

Sterne, Galaxien und das Universum

Teil 10: Schwarze Löcher

Peter Hauschildt

yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

5. Juli 2019

Schwarzes Loch mit Begleiter



Übersicht

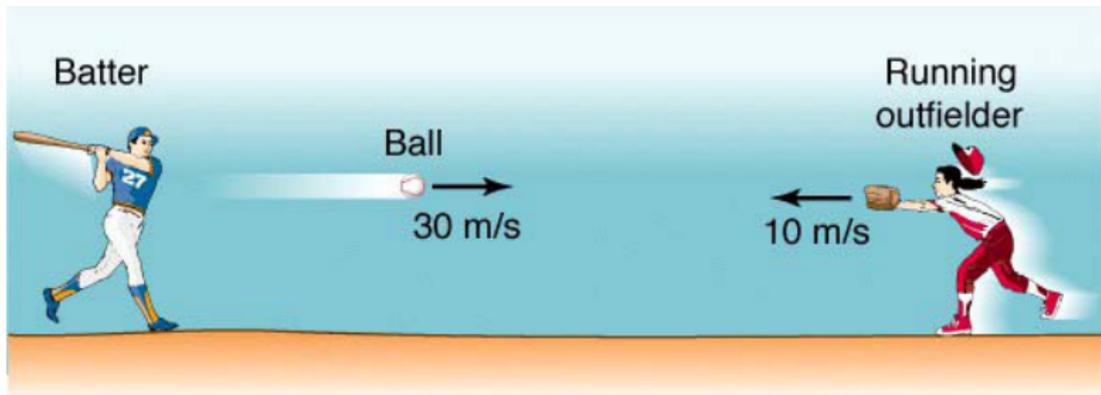
- ▶ ART
- ▶ Was ist ein Schwarzes Loch?
- ▶ Wie sucht man danach?

ART

- ▶ Newton →
 - ▶ Raum gleichförmig und unveränderbar
 - ▶ Zeit läuft überall gleich (für jeden)
 - ▶ Gravitation etc. erfüllen den Raum
- ▶ → Äthertheorie

ART

- ▶ Galileo →
- ▶ Geschwindigkeiten addieren sich

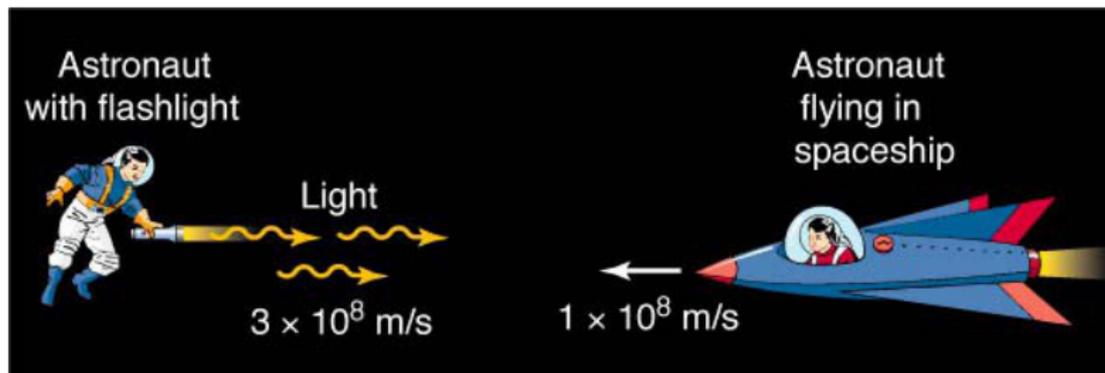


As seen by outfielder, ball is approaching her at
 $(30 \text{ m/s}) + (10 \text{ m/s}) = 40 \text{ m/s}$

a

ART

- ▶ Michelson Experiment → das gilt *nicht* für Licht!



