

V8 Schwarze Löcher

81.

Schwarzschild Lösung (Kugelsymmetrischer Massenverteilung)

$$ds^2 = B(r) c^2 dt^2 - B(r)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2 \quad (*)$$

$$B = 1 - \frac{2GM}{c^2 r}, \quad d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$$

Schwarzschild Radius: $r_s := \frac{2GM}{c^2} \Rightarrow b=0$

Metrik singulär bei

i) $\theta = 0, \pi$

ii) $r = r_s$

iii) $r = 0$

i) kann durch Koordinatentransformation (in Cartesische Koordin.) behoben werden

ii) $r_s(M_{\text{proton}}) \approx 10^{-50} \text{ cm}$ (Protonenradius 10^{-14} cm)

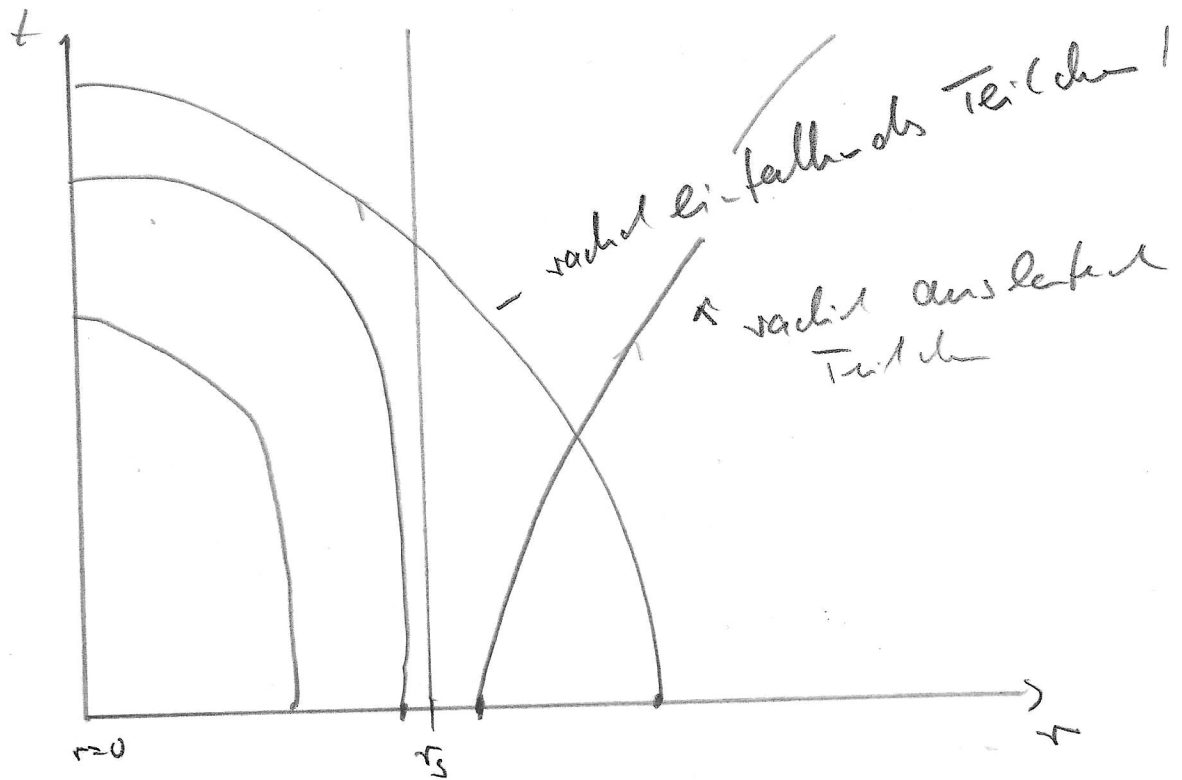
$r_s(M_\odot) \approx 3 \text{ km}$ (innerhalb der Sonne)

$r_s(\text{bekannt Sterne}) \ll R_{\text{Sterne}}$

$r = r_s$ ist ebenfalls Koordinate singulär!

