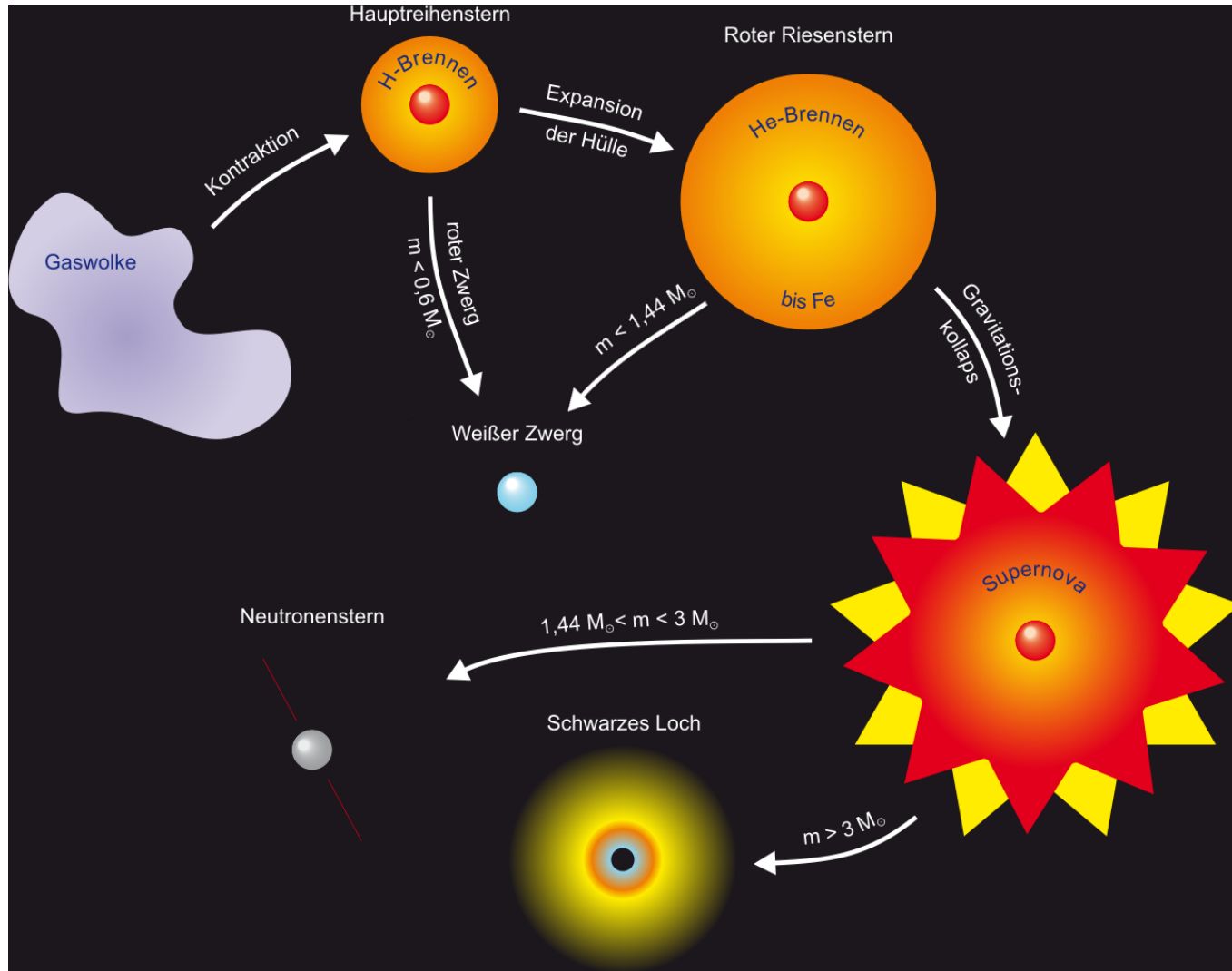


# Wiederholung Sternentwicklung



# stellare schwarze Löcher (Kollapsare)

- stellare schwarze Löcher vs. supermassereiche schwarze Löcher
- Historisches
- Eigenschaften schwarzer Löcher
- Suche nach stellaren schwarze Löchern
- Zusammenfassung Sternentwicklung



John Michell (1724 – 1793)

# Historisches (18. Jahrhundert)



Pierre-Simon Laplace (1749 – 1829)

