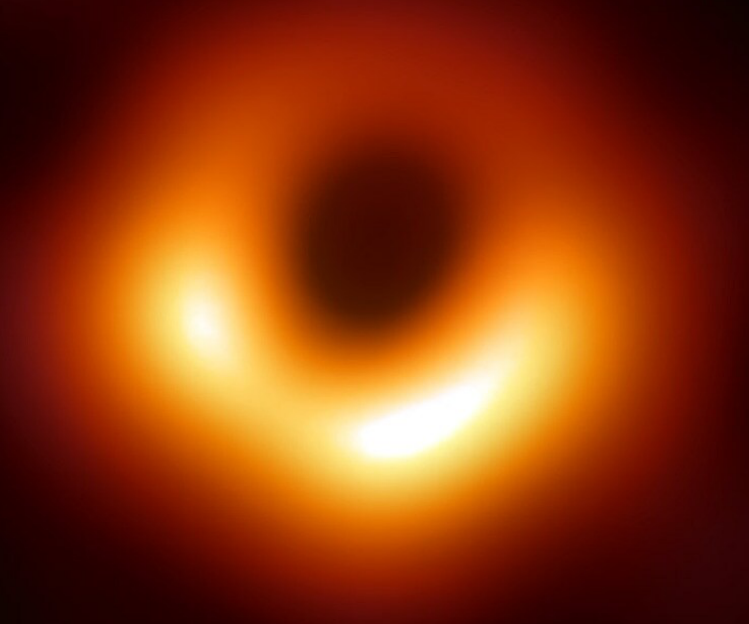


Schwarze Löcher



Dr. Berthold Kracke

17.02.2021

Einführung

Definition Schwarzes Loch:

Extrem kompaktes Objekt

Gravitation in unmittelbarer Umgebung so stark, dass nicht einmal Licht entkommen kann

Bereich: Ereignishorizont

Nichts kann heraus: Information, Strahlung, Materie

ART: Raumzeit in sich gekrümmt: Singularität

Außerhalb EH:

SL normaler Masekörper mit ggfs. Ladung und Drehimpuls vollständig beschrieben

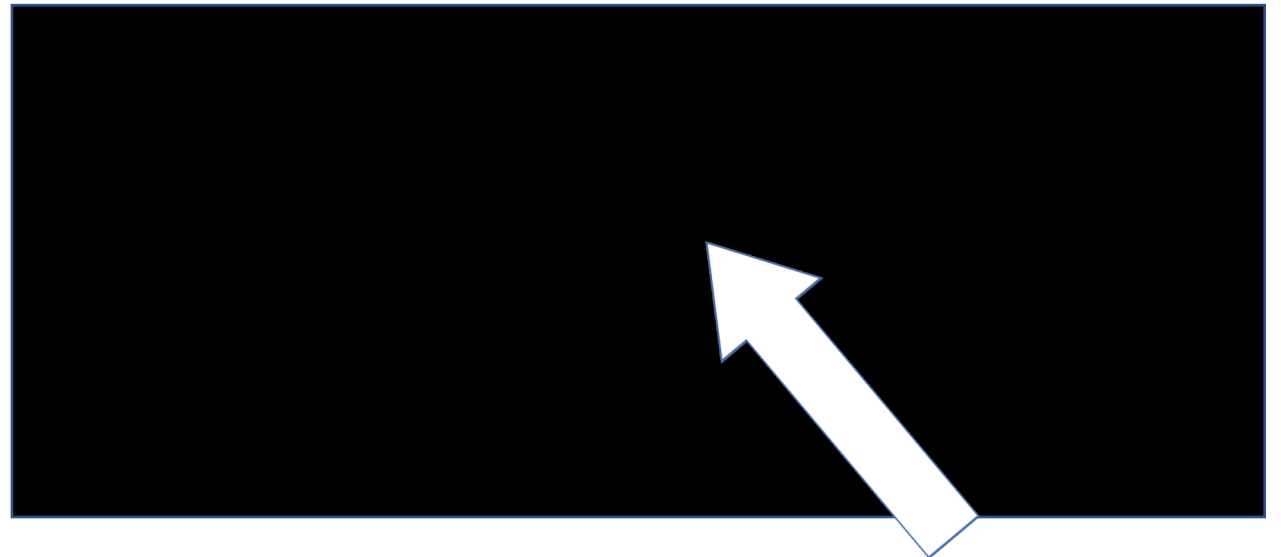
SL vs. kompaktes, dunkles Objekt:

Beide viel Masse auf wenig Raum (deshalb nach ART dunkel), aber SL hat EH und Singularität

Klassische Physik vs. Quantenmechanik:

Singularität – Unschärferelation:

gibt es Punkte, Unendlichkeiten,
was passiert bei sehr kleinen Längen?



