

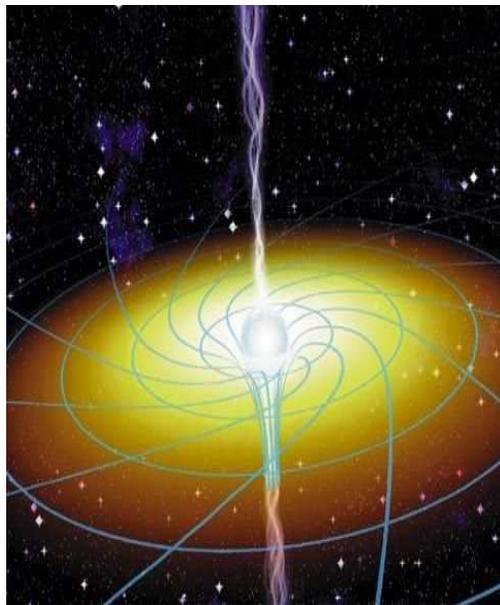
Wie schwarz sind schwarze Löcher

Andreas Wipf

Friedrich-Schiller-Universität Jena



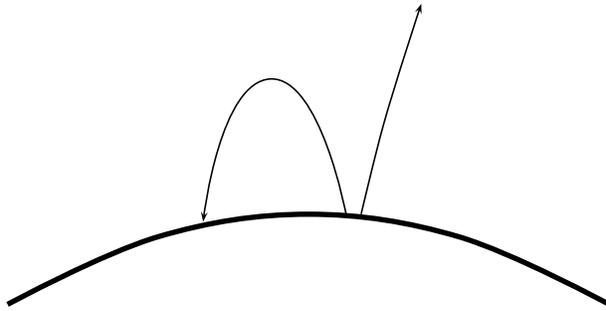
seit 1558



© Joe Bergeron

Halle, Juni 2005

- John Michell (1784) (Brief an Cavendish)



Es könnte „dunkle Sterne“ geben, bei denen die **Fluchtgeschwindigkeit** größer ist als die **Lichtgeschwindigkeit**.

$$E = \frac{m}{2}v^2 - \frac{GmM}{r} = 0 \implies v_F^2 = \frac{2GM}{r}$$

Mond: $v_F = 2.4 \text{ km/s}$, Erde: $v_F = 11.2 \text{ km/s}$

$$v = c \implies r = r_S = \frac{2GM}{c^2}$$

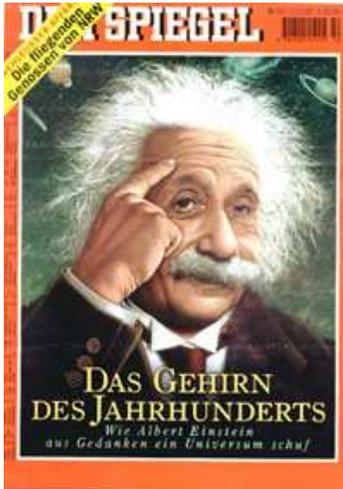
Schwarzschild-Radien:

Erde: $r_S = 8,8 \text{ mm}$

Sonne: $r_S = 3 \text{ km}$, $\rho = 5.3 \cdot 10^{16} \text{ g/cm}^3$

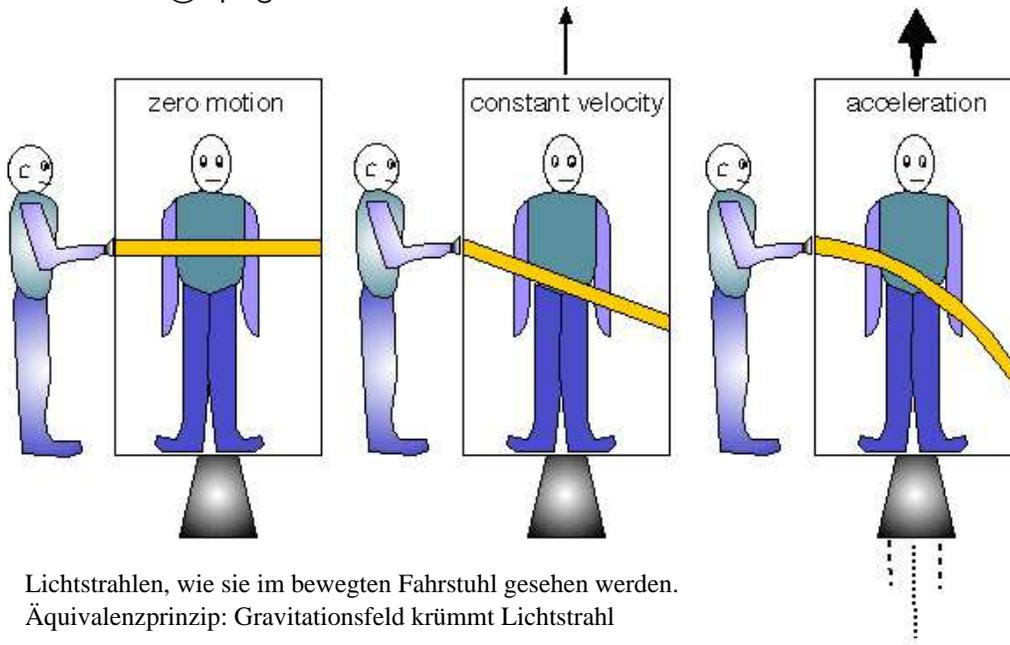
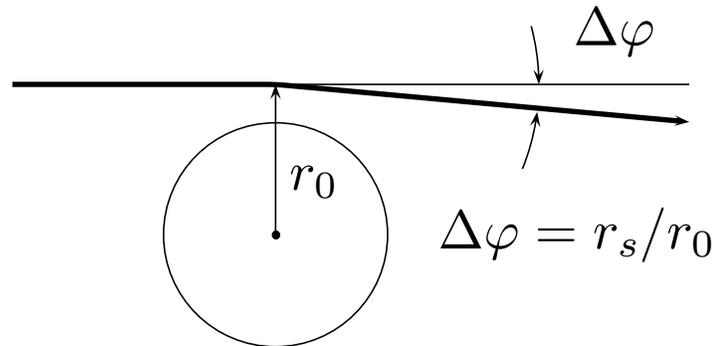
$$\rho = M/V_s(M) \implies \rho = \left(\frac{M_\odot}{M_s}\right)^2 \cdot 5 \cdot 10^{16} \text{ g/cm}^3$$

- Lichtteilchen-Theorie (1784): v_F massenunabhängig
 „...all light emitted from such a body would be made to return towards it, by its own proper gravity ...“

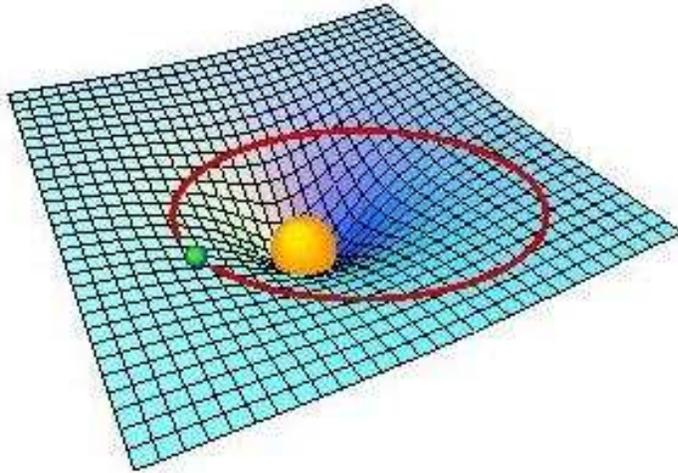


©Spiegel 99

Äquivalenz von E und $m \Rightarrow$
 Gravitation beeinflusst Licht



Lichtstrahlen, wie sie im bewegten Fahrstuhl gesehen werden.
 Äquivalenzprinzip: Gravitationsfeld krümmt Lichtstrahl



Die Masse hat den Raum im Griff, indem sie ihm vorschreibt, wie er sich zu krümmen hat, und der Raum hat die Masse im Griff, indem er ihr vorschreibt, wie sie sich zu bewegen hat (Wheeler).