- ◆ John Michell und Pierre-Simon Laplace schlagen im 18. Jh. das Konzept eines „dunklen Sterns“ vor
- ◆ newtonsches Gravitationsgesetz (1686)  
→ Fluchtgeschwindigkeit eines Himmelskörpers hängt von dessen Masse und Größe ab (Erde = 11,2 km/s)
- ◆ Kontraktion eines Himmelskörpers mit gegebener Masse → Erhöhung der Fluchtgeschwindigkeit
- ◆ Michell und Laplace spekulieren über kompakte Objekte mit Fluchtgeschwindigkeit > Lichtgeschwindigkeit

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$



John Wheeler (1911-2008)  
amerik. Physiker

# Historisches (20. Jahrhundert)

- ◆ Allgemeine Relativitätstheorie von Einstein 1915 → Es ist tatsächlich möglich, dass die Schwerkraft eines Himmelskörpers so stark wird, dass ihm nicht einmal mehr Licht entkommen kann.
- ◆ John Wheeler prägt 1967 den Begriff „Schwarzes Loch“
  - Schwarz → Objekt ist nicht sichtbar
  - Loch → ein fiktives Betreten dieses Bereiches lässt keine Rückkehr mehr zu



# Aufgabe 1

Lesen Sie im LB S. 140 f. das Kapitel „stellare schwarze Löcher“ und notieren Sie:

- ◆ Entstehung eines stellaren schwarzen Lochs
- ◆ Begriff + Formel Schwarzschildradius
- ◆ Methode zur Suche nach einem schwarzen Loch am Beispiel von Cygnus X-1

# Schwarzschildradius

Der **Schwarzschild-Radius**  $R_S$  ist die Größe eines Objektes einer bestimmten Masse ab dem die Photonen es nicht mehr verlassen können.

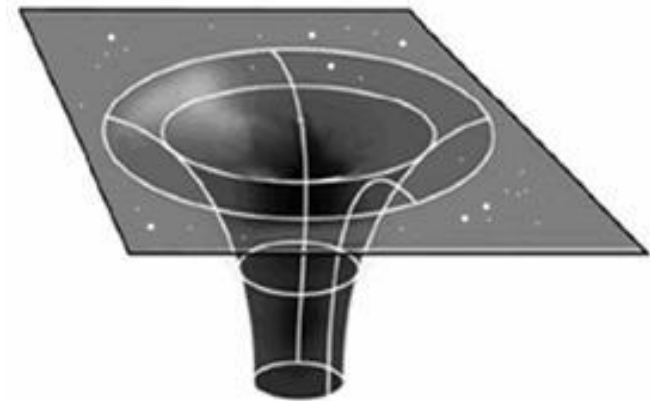
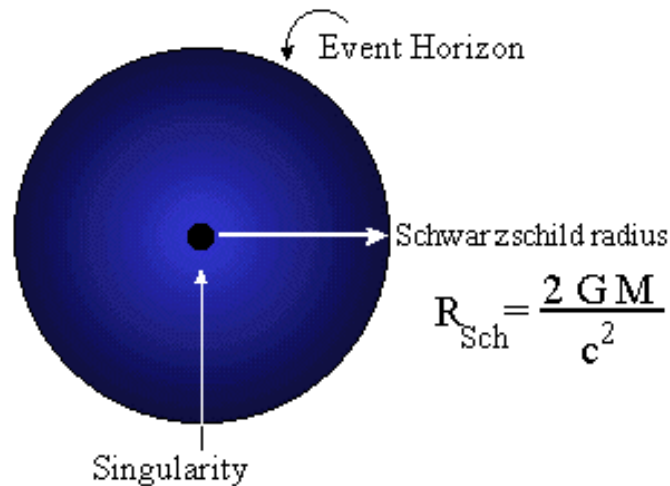
$$R_S = 1,5 * 10^{-27} \text{ m/kg} * M$$

$M$  – Masse des Objektes in kg

# Eigenschaften schwarzer Löcher

Schwarzschildradius,  
Ereignishorizont

Krümmung der Raumzeit



$R = \text{Schwarzschildradius} \rightarrow \text{Entweichgeschwindigkeit} = c$

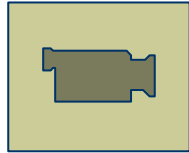
$R < \text{Schwarzschildradius} \rightarrow \text{Entweichgeschwindigkeit} > c$

$\rightarrow$  Schwarzschildradius definiert einen Ereignishorizont

Singularität: Materie ist in einem unendlich kleinen und dichten Punkt im Zentrum des schwarzen Lochs zusammengedrückt



Karl Schwarzschild  
(1873 – 1916)



Video 9:35 – 15:30

## Aufgabe 2 (Schwarzschildradius)

- ◆ Berechnen Sie den Schwarzschildradius eines schwarzen Lochs mit einer Masse von 10 Sonnenmassen.
- ◆ Es wird vermutet, dass sich während des Urknalls schwarze Minilöcher gebildet haben könnten (sogenannte primordiale Schwarze Löcher). Nehmen Sie an, ein solches Miniloch hätte die Masse der Erde. Berechnen Sie den zugehörigen Schwarzschildradius.