- 1750: John Mitchell
- 1795: Pierre Simon de Laplace
Spekulation: Lichtausbreitung (Korpuskulartheorie) gehindert durch Gravitation
- 1905: Albert Einstein SRT
 $c_0 = \text{const}$, $E = mc^2$, keine absolute Zeit, Raum!
- 1915: ART
Feldgleichungen ART: Gravitation = Krümmung Raumzeit durch Masse und Energie
- 1916: Schwarzschild Lösung
- 1963: Roy Kerr: Lösung ART für rotierende SL
- 1965: Roger Penrose
Gravitationskollaps und Raum-Zeit-Singularität in SL (mit S. Hawking: Singularitätstheoreme)
- 1967: Archibald Wheeler: Black Hole
- 1974: Hawking-Strahlung
Paarbildung (QM) am Ereignishorizont: Verdampfung leichter SL
- 1993: Nobelpreis Tylor/Hulse: indirekter Nachweis Gravitationswellen
- 1994: Hubble Space Telescope: M87
Starke Evidenz für akkretierendes, supermassereiche SL im Zentrum einer Galaxie
- 1995: Genzel et al.: Sagittarius A*
1995: Supermassereiches SL im Zentrum der Milchstraße
2003: Blitze Nahinfrarot: Rotation SL
- 2017: Nobelpreis Gravitationswellen
LIGO Detektor: Kollision zweier SL 2015
- 2020: Nobelpreis SL
 - Roger Penrose: SL folgen aus ART
 - Reinhard Genzel, Andrea Ghez: Entdeckung eines supermassiven kompakten Objekts im Zentrum Milchstraße



Dilemma Klassischer Physik: SRT 1905

- Newton

Klassische Mechanik:

$$V_{\text{gesamt}} = V_{\text{Zug}} + V_{\text{Wurf}}$$

- Maxwell

Elektrodynamik, el.magn. Welle, Licht, Äther

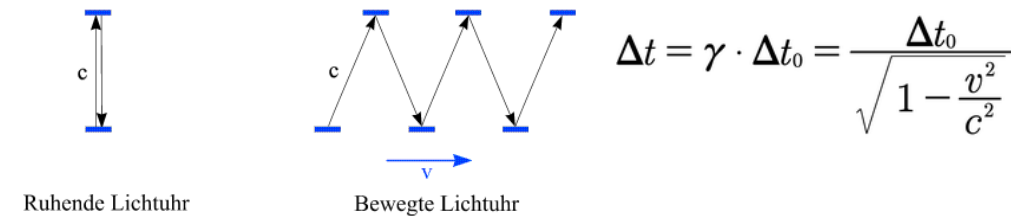
- Problem:

c bewegte Lichtquelle ?

- Lösung: Relativitätsprinzip

- Man kann nicht feststellen, ob und mit welcher gleichförmigen Geschwindigkeit man sich bewegt
- Konstanz der (Vakuum)Lichtgeschwindigkeit
- Mit $c \approx 300.000 \text{ km/s}$: rel. Effekte im Alltag unbemerkt

Relativität der Zeit: Zeitdilatation:



Relativität der Länge: Längenkontraktion:

$$l = \frac{l_0}{\gamma} = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Äquivalenz von Masse und Energie:

$$E = mc^2$$

Die Revolution: Raum und Zeit sind nicht mehr absolut, sondern relativ und hängen zusammen (4dim Raumzeitkontinuum, SRT: flach, Sprache ART: $T=0$)

Weiterentwicklung zur ART 1915

- Identität von träger und schwerer Masse (Galilei, Newton)
Freier Fall, Pendel, Torsionspendel
- Äquivalenzprinzip: Beschleunigung und Schwerfeld sind ununterscheidbar
Wenn träge = schwere Masse, dann Beschleunigung == Gravitation
- Geometrische Deutung:
Gravitation = Raumzeitkrümmung
- Energie = Ursache für Krümmung
- Zusammenhang:
Einsteinsche Feldgleichungen

Einstein tensor

$$G = R - \frac{1}{2} gR$$

R: Ricci Tensor
g: Metric Tensor
R: Scalar Curvature

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R.$$

The Einstein field equations (EFE)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- $R_{\mu\nu}$: Ricci curvature tensor
- R : the scalar curvature
- $g_{\mu\nu}$: the metric tensor
- Λ : the cosmological constant
- G : the gravitational constant
- c : the speed of light
- $T_{\mu\nu}$: the stress-energy tensor

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

↓ $G = c^{-1}$

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

curvature matter/energy
SPACETIME content

- AE: die Gesetze der Physik müssen so beschaffen sein, dass sie für beliebig bewegte Bezugssysteme gelten

ART als geometrische Interpretation der Gravitation

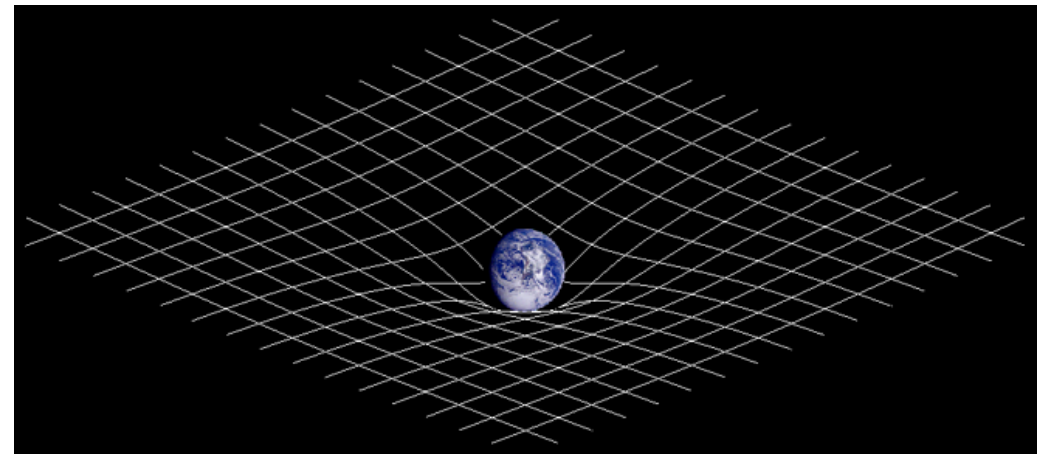
- Newton

- Raum und Zeit sind unabhängig und absolut
- Gravitation: Kraft, die instantan zwischen schweren Massen besteht

- Umstritten: z.B. Philipp Lennard, Johannes Stark: ‚Deutsche Physik‘

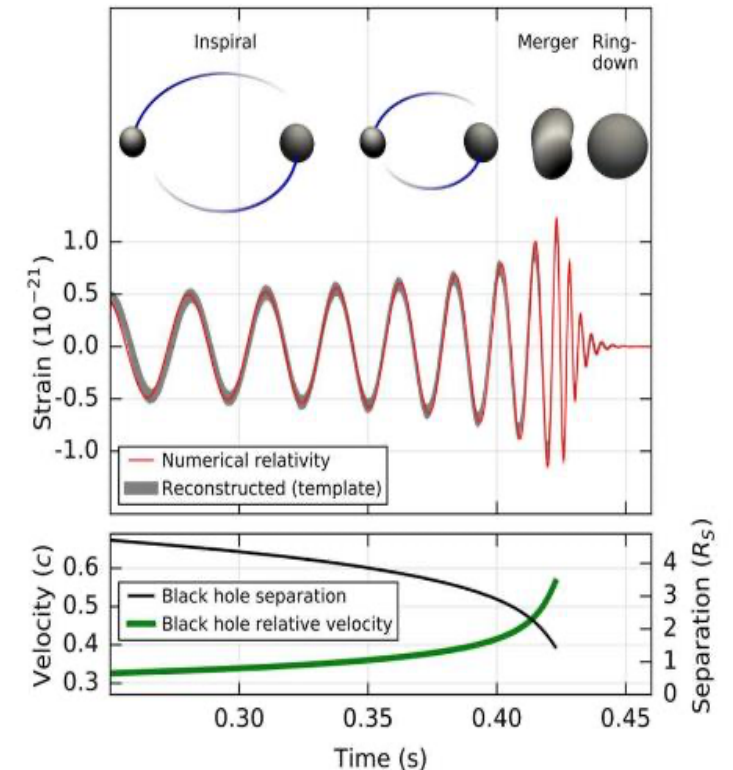
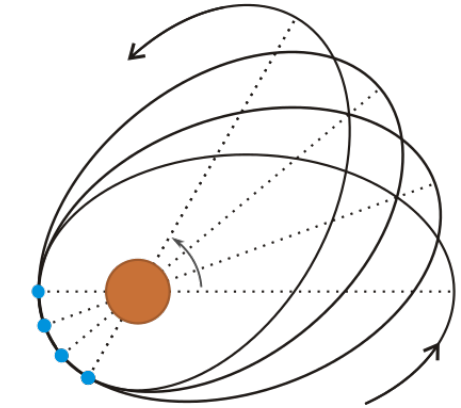
- Einstein

- Raumzeitkontinuum dynamische Einheit, verändert durch Masse/Energie
- Gravitation: Krümmung Raumzeit



Physikalische Effekte ART

- Periheldrehung Merkur Merkurbahn dreht sich: $574''/100a$
 Newton: $531''$ erklärbar, Rest: hypothetischer Planet ‚Vulcan‘
 1915: ART: $43''/100a$ (30.000a 1 Umdrehung)
- Lichtablenkung Sonne Sonnenfinsternis 1919
 AE: 1911/1915: Lichtablenkung Sonne
 29.5.1919: totale Sonnenfinsternis
- Gravitative Zeitdilatation Bewegtes Myon hat verlängerte Eigenzeit
- Gravitationswellen LIGO Experiment
 - Beschleunigte Massen erzeugen GW
 - Zu Messen: Längenänderung 10^{-21} , 1/1000 Protonendurchmesser (LIGO: 1/10.000)
 - Erde: ‚strahlt‘ 196W (1/Millionstel E_{kin} : $10^{18}a$)
 - 14.9.2015: Nachweis Kollision 2 SL:
 $29M_{So} + 36M_{So} = 62M_{So} + GW\ 3M_{So}$
 Dauer: 0,2 sec, Abstand: 1,3 Mrd Lichtjahre



Lösungen der AE Feldgleichungen

- Karl Schwarzschild 1916

Lösung AEEG (Q=0, J=0):

Ereignishorizont $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

(Schwarzschildradius r_s : physikalisch relevant!)

