

# Schwarze Löcher

Sven Bothmann

Physikalisches Proseminar, 03.05.2023

- 1 Einleitung
- 2 Eigenschaften
- 3 Klassifikation/Entstehung
- 4 Beispiele
- 5 Detektion
- 6 Alternative Beschreibungen
- 7 Zukunftsaussicht
- 8 Quellenverzeichnis

- Schwarzes Loch (SL): Objekt mit so dichter Masse, dass selbst Licht diese nicht mehr verlassen kann. (vereinfacht)
- Mathematische Beschreibung über ART:
  - Gravitation geometrische Eigenschaft der Raumzeit, welche Krümmungen erzeugt, unendlich im Zentrum des SL
  - Diese Eigenschaft liefert sog. **Singularität**: Gesamtmasse  $M$  des SL auf unendlich kleinem Volumen mit unendlich hoher Dichte
  - Licht folgt Raumzeitkrümmungen, gefangen im Zentrum
  - zum Teil umstritten ob Singularität wirklich existieren kann
  - Beweis der Singularität im SL aus ART von Hawking 1966 mit wenigen allgemeinen Annahmen Penrose mirgewirkt (2020 Nobelpreis)

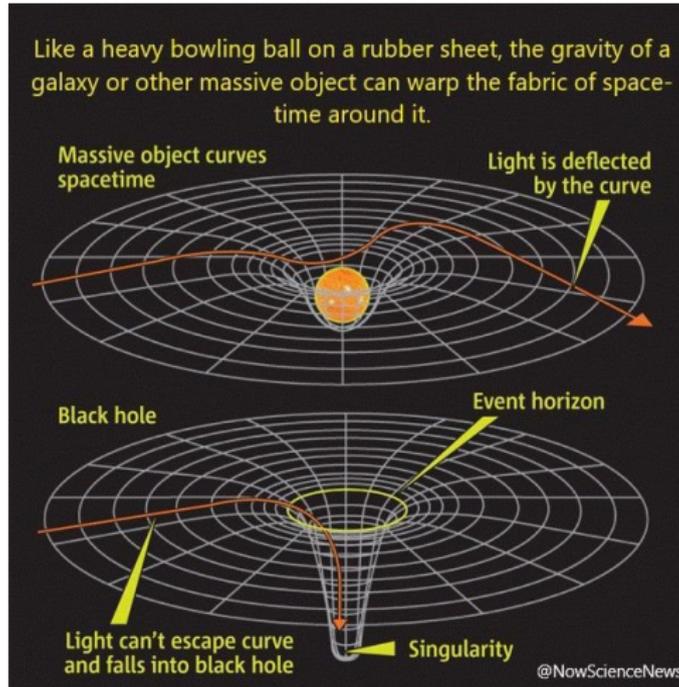


Abbildung: graphische Darstellung SL in ART [1]

- Formen von SL: **nicht Rotierende** (Schwarzschild Lösung), **Rotierende** (Kerr Lösung), **(elektrisch Geladene)**
- Erste Lösung der Feldgleichungen der ART 1916 von Schwarzschild für nicht rotierende, ungeladene Punktmasse mit kugelsymmetrischen materiefreien Aussenraum
  - Schwarzschildradius  $r_S = \frac{2GM}{c^2}$  definiert **Ereignishorizont**
  - Grenze des schwarzen Lochs, von innerhalb der keine Information mehr aus SL entkommen kann
- Für rotierende SL Lösung komplizierter durch zusätzlichen Drehimpuls J (erstmal 1963 durch Kerr)
  - Ereignishorizont:  $r_H = \frac{G}{c^2}(M \pm \sqrt{M^2 - a^2})$ ,  $a = \frac{J}{Mc}$

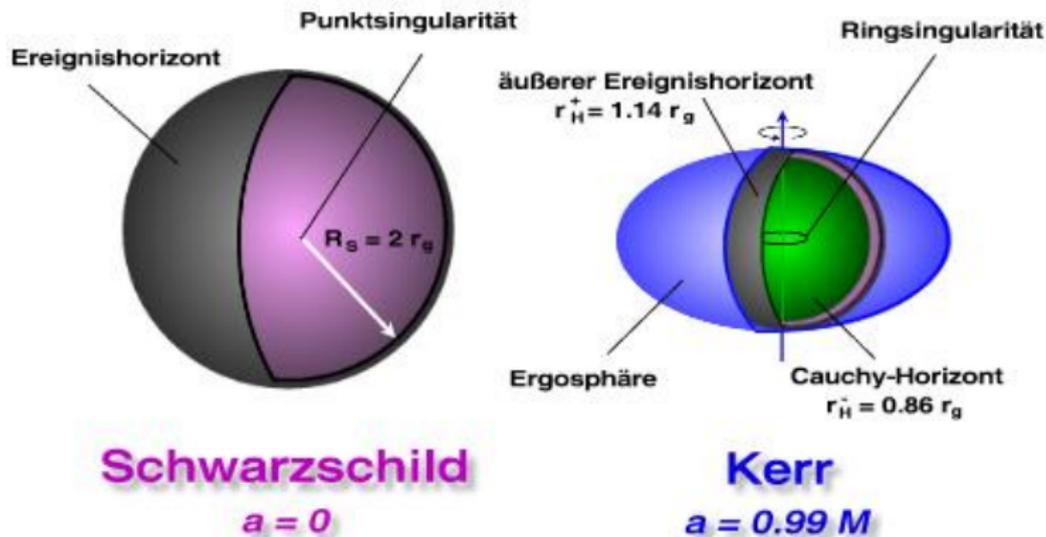


Abbildung: konzeptionelle Darstellung [2]

- 1. Hauptsatz der Schwarzloch-Dynamik
  - Energieerhaltungssatz unter Berücksichtigung der rel. Energie-Masse-Äquivalenz (EMÄ)
- 2. Hauptsatz der Schwarzloch-Dynamik
  - Summe der Flächen der Ereignishorizonte kann niemals abnehmen, jedes SL Entropie mit  $S_{SL} = \frac{Ak_B c^3}{4\hbar G}$
- **Hawking-Strahlung**
  - Infolge von Vakuumfluktuationen (QFT) in Nähe des Ereignishorizonts fällt ein Teilchen in das SL mit negativer Energie und das andere entkommt mit positiver Energie
  - Aufgrund EMÄ verliert SL an Masse/Energie. Entkommene Teilchen bilden Hawking Strahlung (thermische Strahlung) mit Temperatur  $T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi M G k_B}$

- **Hawking-Strahlung**

- Hawking-Strahlung bisher noch nicht gefunden, Lebensdauer des SL (ohne Massenzunahme)  $t = \frac{M^3}{3\Lambda_t}$ ;  $\Lambda_t = 4 \times 10^{15} \frac{\text{kg}^3}{\text{s}}$
- Widerspruch zum 2.Hauptsatz der Schwarzloch-Dynamik

- **No-Hair-Theorem und Informationsparadoxon**

- SL lassen sich nur durch **Masse**, **elektrische Ladung** und **Drehimpuls** charakterisieren, Ereignishorizont symmetrisch ohne lokale Masseunterschiede (no Hairs)
- keine weitere Information kommt aus SL heraus
- Informationsverlust widerspricht QM (Unitarität Zeitentwicklung)
- einige Stimmen widersprechen No-Hair-Theorem, hohe Bedeutung für Quantenbeschreibung SL

## ● Akkretion

- Materie von kosmischem Objekt infolge Gravitation aufgesammelt
- Folge der Akkretion Strahlungsprozesse, u.a. thermische Strahlung durch Reibung der Materie, Materie wird ionisiert
- Bildung Akkretionsscheibe durch Drehimpuls des SL und Strahlungseffekte
- zu nahe am Ereignishorizont werden Bahnen der Materie instabil und fallen schließlich mit Lichtgeschwindigkeit ins SL
- Akkretion auf supermassereiches SL erzeugt sehr hohe Leuchtkraft, so TON 618 etwa 140 Billionenfache Sonnenleuchtkraft ( $4 \times 10^{40}$  Watt)

- Schwarze Mini Löcher
  - Masse im Bereich von Elementarteilchen
  - Bedingung Existenz von Extradimensionen, somit rein spekulativ
  - Suche in Teilchenbeschleunigern, sehr kurze Lebensdauer
- Primordiale Schwarze Löcher
  - Masse ca.  $10^{15}$  kg,  $r_s = 1\text{pm}$ , Beobachtung sehr schwer
  - ebenfalls spekulativ, nach Theorie am Anfang des Universums nach Urknall entstanden (ausreichende Energie/Massendichte)
  - zudem könnte Lebensdauer überschritten sein durch Hawking Strahlung, Beobachtung dieser könnte aber Nachweis für Existenz sein

- Stellare Schwarze Löcher
  - Masse von 3 bis 100 Sonnenmassen,  $r_S$  von 10 bis 300 km
  - Entstehung durch Gravitationskollaps massereicher Sterne (min. 3 Sonnenmassen)
  - Studie von 2022 errechnet im sichtbaren Universum  $40 \times 10^{18}$  stellare SL, die 1 Prozent der gewöhnlichen Masse im Universum ausmachen
- Mittelschwere Schwarze Löcher
  - Hunderte bis Tausende Sonnenmassen
  - Existenz bislang noch nicht nachgewiesen, jedoch angenommen
  - Entstehung möglicherweise durch Sternenkollisionen/-verschmelzungen

- Supermassereiche Schwarze Löcher
  - Millionen- bis Milliardenfache Sonnenmasse
  - Annahme im Zentrum fast jeder Galaxie, in der Milchstraße Sagittarius A\* mit ca. 4.1 Millionen Sonnenmassen
  - Entstehung noch unklar, Annahme durch kleinere SL entstanden
  - Annahme bei Größenordnung  $10^{10}$  Sonnenmassen Grenze für Masse des SL, dort Beschleunigung so stark, dass stabiler Orbit um Ereignishorizont bildet, Gleichgewicht zwischen einfallender und abgestoßener Materie (durch Strahlung und Materiewinde in Akkretionsscheibe)
  - größtes bisher entdecktes SL ist TON 618 (Quasar) mit vermutlich bis zu 70 Milliarden Sonnenmassen,  $r_S$  von 1300 AU

- Quasare
  - Begrifflichkeit für quasi-stellare-Radioquellen
  - gehören zu den aktiven Galaxiekernen (AGN), sehr hell (umgebene Galaxie teilweise nicht mehr sichtbar)
  - Ursache für Leuchtkraft ist Akkretion auf supermassives SL
  - Ausflüsse aus der Akkretionsscheibe können zu Jet mit Strahlungsenergie gebündelt werden
  - jedoch können stärksten Jets nur durch magnetischen Antrieb erklärt werden, etwa durch Wechselwirkung der rotierenden Raumzeit und Magnetosphäre des Akkretionsstroms (Ionisation)

- Sagittarius A\*
- rotierend,  $r_S = 12,2$  Millionen Kilometer
- Massebestimmung kinematisch durch Kepler-Bewegung der Sterne im Umlauf

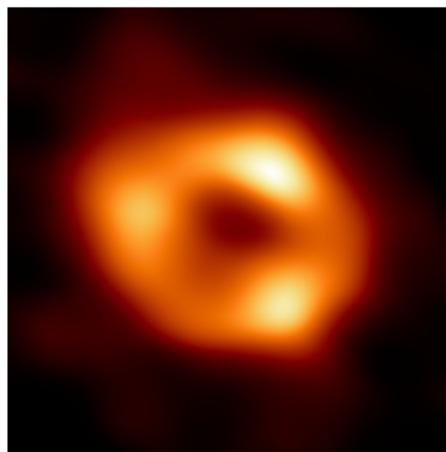


Abbildung: Aufnahme mit EHT [3]

