

## *relativ schwarz*

ein Versuch ein Annäherung an schwarze Löcher  
durch Verständnis von Relativitätstheorie und Gravitation

- i. Spezielle Relativitätstheorie
- ii. Allgemeine Relativitätstheorie
- iii. Schwarze Löcher

*Teil 1*

# Spezielle Relativitätstheorie

## *Leseempfehlung*

- x Albert Einstein: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*
- x es handelt sich um ein kommentiertes Wikibook
- x erste Veröffentlichung Einsteins zur speziellen Relativitätstheorie
- x mathematisch relativ wenig anspruchsvoll, sprachlich nicht immer exakt, aufgrund zu heutiger beinahe genormter wissenschaftlicher Sprache nicht leicht zu verstehen
- x unsere ersten Schritte anhand den Themen dieser Veröffentlichung

## Motivation

- X Motivation der Relativitätstheorie aus Problemen im Verständnis der Mechanik und der Elektrodynamik
- X Maxwell'sche Feldgleichungen waren bereits *relativistisch invariant* formuliert (in korrekter relativistischer Form)
- X diese beschreiben die elektrische und die magnetische Feldstärke (und damit die Kräfte), die sich aus dem skalaren und dem vektoriellen Potential (den Quellen, d.h. den elektrischen und magnetischen Ladungen) und ihren Veränderungen (d.h. ihren Bewegungen) ergeben
- X Anm.: es gibt keine einzelnen magnetischen Ladungen (magnetische Monopole), sondern nur magnetische Dipole, aber das ist eine andere Geschichte ...

## Maxwellsche Gleichungen

Integrale Form	Differentielle Form	Bedeutung auf <i>physikalisch</i> :-)
$\oint_o \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$	$\operatorname{div} \vec{\mathbf{B}} = 0$	Das magnetische Feld ist quellenfrei.
$\oint_o \vec{\mathbf{D}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = Q$	$\operatorname{div} \vec{\mathbf{D}} = \rho$	Der Fluß durch eine bestimmte Oberfläche ist gleich der eingeschlossenen Ladung.
$\oint_s \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$	$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$	Zeitlich sich ändernde Magnetfelder erzeugen ein elektrisches Feld. (Faradaysches Induktionsgesetz)
$\oint_s \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{\mathbf{D}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} + I$	$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}} = \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} + \vec{\mathbf{j}}$	Zeitlich sich ändernde elektrische Felder erzeugen ein Magnetfeld. (Amperesches Gesetz mit Maxwell'scher Ergänzung)

Zusammenhang zwischen elektrischer und magnetischer Feldstärke und den entsprechenden Quellen (d.h. Strömen und Ladungen) oder den entsprechenden Potentialen

## *Der Äther*

- X Frage der Existenz des Äthers
- X ist das postulierte Ausbreitungsmedium der elektromagnetischen Wellen
- X großer Disput
- X viele teils skurrile postulierte Eigenschaften, in sich widersprüchlich
- X seine Existenz wurde als unnötig erkannt und ihm damit abgesprochen

## *spezielle Relativitätstheorie*

- X Raum und Zeit
- X keine beschleunigten Bewegungen
- X damit: keine beschleunigten Massen
- X Äquivalenz von Masse und Energie (auch gültig für chemische und biologische Vorgänge, dort aber nur geringe Massendifferenzen)
- X keine Gravitation

## *Relativitätsprinzip und Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*

- X Prinzip der Relativität: Gleichartigkeit der physikalischen Gesetze und Vorgänge in ausgezeichneten Systemen (Intertialsysteme), klassisch auch gültig
- X Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, unabhängig von der Geschwindigkeit des Senders als auch der des Empfängers (nicht mit klassischer Physik vereinbar)
- X sorgt u.a. für die Erhaltung der Kausalität
- X Definition der Gleichzeitigkeit...
- X ... über die Synchronität von Uhren. Keineswegs trivial!
- X Darstellung mittels Zeit- Ortsdiagrammen, sog. Minkowskidiagrammen



## *Inertialsysteme*

- X Existenz von ausgezeichneten Inertialsystemen
- X in ihnen gelten die gleichen physikalischen Gesetze
- X relativ gegeneinander nicht beschleunigt
- X gleichförmige Bewegung relativ möglich
  
- X in anderen (beschleunigten) Systemen wirken (messbare, spürbare) Kräfte
- X Unbehagen bei Mach: Mach'sches Prinzip
- X Beispiel: rotierender Wassereimer

## *Folgerung*

- X keine absoluten Geschwindigkeiten feststellbar
- X Michelson-Morley-Experiment
- X zur Feststellung der Relativgeschwindigkeit der Erde im Äther
- X keine Geschwindigkeit feststellbar
- X Äther bedeutungslos
- X elektromagnetische Wellen haben kein Ausbreitungsmedium
- X (Schall benötigt Ausbreitungsmedium, dies muss *nicht* Luft sein)

## *Gleichzeitigkeit*

- ✗ Gleichzeitigkeit von Ereignissen hängt vom Bezugssystem ab
- ✗ Beispiel: Bahnsteig + Zug + Blitz, der an beiden Enden des Zuges einschlägt