Masse M innerhalb r_s : Schwarzes Loch

$r = r_s$: nichts (Materie, Strahlung) dringt nach außen

$r > r_s$: normales Gravitationsfeld Masse M

$r = 0$: Singularität (intrinsisch: Hawking-Penrose 60er)

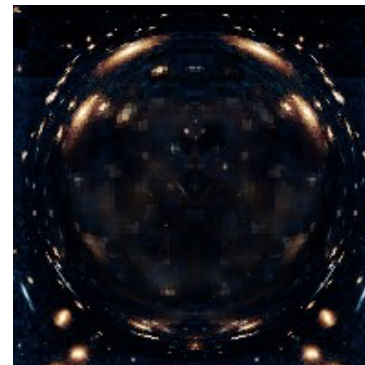
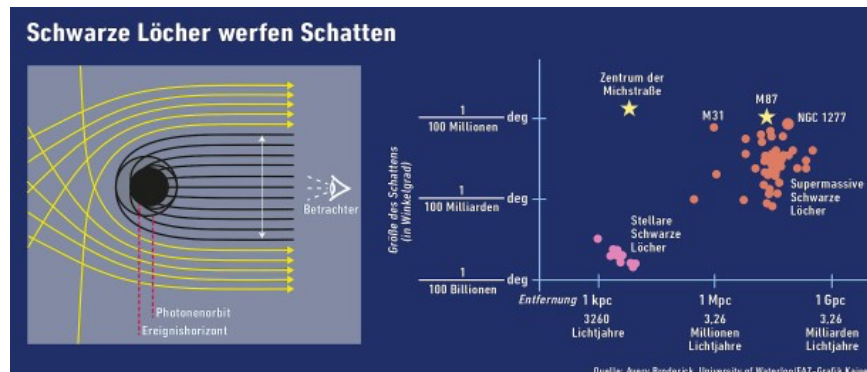


Beispiele r_s :

Sonne: 2.952m

Erde: 9mm

Mt Everest: 1nm

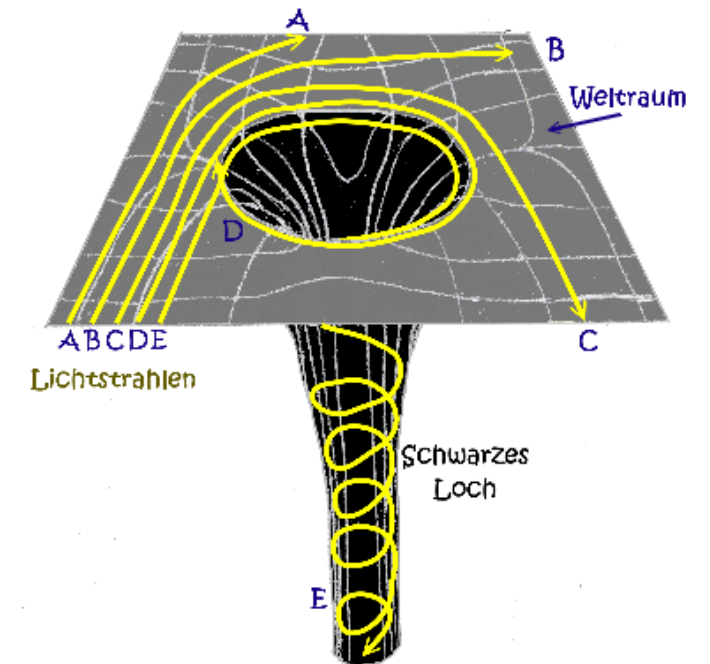
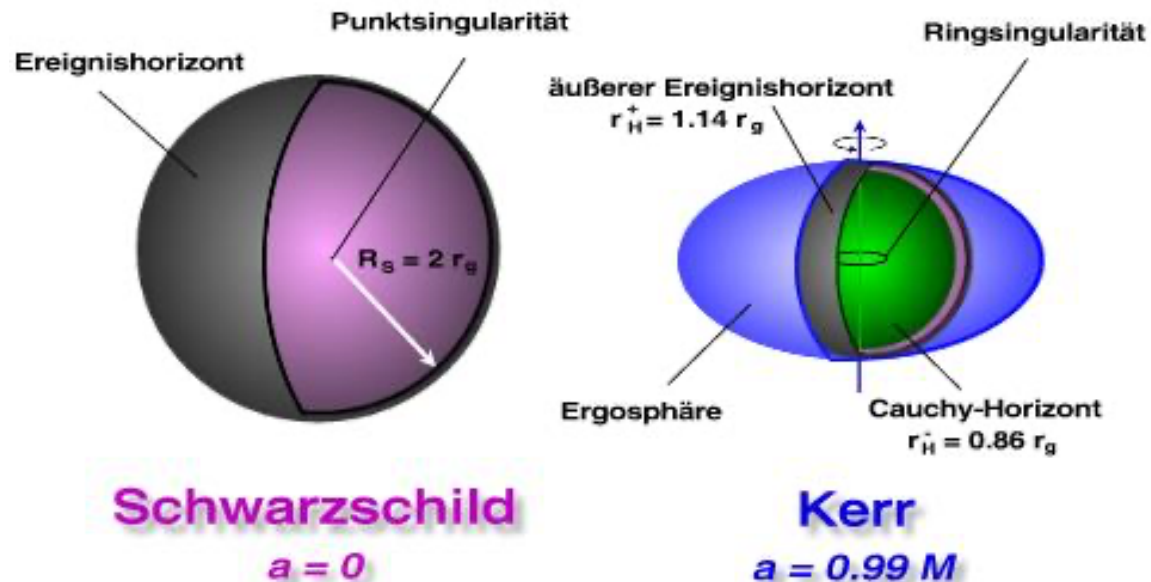


