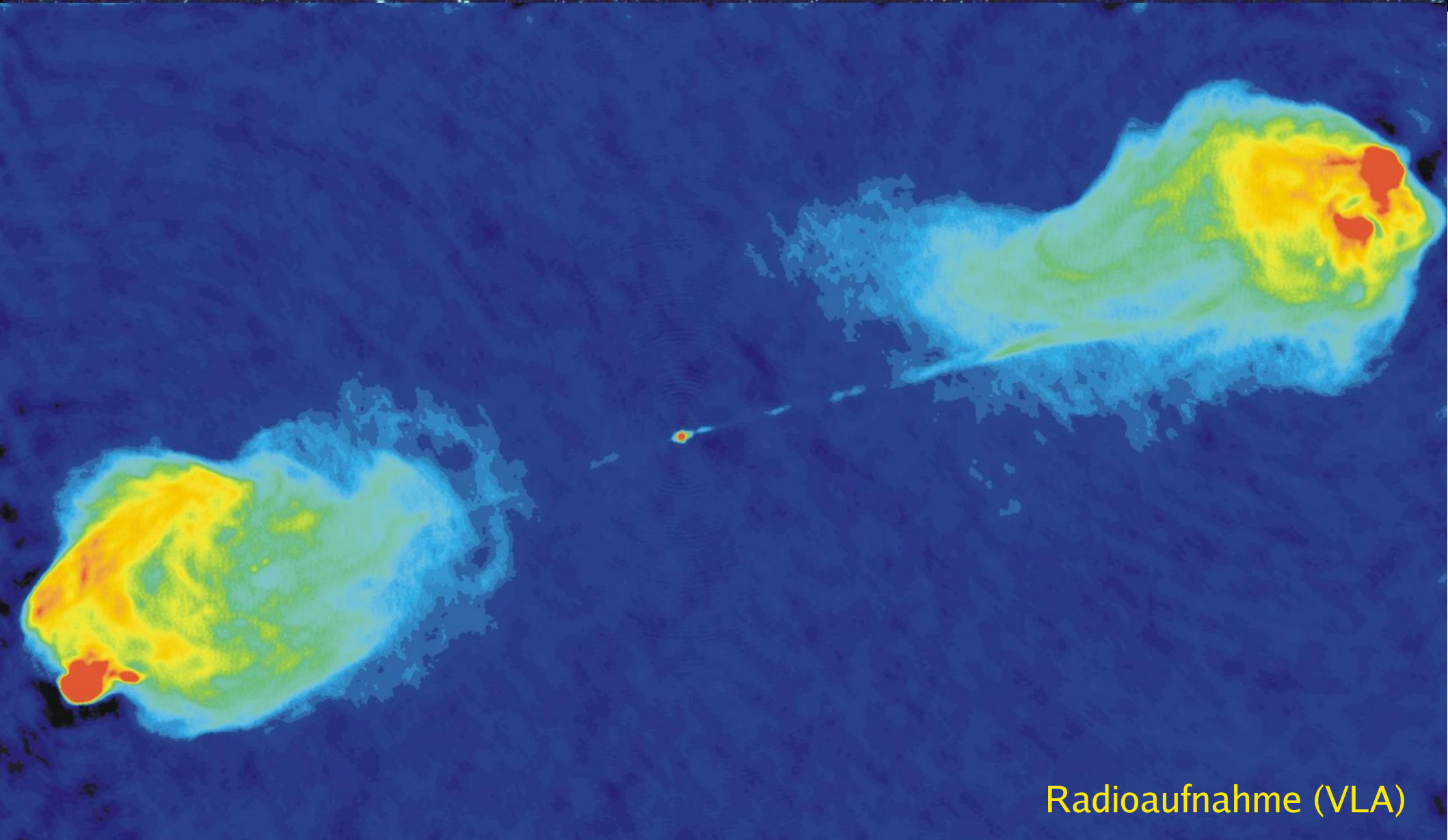


- Supermassereich SL:
 - Milchstraße
 - aktive Galaxienkerne (*active galactic nuclei*, AGN)
 - breite Emissionslinien → hohe Geschwindigkeiten ($0.1c$)
 - Evtl. starke Radioemission: Radio-Galaxien