## *Lorentzkontraktion*

- ✗ Länge eines bewegten Stabes erscheint verkürzt
- ✗ -> Lorentzkontraktion
- ✗ Scheinen – Sein – Beobachten
- ✗ es wirken dennoch keine Kräfte auf den Stab
- ✗ im System des Stabes ist keine Kontraktion festzustellen

## *Zeitdilatation*

- X als weitere Folge ist auch die Gleichzeitigkeit von Ereignissen systemabhängig
- X Uhren laufen nicht in allen Systemen synchron
- X bewegte Uhren gehen langsamer
- X -> Zeitdilatation (-dehnung)
  
- X daraus ergibt sich das Zwillingsparadoxon
- X kein Paradoxon im eigentlichen Sinne
- X Berücksichtigung der Beschleunigungen und Verzögerungen ergibt korrekte Vorhersagen

## *Minkowski Metrik*

- ✗ Zeit als Dimension, ähnlich einer räumlichen Dimension
- ✗ Komponente der Metrik hat anderes Vorzeichen
- ✗ Beispiel:
  - ✗ Abstand im Raum:  $\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = r^2$
  - ✗ Abstand zweier Ereignisse in der Raumzeit:  $\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2 = -s^2$
  - ✗ Koordinatentransformation ähnlich eine Drehung im vierdimensionalen Raum. Einzig die Zeit wird in Folge der Metrik 'falsch' gedreht

## *4er - Vektoren*

- ✗  $x, y, z$  und  $t$  bilden ein nützliches mathematisches Objekt ( $x/y/z/ct$ )
- ✗ Minkowski Metrik
- ✗ Ebenso können elektrische und magnetische Feldstärke zu einem Objekt zusammengefasst werden, dem Feldstärketensor
- ✗ Tensor ist ein math. Objekt, das sich unter Drehungen im (nunmehr vierdimensionalen) Raum auf eine bestimmte Art verhält
- ✗ Vektor ist ein spezieller Tensor
- ✗ Transformationen für den Übergang zwischen Intertailsystemen bekommen so die einfachst mögliche Form

## *Lorentztransformationen*

- X Transformationsgleichungen für den Übergang zwischen den Koordinatensystemen

gebräuchlich für:

- X räumliche Koordinaten
- X Zeit
- X Geschwindigkeiten
- X Feldstärken -> Kräfte
- X skalares und vektoriell Potential ->
- X Quellen (Ladungen und Ströme) -> Ladungen und Magnete



## *Folgen*

- X relativistischer Dopplereffekt
- X Abberation (Vergleich: geneigtes Halten eines Regenschirmes)
- X beschleunigte elektrische Ladungen strahlen elektromagnetische Wellen ab (Prinzip des Sendens und Empfangens, in Verwendung für Radio, Fernsehen, Handy, Funk, ...)
- X 'dynamische' Masse: Masse nimmt für ruhenden Beobachter zu
- X Energie wird somit bei Bewegung größer – 'dynamische' Energie

## *Kritik*

- ✗ einige Begriffe und Vorstellungen haben sich geändert

Beispiel:

- ✗ transversale und longitudinale Masse
- ✗ heute: dynamische Masse
- ✗ Trägheit einer Masse nimmt mit ihrer Geschwindigkeit zu
- ✗ Aufrechterhaltung der Äquivalenz von träger und schwerer Masse

Dies ist weniger eine inhaltliche Kritik, sondern mehr eine Frage der Interpretation der Schlussfolgerungen.

## *Teil 2*

# Allgemeine Relativitätstheorie

## *Merkmale*

- X nun werden auch beschleunigte Körper betrachtet
- X Masse
- X Krümmung der Raumzeit
- X Körper bewegen sich entlang von Geodäten

## *Gravitation*

- X Geschwindigkeit von Uhren hängt von ihrer Lage ab
- X Geschwindigkeit der Zeit hängt von der Lage ab (physikalische, chemische, biologische Vorgänge)
- X muss bei GPS berücksichtigt werden

Anmerkung:

- X für Genauigkeit der Bahn beim Mondflug keine Relativitätstheorie nötig
- X Bahnen der Elektronen im Fernseher müssen relativistisch gerechnet werden

## *Geometrie*

- X Verabschiedung vom Euklidischen Raum
- X gekrümmter Raum
- X mathematisch: Differentialgeometrie

Vergleich: Kugelgeometrie

- X dort aber: konstante Krümmung
- X hier: Krümmung in jedem Raumpunkt prinzipiell unabhängig von anderen möglich

## *Materie*

- X Materie bewirkt Krümmung des Raumes
- X Körper bewegen sich entlang der Geodäten (Gravitationskraft löst sich in Krümmung des Raumes auf)
- X alle Energieformen krümmen den Raum (etwa auch Wellen)
- X Äquivalenzprinzip: jedes Schwerefeld lässt sich durch geeignete Raumkrümmung ersetzen
- X Äquivalenz von träger und schwerer Masse

## *Schwerefeld*

- X Eine Bewegung im Schwerefeld ist in einem geschlossenen System nicht feststellbar, solange das Feld ausreichend homogen ist und somit keine Gezeitenkräfte auftreten
- X Rotverschiebung von Licht im Schwerefeld
- X schiefer Wurf auch nur eine Bewegung entlang Geodäten



## *Berücksichtigung*

- X bei kosmologischen Berechnungen (große Massen, große Geschwindigkeiten)
- X schwarze Löcher
- X Gravitationswellen (analog elektromagnetischen Wellen)
- X Bestätigung durch Myonen in der Höhenstrahlung