Incorrect Newtonian description:

As seen by astronaut in spaceship, light is approaching her at $(3 \times 10^8 \text{ m/s}) + (1 \times 10^8 \text{ m/s}) = 4 \times 10^8 \text{ m/s}$

Correct Einsteinian description:

As seen by astronaut in spaceship, light is approaching her at $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

b

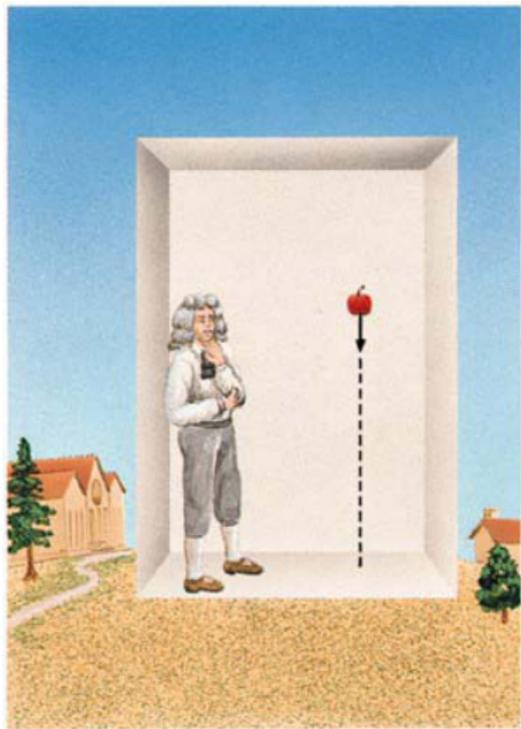
ART

- ▶ das bedeutet: Newton's Modell falsch.
- ▶ Lorentz, Einstein (1905) →
- ▶ Spezielle Relativitätstheorie:
 - ▶ alle Naturgesetze identisch für gleichförmig bewegte Beobachter
 - ▶ $c = \text{const. für alle}$
- ▶ → *Lorentztransformation*
- ▶ → Längenkontraktion (schnelle Objekte 'kürzer')
- ▶ → Zeitdilatation (schnelle Uhren gehen langsamer)
- ▶ → $E = mc^2$

ART

- ▶ dieses Modell nur gültig für konstante Geschwindigkeiten
- ▶ Einstein (1915) →
- ▶ Erweiterung auf beschleunigte Bezugssysteme