Very Large Array

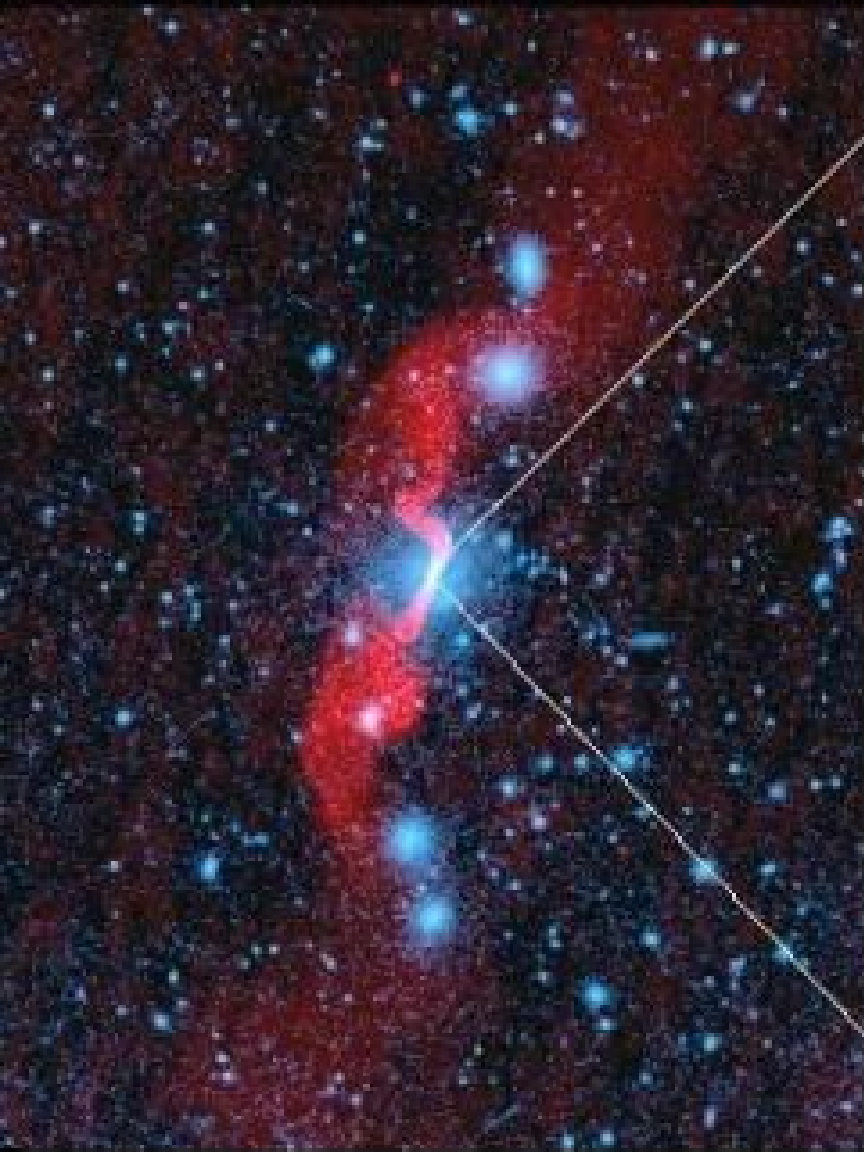
Phänomenologie



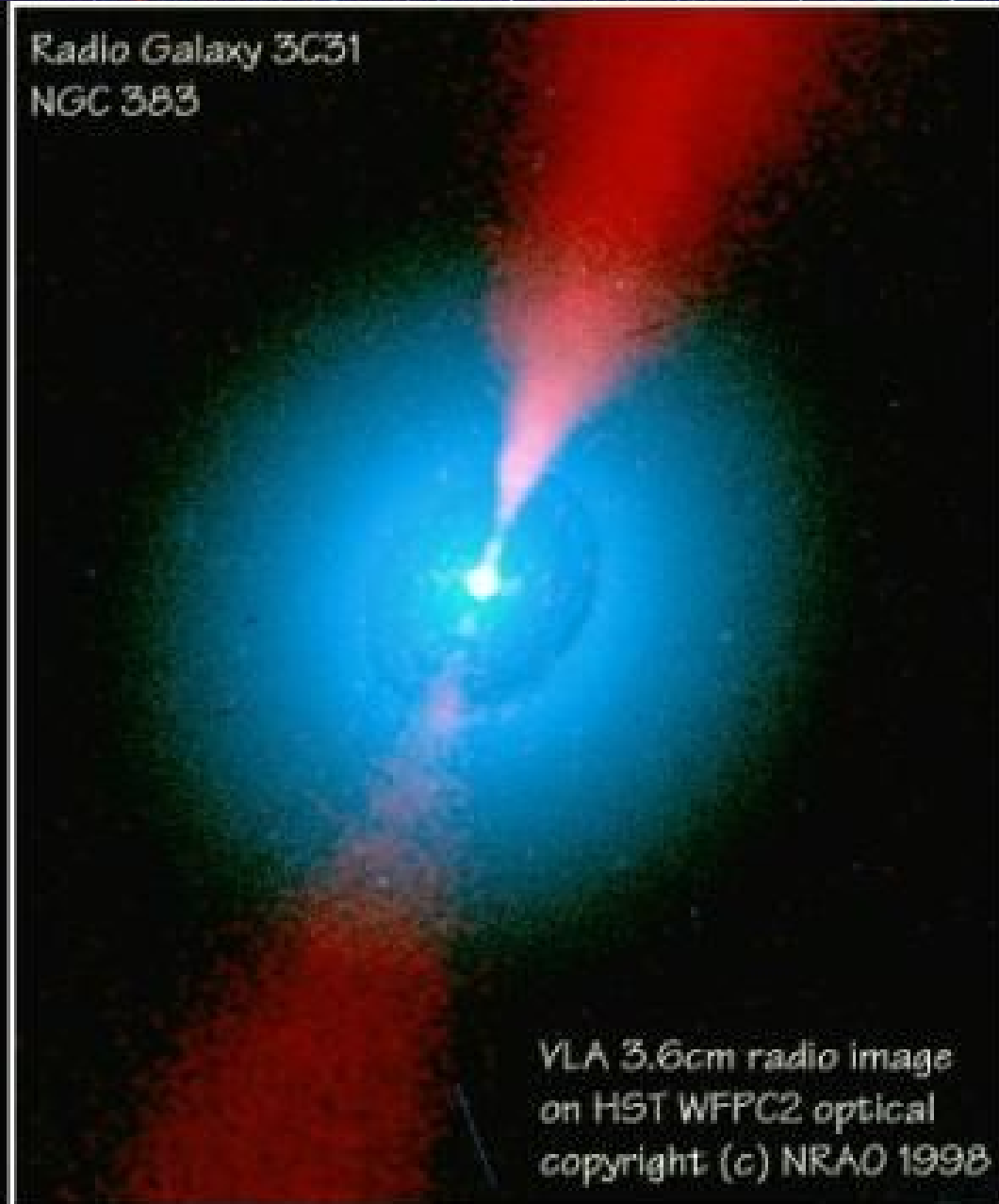
Radioaufnahme (VLA)



Phänomenologie



Radio Galaxy 3C31
NGC 383



VLA 3.6cm radio image
on HST WFPC2 optical
copyright (c) NRAO 1998

- Supermassereich SL:
 - Milchstraße
 - aktive Galaxienkerne (*active galactic nuclei*, AGN)
 - breite Emissionslinien → hohe Geschwindigkeiten ($0.1c$)
 - Evtl. starke Radioemission: Radio-Galaxien
 - Extrem helle Kerne: Quasare