## *Struktur des Weltraumes*

- X Raum benötigt Masse
- X Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen (Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Raumes)
- X Expansion (und Kontraktion) des Raumes als Lösung der Feldgleichungen
- X konstanter Raum keine stabile Lösung

## *Riemannsche Geometrie*

- ✗ löst Euklidische Geometrie ab
- ✗ Einsteinsche Feldgleichungen beschreiben Zusammenhang zwischen dem Krümmungstensor, dem Metriktensor und dem Energie-Impulstensor
- ✗ d.h. Zusammenhang zwischen Masse (Energie), Raumkrümmung und Maß des Raumes

$$R_{ij} - \frac{g_{ik} R}{2} + \Lambda g_{ik} = 8 \Pi \frac{G}{c^4} T_{ik}$$

- ✗  $R_{ij}$  ... Krümmungstensor  $\rightarrow$   $R$  ... Krümmungsskalar
- $g_{ij}$  ... metrischer Tensor,  $T_{ij}$  ... Energie - Impuls - Tensor
- $\Lambda$  ... kosmologische Konstante,  $\Pi$  ... Kreiskonstante,  $c$  ... Lichtgeschwindigkeit
- $G$  ... Gravitationskonstante

## *Metrik*

- ✗ Metriktensor bezeichnet Metrik
- ✗ Metrik gibt das Maß des Raumes an
- ✗ Beispiel:  $F = \text{Länge} * \text{Breite}$  in rechtwinkligen Koordinaten beim Rechteck  
aber  $F \neq \text{Radius} * \text{Winkel}$  in Polarkoordinaten beim Kreis  
sondern ...
- ✗ noch schlimmer: Kreis auf gekrümmter Fläche:  $F = M * r^2 * \pi$   
mit  $M$  ... Metrik

## *Koordinatensysteme*

- X das Äquivalenzprinzip wird auf beliebige Koordinatensysteme ausgeweitet
- X z.B. bewirkt die rasche Drehung eines Beobachters die vielfache Lichtgeschwindigkeit eines Sterns
- X die Formulierung der Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit muss daher genau durchgeführt werden

## *Höherdimensionale Räume*

- ✗ auch höherdimensionale Räume denkbar
- ✗ 6, **10** oder 23 Dimensionen als Kandidaten
- ✗ nicht beobachtete Dimensionen eingerollt auf Plancklänge ( $10^{-43}$  Meter)
- ✗ Stringtheorie

## *Bestätigungen*

- X Periheldrehung des Merkur
- X Rotverschiebung des Lichts im Gravitationsfeld (Nachweis 1919 bei Sonnenfinsternis, genauere Messung beim Licht von Quasaren, Mössbauer-Effekt - Emission und anschließende Absorption von Licht)
- X Shapiro - Test (Radarecho der Venus, das nahe an der Sonne vorüber geht)
- X Gangunterschied von Atomuhren in Flugzeugen 1971
- X Äquivalenzprinzip (träge - schwere Masse) Shapiro, Laserreflexion bei Apollomission 1976 vom Mond
- X Gravitationswellen von Pulsaren
- X Existenz von schwarzen Löchern

## *gesellschaftliche Auswirkungen*

- X Teilweises Verbot der Relativitätstheorie im 3.Reich
- X für Entwicklung von Waffen Verwendung der Relativitätstheorie zugelassen
- X weitreichende Auswirkungen auf Philosophie -> Kant



## *Wünsche*

- X Vereinheitlichung von Quantenelektrodynamik und Relativitätstheorie
- X Quantenelektrodynamik = Vereinheitlichung von Elektrodynamik und Quantenmechanik
- X Relativitätstheorie = Vereinheitlichung und Kinetik und Gravitation
  
- X Quantenelektrodynamik vereinheitlicht starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung
- X Relativitätstheorie beinhaltet Gravitation

## *Alternativtheorien*

- X viele Alternativtheorien
- X große experimentelle Bestätigung
- X Argument des 'gesunden Menschenverstandes'
- X Probleme, etwa bei Bahnen der Voyager-Sonden, können aber auch andere Ursachen haben
- X vielleicht eine Adaption der Theorie zur Vereinheitlichung mit der Quantenelektrodynamik
- X wird aber zumindest ein weiteres Korrespondenzprinzip gültig sein

## *Folgerungen*

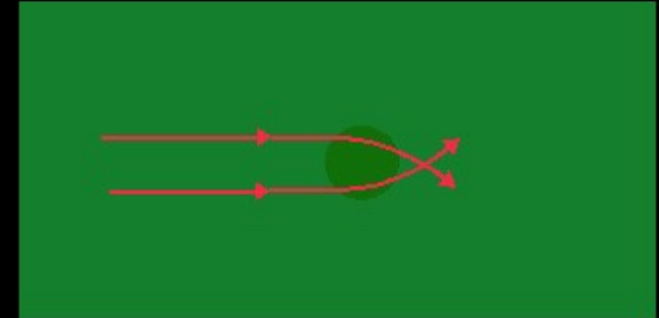
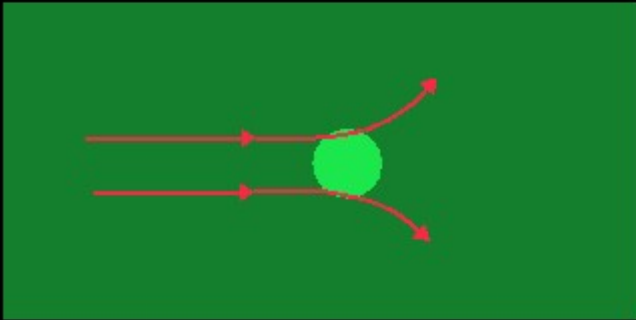
- X Existenz von schwarzen Löchern als Lösungen der Feldgleichungen bei Verwendung der Schwarzschildmetrik
- X Vergleich: Fluchtgeschwindigkeit eines Satelliten
- X es treten keinerlei mysteriöse Kräfte oder Phänomene auf
  