Lösungen der AE Feldgleichungen

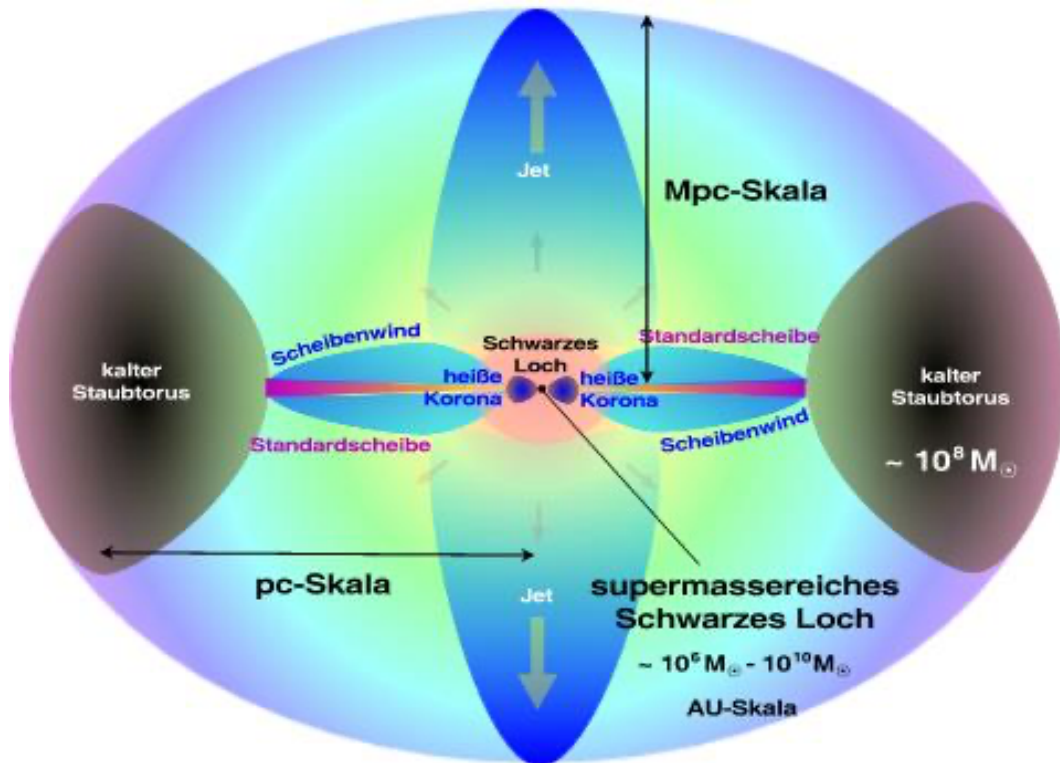
- Roy Kerr 1963
Lösung $Q=0, J \neq 0$
- Äußerer Ereignishorizont: ab hier schwarz
- **Ergosphäre**: Raum-Zeit wird von SL mitgezogen und verdrillt (Frame-Drag)
- Intrinsische Ringsingularität



- 5 Bahntypen um rotierendes SL:
 - Teilchen fällt aus ∞ ins SL
 - Teilchen aus ∞ eingefangen, einige Umrundungen, dann ins SL
 - Teilchen auf stabilem Kreis ums SL
 - Teilchen auf drehender Ellipse stabil ums SL
 - Teilchen entkommt bei genügend Energie bzw. großem Abstand



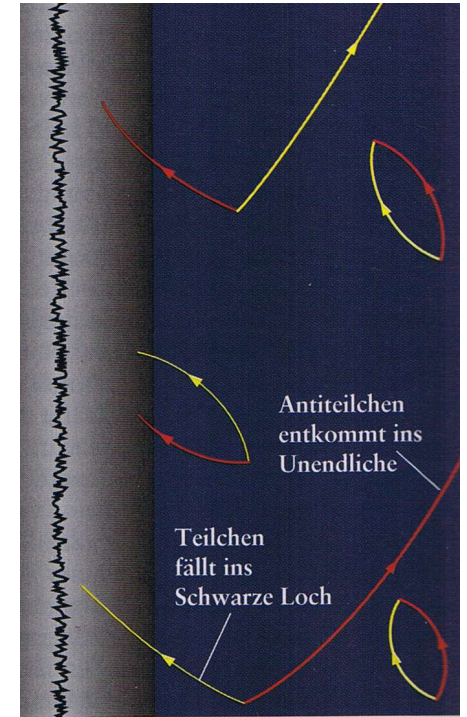
Struktur und Dynamik rotierendes Supermassereiches SL



- Akkretion: kalter Staubtorus $10^4 - 10^8 M_{\text{Sonne}}$, Abstand \approx parsec (206.264 AE Erde-Sonne)
- Torus instabil: scheibenförmiger Akkretionsfluss zum SL, sehr komplex
- Scheibe heizt sich in Richtung SL auf
- ART Effekte: Raum/Feld Quetschungen etc.: extreme Beschleunigungen
 - Innerer Torus: marginal stabil, fällt ins SL
 - Hauptscheibe: Zwischengebiet IT-Torus
 - Koronale Einhüllende: Rückflussgebiet ober/unterhalb Hauptscheibe
 - Trichterförmige Jets: zentrifugal und magnetisch getriebener Ausfluss, bei ca. $100r_s$ stark kollimiert: gigantisch: mehrere Galaxien groß
- Aktive Zentren Galaxien