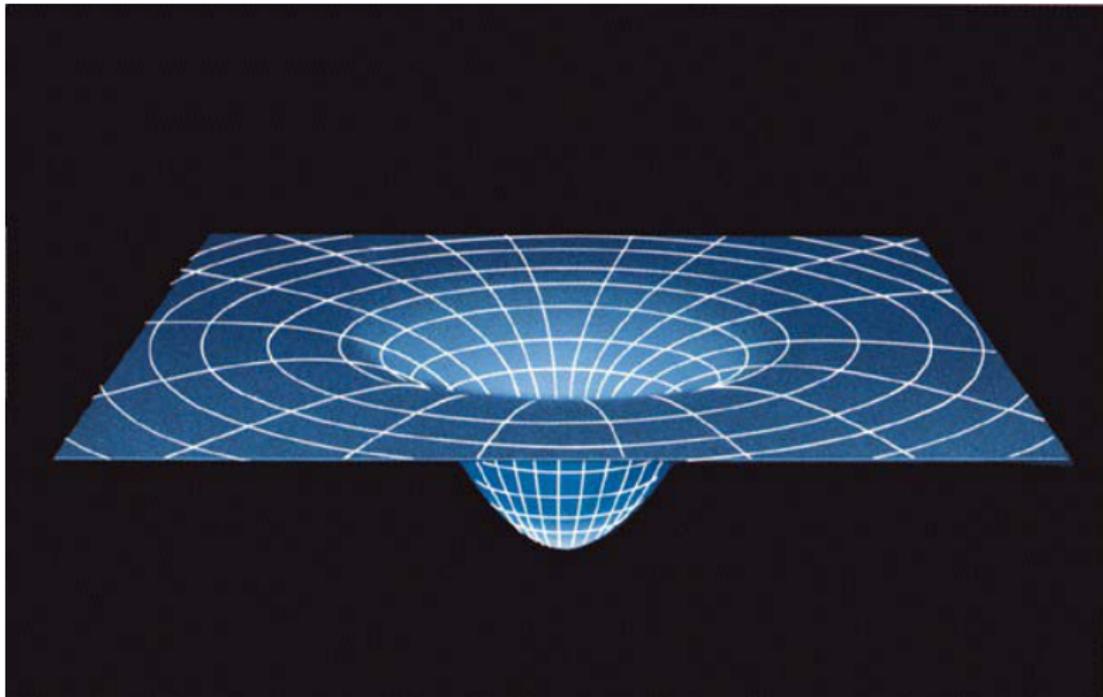
ART



ART

- ▶ → *Allgemeine Relativitätstheorie*
- ▶ *Äquivalenzprinzip:*
- ▶ Beschleunigungen nicht unterscheidbar von Gravitation
- ▶ führt zu einer geometrischen Beschreibung der *Raumzeit*
- ▶ Zeit und Raum sind ein Objekt, können nicht getrennt betrachtet werden
- ▶ Gravitation → Krümmung der Raumzeit

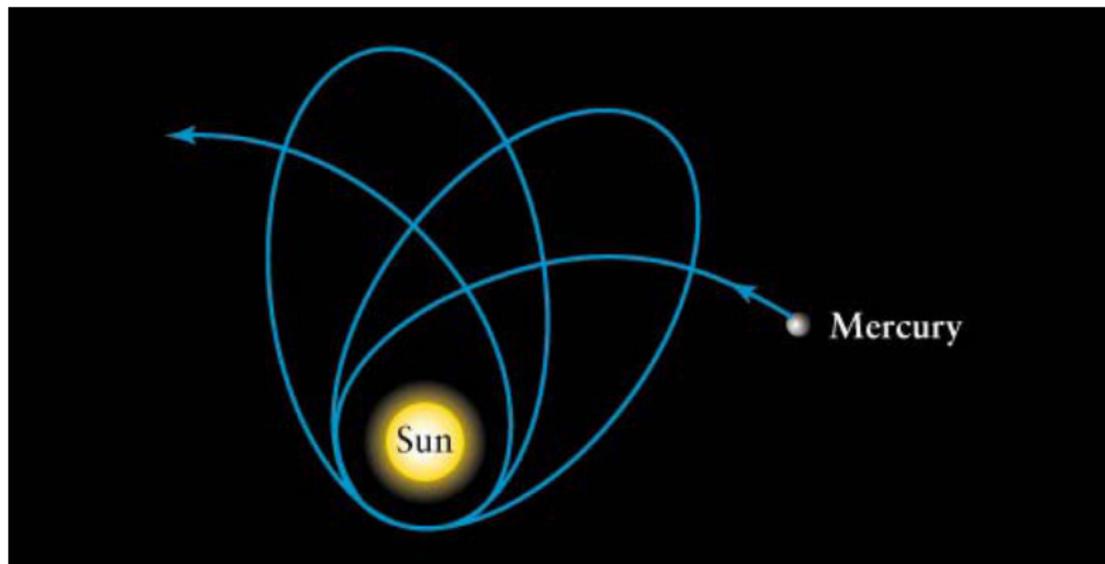
ART



ART

- ▶ Massen sagen der Raumzeit wie sie sich krümmen soll
- ▶ Raumzeit sagt den Massen wie sie sich bewegen sollen
- ▶ erster Test:
- ▶ Periheldrehung der Merkur Umlaufbahn
- ▶ 43 arcsec/100 yr ...
- ▶ nicht erklärbar mit Newton
- ▶ wird von ART korrekt berechenbar