- X zwei Arten von Singularitäten:
  - 'unecht' beim Schwarzschildradius
  - 'echt' im Zentrum, die eigentlich Singularität

## *Teil 3*

# Schwarze Löcher

- ✗ bislang vorgetragene Inhalte über schwarze Löcher werden in dieser Präsentation nicht wiederholt, siehe hierzu: Skriptum zum 4.Tag

# Krümmung



## Billardtisch mit Hügel

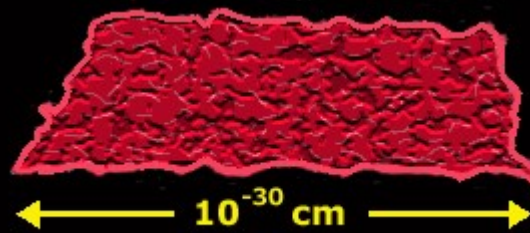
alle Bilder: Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>

## Billardtisch mit Grube

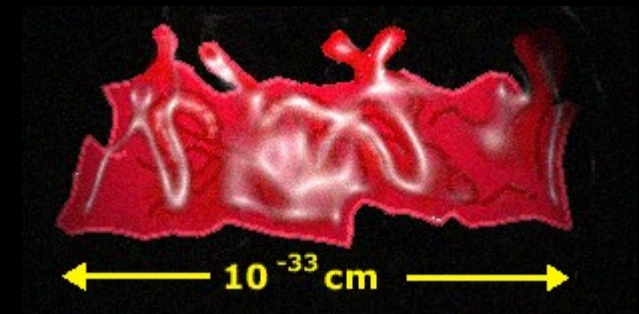


Positive Krümmung    Ohne Krümmung    Negative Krümmung

## *Kräuselung der Raumzeit*

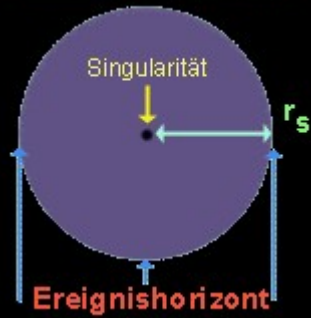


alle Bilder: Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>

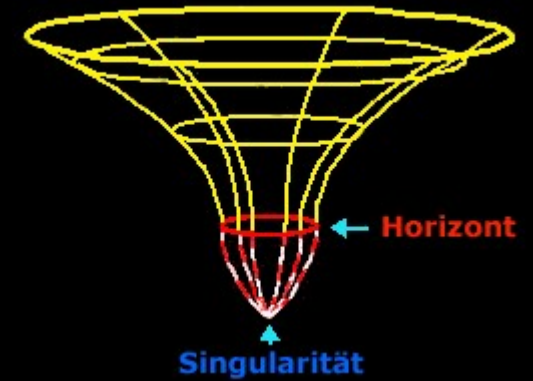
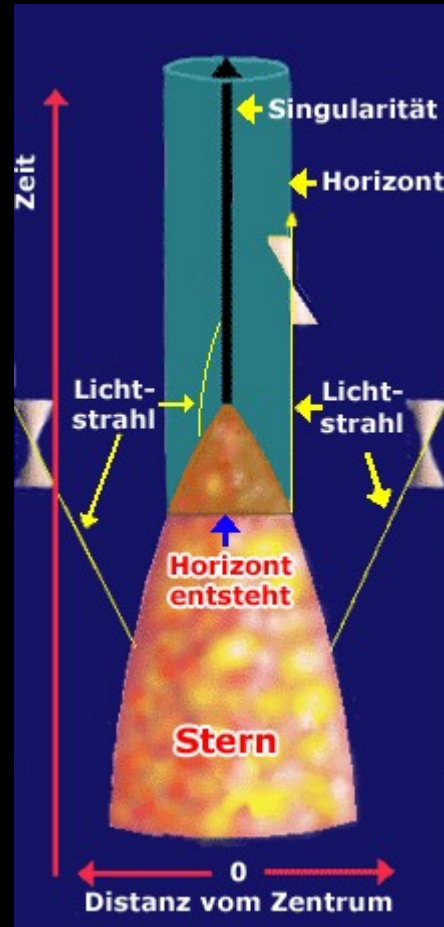