Entstehung eines SL

- Primordiale Schwarze Löcher („Mini Löcher“)
 - Masse: 10^{18}g ($10^{-15} M_{\text{Sonne}}$, irdischer Berg)
 - Enorme Kompaktheit: $10^{42}\text{Tonnen/cm}^3$
 - Entstehung Frühphase Universum
 - Hoher Druck, große Dichte, hohe Temperaturen
 - Hawkingstrahlung:
 - Vakuumfluktuationen am Ereignishorizont
 - $M < 1000T$: Explosion mit Teratonne TNT
 - SL M_{Sonne} : $\approx 10^{64}$ Jahre!
- Existenz unbewiesen



Masse in M_{Sonne}	Lebensdauer
10^{-20}	10^{10} (Alter Universum)
2	10^{67}
20	10^{70}

Entstehung eines stellaren SL

- Stellare Schwarze Löcher (3 bis $100 M_{\text{Sonne}}$)
- Sternentwicklung:
 - Gravitationskollaps:
 - $M < 1,44 M_{\text{Sonne}}$: Supernova:
Weißer Zwerg (kühlt aus) + Planetarischer Nebel
 - $1,44 - 3,2 M_{\text{Sonne}}$: Neutronenstern
 - Elektronen und Protonen verschmelzen zu Neutronen
 - \varnothing 10km, feste Oberfläche, einige cm Atmosphäre, superfluide n-Materie
 - Häufig extreme Rotation: 1000U/Sekunde (Pulsare)
 - $M > 3,2 M_{\text{Sonne}}$ (Oppenheimer-Volkov-Masse): Schwarzes Loch
- Stern:
 - Gaswolke
 - Protostern
Kontrahiert, heizt sich auf
 - Gaskugel, 10^6K : Fusion H- \rightarrow He
 - Gleichgewicht:
Strahlungsdruck = Gravitation
 - Sonne:
Nukleare Zeitskala 10^{10} Jahre
Dynamische Zeitskala: 30min

Supermassereiche SL

- Massereiche Schwarze Löcher ($\leq 10^6 M_{\text{Sonne}}$)

Akkretion: SL fängt Gas, Sterne und sogar andere SL ein
Vorkommen in Kugelsternhaufen

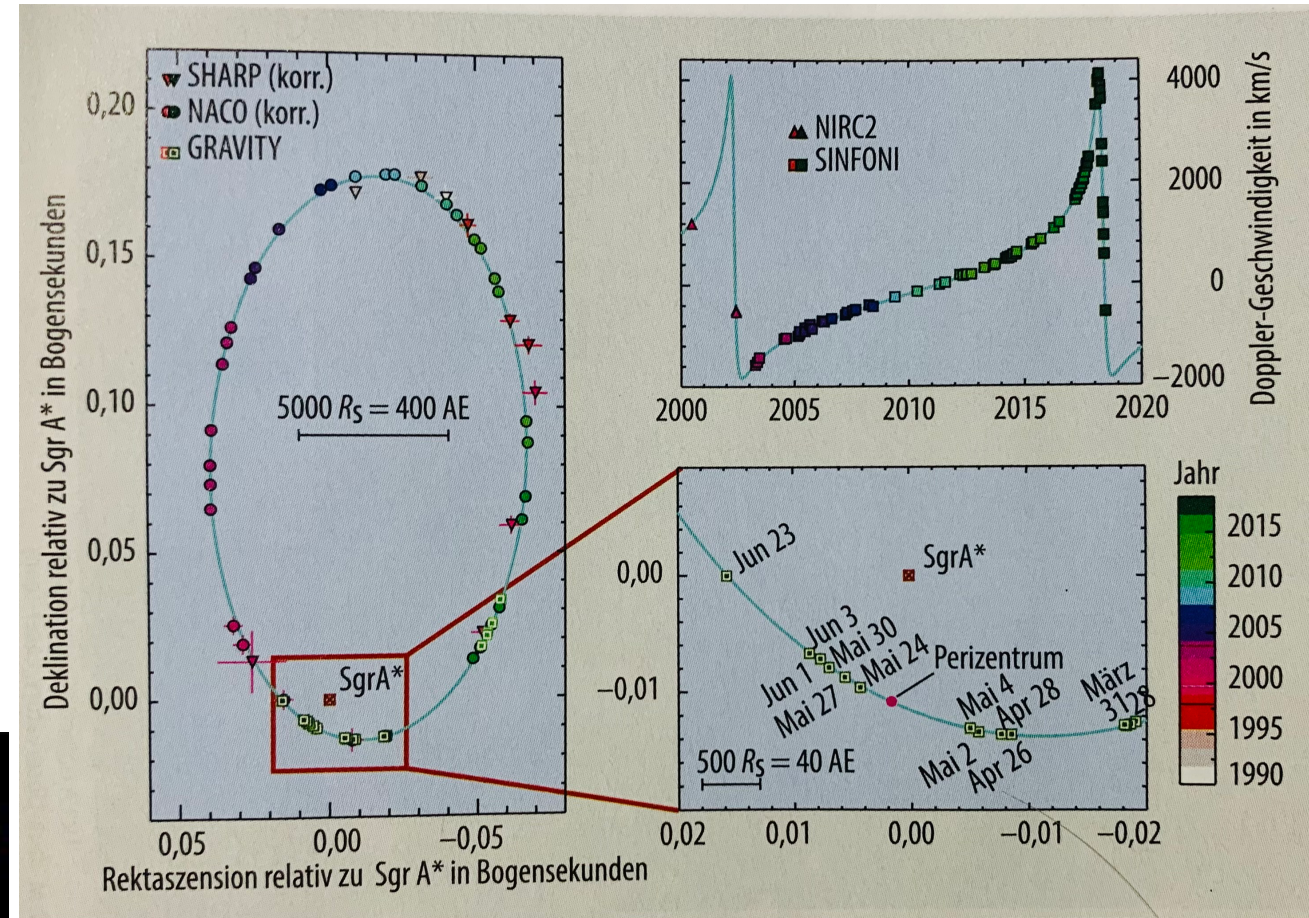
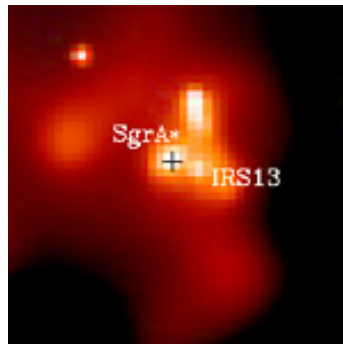
- Älteste Objekte einer Galaxie
- Anhäufung ca. 100 - 1.000 Sterne
- Hungern: Umgebung leergesaugt: keine Gaswolken mehr
- Gute Erklärung für stellare Dynamik, aber schwache Evidenz