- M87\* (AGN in Messier 87)
  - Masse von 6,5 Milliarden Sonnemassen,  $r_S$  über 100 AU, 5000 Lichtjahre langer Jet vom SL ausgehend



Abbildung: ausgehender Jet [4]

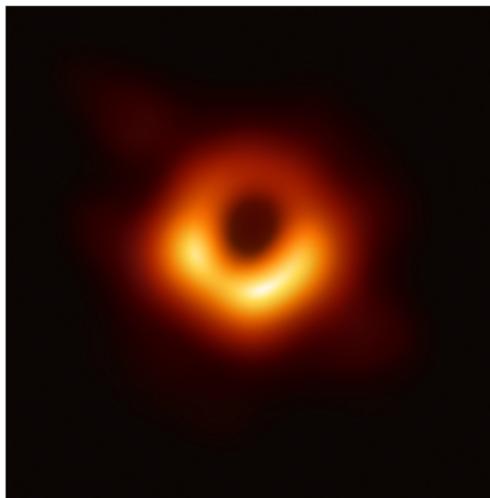


Abbildung: Aufnahme mit EHT [5]

- Aufgrund Informationsundurchlässigkeit aus dem SL nur Nachweis durch umgebende Materie möglich
- Kinematischer Nachweis
  - Sterne werden durch Gravitation des SL in ihrer Laufbahn beeinflusst, so lässt sich Masse des SL nach Kepler berechnen
- eruptiver Nachweis
  - Sterne kommen Gezeitenradius des SL zu nahe und werden von Gezeitenkräften zerrissen, dabei wird charakteristische Röntgenstrahlung ausgesandt
- akkretiver Nachweis
  - Durch Akkretion wird Strahlung in allen Spektralbereichen emittiert, die beobachtet werden kann

- aberrativer Nachweis
  - dichte Masse des SL verursacht Linseneffekte und kann so Strahlung anderer Objekte ablenken (Licht folgt Raumkrümmungen)
- Nachweis durch Gravitationswellen
  - Beschleunigung von SL oder Verschmelzung sendet Gravitationswellen aus, die z.B. mit LIGO gemessen werden können
- Temporaler Nachweis
  - Zeitdilatation in Nähe des SL verändern Lichtkurven von z.B. umkreisenden Sternen

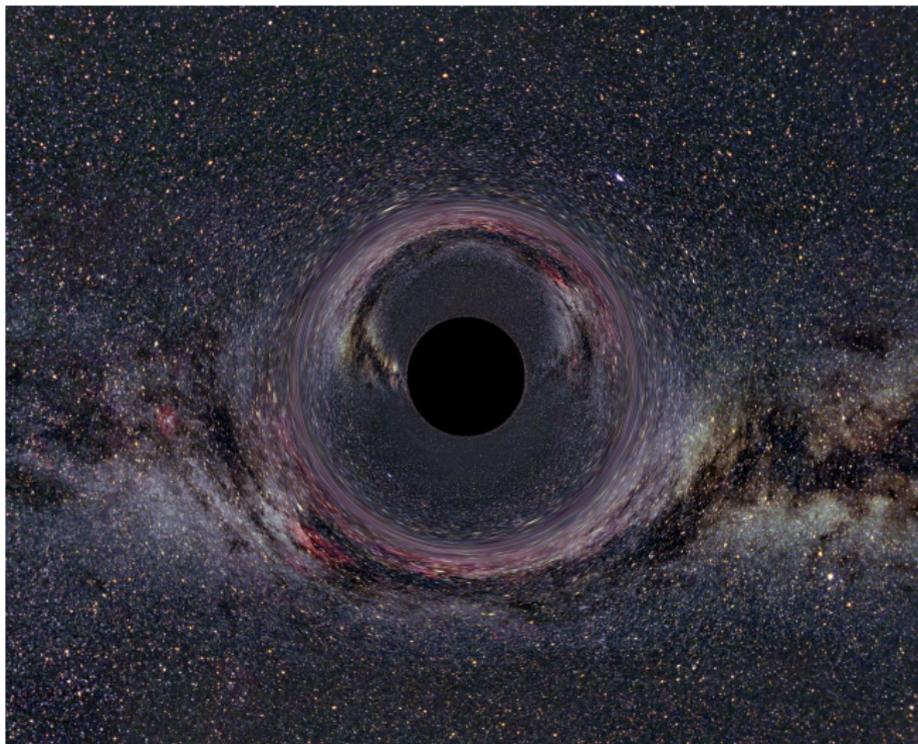


Abbildung: SL mit 10 SM aus 600km Entfernung [6]

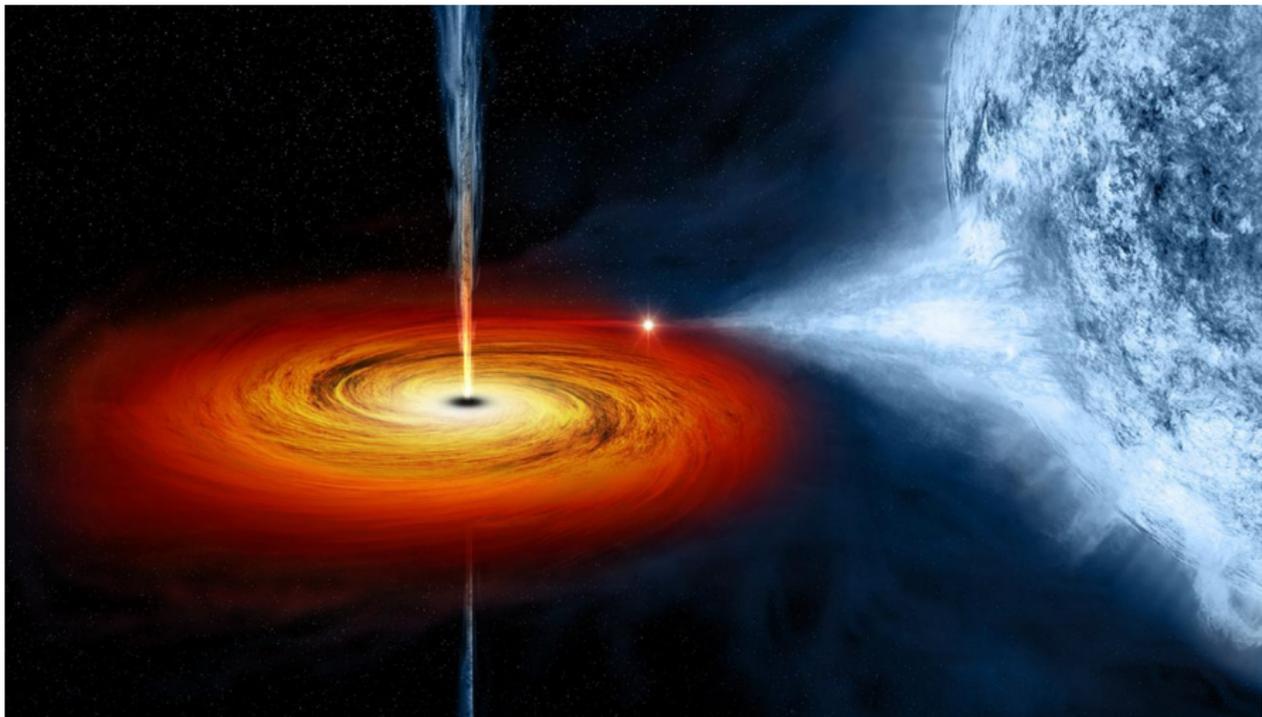
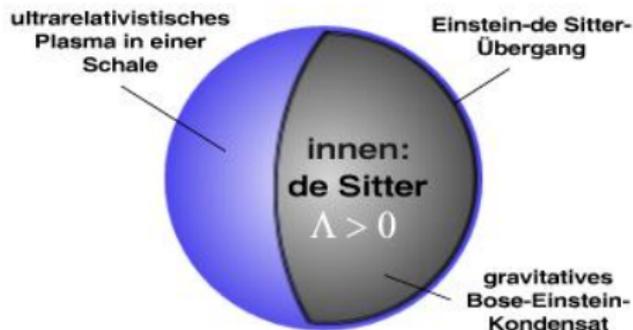