# Ereignishorizont

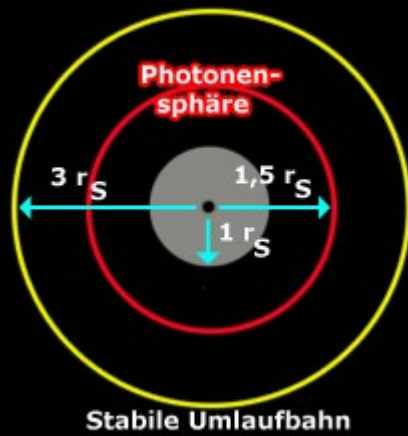
Schwarzschildradius



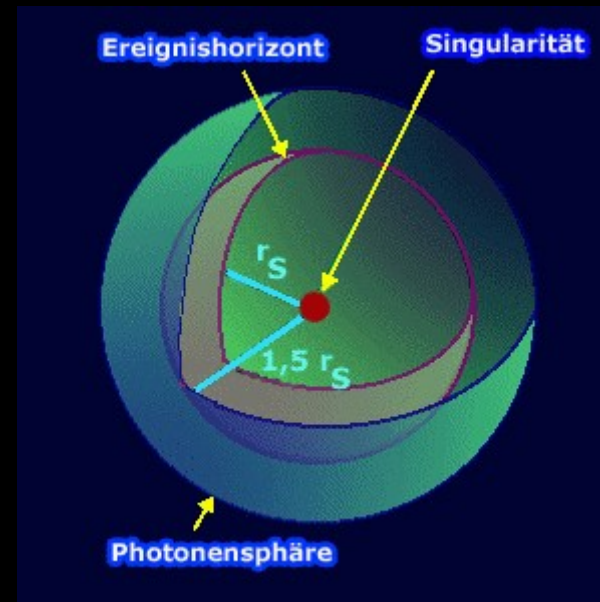
alle Bilder: Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/lindex.html>



# Photosphäre



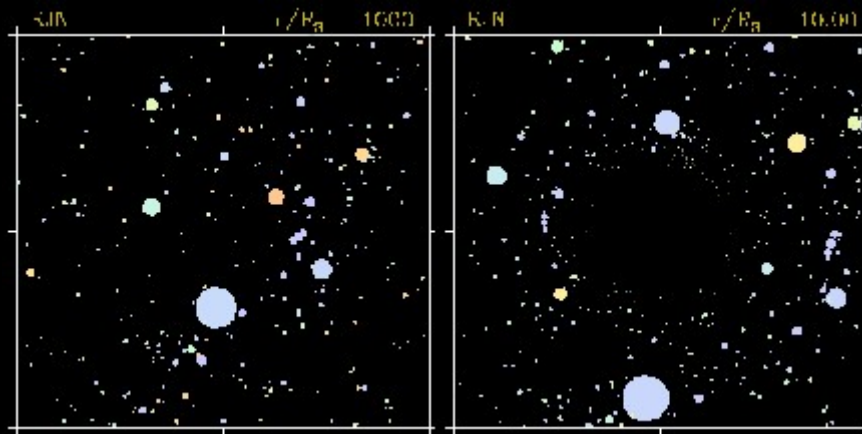
Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>



Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>



## Blick beim Flug in ein schwarzes Loch



Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>

große Entfernung

kleine Entfernung



Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>

auch das Licht von hinten  
 kommt nun bereits von vorne

## Wurmloch



Reise in eine anderes  
Universum durch ein  
Wurmloch

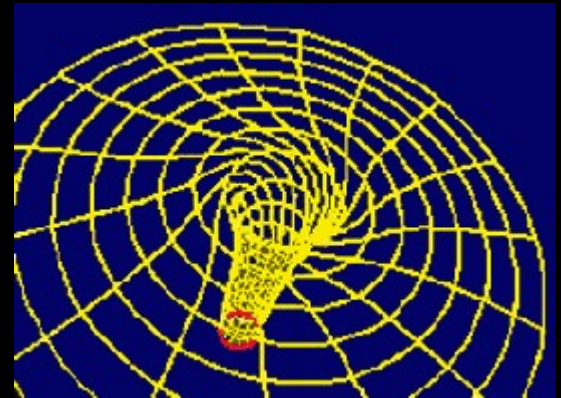
Quelle: Abenteuer Universum, die Macht  
der Gravitation,  
[http://abenteuer-  
universum.vol4u.de/index.html](http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html)

## Arten

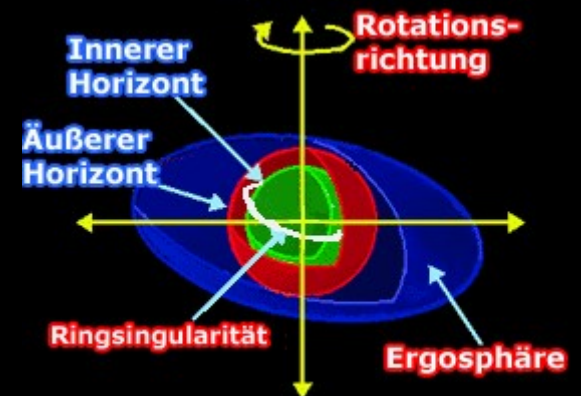
- X sie sind durch Masse, Ladung und Drehimpuls eindeutig gekennzeichnet (Wheeler)
- X auch physikalisch mehrere Arten von schwarzen Löchern:
- X 'normale' Schwarzschild - Löcher; ungeladen, kugelsymmetrisch
- X schwarzes Loch nach Reissner-Nordström: elektrisch geladen, kugelsymmetrisch
- X Kerrsches Loch: rotiert
- X Kerr-Newman-Loch: rotiert und geladen