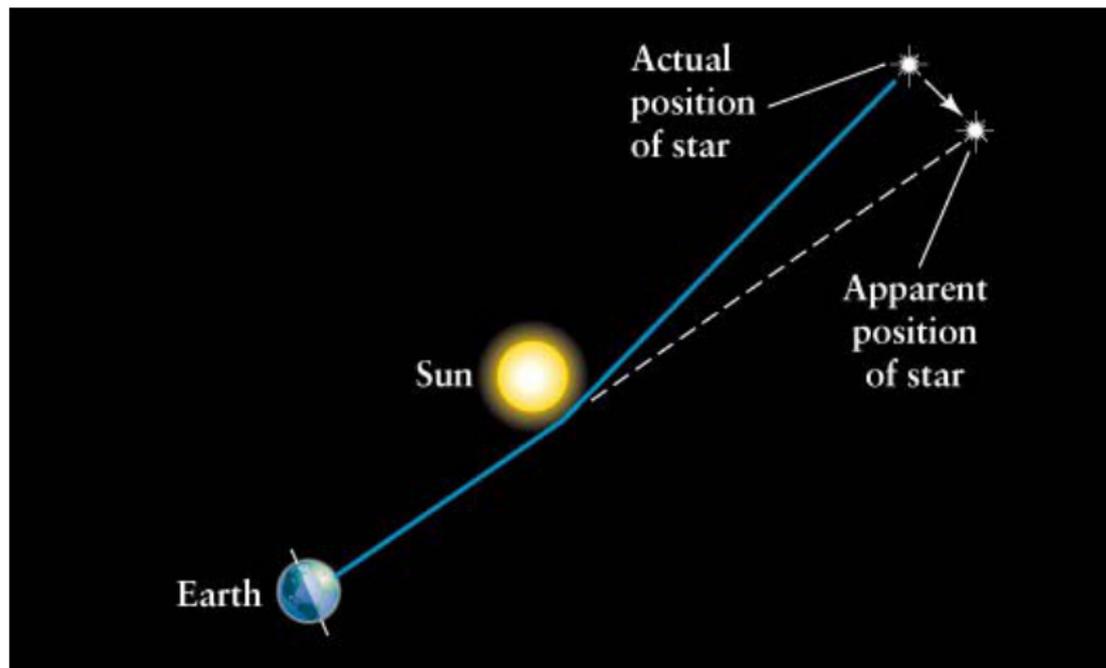
Periheldrehung Merkur



ART

- ▶ zweiter Test:
- ▶ Lichtablenkung durch Masse
- ▶ 1.75 arcsec am Rand der Sonne
- ▶ 1919 bei Sonnenfinsternis bestätigt

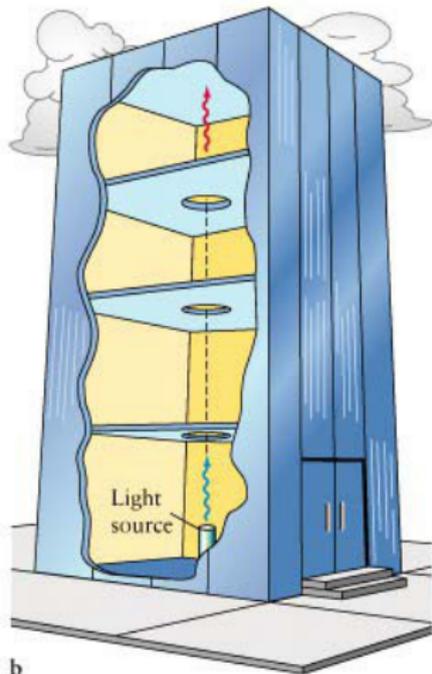
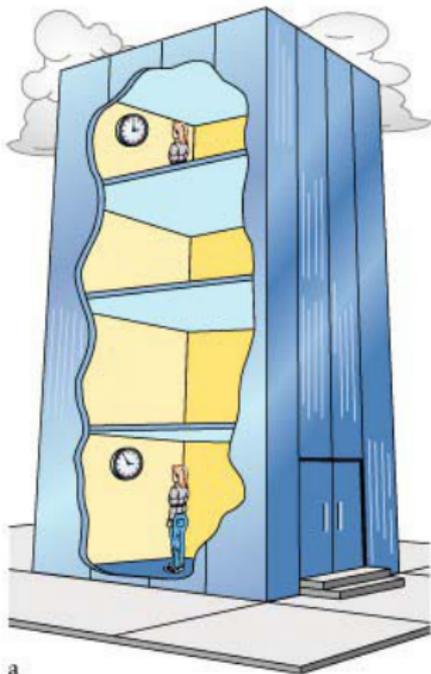
Lichtablenkung durch Sonne