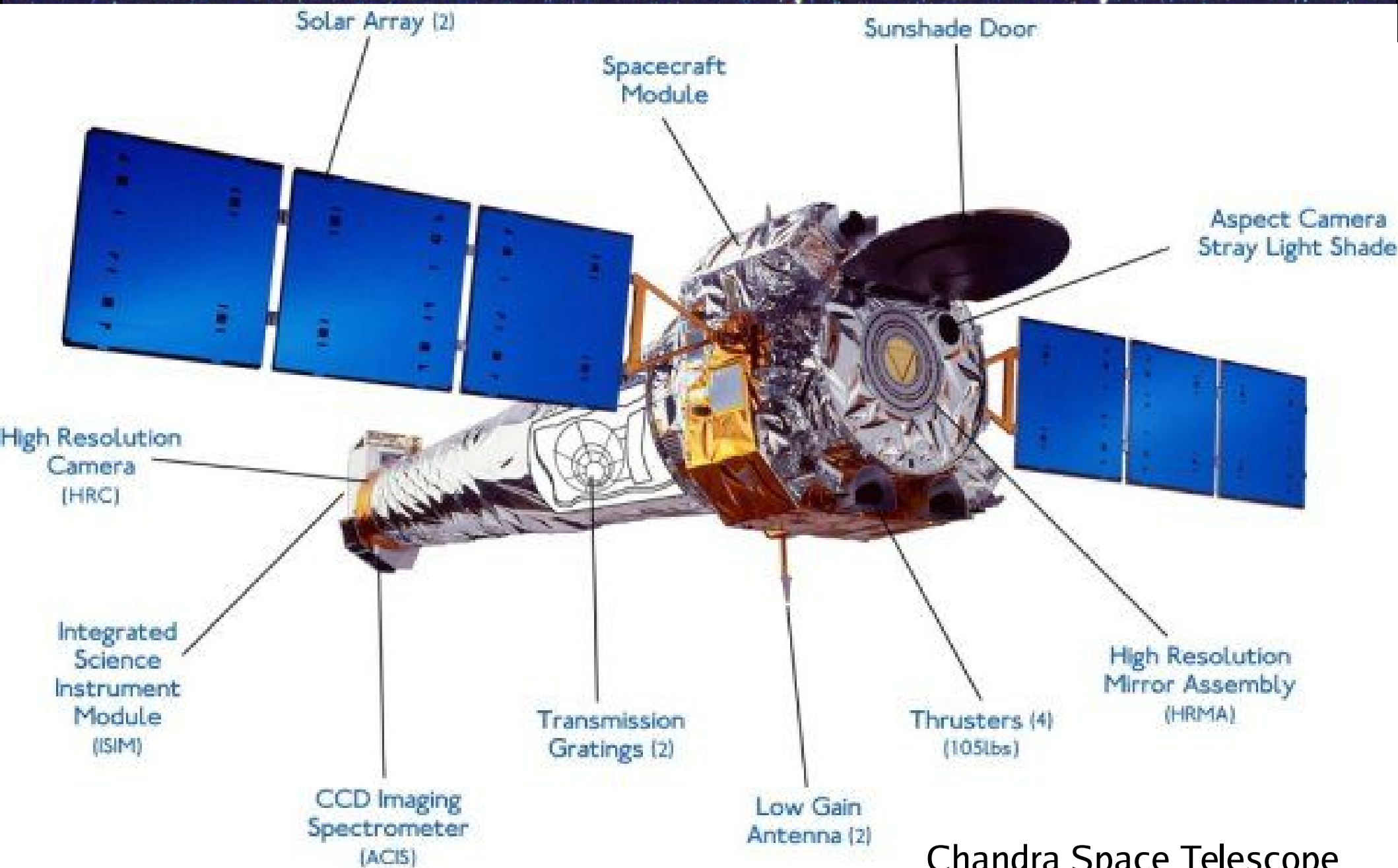


Hubble Space Telescope



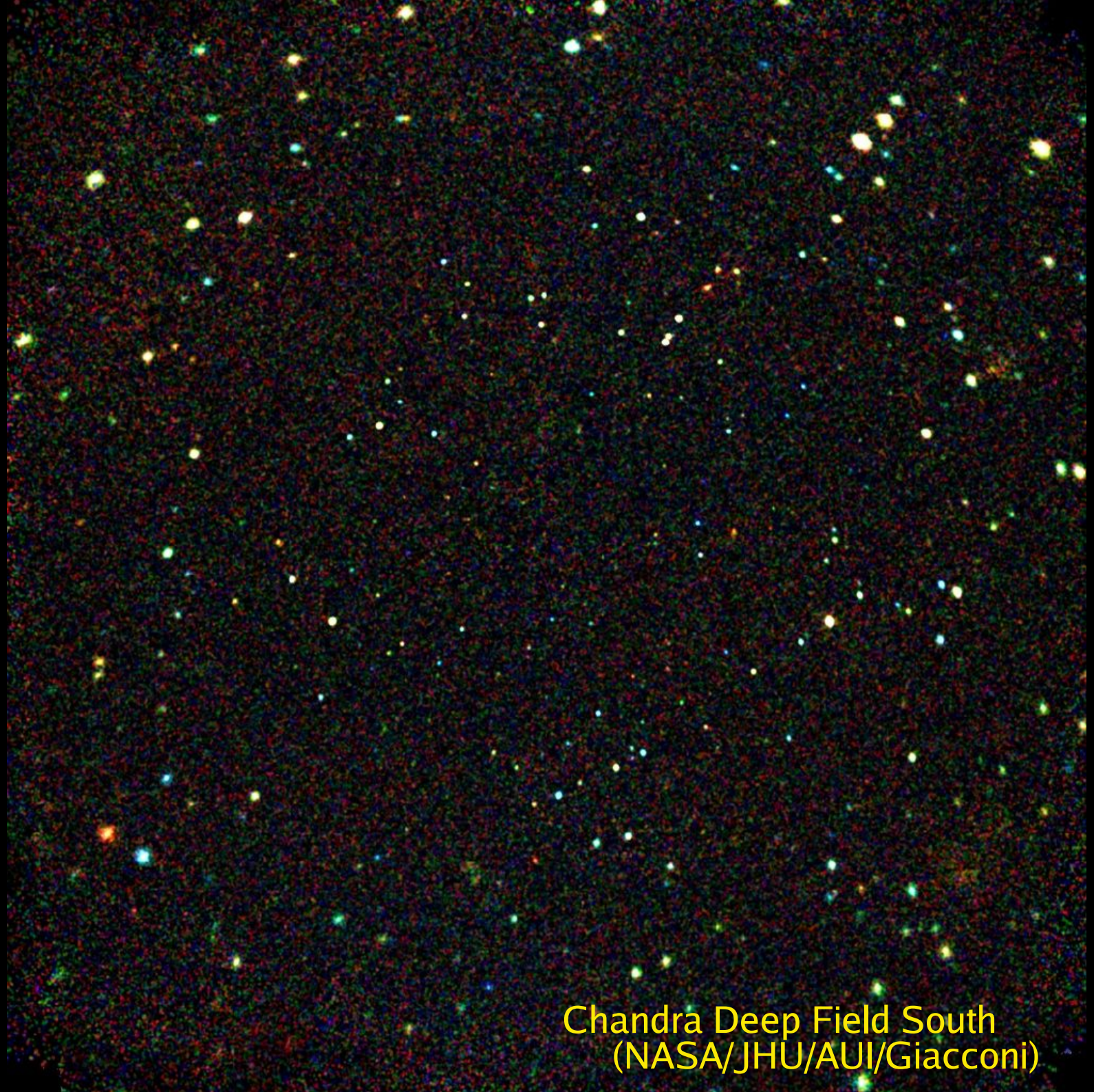
Chandra Deep Field South mit
HST/ACS (MPIA/Rix et al.)

- Supermassereich SL:
 - Milchstraße
 - aktive Galaxienkerne (*active galactic nuclei*, AGN)
 - breite Emissionslinien → hohe Geschwindigkeiten ($0.1c$)
 - Evtl. starke Radioemission: Radio-Galaxien
 - Extrem helle Kerne: Quasare
 - Starke Röntgenemitter