## Kerrsche Löcher

- X Loch krümmt Raumzeit rund um sich mit (machen im Prinzip auch kleine Massen)
- X Maximal Kerr: Materie kann nicht mehr in das Loch fallen und wird weggeschleudert
- X Zentrifugalkraft hebt Schwerkraft auf, dennoch:
- X Kosmische Zensur: nackte Singularität kann nicht beobachtet werden
- X Ergosphäre: abgeplatteter ellipsoid, keine statisch ruhige Lage mehr möglich.  
Äußere Grenze = statische Grenze
- X inner Horizont = 2.Singularität, Bedeutung unklar

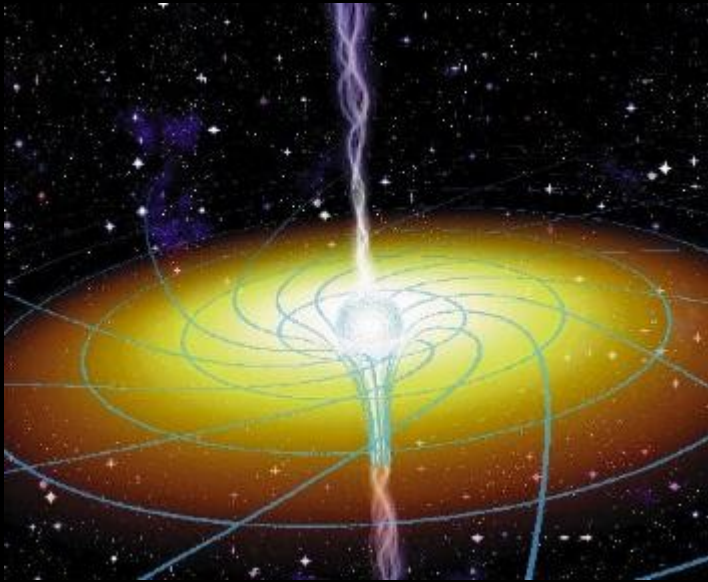


Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/lindex.html>



Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/lindex.html>

## *Raumzeitkrümmung*



Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/lindex.html>

Durchflug theoretisch denkbar (kein  
physikalischer Ereignishorizont)

Teilchen werden vielleicht Tachonen  
(fliegen mit Überlichtgeschwindigkeit,  
rückwärts in der Zeit)

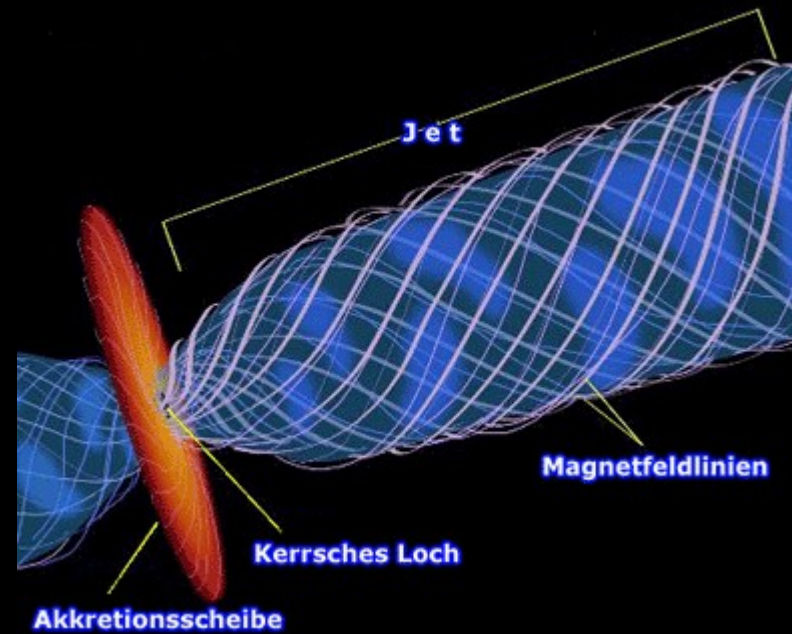
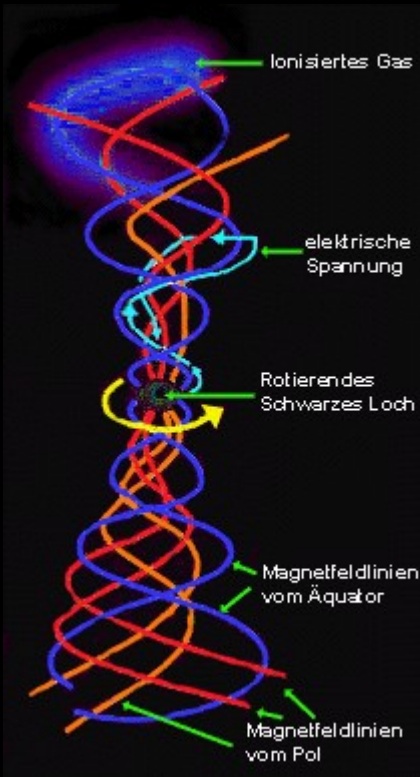