Allgemeine Relativitätstheorie (ART) beschreibt Physik von großen Skalen (Makrokosmos)

Einsteinsche Gravitationstheorie:

Stellt Frage nach der Struktur von Raum und Zeit

- Einstein Gleichungen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

$g_{\mu\nu}$: bestimmt Längen- und Zeitmessungen

$R_{\mu\nu}$: Krümmung von **Raum** und **Zeit**

Λ : Kosmologische Konstante

$T_{\mu\nu}$: Energie und Impuls der Materie

Experimentell vielfach bestätigt!

- **Lichtablenkung** im Gravitationsfeld (1.75")
- **Periheldrehung** von Merkur (43 vs. 43.1" /Jhd)
- Binäre Systeme (PSR 1913+16)
- Gravitative **Rotverschiebung** (1%)
- Fluktuationen im **MW-Hintergrund** (WMAP, QT)
- **GPS** \longleftrightarrow **Schwarze Löcher**

aber:

Keine konsistente Quantentheorie der Gravitation.

Kompakte Objekte am Himmel

- **Weisse Zwerge:**

Entartungsdruck der e^- ,

10^6 g/cm^3 , $M < 1.46M_{\odot}$ (Chandrasekhar)

- **Neutronensterne:**

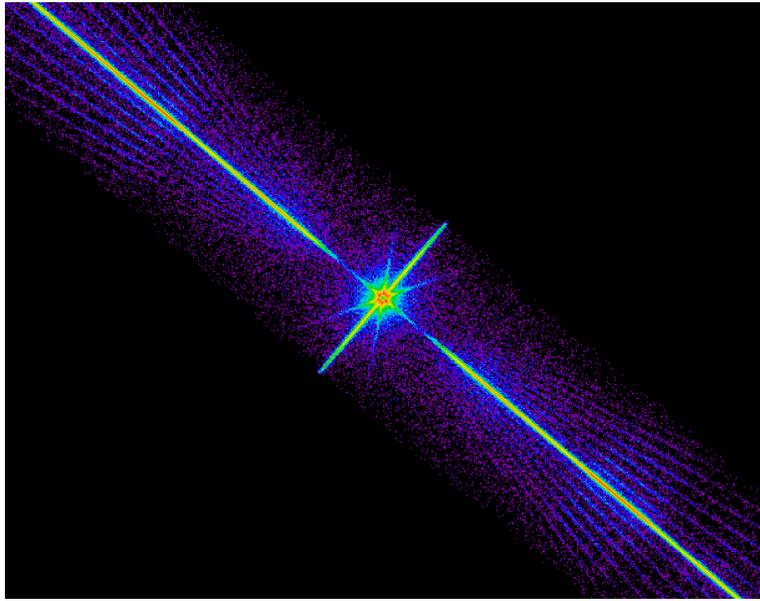
Entartungsdruck der n

10^{15} g/cm^3 , $M < 1.45 - 1.65M_{\odot}$ (OV)