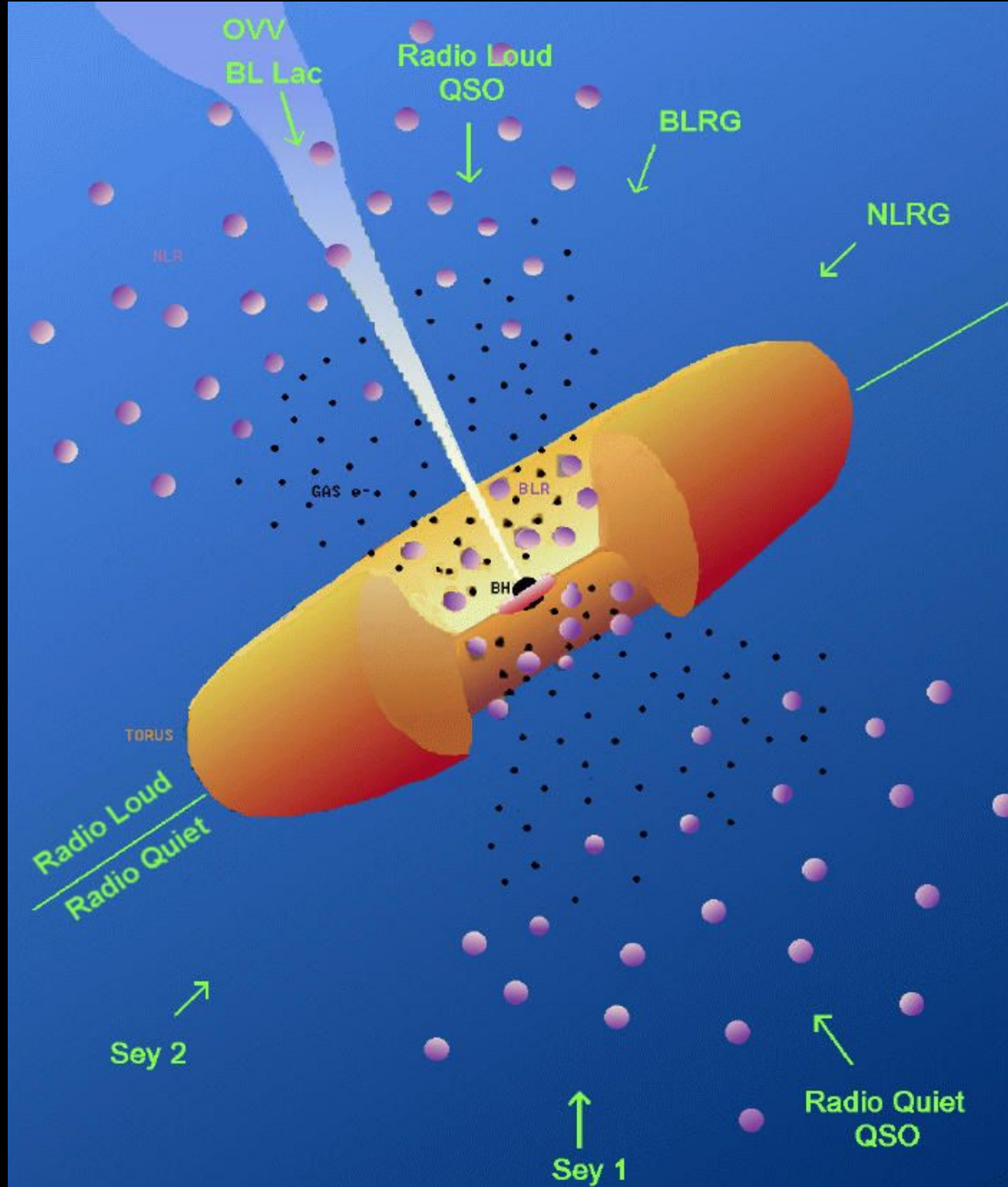


Chandra Space Telescope





Chandra Deep Field South
(NASA/JHU/AUI/Giacconi)