# Aufgabe 3

Berechnen Sie den Schwarzschildradius der Sonne.

$R \sim 3 \text{ km}$

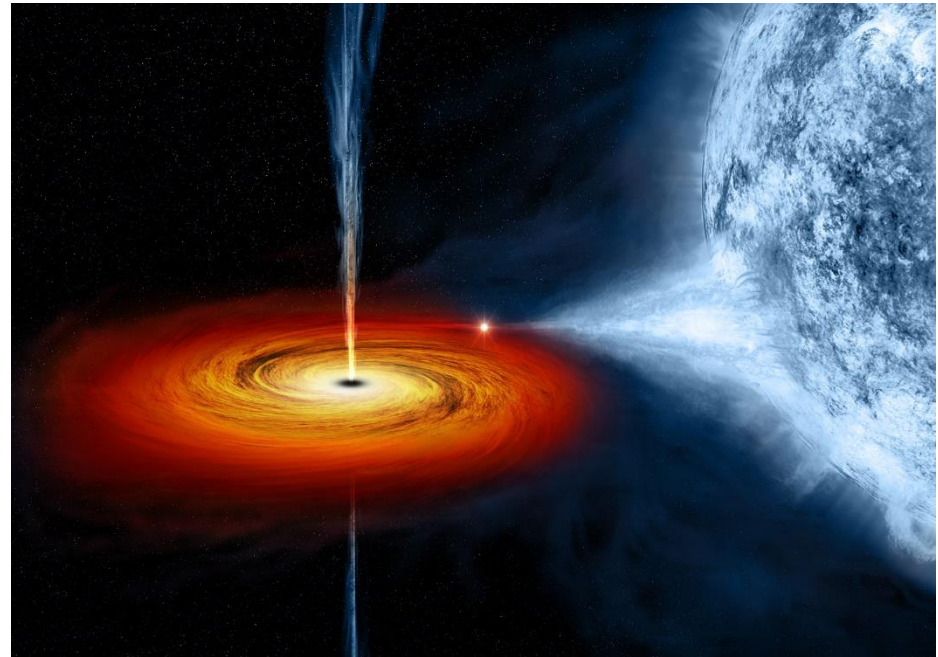
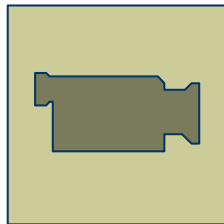
# Aufgabe 4

Berechnen Sie die Ausgangsmasse (in kg und Vielfachen der Sonnenmasse) eines kollabierenden Sterns, wenn das entstehende schwarze Loch einen Durchmesser von 20 km hat.

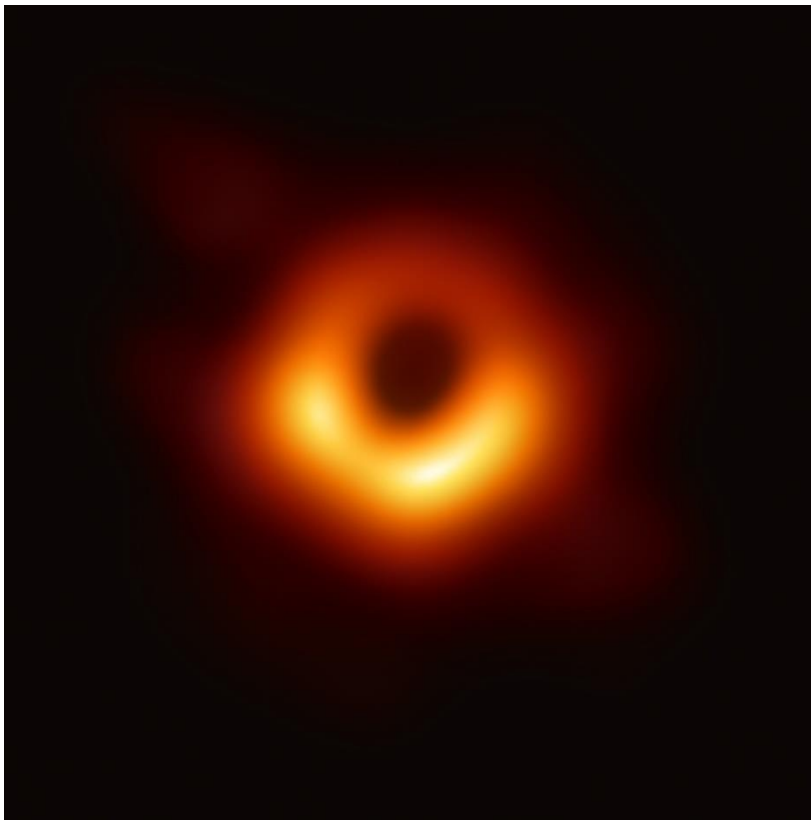
$$M = 6,77 * 10^{30} \text{ kg bzw. } M \sim 3,4 * M_{\text{Sonne}}$$