Verzerrung des Loches  
durch Rotation

# Akkretionsscheiben

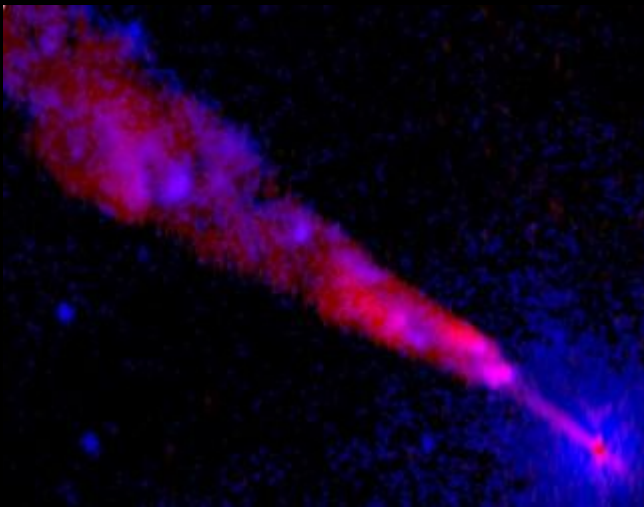
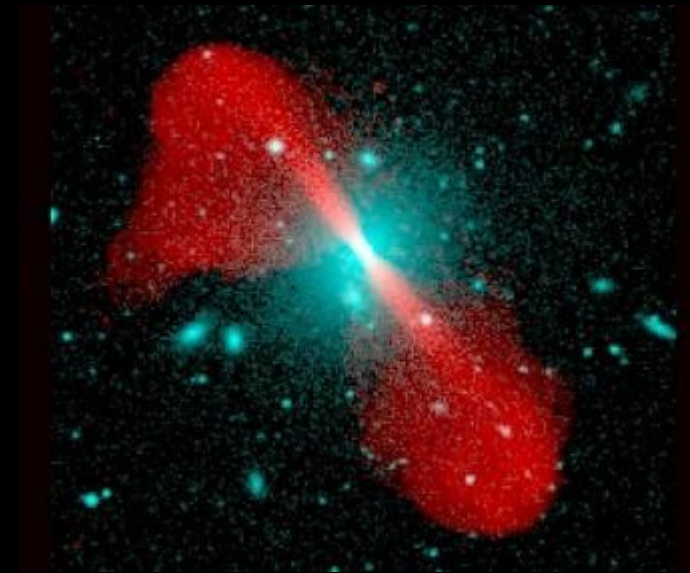
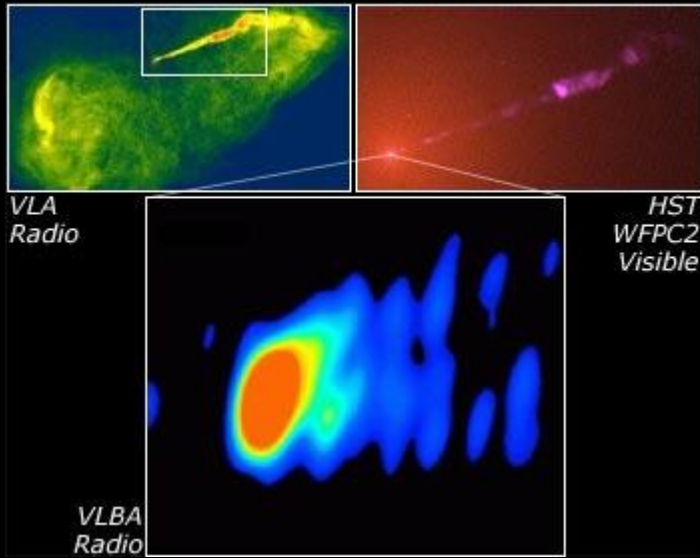


# Jets



alle Bilder: Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/lindex.html>

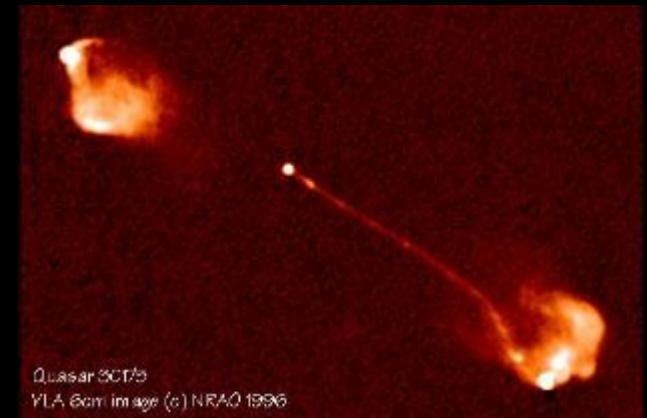
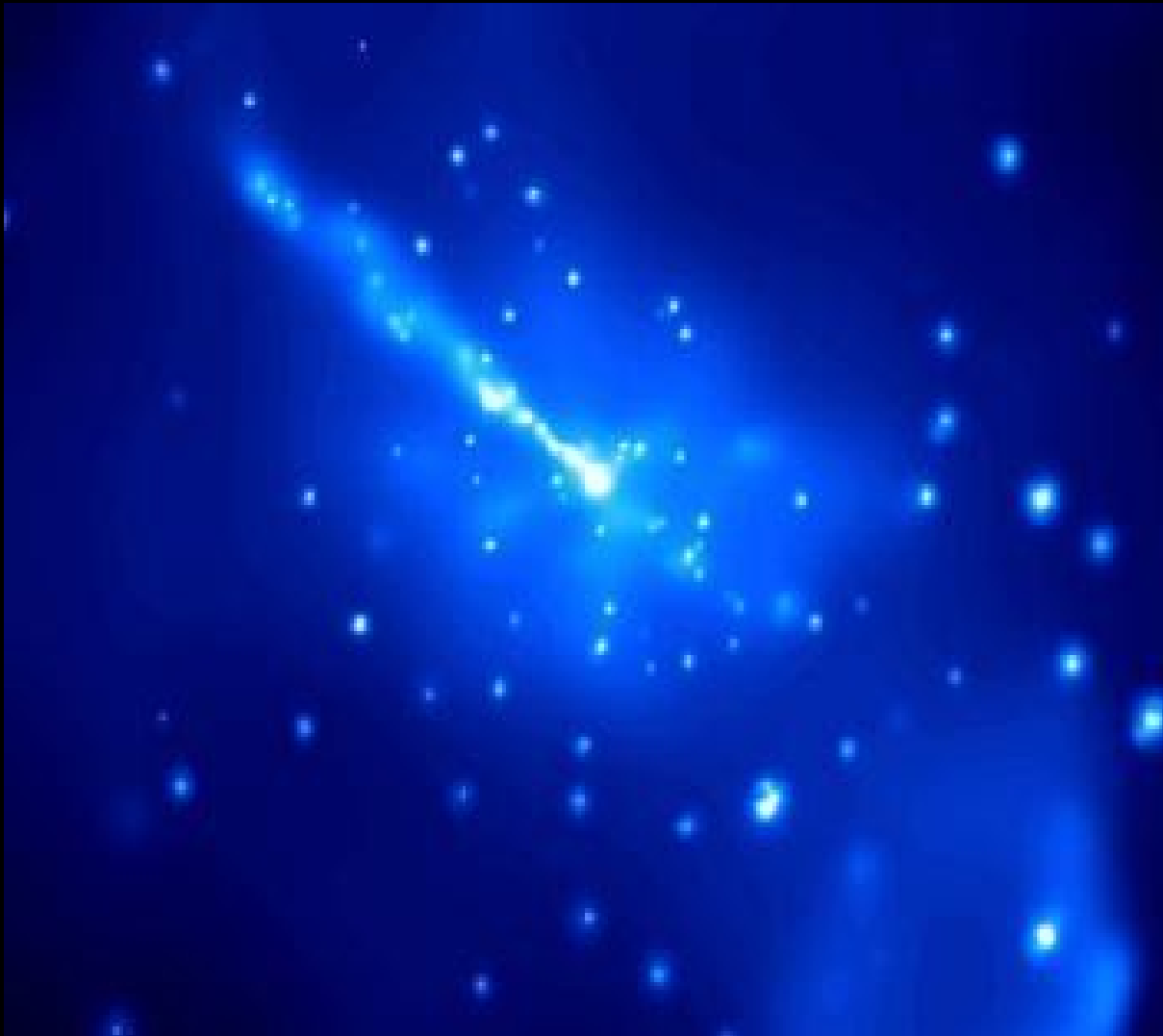
## reale Jets 1/2



alle Bilder: Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>



## reale Jets 2/2



alle Bilder: Quelle: Abenteuer Universum, die Macht der Gravitation,  
<http://abenteuer-universum.vol4u.de/index.html>

## *eine Steigerung*

- X verspricht die Smolin - Theorie, nach der das ganze Universum vielleicht ein schwarzes Loch darstellt ...
- X die Existenz von 'weißen Löchern' als zweites Ende von
- X Wurmlöchern
  
- X Wir werden sehen, was die Zukunft uns an Erkenntnissen bringt.
- X Wer weiter forschen will, dem empfehle ich ->

## Quellenverzeichnis 1/2

Wikipedia: <http://www.wikipedia.de>

Albert Einstein, Allgemeine Relativitätstheorie, Kosmologie, Relativitätstheorie, Schwarzes Loch, Spezielle Relativitätstheorie

Wikibooks: <http://de.wikibooks.org>

Die vierdimensionale Welt, Einsteins Welt, Spezielle Relativitätstheorie I-V, Über das Wesen der Zeit; A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper

Telepolis: Das Monster wohnt in der Mitte der Milchstraße

<http://www.heise.de/tp/r4/artikel/9/9469/1.html>

Andreas Müller: Schwarze Löcher

[http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller/astro\\_sl.html](http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller/astro_sl.html)

## Quellenverzeichnis 2/2

Werner Kasper: Die bunte Welt der schwarzen Löcher

<http://abenteuer-universum.vol4u.de/lr.html>

Heribert Genreith: Was Du schon immer über Relativitätstheorie wissen wolltest

<http://home.t-online.de/home/heribert.genreith/rt.pdf>

Albert Einstein: Fundamental ideas and problems of the theory of relativity

<http://nobelprize.org/physics/laureates/1921/einstein-lecture.pdf>

Peter Schneider: Überblick Kosmologie

[http://www.astro.uni-bonn.de/~peter/cosmo\\_short.html](http://www.astro.uni-bonn.de/~peter/cosmo_short.html)