- **Stellare schwarze Löcher:**

Stern $M > 8M_{\odot} \implies$ stellares SL

Supernova, $n^* + n^*$

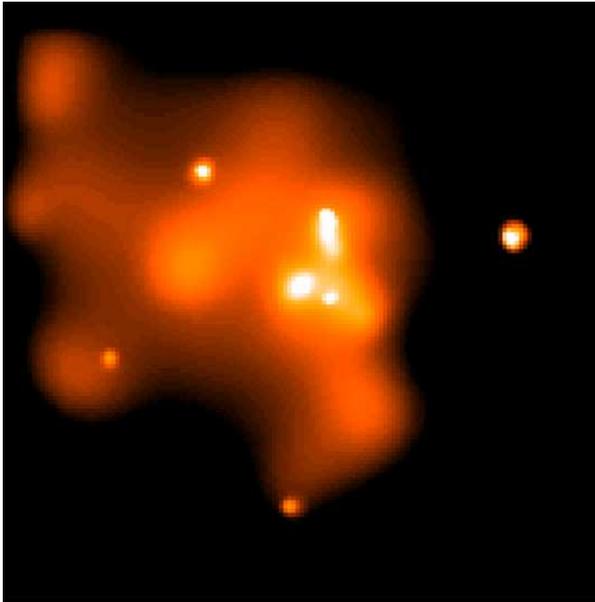


XTE J1118+480: SL-Kandidat in unserer Milchstrasse (Chandra)

Objekt	Entfernung	Wirt
XTE J1118+480	1.8 kpc	Begleitstern
Cyg X-1	2 kpc	blauweisser Riese
SS 433	3 kpc	blauweisser Riese
GRS 1915+105	12.5 kpc	Begleitstern

1 pc = 3.2615 Lichtjahre

- Supermassereiche SL:



$$M = 3.7 \cdot 10^6 M_{\odot}$$

$$r_S = 11 \cdot 10^6 \text{ km}$$

$$= 1700 \text{ Erdradien}$$

Innere 10LJ des galaktischen Zentrums

Objekt	Entfernung	Wirt
Sgr A*	8.3 kpc	Milchstrasse
NGC 4258	7.2 Mpc	Galaxie
M87	16 Mpc	Riesenellipse
Cyg A	233.2 Mpc	Radiogalaxie

Standardmodell für Galaxienzentren:

Existenz eine zentralen, supermassiven SL

- Primordiale SL (Hawking):

spekulativ, noch nicht beobachtet

$$M \approx 10^{18} \text{g}, \quad r_s = 1.5 \cdot 10^{-10} \text{cm}$$

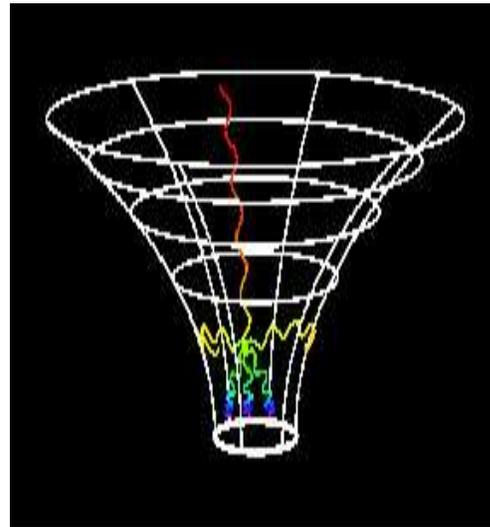
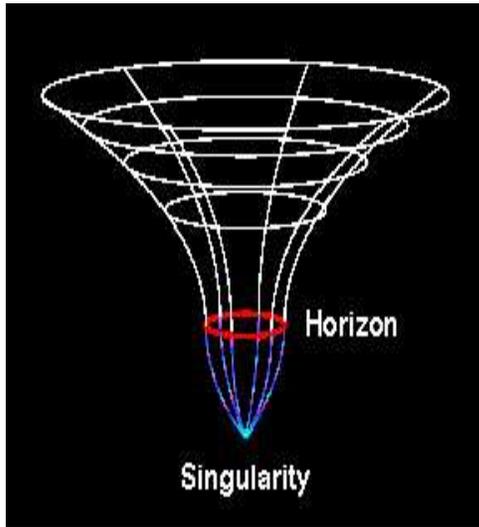
Quanteneffekte wesentlich.