(*) gilt nur für $r > R_{\text{Sterne}} > r_s$

$$R_{\text{Sterne}} R_{\text{proton}} \sim \frac{r_s^2}{r_p}$$



Für $r < r_s$ kann kein Signal nach $r \rightarrow \infty$!
 $r = r_s$ heißt Ereignis-Horizont

Definition Schwarzes Loch:

Materiensammlung mit Masse M , die innerhalb von r_s liegt, also $R_0 < r_s$

Eigenschaften:

- Lösung der E.G.
- Objekte können mit Strahl, sondern sind schwarz

Existieren SL?

- zunächst Skepsis (Einstein, ...)
- erster Nachweis: 1990er (R. Genzel, A. Ghez)
Nobelpreis 2020

Radiquelle Sagittarius A* im Zentrum
unser Milchstraße

Mittloch: Vermessung der Kepler Ellipsen nahe
umlaufende Sterne $\rightarrow$ Rückschlüsse auf
(im IR, 4,7 μm)
Masse: $M = 10^6 M_\odot$

- seither: Identifizierung zahlreicher SL, z.B. Doppelstern
bewegungen
vermutet: Zentrum jeder Galaxie ist SL. ^{unmittelbar} _{bestehen}

Wie entsteht SL?

84.

Endstadium von Sternen

Zunächst: Gleichgewicht Gravitation $\leftrightarrow$ Gasdruck des heißen Plasmas

Nachdem "Fusionsprozesse" beendet $\rightarrow$ Stern kollabiert und Explodiert

Endstadien:

- weißer Zwerg: $R_0 \sim 10000 \text{ km}$

ideales Elektronengas $T \sim 10^4 \text{ K}$

$$M \leq M_c \approx 1,5 M_\odot$$

$\uparrow$

Chandrasekhar-Limit

- Neutronensterne $R_0 \sim 10 \text{ km}$

Neutronen

$$M < M_{\text{TOV}} \sim (1,5 - 3,2) M_\odot$$

$\uparrow$

Tolman - Oppenheimer - Volkoff
Limit

- Schwarzes Loch $M > M_{\text{c, TOV}}$

heißer stiller SL

Klassifikation

Entstehung

Supermassiv	$(10^5 - 10^{10}) M_{\odot}$	} ^{stetig} Verschmelzung von SL + Gas wolke
mittelschwer	$\approx 10^3 M_{\odot}$	
stille	$\approx 10 M_{\odot}$	• Kollaps von Sternen • Verschmelzung von kleinen Sternen
primordial	$\leq M_{\text{Mond}}$	← Existenz und Entstehung noch unklar möglich

Entstehung und Entwicklung

Zusammenfassung SL:

- $\rho_0 < \rho_s$
- Lösung der E.G.
- stabil mit
- ^{Erster} Nachweis im Zentrum der Milchstraße 1990, z
- Heute: SL im Zentrum jeder Galaxie vermutet
- Entstehung: Kollaps + Verschmelzung

iii) $r=0$: phys. Singularität $R_{\text{max}} R^{4+3\sigma} \sim \frac{\sqrt{3}^2}{r^6} \rightarrow \infty$
 (wie $v \sim \frac{e}{r}$ für elektostat. Potential)

Erwartung: "Auflös" im Rahmen einer
 Quantentheorie (Quantengravitation)!

Singularität deutet auf Unvollständigkeit der
 ART (daher war Einstein skeptisch bzgl.
 dieser Lösung / Interpretation)

Hawking, Penrose 1960er: (Nobelpreis Penrose 2020)

Singularitäten existieren in der ART generell

Produktion von Teilchen / Anti Teilchen Paaren
nahe Horizont.

Ein Teilchen fällt ins SL, das andere "entkommt"

$\Rightarrow$ SL strahlt doch in QT

$\Rightarrow$ SL verliert Energie

H.S. bisher nicht beobachtet

Informations paradox

QT: In der QT geht keine Information verloren

Wo ist die Information der in ein SL
eintreffenden Materie?

String Theorem: erlaubt Freiheitsgrade + Mikrozustände zu zählen

• Information $\sim \ln(\text{Mikrozustände})$

• Ergebnis: # Mikrozustände $\sim$ Horizont

Holographisches Prinzip