ART

- ▶ dritter Test:
- ▶ Uhren laufen langsamer in hoher Raumzeitkrümmung
- ▶ Licht → kleine Uhren (Frequenzen)
- ▶ → Lichtfrequenzen verschieben sich nahe Massen
- ▶ das ist *kein* Doppler Effekt!

Lichtablenkung durch Sonne



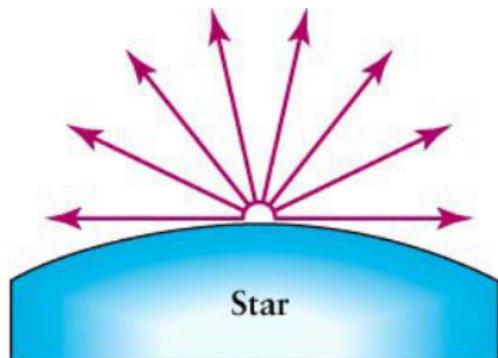
ART

- ▶ weitere Konsequenzen:
- ▶ Änderungen der Gravitation breiten sich mit c aus
- ▶ → Planeten senden *Gravitationswellen* aus
- ▶ dadurch ändert sich die Bahn (Energieverlust)
- ▶ sehr kleiner Effekt (nicht relevant für Sonnensystem)
- ▶ Gravitationswellen sehr schwach
- ▶ → sehr schwer nachzuweisen

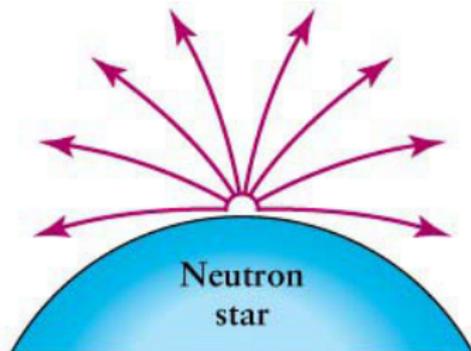
Schwarze Löcher

- ▶ Effekt von Massen auf Licht
- ▶ → Konzept des *Schwarzen Loches*
- ▶ Masse größer als Grenzmasse eines Neutronensterns
- ▶ → Schwerkraft bewirkt totalen Kollaps
- ▶ Raum und Zeit extrem verzerrt
- ▶ → es wird ein Loch in die Raum-Zeit gestanzt

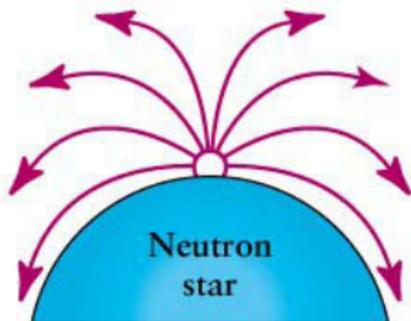
Schwarze Löcher



a



b

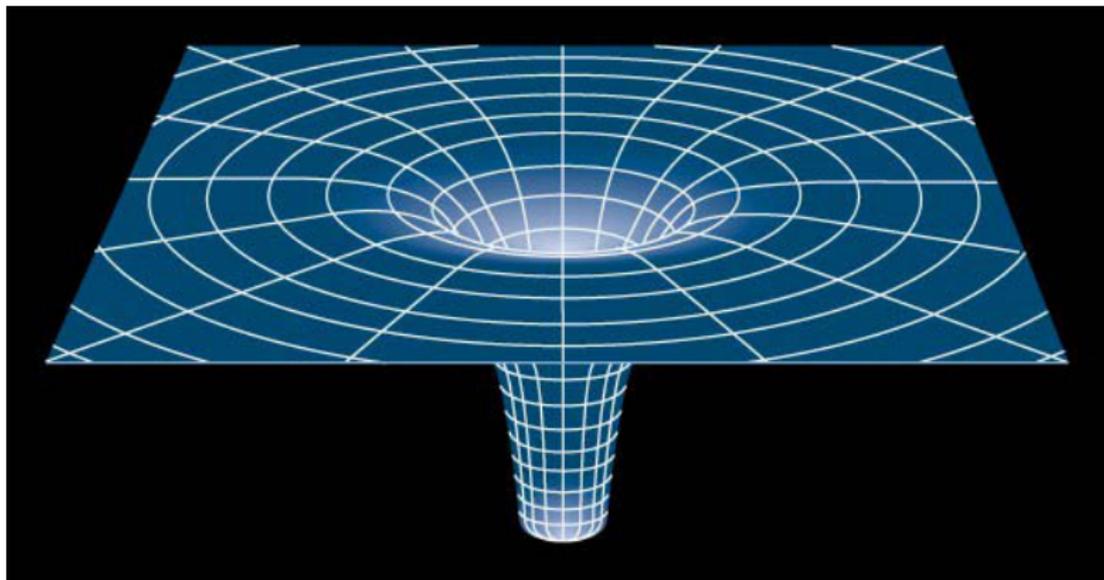


c



d

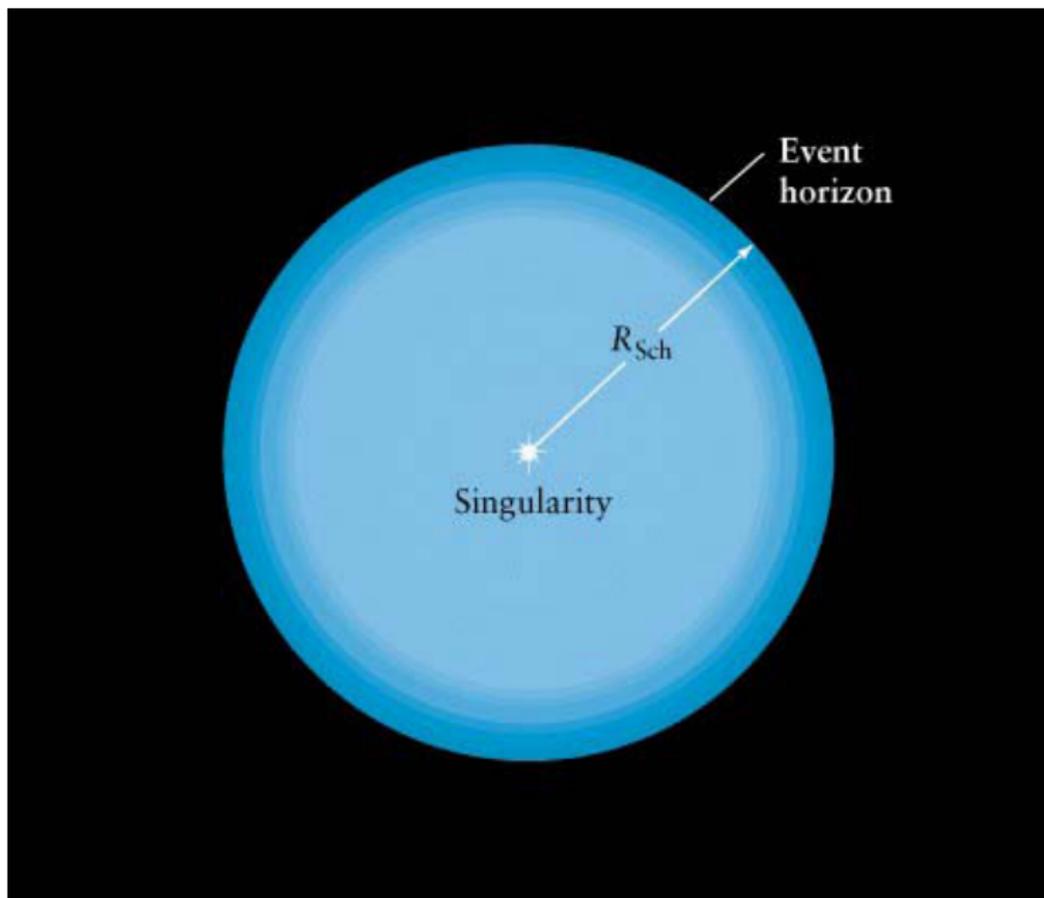
Schwarze Löcher



Schwarze Löcher

- ▶ innerhalb eines Schwarzes Loches sind Raum und Zeit vertauscht
- ▶ ein Beobachter könnte die Zeit beeinflussen aber nicht den Raum
- ▶ im Zentrum (der Singularität) verlieren Raum und Zeit ihre Identität
- ▶ die Singularität selber verhält sich unvorhersehbar
- ▶ das kann nicht beobachtet werden da aus dem Loch keine Information kommen kann