Abbildung: Cygnus X-1 verschlingt Nachbarstern (eruptiver Nachweis) [7]

- Gravastern (2001 von Mazur und Mottala):
  - äusserer Bereich entspricht Schwarzschildlösung, gefolgt von Schale ultrarelativistischen Plasmas, welche durch Dunkle Energie im Inneren stabilisiert wird, keine Singularität im Inneren und kein Ereignishorizont
- Da aber bislang keine Beschreibung für rotierende Objekte dieser Theorien möglich, ist die Lösung von Kerr bislang Relevanteste
- Erforschung neuer regulärer Raumzeiten aktuelles Forschungsgebiet

## Gravastern



**außen:** Schwarzschild-Vakuum  
*nicht-rotierend*

Abbildung: Gravastern [8]

- wichtiges Forschungsobjekt in Zukunft, noch unklar ob Vorstellung richtig ist
- Verbindungsstück zwischen ART und Quantentheorie, mögliche Vereinigung?
- Fragen nach dem Anfang des Universums, nach Bildung von Galaxien (Bildung von supermassereichen SL)
- Abgefahrene Theorien, Beispiel des weißen Lochs als Ausgangspunkt unseres Universums
- Bedrohung für uns? Wohl eher nicht, riesige Distanzen zu schwarzen Löchern im Vergleich zu ihrer Größe

## Abbildungen

- 1 <https://qph.cf2.quoracdn.net/main-qimg-026ce496694bb6784d9c3faa23c053bd-lq>
- 2 <https://www.spektrum.de/lexika/images/astronomie/intermed/SchwKerr2.jpg>
- 3 Von EHT Collaboration - Astronomers reveal first image of the black hole at the heart of our galaxy (Image link), CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=117932040>
- 4 <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63524594>
- 5 Von Event Horizon Telescope, uploader cropped and converted TIF to JPG - <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/> (image link) The highest-quality image (7416x4320 pixels, TIF, 16-bit, 180 Mb), ESO Article, ESO TIF, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=77925953>

- 6 Von Ute Kraus, Physikdidaktik Ute Kraus, Universität  
Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit,  
(Milchstraßenpanorama im Hintergrund: Axel Mellinger) - Galerie  
von Tempolimit Lichtgeschwindigkeit, CC BY-SA 2.5,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=370240>
- 7 <https://assets.deutschlandfunk.de/FILE/9d818f0389752c01bc88acacc9e7a349/1280x720.jpg?t=1601459610297>
- 8 <https://www.spektrum.de/lexika/images/astronomie/intermed/Gravastar.jpg>

## Allgemeine Quellen

- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwarzes-loch/429>
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes\\_Loch](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch)
- Artikel zu Akkretion, supermassereiche SL, Grava- und Holostern, Quasare, Kerr- und Schwarzschildlösung:  
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/>
- [https://de.wikipedia.org/wiki/TON\\_618](https://de.wikipedia.org/wiki/TON_618)
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Messier\\_87](https://de.wikipedia.org/wiki/Messier_87)
- [https://de.wikipedia.org/wiki/Sagittarius\\_A\\*](https://de.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*)
- <https://www.chemie.de/lexikon/Hawking-Strahlung.html>
- <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/schwarze-loecher/>