Schwarze Löcher in der ART

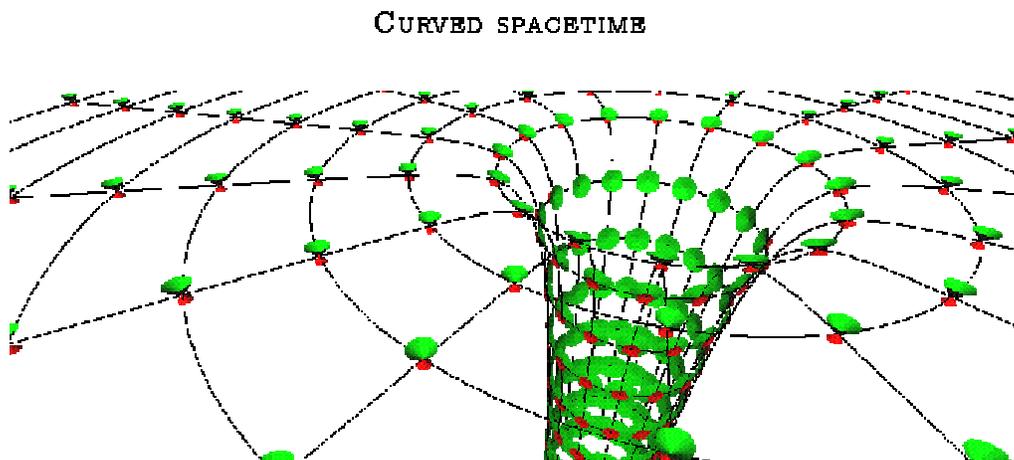
- Schwarzes Loch = Wasserstoffatom der ART
- Einfache Lösung der Einsteinschen Feldgleichung
- Ein schwarzes Loch hat keine Haare
Nur 3 Parameter!

Masse M , Ladung Q , Drehimpuls L

Einbettungsdiagramme:



Gekrümmter Raum, Horizont, Rotverschiebung
gestreckt in radiale Richtung



- SL einfach, gibt nur 4 Typen

Schwarzschild (1916): M

Reissner-Nordström (1916/18): M, Q

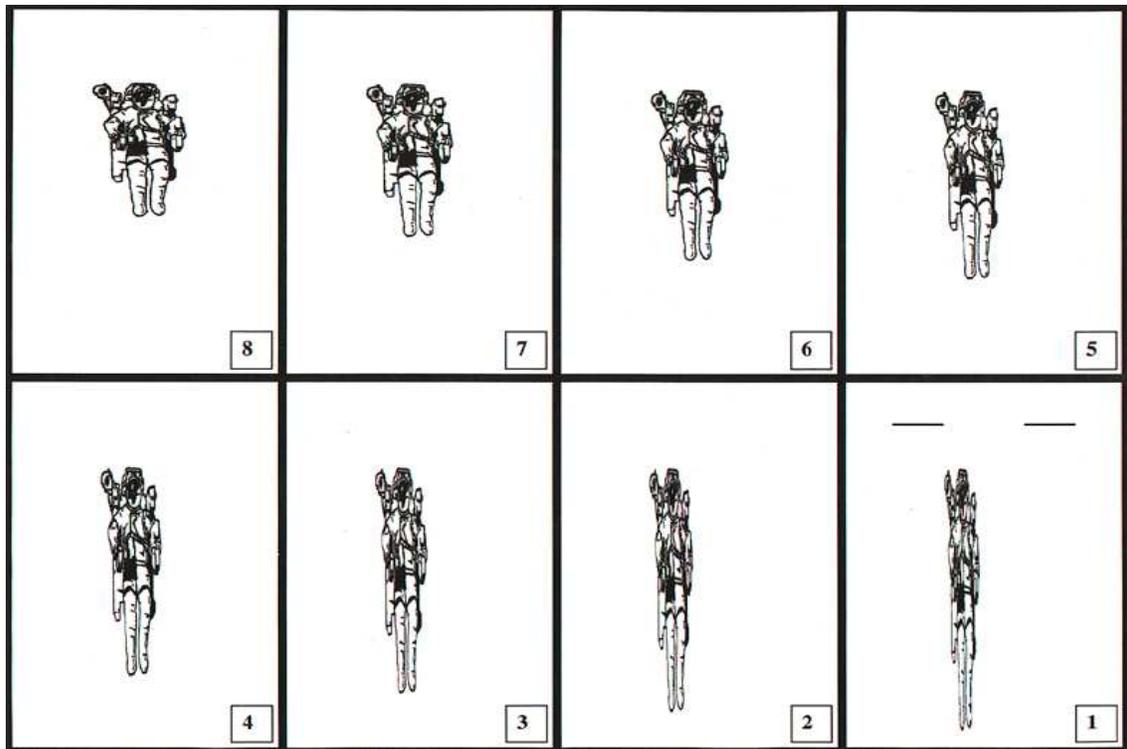
Kerr (1962): M, L

Kerr-Newman (1965): M, L, Q

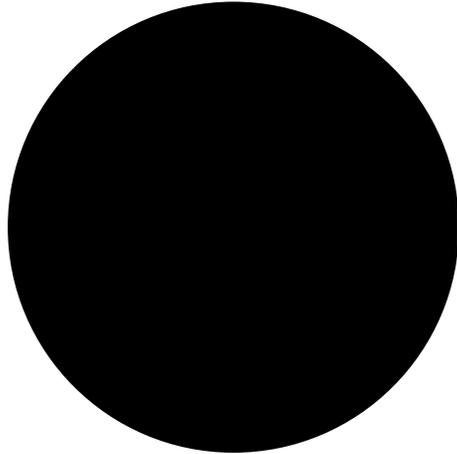
- SL von Ereignishorizont ($r = r_s$) umgeben

Zeitdilatation, Rotverschiebung $\longrightarrow \infty$

halbdurchlässige Membran, Gezeitenkräfte



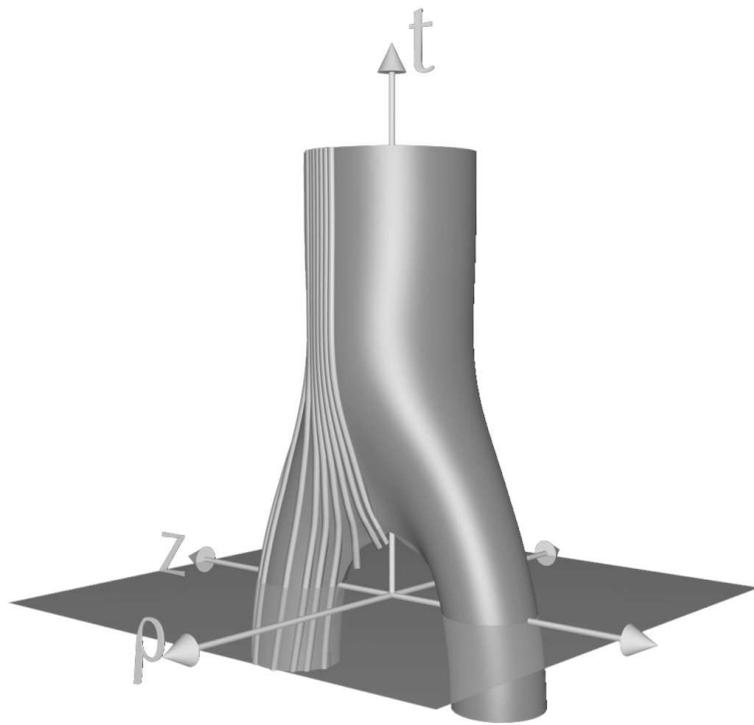
- Licht/Materie innerhalb Horizont **gefangen**
eingefrorener Stern
- *Schwarzes Loch in ART ist schwarz*



- Ein SL „hat kein Gedächtnis“
Information über Anfangszustand geht verloren!
ähnlich einfach wie Elementarteilchen
- **Ungewöhnlich**
 $g = 2$ wie Dirac-Elektron, singulär im Zentrum
- **Nur indirekte Beobachtung:**
Akkretion, Gravitationskraft, ...

Thermodynamik schwarzer Löcher

- 0. Gesetz:
Die (evtl. riesige) Oberflächengravitation k auf dem Horizont ist konstant
- 1. Gesetz:



$$dM = \frac{k}{8\pi} dA + \Omega_H dL + F_H dQ$$

M: Masse, A: Horizontfläche

- 2. Gesetz:

Bei allen physikalischen Prozessen $dA \geq 0$

- 3. Gesetz:

$k \rightarrow 0$ mit physikalischen Prozessen unmöglich!

Thermodynamik	\longleftrightarrow	SL-Physik
innere Energie U	\longleftrightarrow	Masse M
Entropie S	\longleftrightarrow	Horizontfläche A
Temperatur T	\longleftrightarrow	Oberf.gravitation k
⋮		⋮

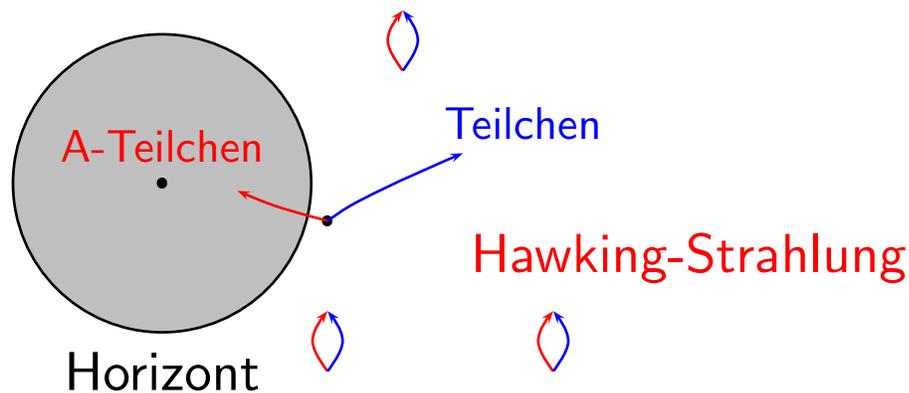
Wheeler, Bekenstein: $S = \mu A$, $[\mu] = \frac{\text{Wirkung}}{\text{Fläche}}$.

Hat SL eine Temperatur?

- Ansatz

$$S = \text{konst.} \cdot \frac{A}{\ell_p^2}, \quad \ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.6 \cdot 10^{-33} \text{cm}$$

- Thermodynamik \Rightarrow SL has $T \sim k$
- **Quantentheorie:** Vakuumfluktuationen



- Hawking: **Hohlraumstrahlung** mit

$$T_H = 10^{-7} \frac{M_\odot}{M} \implies t = 10^{10} \left(\frac{M}{10^{12} \text{kg}} \right)^3 \text{Jahre}$$

stellares SL $\sim 10^{66}$ Jahre, primordiales SL $\sim t_{\text{Univ.}}$

- T_H enthält G und $\hbar \Rightarrow$ Größe der QG
- *Riesige Entropie:*

$$T_H \text{ bekannt} \Rightarrow S = \frac{1}{4} \frac{A}{\ell_p^2}$$

Anzahl Mikrozustände W , $S = k_B \log W$

$$\frac{\log W}{A} = 10^{64} \text{ (pro cm}^2 \text{ Horizontfläche)}$$

$$S_{\odot} \sim 8 \cdot 10^{58} k_B \quad \text{ideales Gas}$$

- *Informationsproblem: Information wohin?*

Stringtheorie, Quantengravitation, . . . ?

Schwarze Löcher sind nicht schwarz