- Supermassereiche SL ($> 10^6 M_{\text{Sonne}}$)

Zentrum einer Galaxie

Sgr A* in unsere Milchstraße ($4,3 \times 10^6 M_{\text{Sonne}}$)

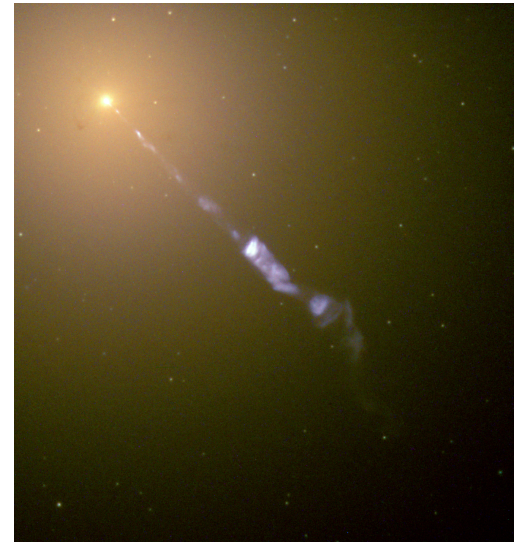
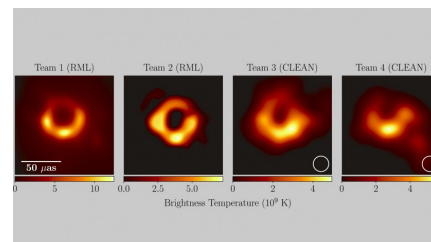
- 2003: Sgr A*: Zentrum Milchstraße
- Beobachtung Stern S2 um Sgr A* 1992-2018
- Entfernung 26000 LJ
- Kepler Ellipse mit 16a Umlaufzeit
- $V=18\text{mio km/h}$ ($0,03c$)
- Bahn S2 mit ART und SL präzise erklärbar
- Perizentrum: $1500 r_s / 120 \text{ AE}$:
Gravitationsrotverschiebung,
Schwarzschild-Präzession



Messier 87

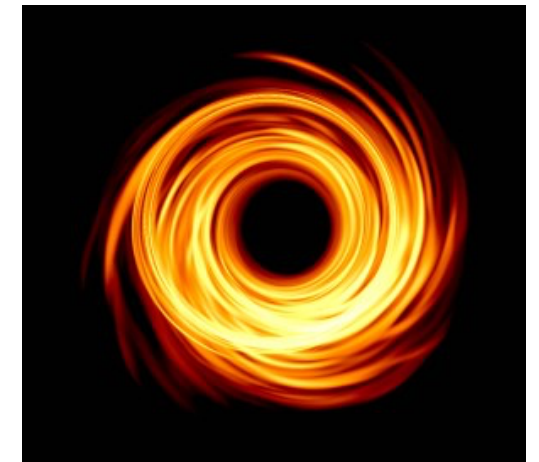
- Elliptische Riesengalaxie
 - 55mio LJ entfernt
 - \varnothing 2 x Milchstrasse
 - $6 \times 10^{12} M_{\text{Sonne}}$ (200 x Milchstraße)
- Supermassereiches SL
 - $6,6 \times 10^9 M_{\text{Sonne}}$
 - $r_s \approx$ Sonne-Pluto
 - Akkretionsrate: 0,1 M_{Sonne} p.a.
- 10.4.2019: Event-Horizon Telescope
 - Verbund von 8 Radioteleskopen
 - Gigantische Datenmengen (350TB Pro Tag und Teleskop)
 - Auflösung: Zeitung in NY lesen in Café in Paris
 - Jahrelange Datenreihen, Computer-ausgewertet
 - Schatten $2,5 \times r_s$
 - Rotierendes SL
 - Unterer Halbkringel: Plasma mit fast C auf Beobachter: relativistische Strahlungsverstärkung (Beaming)

Ergebnis nicht eindeutig!