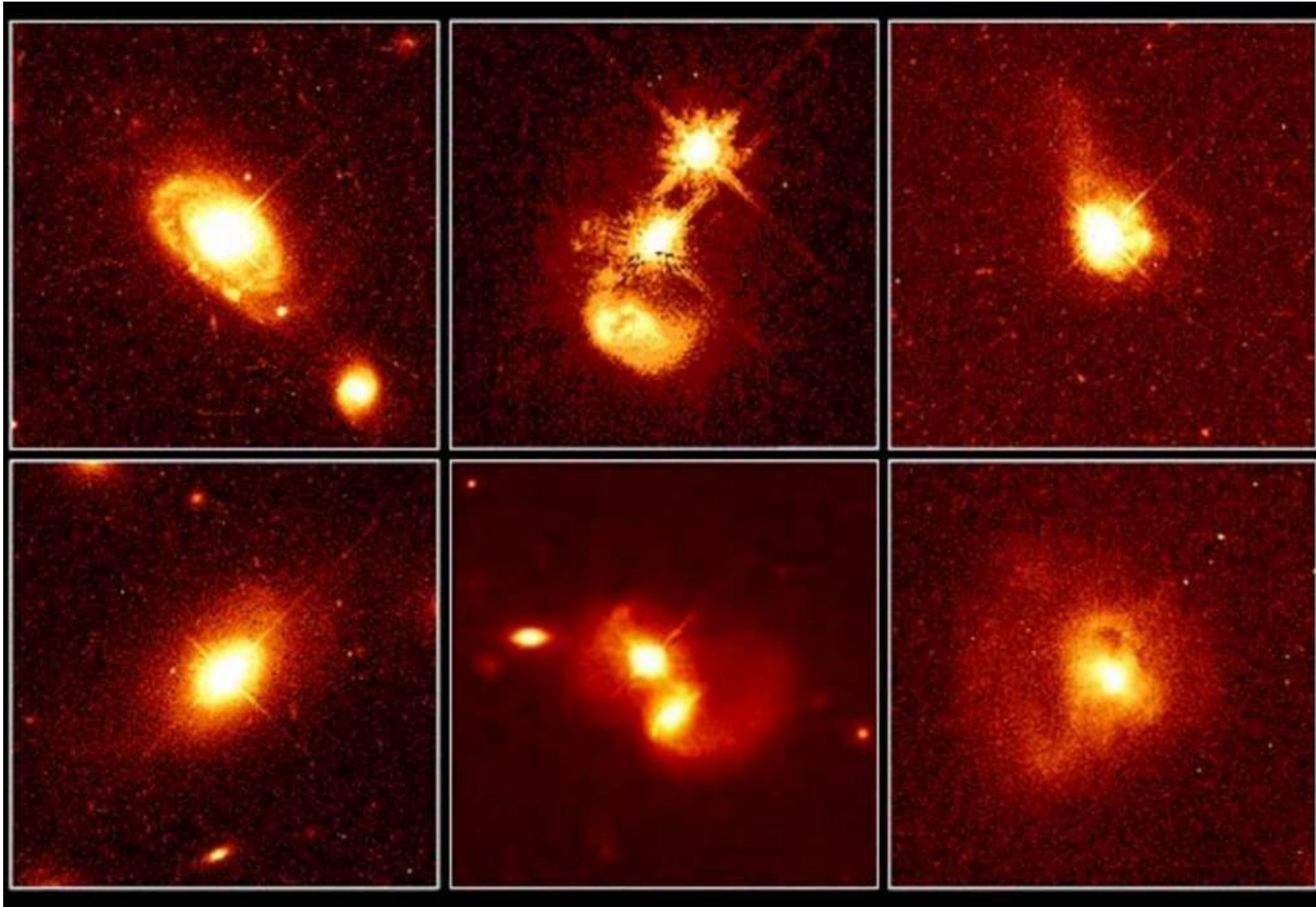
- skalenfrei $\rightarrow$ gilt für 1 und $10^9 M_{\text{Sonne}}$
- Wachstum: Einfall von Gas
- Energieumwandlungseffizienz:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \quad \rightarrow \quad \eta = \frac{GM}{c^2 r}$$

- Schwarzschild: letzter stabiler Orbit bei $r = 3 r_S \rightarrow \eta \sim 10\%$
- Kerr: $r = 2 r_S \rightarrow \eta \sim 30\%$

$\rightarrow$ Fusion: 0.7%

Auslöser von Gastransport?



Bahcall+ 1997



Auslöser von Gastransport?

- Galaxienzusammenstöße: kleiner Beitrag
 - Akkretion von Begleitern: ?
 - Balken: kleiner Beitrag
- vermutlich: Gas auf $\sim \text{kpc}$ Skalen
+ Instabilitäten durch Eigengravitation
= Transport bis $< 1 \text{ pc}$



- Schwarze Löcher = Lösung der ART Feldgleichung
- sie haben keine Haare
- sie existieren: SN-Reste, Milchstraße, AGN