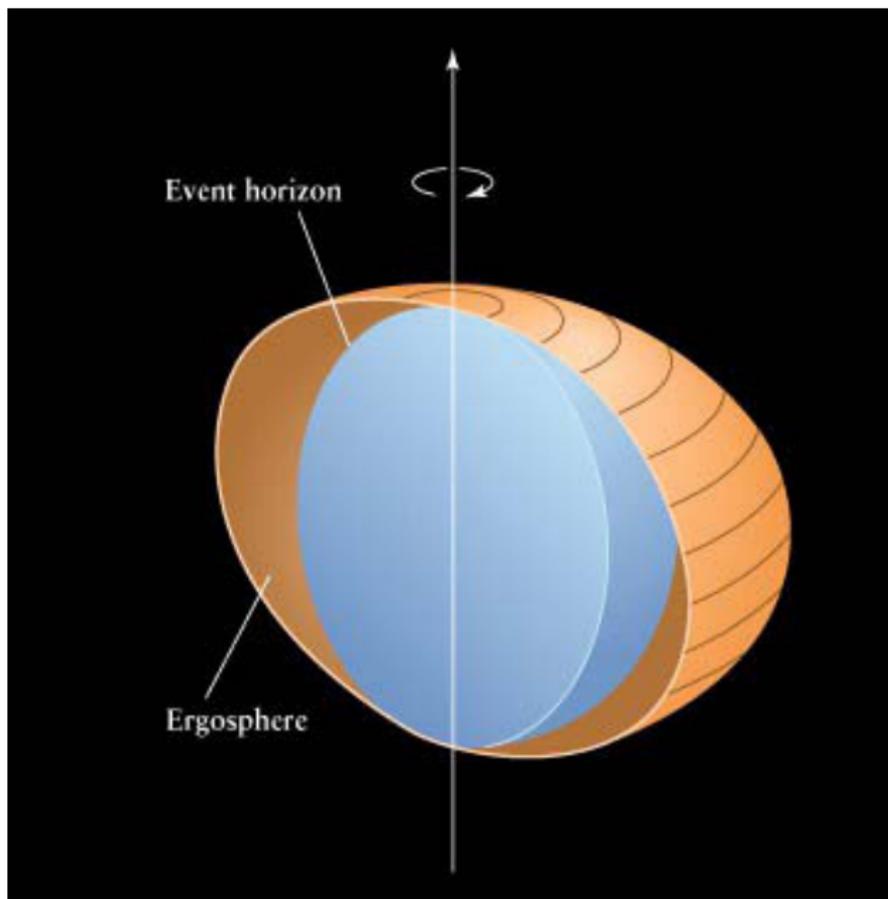
Schwarze Löcher



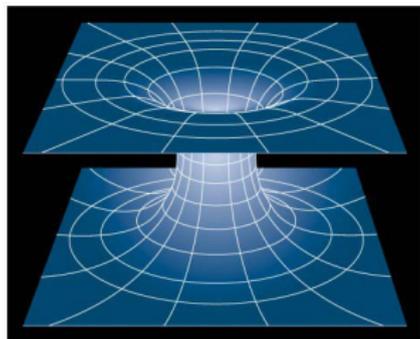
Schwarze Löcher

- ▶ ein Schwarzes Loch hat genau 3 Parameter:
 - ▶ Masse
 - ▶ elektrische Ladung
 - ▶ Drehimpuls
- ▶ Rotation → Raumzeit wird 'mitgeschleift'
- ▶ *frame dragging*
- ▶ *Ergoshäre*
- ▶ → keine stationären Objekte

Schwarze Löcher

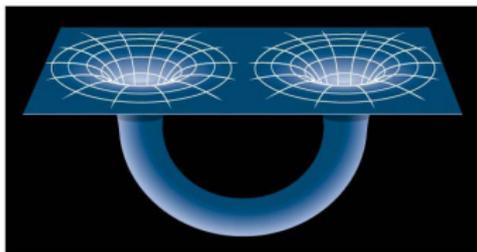


Schwarze Löcher



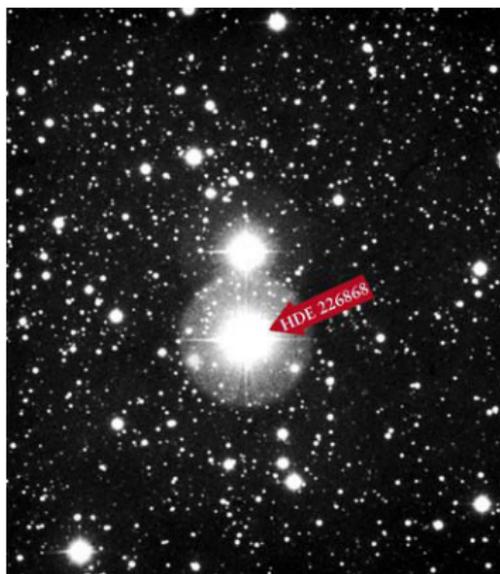
- ▶ 1930's:
- ▶ Einstein-Rosen Brücke:
- ▶ Schwarze Löcher können verbunden sein
- ▶ Verbindung zu einem anderen Universum

Schwarze Löcher



- ▶ Alternativ:
 - ▶ Wurmloch
 - ▶ → Verbindung innerhalb des Universums
-
- ▶ instabil: bricht zusammen wenn man es verwenden will
 - ▶ Stabilisierung → Anti-Gravitation ($M < 0$)
 - ▶ kann auch als Zeitmaschine funktionieren
 - ▶ → Verletzung der Kausalität . . .

Detektion



- ▶ Cyg X-1: starke Röntgenquelle
- ▶ Position von B0 Überriesen, $30 M_{\odot}$
- ▶ der ist dafür zu kalt (31000 K)
- ▶ spektroskopischer Doppelstern
- ▶ → Begleiter mit $7 M_{\odot}$
- ▶ → stellares Schwarzes Loch?
- ▶ Röntgen durch Akkretion in das Loch!

Cyg X-1