Jet: 5000LJ

Materie: bis 250.000LJ



,Messung EHT', Simulation relativistisch verbogene Strahlung des akkretierenden Plasmas, perfektes Teleskop beliebiger Auflösung

Schwarze Löcher und Kosmologie: offene Fragen

- Woher kommen SMSL im jungen Kosmos?
- Aktive Galaktische Kerne = SMSL
- Beobachtung:
 - in kosmologisch großer Entfernung viele leuchtkräftige AGN
 - in kosmologisch kleinen Entfernungen viele leuchtschwache AGNs
 - > erst bildeten sich große SL, dann kleine SL (antihierarchisches Wachstum SL)
- Henne-Ei:
 - Erst Galaxie, dann SL? Umgekehrt?
 - Derzeit: erst SMSL, dann die meisten Sterne.
 - Warum? Instabilitäten?

?

?

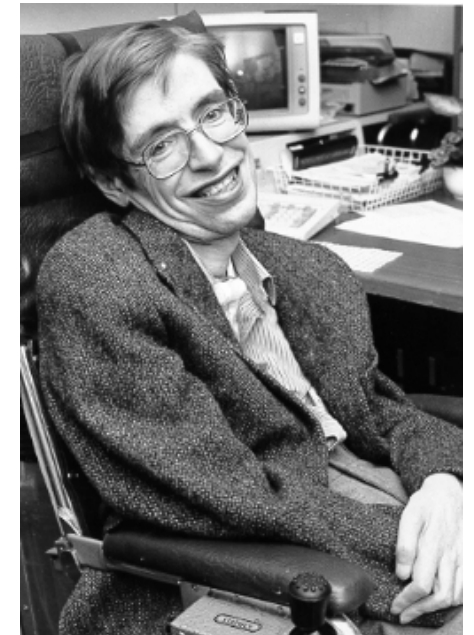
?

Quantengravitation: künstliche SL?

- Max Plank:
Ab Plank-Skala: QM und RT falsch
- Mathematische Apparat QM passt nicht für ART
Nichtlineare Feldgleichungen: keine Superposition
- Stringtheorie
4dimART (RaumZeit) + weitere Raumdimensionen
Kompaktifizierung: Extradimensionen sind aufgerollt,
Zusatzeffekte erst auf Skala der Extradimensionen
Standardmodell (Elektromagnetische, schwache- und starke
Kernkraft) beschränkt auf nur wirksam in niederen
Dimensionen
- Loop-Quantengravitation
Echte Quantisierung Raumzeit: körnige Struktur
'Volumenquanten'
- Nach Stringtheorie: Teilchenbeschleuniger (TeV)
Energie für SL!

- Plank-Länge: $l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$
- $l_p = 1,62 \times 10^{-35} \text{m}$
- Plank-Masse: $1,2 \times 10^{19} \text{GeV}$
- Plank-Zeit: $5,4 \times 10^{-44} \text{s}$

SL mit 3TeV Masse:
Hawkingstrahlung:
lebt 10^{-24}s
Akkretion: 10^{-36}g/s
1 Trillion Jahre für Masse 1
Elektron



Hat Hawking recht?



Bild- und Textquellen

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Apsidendrehung>
- Physik Journal 12/2020
- <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/4029450/Gravitationswellen.pdf>
- <https://www.yumpu.com/de/document/read/7995150/sternentwicklung-vom-hauptreihenstern-bis-zum-schwarzen-loch>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Messier_87
- <https://www.eso.org/public/germany/news/eso1907/>
- <https://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/eine-nackte-singularitaet-ist-es-schon-mal-nicht-16139939.html>
- https://de.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*
- <https://www.golem.de/news/wissenschaft-kein-foto-von-einem-schwarzen-loch-1904-140774.html>
- <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/kerr-loesung/219>
- <https://astrokramkiste.de/schwarzes-loch>
- Von NASA, Andrew Fruchter and the ERO Team [Sylvia Baggett (STScI), Richard Hook (ST-ECF), Zoltan Levay (STScI)] (STScI). - GRIN/NASA. HubbleSite: gallery, NewsCenter., Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6354886>
- <https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/lectures/WDNSBH/wdnsbh-5.pdf>
- Alberto Franceschini, Guenther Hasinger, Takamitsu Miyaji, Diego Malquori: On the relationship between galaxy formation and quasar evolution
- Andreas Müller: Schwarze Löcher – Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- Andreas Müller: Astro-Lexikon
- A. Marconi: Galaxies, active galactic nuclei and black holes: Evolution and Interaction
- Michell C. Begelman, Martin J. Rees: Gravity's fatal attraction
- Jörn Wilms: Introduction to Astronomy
- Hanno Karttunen: Introduction to Astronomy
- Kip Thorne: Gekrümmter Raum und verbogene Zeit - Einsteins Vermächtnis
- Ross J. McLure, James S. Dunlop: The cosmological evolution of quasar black hole masses
- Zoltán Haiman, Eliot Quataert: The formation and evolution of the first massive black holes
- <https://www.kunstnet.de/werk/294164-schwarzes-loch-schluerft-erde>