# Röntgendoppelstern Cygnus X1

- ◆ Schwarzes Loch von  $14,8 \pm 1$  Sonnenmassen
- ◆ Ereignishorizont mit schätzungsweise 26 Kilometern Radius



# Wie „sieht“ ein schwarzes Loch aus?



- ◆ Aufnahme des Event Horizon Telescope (Radioteleskope)
- ◆ Leuchtender Ring aus heißer Materie um das Schwarze Loch im Zentrum von M87
- ◆ Bild ist das Ergebnis einer Rekonstruktion von Messdaten, die acht Observatorien im April 2017 gesammelt haben

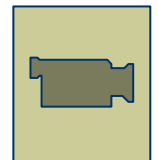


Foto 28:00 – 35:50

Von Event Horizon Telescope, <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>  
ESO Article, ESO TIF, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=77925953>

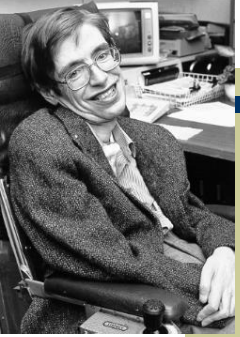


# No – hair – Theorem

maximaler Satz von Parametern:

$\{M, a, Q\}$

- ◆ J. Wheeler: „Schwarze Löcher haben keine Haare.“
- ◆ dt. „Keine – Haare – Theorem“ oder „Glatzensatz“
- ◆ Schwarze Löcher werden vollständig beschrieben durch Masse, elektr. Ladung und Drehimpuls
- ◆ Darüber hinaus haben Schwarze Löcher keine individuellen Kennzeichen (keine "Frisuren")
- ◆ alle anderen Informationen des Vorgängersterns gehen beim Kollaps unwiederbringlich verloren

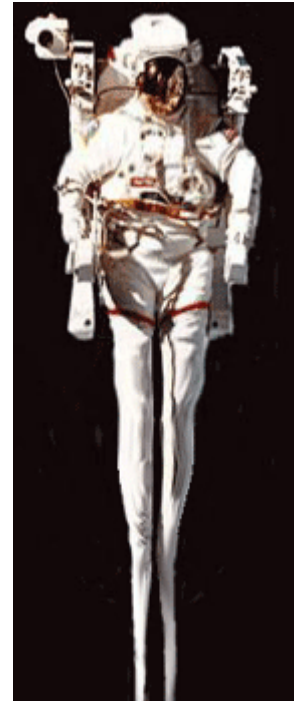


Video 15:50 – 19:50  
21:00 – 22:00

# Spaghetti - Effekt

Stephen Hawking (1942 - 2018)

- ◆ Begriff geprägt von Stephen Hawking
- ◆ Verformung von Objekten die eintritt, wenn ein Objekt in dafür ausreichende Nähe zu einem Schwarzen Loch gerät
- ◆ Ein fiktiver Astronaut wird auf Grund der Gezeitenkräfte wie ein Spaghetti in die Länge gezogen, da auf die Füße stärkere Kräfte wirken als auf seinen Kopf.



# Zusammenfassung Sternentwicklung

Geben Sie mithilfe der Grafiken auf den nächsten Folien und LB S. 148, Abb. 30.2 einen Überblick über den kosmischen Materiekreislauf / die Entwicklung eines Sterns. Gehen Sie dabei auch auf mögliche unterschiedliche Entwicklungswege in Abhängigkeit von der Masse des Sterns ein.

Kosmischer Materiekreislauf:

