

Schwarze Löcher und das holographische Prinzip

Daniel Grumiller

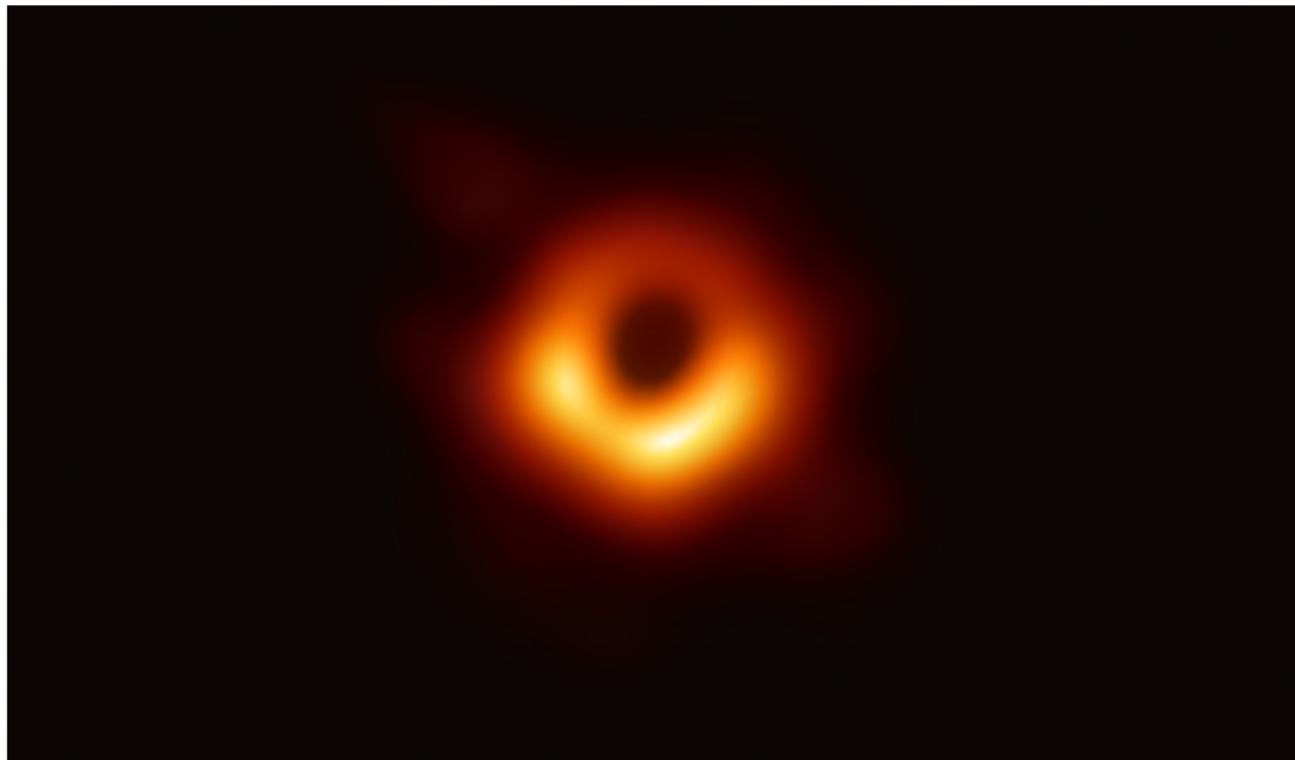
Institut für Theoretische Physik
TU Wien

Studienstiftung, September 2023



grumil@hep.itp.tuwien.ac.at

Erstes Photo des Schatten eines Schwarzen Loches (April 2019)



Überblick

Was sind Schwarze Löcher?

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher und das holographische Prinzip

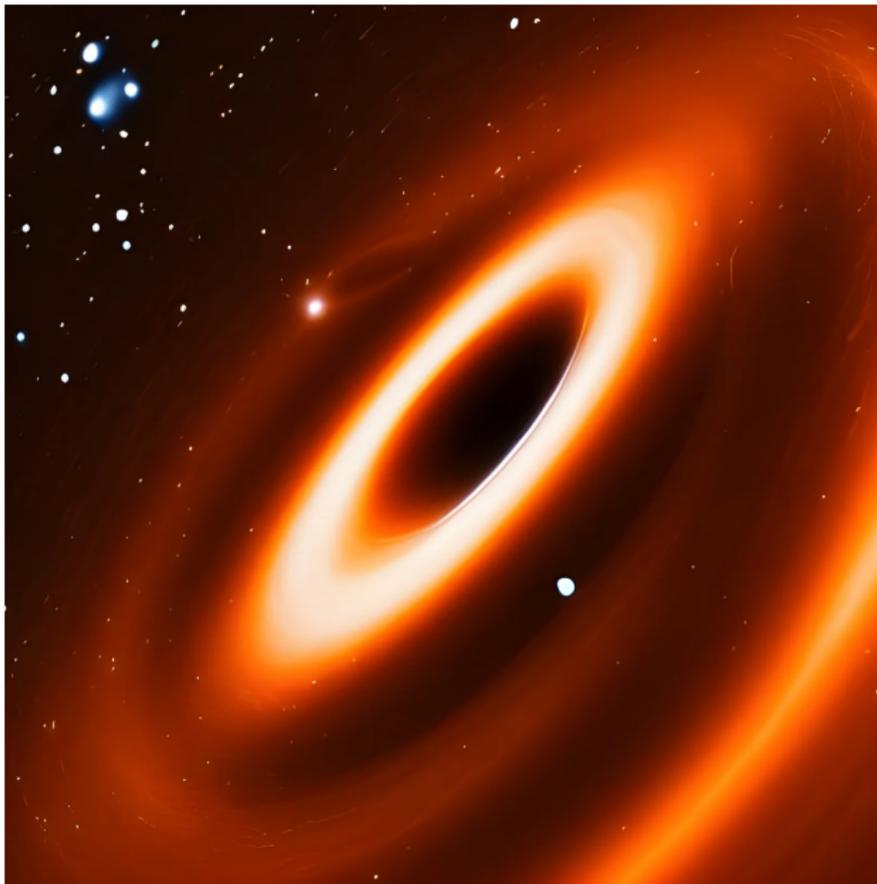
Überblick

Was sind Schwarze Löcher?

Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher und das holographische Prinzip

AI-Bild mit Input "Black hole with accretion disk"



Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

Schwarze Löcher — Phantasie und Wirklichkeit

Schwarzes Loch, Pokemon Karte



Schwarzes Loch, Gemälde



Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

Schwarze Löcher — Phantasie und Wirklichkeit

Schwarzes Loch, Gemälde



Schwarzes Loch, Computersimulation



Am Computer berechnet für den Film
“Interstellar”

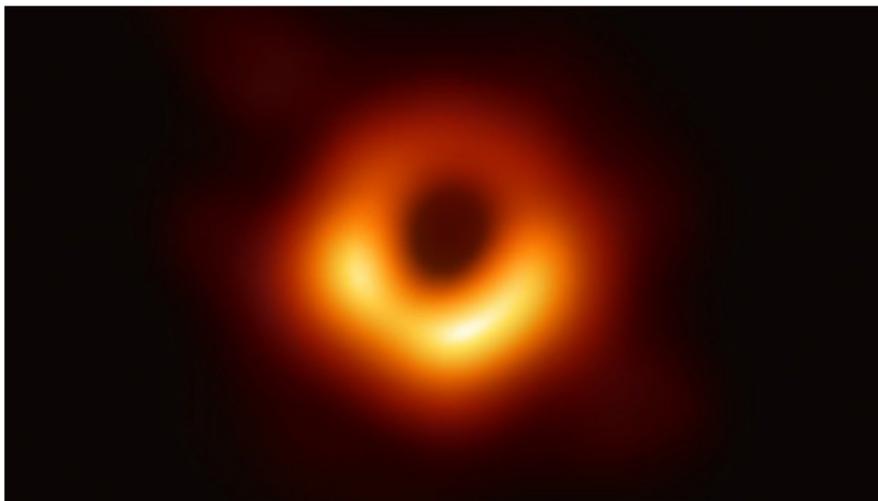
Gibt es Schwarze Löcher wirklich?

Schwarze Löcher — Phantasie und Wirklichkeit

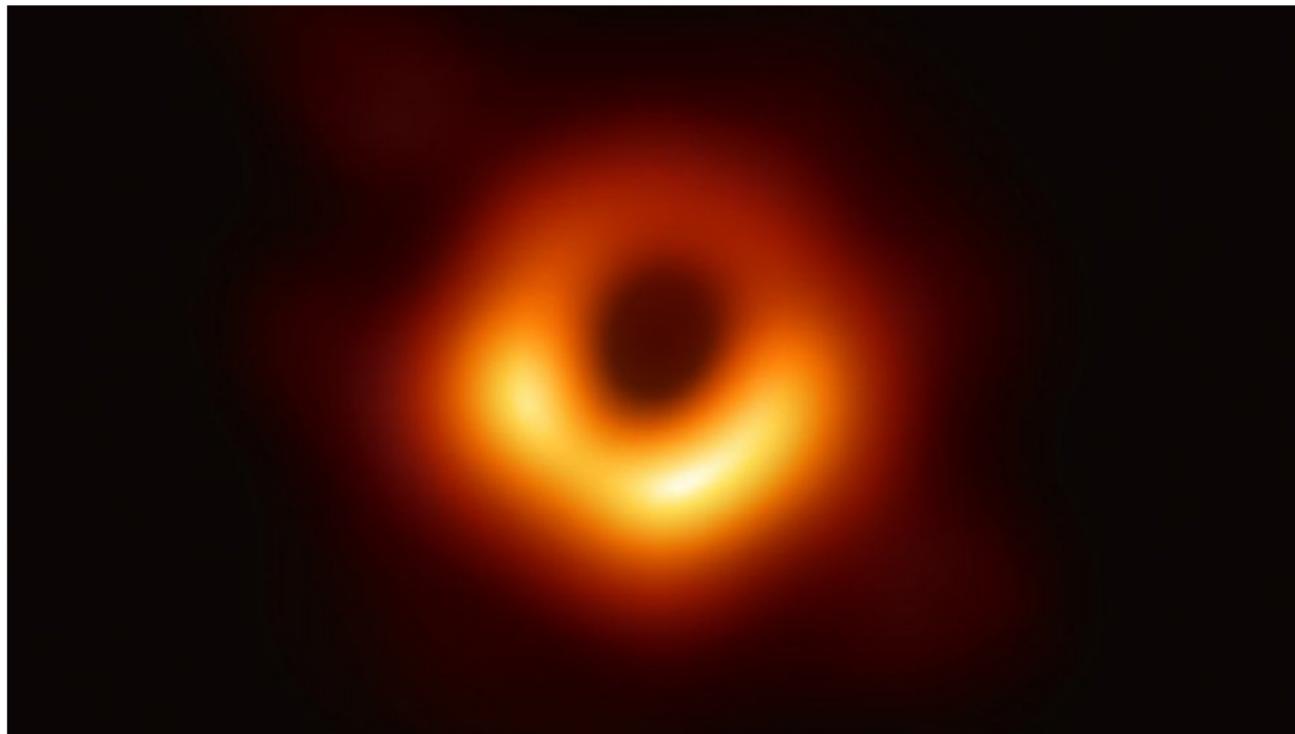
Schwarzes Loch, Computersimulation



Schwarzes Loch, Foto

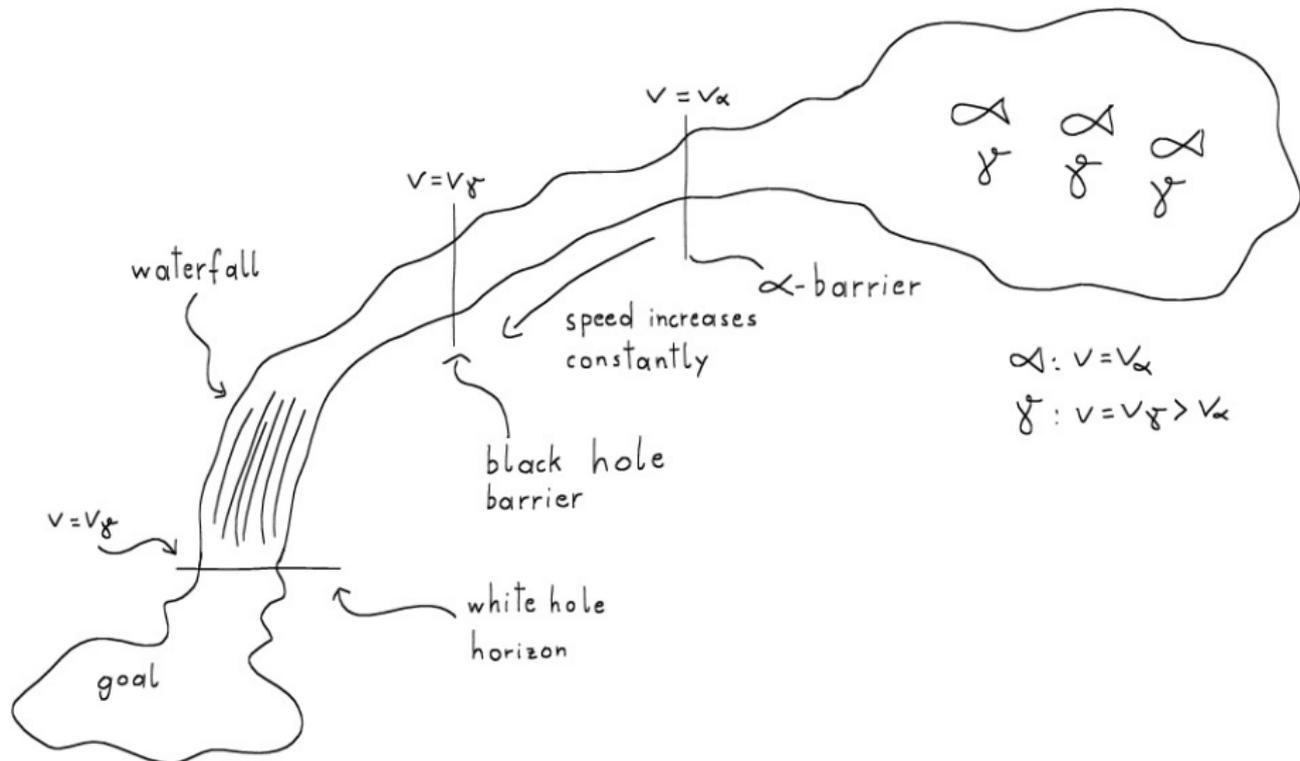


Was ist ein Schwarzes Loch?



Schatten des Schwarzen Lochs M87 (Distanz: $5.3 \cdot 10^7$ ly, Masse: $6.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$)
aufgenommen im April 2019 vom Event Horizon Telescope (EHT)

Fischanalogie

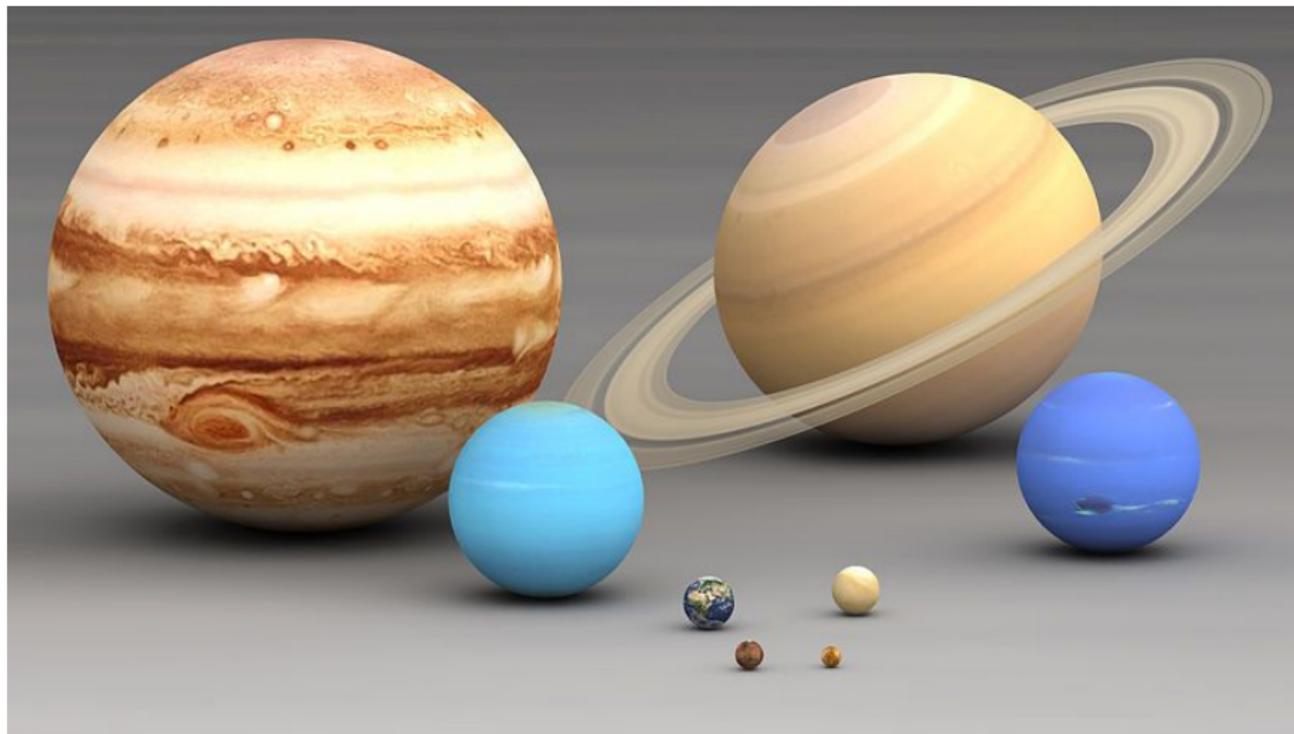


Schwarzes Loch: Bereich ohne Entkommen!



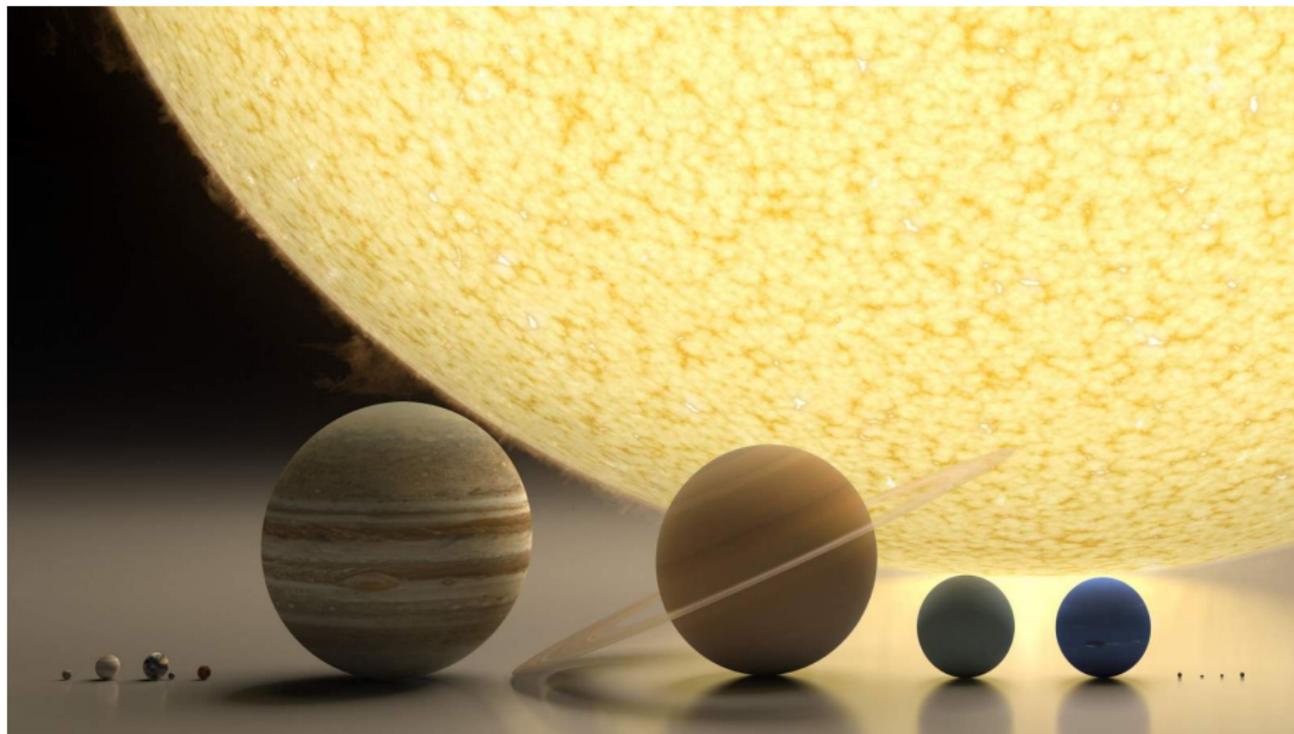
Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Planeten: schwere (z.B. Eisen) und leichte (z.B. Wasserstoff) Elemente



Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Sterne: leichte (Wasserstoff und Helium) Elemente

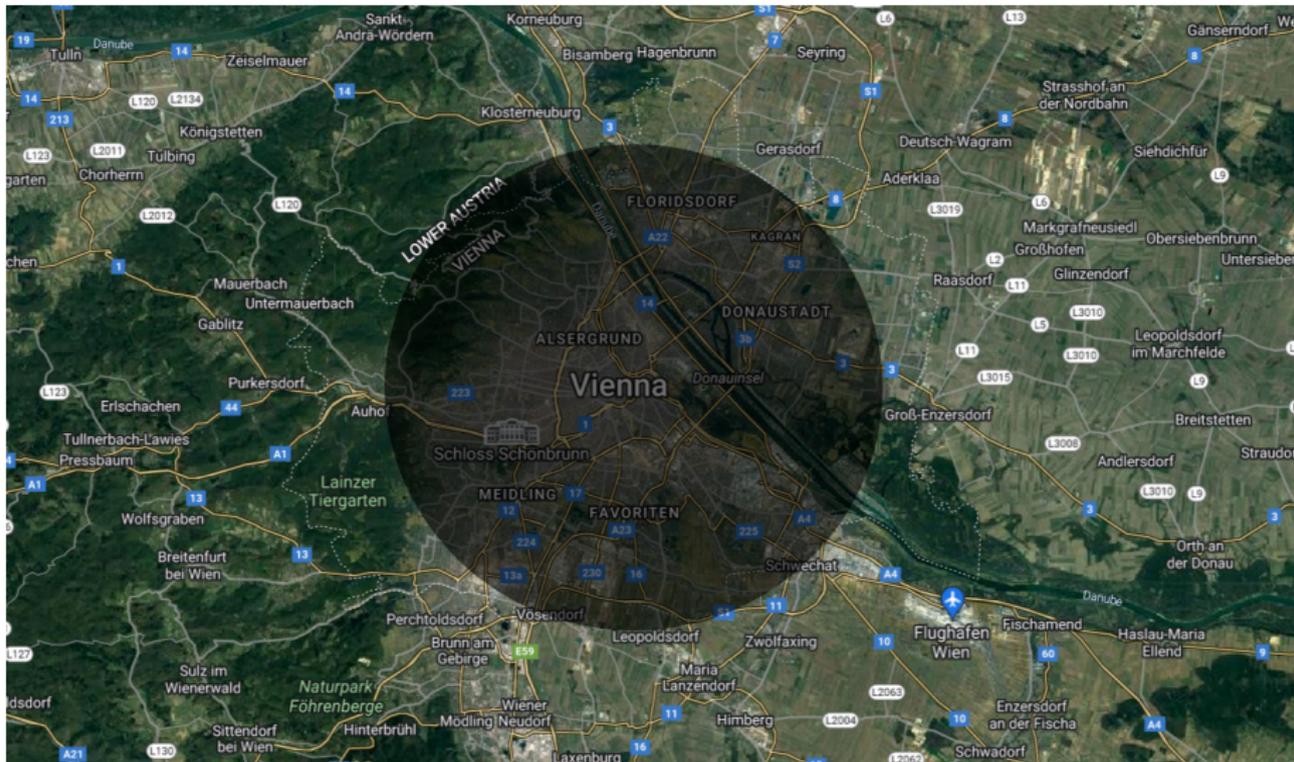


Woraus besteht ein Schwarzes Loch?

Schwarzes Loch: nichts (außer Raum und Zeit)

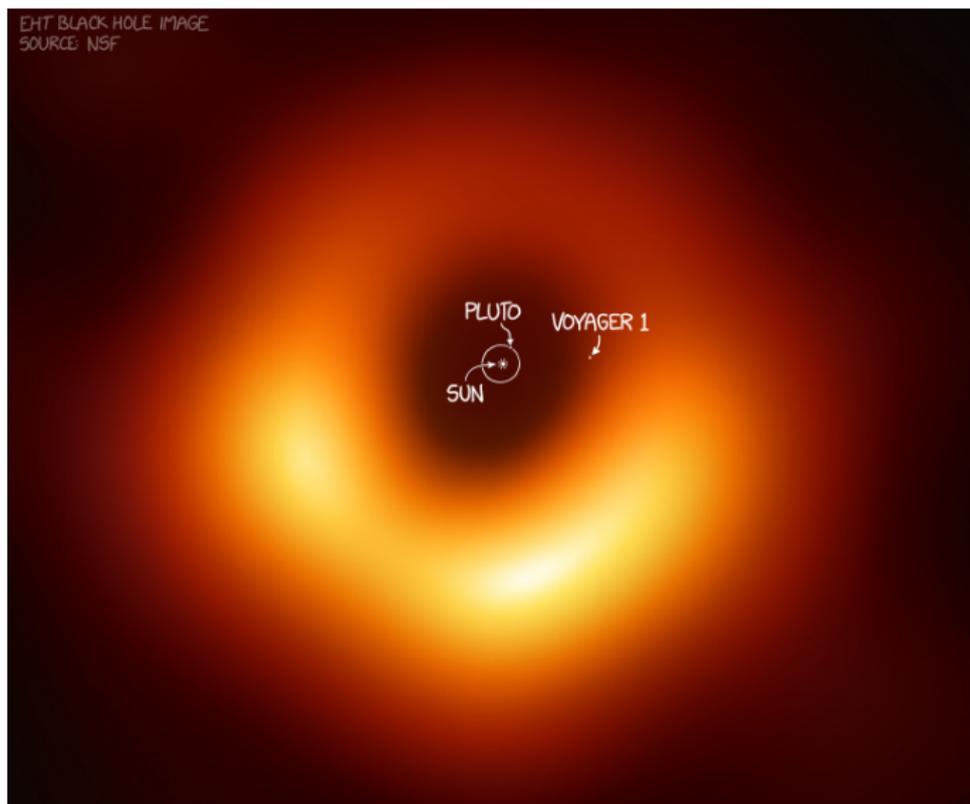
Wie groß ist ein Schwarzes Loch? (ein paar Kilometer)

Stellare Schwarze Löcher: ca. so groß wie Wien



Wie groß ist ein Schwarzes Loch? (viele Milliarden Kilometer)

Galaktische Schwarze Löcher: ca. so groß wie unser Sonnensystem

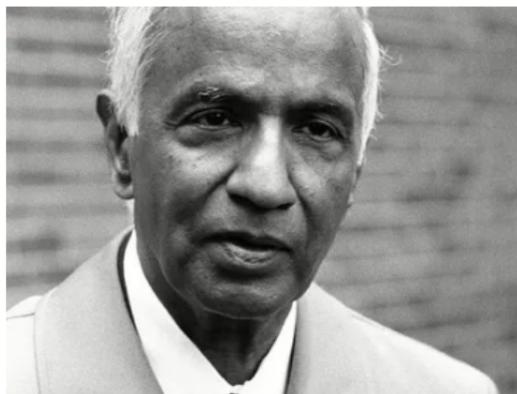


Überblick

Was sind Schwarze Löcher?

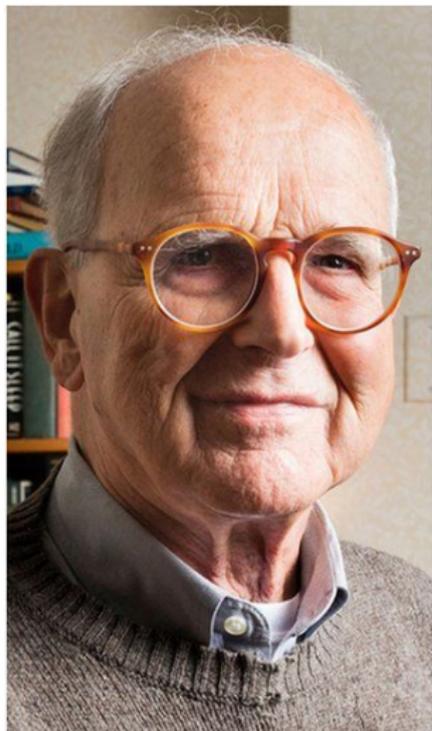
Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher und das holographische Prinzip



Subrahmanyan Chandrasekhar

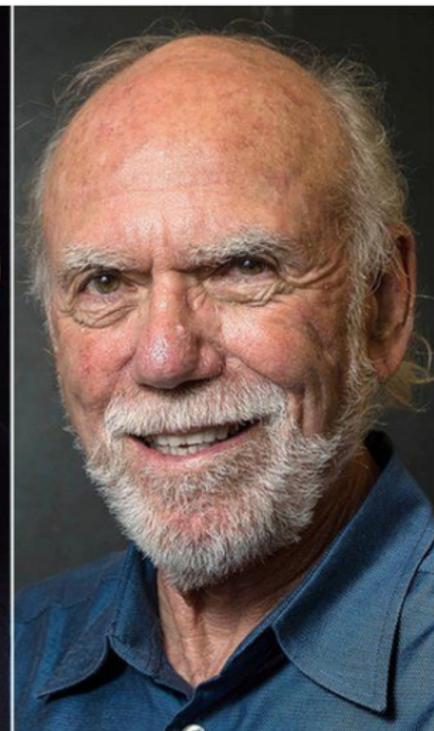
Sternentwicklung (inkl. gravitationeller Kollaps zu Schwarzem Loch)



Rainer Weiss



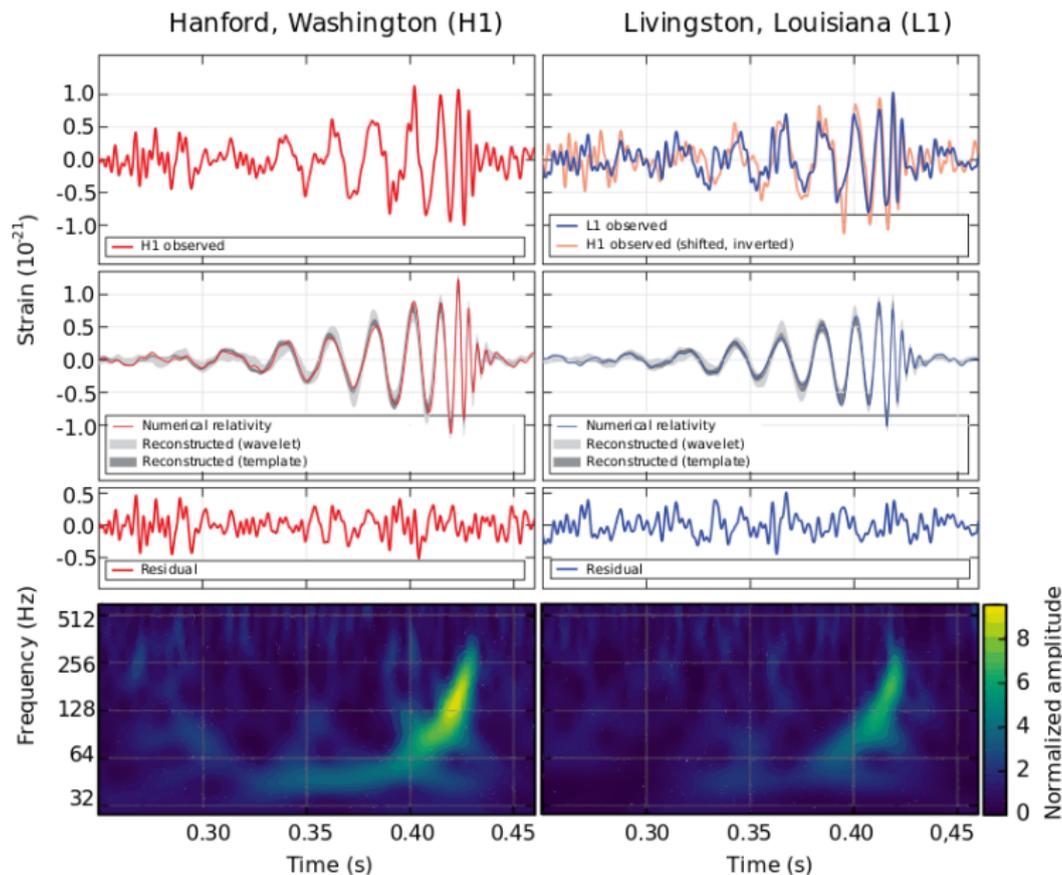
Kip Thorne



Barry Barish

Beobachtung von Gravitationswellen einer Schwarzen-Loch-Verschmelzung

Physiknobelpreis 2017 (LIGO Experiment)





Roger Penrose

Theorie Schwarzer
Löcher



Andrea Ghez

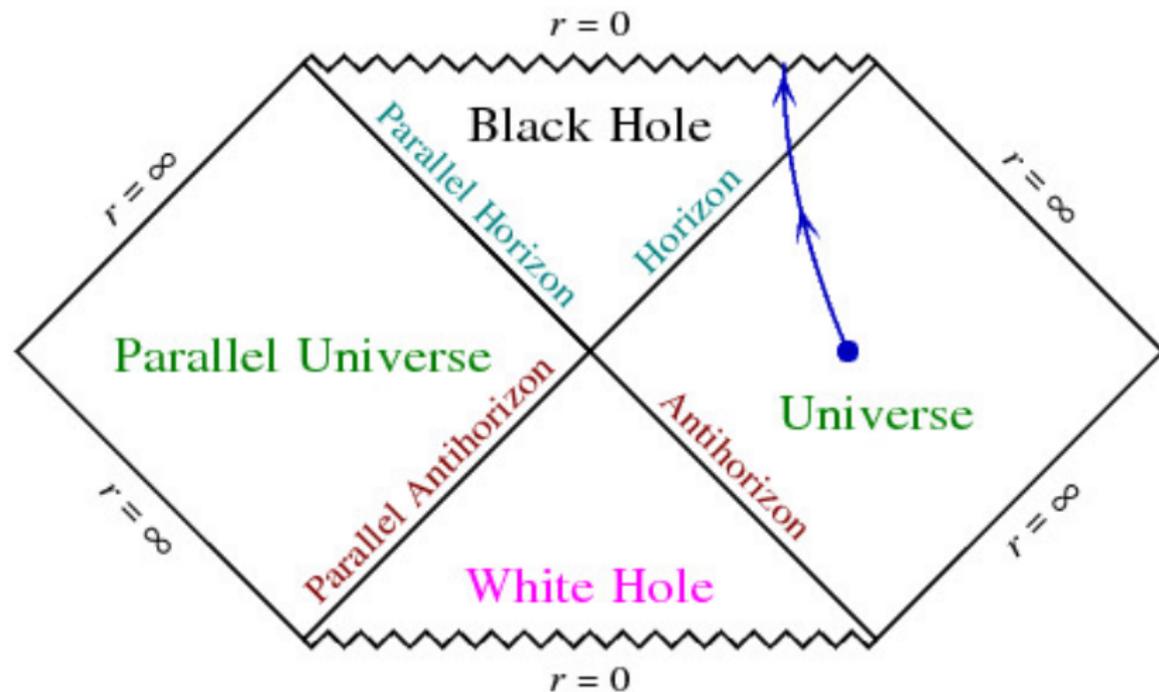
Beobachtung des Schwarzen Lochs im Zentrum
der Milchstrasse



Reinhard Genzel

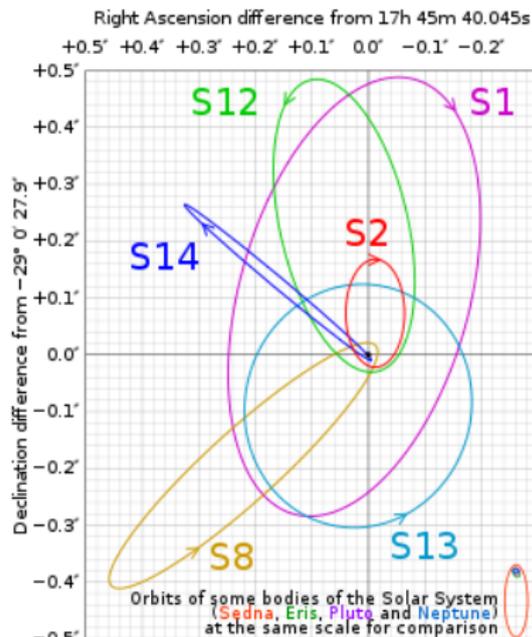
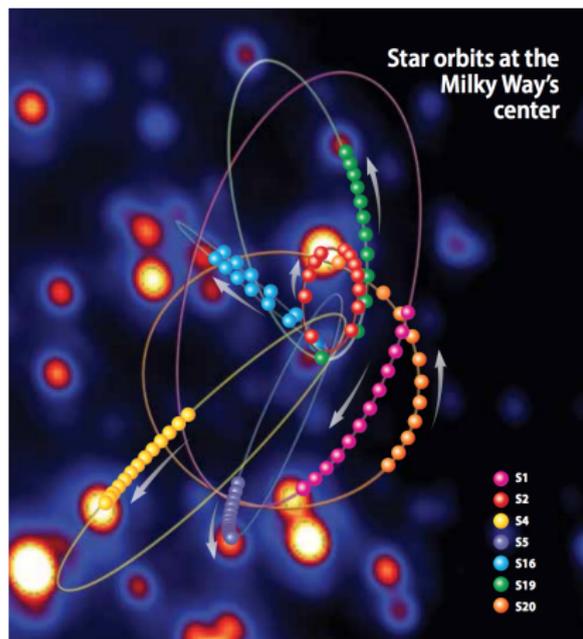
Roger Penrose:

Hat die Unendlichkeit endlich gemacht und gezeigt, dass Schwarze Löcher eine robuste Vorhersage der ART sind.



Andrea Ghez und Reinhard Genzel:

Haben supermassives Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstrasse entdeckt.



Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930

Warum explodieren Sterne nicht?

Warum implodieren Sterne nicht?

Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930

Warum explodieren Sterne nicht?

Warum implodieren Sterne nicht?

kritische Masse: Fermidruck = Gravitationsdruck

Rechnung ergibt

$$M_{\text{krit}} \approx 3M_{\odot}$$

Unsichtbare stellare Objekte mit Masse $> M_{\text{krit}}$ sind SL!

Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972

Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972

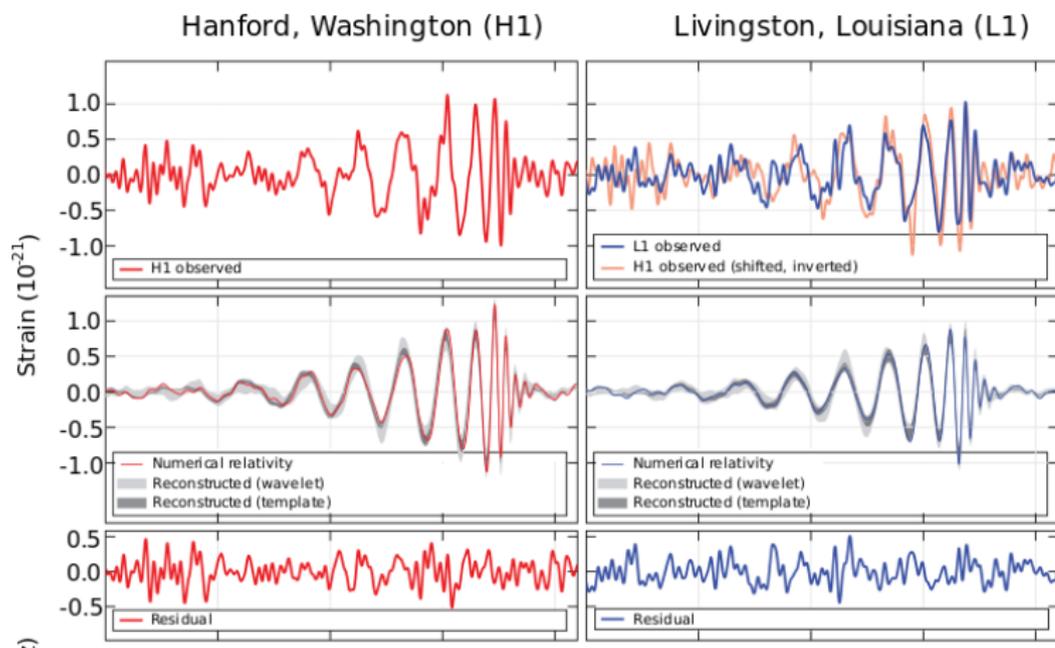
Objekte dessen Masse größer ist als kritische $M > 3M_{\odot}$ (2006):

| System | P_{orb} [days] | $f(M)$ [M_{\odot}] | Donor Spect. Type | Classification | M_x † [M_{\odot}] |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|----------------------------|
| GRS 1915+105 ^a | 33.5 | 9.5 ± 3.0 | K/M III | LMXB/Transient | 14 ± 4 |
| V404 Cyg | 6.471 | 6.09 ± 0.04 | K0 IV | „ | 12 ± 2 |
| Cyg X-1 | 5.600 | 0.244 ± 0.005 | 09.7 Iab | HMXB/Persistent | 10 ± 3 |
| LMC X-1 | 4.229 | 0.14 ± 0.05 | 07 III | „ | > 4 |
| XTE J1819-254 | 2.816 | 3.13 ± 0.13 | B9 III | IMXB/Transient | 7.1 ± 0.3 |
| GRO J1655-40 | 2.620 | 2.73 ± 0.09 | F3/5 IV | „ | 6.3 ± 0.3 |
| BW Cir ^b | 2.545 | 5.74 ± 0.29 | G5 IV | LMXB/Transient | > 7.8 |
| GX 339-4 | 1.754 | 5.8 ± 0.5 | – | „ | – |
| LMC X-3 | 1.704 | 2.3 ± 0.3 | B3 V | HMXB/Persistent | 7.6 ± 1.3 |
| XTE J1550-564 | 1.542 | 6.86 ± 0.71 | G8/K8 IV | LMXB/Transient | 9.6 ± 1.2 |
| 4U 1543-475 | 1.125 | 0.25 ± 0.01 | A2 V | IMXB/Transient | 9.4 ± 1.0 |
| H1705-250 | 0.520 | 4.86 ± 0.13 | K3/7 V | LMXB/Transient | 6 ± 2 |
| GS 1124-684 | 0.433 | 3.01 ± 0.15 | K3/5 V | „ | 7.0 ± 0.6 |
| XTE J1859+226 ^c | 0.382 | 7.4 ± 1.1 | – | „ | – |
| GS2000+250 | 0.345 | 5.01 ± 0.12 | K3/7 V | „ | 7.5 ± 0.3 |
| A0620-003 | 0.325 | 2.72 ± 0.06 | K4 V | „ | 11 ± 2 |
| XTE J1650-500 | 0.321 | 2.73 ± 0.56 | K4 V | „ | – |
| GRS 1009-45 | 0.283 | 3.17 ± 0.12 | K7/M0 V | „ | 5.2 ± 0.6 |
| GRO J0422+32 | 0.212 | 1.19 ± 0.02 | M2 V | „ | 4 ± 1 |
| XTE J1118+480 | 0.171 | 6.3 ± 0.2 | K5/M0 V | „ | 6.8 ± 0.4 |

Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

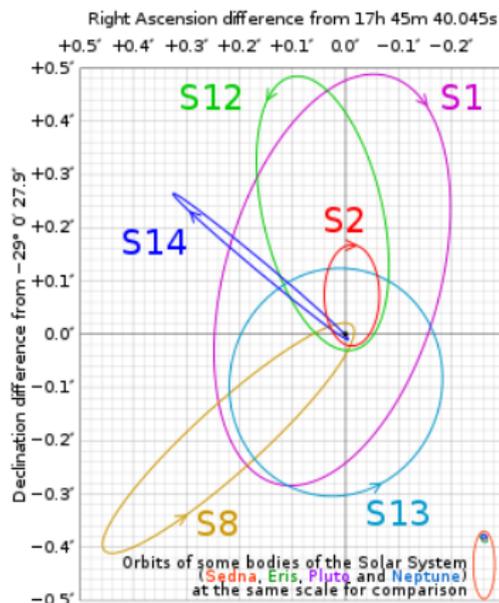
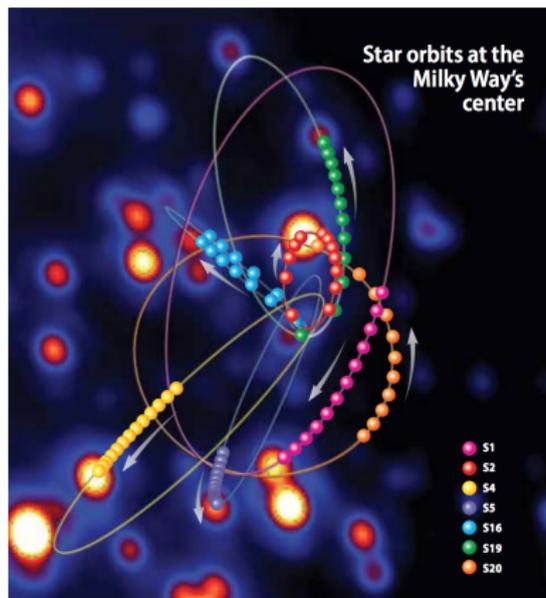
- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps **Chandrasekhar 1930**
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe **Bolton, Webster, Murdin 1972**
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion **LIGO '16**



Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

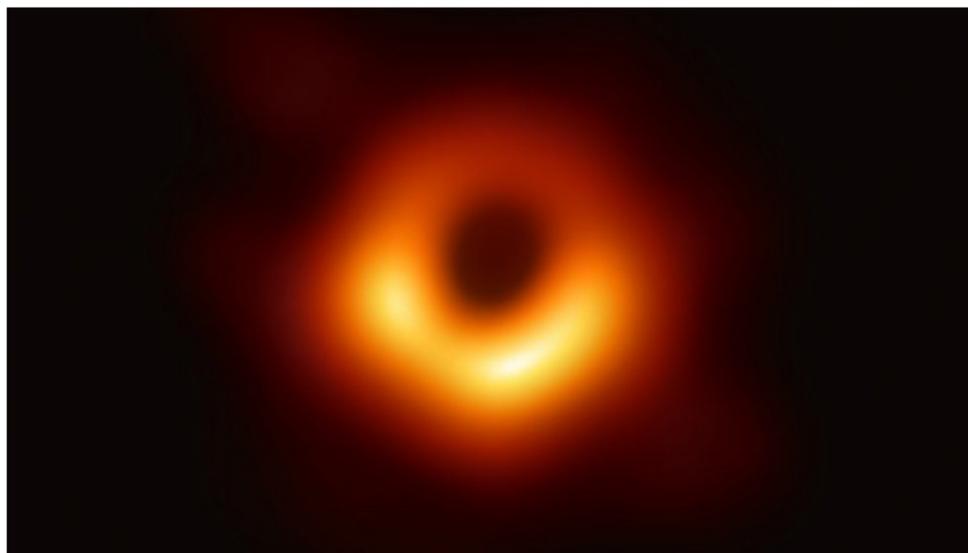
- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps **Chandrasekhar 1930**
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe **Bolton, Webster, Murdin 1972**
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion **LIGO '16**
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen **Ghez et al '08; Gillessen et al '09**



Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps [Chandrasekhar 1930](#)
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe [Bolton, Webster, Murdin 1972](#)
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion [LIGO '16](#)
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen [Ghez et al '08](#); [Gillessen et al '09](#)
- ▶ Supermassive SL: Schatten [EHT '19](#)



Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521

Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521
- ▶ Primordiale SL: keine Evidenz in Kosmologie

Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521
- ▶ Primordiale SL: keine Evidenz in Kosmologie
- ▶ Teilchenstoß-erzeugte SL: keine Evidenz vom LHC

Wie entdeckt man Schwarze Löcher?

Experimentelle Evidenz für Schwarze Löcher (SL):

- ▶ Stellare SL: gravitationeller Kollaps Chandrasekhar 1930
- ▶ Stellare SL: Akkretionsscheibe Bolton, Webster, Murdin 1972
- ▶ Stellare SL Verschmelzung: Gravitationswellenproduktion LIGO '16
- ▶ Supermassive SL: Keplerbahnen Ghez et al '08; Gillessen et al '09
- ▶ Supermassive SL: Schatten EHT '19
- ▶ Mittelschwere SL: wenig Evidenz ($100 - 10^6 M_{\odot}$) GW190521
- ▶ Primordiale SL: keine Evidenz in Kosmologie
- ▶ Teilchenstoß-erzeugte SL: keine Evidenz vom LHC

- ▶ überwältigende Evidenz für stellare and supermassive SL
- ▶ bestätigte Massenbereiche: $3 - 142 M_{\odot}$ und $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$
- ▶ SL können prinzipiell für alle Massen $> 10^{-5} g$ existieren

Graduate Texts in Physics

Daniel Grumiller
Mohammad Mehdi Sheikh-Jabbari

Black Hole Physics

From Collapse to Evaporation

 Springer

Überblick

Was sind Schwarze Löcher?

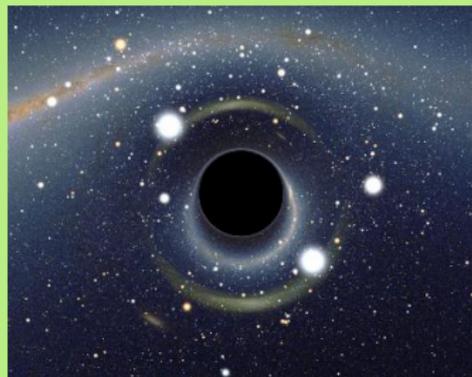
Wie beobachtet man Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher und das holographische Prinzip

Warum sind Schwarze Löcher interessant für Quantengravitation?

Schwarze Löcher haben scheinbar paradoxe Eigenschaften

Schwarze Löcher: die einfachsten
Objekte im Universum



Eigenschaften bestimmt durch

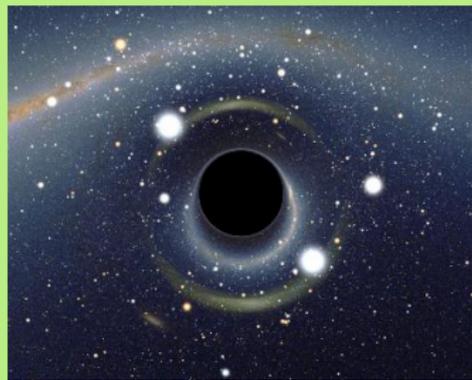
- ▶ Masse M
- ▶ Drehimpuls J
- ▶ Ladung Q

Schwarzes Loch \sim Teilchen!

Warum sind Schwarze Löcher interessant für Quantengravitation?

Schwarze Löcher haben scheinbar paradoxe Eigenschaften

Schwarze Löcher: die einfachsten Objekte im Universum



Eigenschaften bestimmt durch

- ▶ Masse M
- ▶ Drehimpuls J
- ▶ Ladung Q

Schwarzes Loch \sim Teilchen!

Schwarze Löcher: die kompliziertesten Objekte im Universum



Quantenmechanik:

- ▶ Schwarze Löcher strahlen
- ▶ SL haben Entropie S_{BH}
- ▶ SL sind holographisch

Bekenstein–Hawking:

$$S_{\text{BH}} = \frac{A}{4}$$

Thermodynamik

Nullter Hauptsatz:

$T = \text{const.}$ im Gleichgewicht

T : Temperatur

Schwarze Loch Mechanik

Nullter Hauptsatz:

$\kappa = \text{const.}$ f. stationäre SL

κ : "surface gravity"

Thermodynamik

Nullter Hauptsatz:

$T = \text{const.}$ im Gleichgewicht

Erster Hauptsatz:

$dE \sim TdS + \text{Arbeitsterme}$

T : Temperatur

E : Energie

S : Entropie

Schwarze Loch Mechanik

Nullter Hauptsatz:

$\kappa = \text{const.}$ f. stationäre SL

Erster Hauptsatz:

$dM \sim \kappa dA + \text{Arbeitsterme}$

κ : "surface gravity"

M : Masse

A : Oberfläche (des Horizontes)

Thermodynamik

Nullter Hauptsatz:

$T = \text{const.}$ im Gleichgewicht

Erster Hauptsatz:

$dE \sim TdS + \text{Arbeitsterme}$

Zweiter Hauptsatz:

$dS \geq 0$

T : Temperatur

E : Energie

S : Entropie

Schwarze Loch Mechanik

Nullter Hauptsatz:

$\kappa = \text{const.}$ f. stationäre SL

Erster Hauptsatz:

$dM \sim \kappa dA + \text{Arbeitsterme}$

Zweiter Hauptsatz:

$dA \geq 0$

κ : "surface gravity"

M : Masse

A : Oberfläche (des Horizontes)

Thermodynamik

Nullter Hauptsatz:

$T = \text{const.}$ im Gleichgewicht

Erster Hauptsatz:

$dE \sim TdS + \text{Arbeitsterme}$

Zweiter Hauptsatz:

$dS \geq 0$

Dritter Hauptsatz:

$T \rightarrow 0$ unmöglich

T : Temperatur

E : Energie

S : Entropie

Schwarze Loch Mechanik

Nullter Hauptsatz:

$\kappa = \text{const.}$ f. stationäre SL

Erster Hauptsatz:

$dM \sim \kappa dA + \text{Arbeitsterme}$

Zweiter Hauptsatz:

$dA \geq 0$

Dritter Hauptsatz:

$\kappa \rightarrow 0$ unmöglich

κ : "surface gravity"

M : Masse

A : Oberfläche (des Horizontes)

Keine formale Analogie sondern echte Physik!

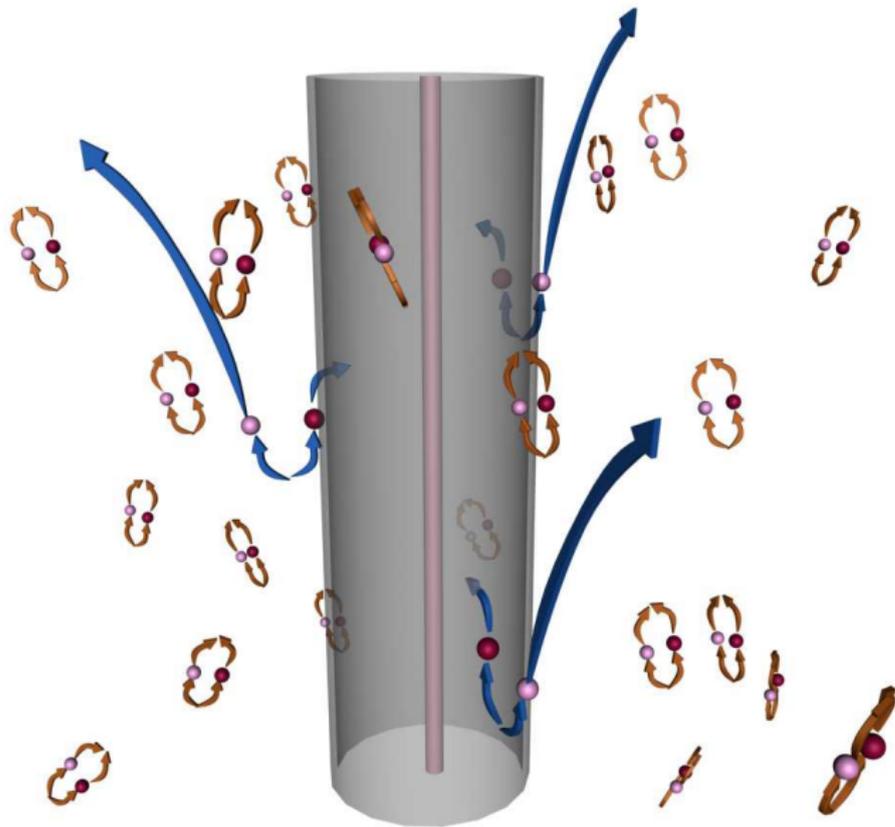
HERE LIES WHAT WAS MORTAL OF

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k}$$

STEPHEN HAWKING
1942-2018

Hawkingeffekt: Schwarze Löcher + Quantenfeldtheorie

SL verdampfen wegen Vakuumfluktuationen!



Temperatur:

$$T_H = \frac{\kappa}{2\pi}$$

Hawking

Entropie:

$$S_{\text{BH}} = \frac{A}{4}$$

Bekenstein-
Hawking

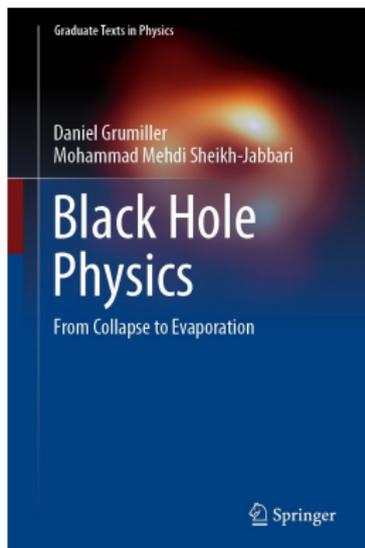
$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?

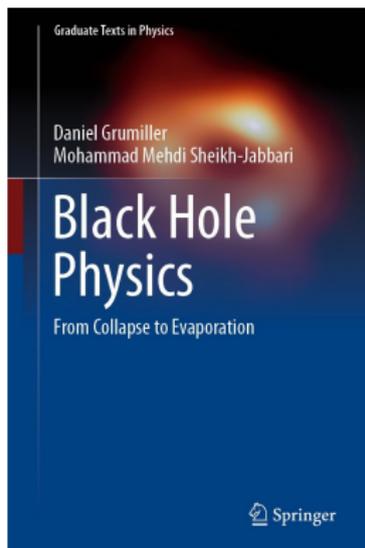
$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

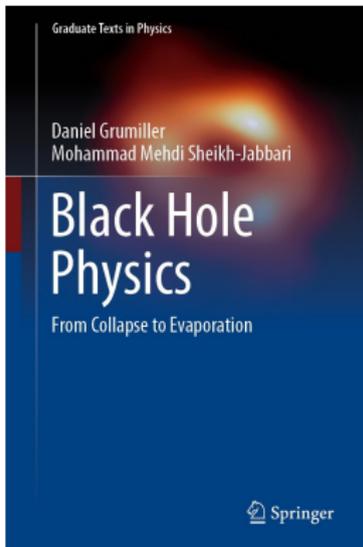
- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



- ▶ Erwartung: Information ist im Buch enthalten

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

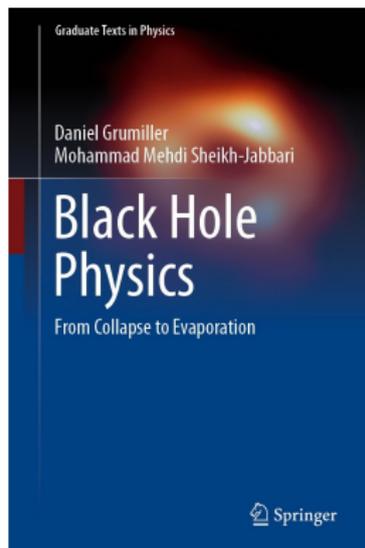
- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



- ▶ Erwartung: Information ist im Buch enthalten
- ▶ Aber wieviel Information?

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

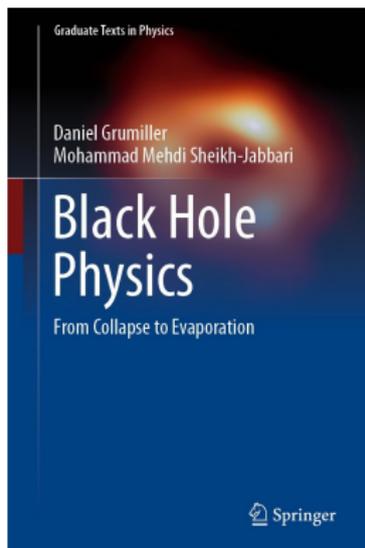
- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



- ▶ Erwartung: Information ist im Buch enthalten
- ▶ Aber wieviel Information?
- ▶ Nur das Cover zu betrachten ist ungenügend

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

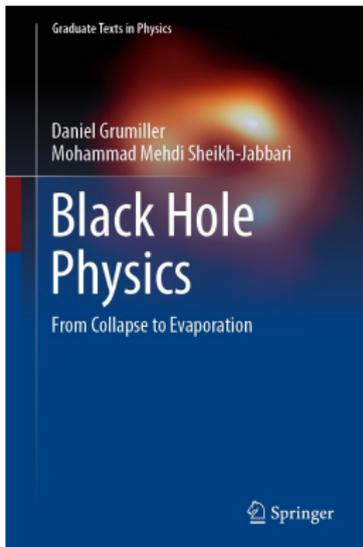
- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



- ▶ Erwartung: Information ist im Buch enthalten
- ▶ Aber wieviel Information?
- ▶ Nur das Cover zu betrachten ist ungenügend
- ▶ Müssen wissen wieviele Seiten das Buch hat

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

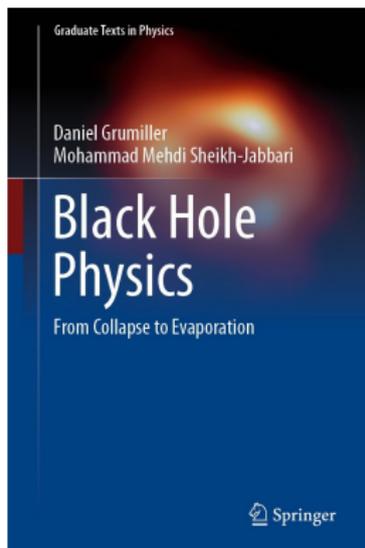
- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



- ▶ Erwartung: Information ist im Buch enthalten
- ▶ Aber wieviel Information?
- ▶ Nur das Cover zu betrachten ist ungenügend
- ▶ Müssen wissen wieviele Seiten das Buch hat
- ▶ Richtig?

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

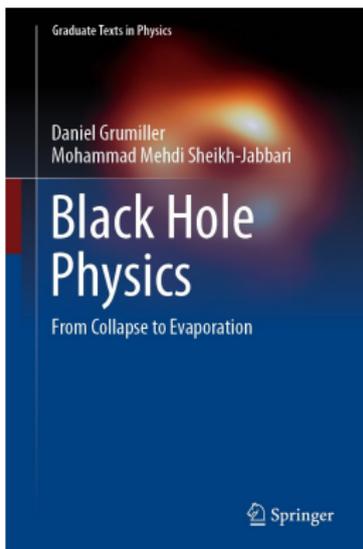
- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



- ▶ Erwartung: Information ist im Buch enthalten
- ▶ Aber wieviel Information?
- ▶ Nur das Cover zu betrachten ist ungenügend
- ▶ Müssen wissen wieviele Seiten das Buch hat
- ▶ Richtig? Im Allgemeinen ja, aber...

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche}$$

- ▶ Warum ist diese Formel bemerkenswert?
- ▶ Nimm beispielsweise ein Buch



- ▶ Erwartung: Information ist im Buch enthalten
- ▶ Aber wieviel Information?
- ▶ Nur das Cover zu betrachten ist ungenügend
- ▶ Müssen wissen wieviele Seiten das Buch hat
- ▶ Richtig? Im Allgemeinen ja, aber...
- ▶ Nein! Für Schwarze Löcher sagt die BH Formel

Judge the book by its cover!

Entropievergleich

- ▶ Entropie eines Gases (zB die Luft in diesem Raum):

$$S_{\text{gas}} \sim \text{Volumen} \propto L^d$$

L : Längenskala; d : Anzahl der Raumdimensionen

Entropievergleich

- ▶ Entropie eines Gases (zB die Luft in diesem Raum):

$$S_{\text{gas}} \sim \text{Volumen} \propto L^d$$

L : Längenskala; d : Anzahl der Raumdimensionen

- ▶ Entropie eines Schwarzen Lochs:

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche} \propto L^{d-1}$$

Entropievergleich

- ▶ Entropie eines Gases (zB die Luft in diesem Raum):

$$S_{\text{gas}} \sim \text{Volumen} \propto L^d \xrightarrow{d=2} S_{\text{gas}} \sim L^2$$

L : Längenskala; d : Anzahl der Raumdimensionen

- ▶ Entropie eines Schwarzen Lochs:

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche} \propto L^{d-1} \xrightarrow{d=3} S_{\text{BH}} \sim L^2$$

- ▶ Beachte: Fläche in $d = 3$ gleich Volumen in $d = 2$ bis aus geometrischen Faktor

| Dimension | Fläche | Volumen |
|---|-----------|---------|
| $d = 1$:  | $2 * L^0$ | L^1 |
| $d = 2$:  L | $4 * L^1$ | L^2 |
| $d = 3$:  L | $6 * L^2$ | L^3 |

Entropievergleich

- ▶ Entropie eines Gases (zB die Luft in diesem Raum):

$$S_{\text{gas}} \sim \text{Volumen} \propto L^d \quad \xRightarrow{d=2} \quad S_{\text{gas}} \sim L^2$$

L : Längenskala; d : Anzahl der Raumdimensionen

- ▶ Entropie eines Schwarzen Lochs:

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche} \propto L^{d-1} \quad \xRightarrow{d=3} \quad S_{\text{BH}} \sim L^2$$

- ▶ Beachte: Fläche in $d = 3$ gleich Volumen in $d = 2$
- ▶ auch die entsprechenden Entropien passen zusammen

Entropievergleich

- ▶ Entropie eines Gases (zB die Luft in diesem Raum):

$$S_{\text{gas}} \sim \text{Volumen} \propto L^d \xrightarrow{d=2} S_{\text{gas}} \sim L^2$$

L : Längenskala; d : Anzahl der Raumdimensionen

- ▶ Entropie eines Schwarzen Lochs:

$$S_{\text{BH}} \sim \text{Fläche} \propto L^{d-1} \xrightarrow{d=3} S_{\text{BH}} \sim L^2$$

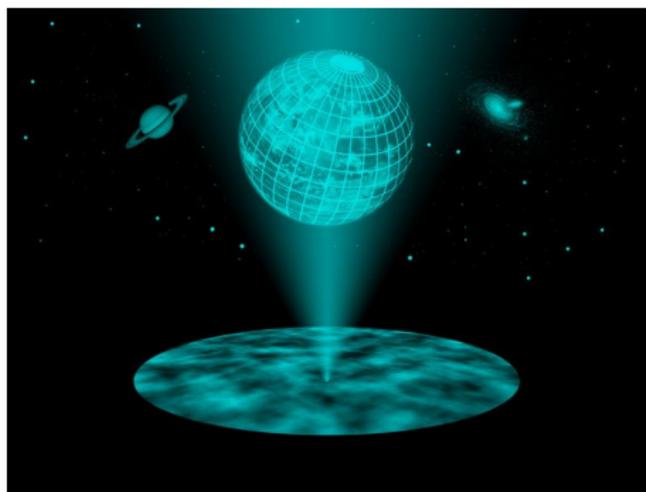
- ▶ Beachte: Fläche in $d = 3$ gleich Volumen in $d = 2$
- ▶ auch die entsprechenden Entropien passen zusammen

Gewagte Idee von 't Hooft und Susskind in 1990ern:

Holographisches Prinzip:

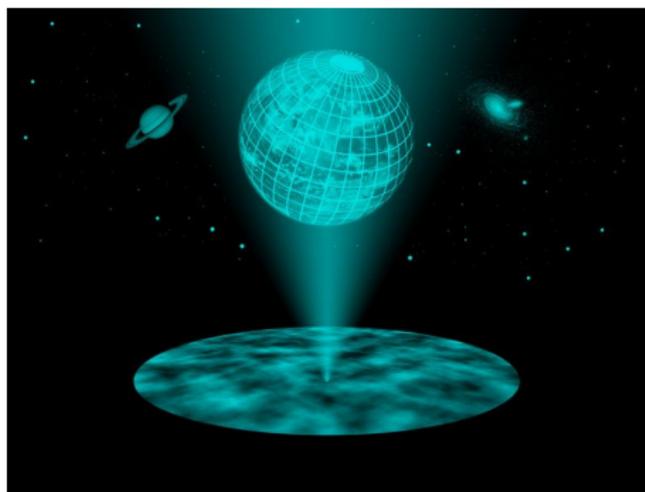
Theorie mit Gravitation in $d + 1$ Dimensionen äquivalent zu Theorie ohne Gravitation in d Dimensionen

Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten theoretischen Physik-Ideen der letzten 3 Jahrzehnte

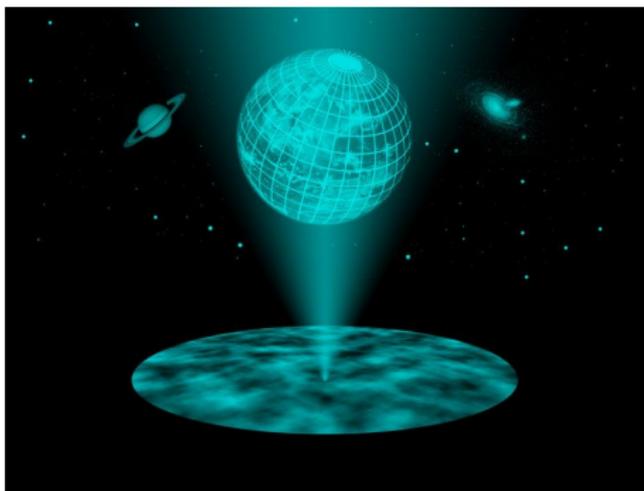
Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten theoretischen Physik-Ideen der letzten 3 Jahrzehnte

- ▶ Anzahl der Dimensionen hängt von Perspektive ab

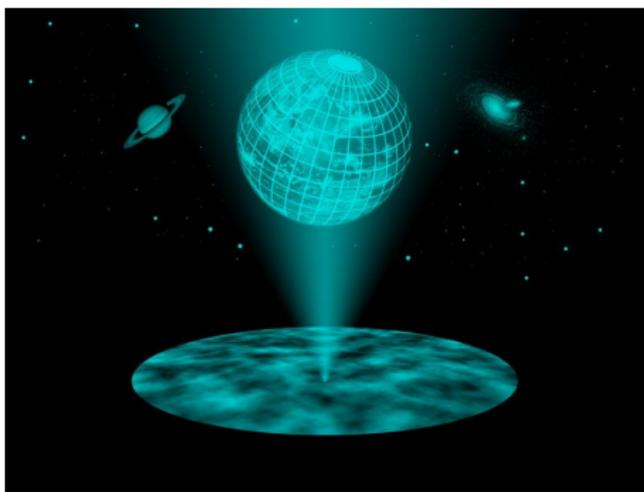
Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten theoretischen Physik-Ideen der letzten 3 Jahrzehnte

- ▶ Anzahl der Dimensionen hängt von Perspektive ab
- ▶ können dieselbe Physik mit zwei verschiedenen Formulierungen in verschiedenen Dimensionen beschreiben

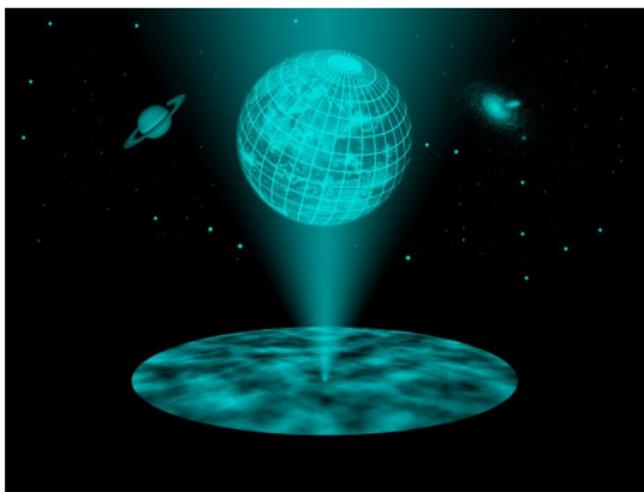
Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten theoretischen Physik-Ideen der letzten 3 Jahrzehnte

- ▶ Anzahl der Dimensionen hängt von Perspektive ab
- ▶ können dieselbe Physik mit zwei verschiedenen Formulierungen in verschiedenen Dimensionen beschreiben
- ▶ höherdimensionale Formulierung ist (Quanten-)Gravitationstheorie

Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten theoretischen Physik-Ideen der letzten 3 Jahrzehnte

- ▶ Anzahl der Dimensionen hängt von Perspektive ab
- ▶ können dieselbe Physik mit zwei verschiedenen Formulierungen in verschiedenen Dimensionen beschreiben
- ▶ höherdimensionale Formulierung ist (Quanten-)Gravitationstheorie
- ▶ niederdimensionale Formulierung ist (Quanten-)Feldtheorie ohne Gravitation

Die Folie für SpezialistInnen

Zwei Beispiele für Einträge im holographischen Wörterbuch a la AdS/CFT Maldacena '97

Haben Wörterbuch zwischen Gravitations- und Feldtheorieobservablen:

- ▶ Korrelationsfunktionen Gubser, Klebanov, Polyakov '98; Witten '98

Die Folie für SpezialistInnen

Zwei Beispiele für Einträge im holographischen Wörterbuch a la AdS/CFT Maldacena '97

Haben Wörterbuch zwischen Gravitations- und Feldtheorieobservablen:

- Korrelationsfunktionen Gubser, Klebanov, Polyakov '98; Witten '98

zB 5-Punktfunktion von Energie-Impulsflüssen in 2d konformer Feldtheorie

$$\text{CFT}_2 : \quad \langle T_{++}(z_1)T_{++}(z_2)T_{++}(z_3)T_{++}(z_4)T_{++}(z_5) \rangle = \frac{4c f_5(\gamma, \zeta)}{\prod_{1 \leq i \leq 5} z_{ij}}$$

$\gamma = z_{12}z_{34}/(z_{13}z_{24})$, $\zeta = z_{25}z_{34}/(z_{35}z_{24})$, $z_{ij} = z_i - z_j$ und

$$f_5(\gamma, \zeta) = \frac{\gamma + \zeta}{2(\gamma - \zeta)} - \frac{\gamma^2 - \gamma\zeta + \zeta^2}{\gamma(\gamma - 1)\zeta(\zeta - 1)(\gamma - \zeta)} ([\gamma(\gamma - 1) + 1][\zeta(\zeta - 1) + 1] - \gamma\zeta)$$

passt präzise mit Gravitationsrechnung zusammen

$$\frac{\delta^5 I_{\text{EH}}^{\text{AdS}_3}[g_{\mu\nu}]}{\delta g^{++}(z_1)\delta g^{++}(z_2)\delta g^{++}(z_3)\delta g^{++}(z_4)\delta g^{++}(z_5)} = \frac{4c f_5(\gamma, \zeta)}{\prod_{1 \leq i \leq 5} z_{ij}}$$

Bagchi, DG, Merbis '15

Die Folie für SpezialistInnen

Zwei Beispiele für Einträge im holographischen Wörterbuch a la AdS/CFT Maldacena '97

Haben Wörterbuch zwischen Gravitations- und Feldtheorieobservablen:

- ▶ Korrelationsfunktionen Gubser, Klebanov, Polyakov '98; Witten '98

zB 5-Punktfunktion von Energie-Impulsflüssen in 2d konformer Feldtheorie

$$\text{CFT}_2 : \quad \langle T_{++}(z_1)T_{++}(z_2)T_{++}(z_3)T_{++}(z_4)T_{++}(z_5) \rangle = \frac{4c f_5(\gamma, \zeta)}{\prod_{1 \leq i \leq 5} z_{ij}}$$

$\gamma = z_{12}z_{34}/(z_{13}z_{24})$, $\zeta = z_{25}z_{34}/(z_{35}z_{24})$, $z_{ij} = z_i - z_j$ und

$$f_5(\gamma, \zeta) = \frac{\gamma + \zeta}{2(\gamma - \zeta)} - \frac{\gamma^2 - \gamma\zeta + \zeta^2}{\gamma(\gamma - 1)\zeta(\zeta - 1)(\gamma - \zeta)} ([\gamma(\gamma - 1) + 1][\zeta(\zeta - 1) + 1] - \gamma\zeta)$$

passt präzise mit Gravitationsrechnung zusammen

$$\frac{\delta^5 I_{\text{EH}}^{\text{AdS}_3}[g_{\mu\nu}]}{\delta g^{++}(z_1)\delta g^{++}(z_2)\delta g^{++}(z_3)\delta g^{++}(z_4)\delta g^{++}(z_5)} = \frac{4c f_5(\gamma, \zeta)}{\prod_{1 \leq i \leq 5} z_{ij}}$$

Bagchi, DG, Merbis '15

- ▶ CFT₂ Verschränkungsentropie: Geodäten Ryu, Takayanagi '06

Die Folie für SpezialistInnen

Zwei Beispiele für Einträge im holographischen Wörterbuch a la AdS/CFT Maldacena '97

Haben Wörterbuch zwischen Gravitations- und Feldtheorieobservablen:

- ▶ Korrelationsfunktionen Gubser, Klebanov, Polyakov '98; Witten '98
zB 5-Punktfunktion von Energie-Impulsflüssen in 2d konformer Feldtheorie

$$\text{CFT}_2 : \quad \langle T_{++}(z_1)T_{++}(z_2)T_{++}(z_3)T_{++}(z_4)T_{++}(z_5) \rangle = \frac{4c f_5(\gamma, \zeta)}{\prod_{1 \leq i \leq 5} z_{ij}}$$

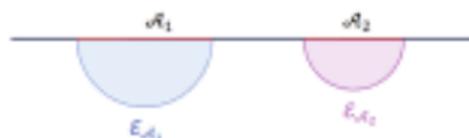
$$\gamma = z_{12}z_{34}/(z_{13}z_{24}), \quad \zeta = z_{25}z_{34}/(z_{35}z_{24}), \quad z_{ij} = z_i - z_j \quad \text{und}$$

$$f_5(\gamma, \zeta) = \frac{\gamma + \zeta}{2(\gamma - \zeta)} - \frac{\gamma^2 - \gamma\zeta + \zeta^2}{\gamma(\gamma - 1)\zeta(\zeta - 1)(\gamma - \zeta)} ([\gamma(\gamma - 1) + 1][\zeta(\zeta - 1) + 1] - \gamma\zeta)$$

passt präzise mit Gravitationsrechnung zusammen

$$\frac{\delta^5 I_{\text{EH}}^{\text{AdS}_3}[g_{\mu\nu}]}{\delta g^{++}(z_1)\delta g^{++}(z_2)\delta g^{++}(z_3)\delta g^{++}(z_4)\delta g^{++}(z_5)} = \frac{4c f_5(\gamma, \zeta)}{\prod_{1 \leq i \leq 5} z_{ij}}$$

- ▶ CFT₂ Verschränkungsentropie: Geodäten Ryu, Takayanagi '06



Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

- ▶ Viele Anwendungen!

Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

- ▶ Viele Anwendungen!
- ▶ Pragmatisch: Werkzeug für Rechnungen

Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

- ▶ Viele Anwendungen!
- ▶ Pragmatisch: Werkzeug für Rechnungen
- ▶ Stark wechselwirkende Theorien (schwierig) entsprechen klassischer Gravitation (einfach)

Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

- ▶ Viele Anwendungen!
- ▶ Pragmatisch: Werkzeug für Rechnungen
- ▶ Stark wechselwirkende Theorien (schwierig) entsprechen klassischer Gravitation (einfach)
- ▶ Quantengravitationstheorien (schwierig) entsprechen schwach wechselwirkenden Theorien (einfach)

Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

- ▶ Viele Anwendungen!
- ▶ Pragmatisch: Werkzeug für Rechnungen
- ▶ Stark wechselwirkende Theorien (schwierig) entsprechen klassischer Gravitation (einfach)
- ▶ Quantengravitationstheorien (schwierig) entsprechen schwach wechselwirkenden Theorien (einfach)
- ▶ Beispiele des 1. Typs: Schwerionenstöße am LHC und FAIR, Hochtemperatursupraleiter, Neutronensterne, kalte Atome, seltsame Metalle, viskose Hydrodynamik, ...

Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

- ▶ Viele Anwendungen!
- ▶ Pragmatisch: Werkzeug für Rechnungen
- ▶ Stark wechselwirkende Theorien (schwierig) entsprechen klassischer Gravitation (einfach)
- ▶ Quantengravitationstheorien (schwierig) entsprechen schwach wechselwirkenden Theorien (einfach)
- ▶ Beispiele des 1. Typs: Schwerionenstöße am LHC und FAIR, Hochtemperatursupraleiter, Neutronensterne, kalte Atome, seltsame Metalle, viskose Hydrodynamik, ...
- ▶ Beispiele des 2. Typs: mikroskopisches Verständnis Schwarzer Löcher, Informationsparadoxon und Verdampfung Schwarzer Löcher, Quanteninformationsaspekte Schwarzer Löcher und Quantengravitation, ...

Amüsant, aber wozu das Ganze?

...und warum gibt es $> 18,000$ wissenschaftliche Arbeiten zu Holographie seit 1998?

- ▶ Viele Anwendungen!
- ▶ Pragmatisch: Werkzeug für Rechnungen
- ▶ Stark wechselwirkende Theorien (schwierig) entsprechen klassischer Gravitation (einfach)
- ▶ Quantengravitationstheorien (schwierig) entsprechen schwach wechselwirkenden Theorien (einfach)
- ▶ Beispiele des 1. Typs: Schwerionenstöße am LHC und FAIR, Hochtemperatursupraleiter, Neutronensterne, kalte Atome, seltsame Metalle, viskose Hydrodynamik, ...
- ▶ Beispiele des 2. Typs: mikroskopisches Verständnis Schwarzer Löcher, Informationsparadoxon und Verdampfung Schwarzer Löcher, Quanteninformationsaspekte Schwarzer Löcher und Quantengravitation, ...

Erwarten zahlreiche neue Anwendungen in diesem Jahrhundert!

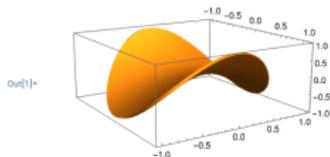
(Mein) langfristiges Ziel: Wie allgemein gilt das holographische Prinzip?

- ▶ Best-entwickelte Implementierung des holographischen Prinzips:
AdS/CFT Maldacena '97

(Mein) langfristiges Ziel: Wie allgemein gilt das holographische Prinzip?

- ▶ Best-entwickelte Implementierung des holographischen Prinzips: AdS/CFT Maldacena '97
- ▶ Problem: AdS falsches Vorzeichen der kosmologischen Konstante

```
in[1]:= AdS = Plot3D[x^2 - y^2, {x, -1, 1}, {y, -1, 1},  
Mesh -> False,  
RegionFunction -> Function[{x, y, z}, x^2 + y^2 < 1],  
PlotTheme -> "ThickSurface"]
```

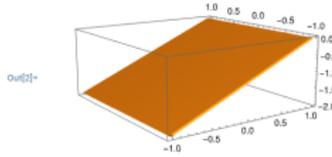


Euklidisches AdS_2



AdS/CFT
 $\Lambda < 0$

```
in[2]:= FS = Plot3D[x - 1, {x, -1, 1}, {y, -1, 1}, Mesh -> False,  
PlotTheme -> "ThickSurface"]
```

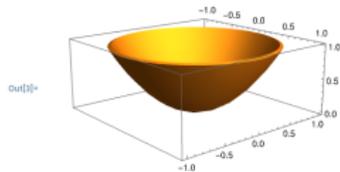


Euklidischer flacher Raum $_2$



Teilchenphysik
 $\Lambda = 0$

```
in[3]:= dS = Plot3D[x^2 + y^2, {x, -1, 1}, {y, -1, 1},  
Mesh -> False,  
RegionFunction -> Function[{x, y, z}, x^2 + y^2 < 1],  
PlotTheme -> "ThickSurface"]
```



Euklidisches dS_2



Kosmologie
 $\Lambda > 0$

(Mein) langfristiges Ziel: Wie allgemein gilt das holographische Prinzip?

- ▶ Best-entwickelte Implementierung des holographischen Prinzips: AdS/CFT Maldacena '97
- ▶ Problem: AdS falsches Vorzeichen der kosmologischen Konstante
- ▶ Funktioniert Holographie ohne kosmologischer Konstante?

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Highlights Recent Accepted Collections Authors Referees Search Press About Editorial Team 

Entanglement Entropy in Galilean Conformal Field Theories and Flat Holography

Arjun Bagchi, Rudranil Basu, Daniel Grumiller, and Max Riegler
Phys. Rev. Lett. **114**, 111602 – Published 19 March 2015



Article

References

Citing Articles (100)

PDF

HTML

Export Citation

Flat-Space Chiral Gravity

Arjun Bagchi, Stéphane Detournay, and Daniel Grumiller
Phys. Rev. Lett. **109**, 151301 – Published 9 October 2012

Cosmic Evolution from Phase Transition of Three-Dimensional Flat Space

Arjun Bagchi, Stéphane Detournay, Daniel Grumiller, and Joan Simón
Phys. Rev. Lett. **111**, 181301 – Published 28 October 2013

Cite Article

Local Quantum Energy Conditions in Non-Lorentz-Invariant Quantum Field Theories

Daniel Grumiller, Pulitoyta Parekh, and Max Riegler
Phys. Rev. Lett. **123**, 121602 – Published 20 September 2010

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Highlights Recent Accepted Collections Authors Referees Search Press

Spin-3 Gravity in Three-Dimensional Flat Space

Hamid Afshar, Arjun Bagchi, Beza Fareghbal, Daniel Grumiller, and Jan Rosseel
Phys. Rev. Lett. **111**, 121603 – Published 19 September 2013

Article

References

Citing Articles (102)

PDF

HTML

Export Citation



(Mein) langfristiges Ziel: Wie allgemein gilt das holographische Prinzip?

- ▶ Best-entwickelte Implementierung des holographischen Prinzips: AdS/CFT **Maldacena '97**
- ▶ Problem: AdS falsches Vorzeichen der kosmologischen Konstante
- ▶ Funktioniert Holographie ohne kosmologischer Konstante?
- ▶ Funktioniert Holographie mit positiver kosmologischer Konstante?

Holographic de Sitter Geometry from Entanglement in Conformal Field Theory

Jan de Boer, Michal P. Heller, Robert C. Myers, and Yasha Neiman
Phys. Rev. Lett. **116**, 061602 – Published 10 February 2016

The dS/CFT correspondence

Andrew Strominger¹

Published 23 November 2001 • Published under licence by IOP Publishing Ltd

[Journal of High Energy Physics, Volume 2001, JHEP10\(2001\)](#)

Citation Andrew Strominger JHEP10(2001)034

Regular Article - Theoretical Physics | [Open Access](#) | [Published: 22 January 2018](#)

The holographic dual of the Penrose transform

[Yasha Neiman](#) ✉

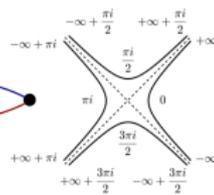
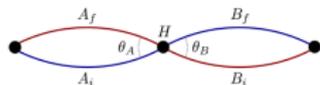
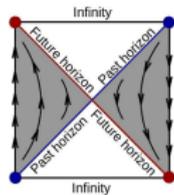
[Journal of High Energy Physics](#) **2018**, Article number: 100 (2018) | [Cite this article](#)

Higher spin realization of the DS/CFT correspondence

Dionysios Anninos¹, Thomas Hartman² and Andrew Strominger³

Published 14 December 2016 • © 2016 IOP Publishing Ltd

[Classical and Quantum Gravity, Volume 34, Number 1](#)



Higher spin de Sitter holography from functional determinants

Dionysios Anninos, Frederik Denef, George Konstantinidis ✉ & Edgar Shaghoulian

[Journal of High Energy Physics](#) **2014**, Article number: 7 (2014) | [Cite this article](#)

(Mein) langfristiges Ziel: Wie allgemein gilt das holographische Prinzip?

- ▶ Best-entwickelte Implementierung des holographischen Prinzips: AdS/CFT Maldacena '97
- ▶ Problem: AdS falsches Vorzeichen der kosmologischen Konstante
- ▶ Funktioniert Holographie ohne kosmologischer Konstante?
- ▶ Funktioniert Holographie mit positiver kosmologischer Konstante?
- ▶ Lifshitz Holographie
- ▶ Schrödinger Holographie
- ▶ Höhere-Spin Holographie
- ▶ Nahhorizont Holographie
- ▶ Himmlische Holographie
- ▶ Carrollsche Holographie
- ▶ Nah-AdS/Nah-CFT Holographie
- ▶ warped AdS Holographie
- ▶ ...

(Mein) langfristiges Ziel: Wie allgemein gilt das holographische Prinzip?

- ▶ Best-entwickelte Implementierung des holographischen Prinzips: AdS/CFT Maldacena '97
- ▶ Problem: AdS falsches Vorzeichen der kosmologischen Konstante
- ▶ Funktioniert Holographie ohne kosmologischer Konstante?
- ▶ Funktioniert Holographie mit positiver kosmologischer Konstante?
- ▶ Lifshitz Holographie
- ▶ Schrödinger Holographie
- ▶ Höhere-Spin Holographie
- ▶ Nahhorizont Holographie
- ▶ Himmlische Holographie
- ▶ Carrollsche Holographie
- ▶ Nah-AdS/Nah-CFT Holographie
- ▶ warped AdS Holographie
- ▶ ...

Zahlreiche Forschungspfade. Studierende willkommen beim Abenteuer!

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung

“Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
- ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
- ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
- ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: `www` am CERN entwickelt

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
- ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
- ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
- ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: `www` am CERN entwickelt
- ▶ Direkte Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie: GPS

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln
 - ▶ Geduld nötig in fundamentaler Forschung an grossen Fragen

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln
 - ▶ Geduld nötig in fundamentaler Forschung an grossen Fragen
 - ▶ Finanzierung muss aus öffentlichen Quellen kommen und nicht von Industrie

Industrielle Anwendungen?

- ▶ Forschung aus Neugier nicht fokussiert auf industrielle Anwendungen
 - ▶ Grosse industrielle Revolutionen kommen immer von durch Neugier getriebene Forschung
 - “Glühbirne wurde nicht kreiert im Versuch Kerzen zu verbessern”
 - ▶ Zwei Klassen von Anwendungen: Spin-offs und direkte Anwendungen
 - ▶ Berühmtes Spin-off Beispiel: www am CERN entwickelt
 - ▶ Direkte Anwendung der Allgemeinen Relativitätstheorie: GPS
- ▶ Es dauerte 8 Jahrzehnte um erste industrielle ART Anwendungen zu entwickeln
 - ▶ Geduld nötig in fundamentaler Forschung an grossen Fragen
 - ▶ Finanzierung muss aus öffentlichen Quellen kommen und nicht von Industrie
 - ▶ Im Gegenzug: öffentliche Forschungsgelder sollten in fundamentale Forschung gehen, nicht in industrielle (FWF nur ca. 1/6 des SNF)



Manchmal unerwartetes Medienecho

Beispiele für Reaktionen auf eine Presseaussendung der TU Wien anlässlich einer unserer Entdeckungen (holographische Berechnung von Verschränkungsentropie)

Entanglement Entropy in Galilean Conformal Field Theories and Flat Holography

Overview of attention for article published in Physical Review Letters, March 2015



About this Attention Score

In the top 5% of all research outputs scored by Altmetric

High Attention Score compared to outputs of the same age (99th percentile)

High Attention Score compared to outputs of the same age and source (99th percentile)

LESS...

Mentioned by



SUMMARY News Blogs Twitter Facebook Google+ Reddit Video Misc. Dimensions citations

So far, Altmetric has seen 15 news stories from 15 outlets.

DIE WELT **Waren Gangsta-Rapper überhaupt jemals real?**
Die Welt, 13 Apr 2016
Lassen Sie uns einen kleinen Ausflug in die theoretische Physik machen. Es ist eine tolle Welt voller Quanten, die nie allein...

Vox **Some physicists believe we're living in a giant hologram — and it's not that far-fetched**
Vox.com, 29 Jun 2015
(TU Wien) Some physicists actually believe that the universe we live in might be a hologram. The idea isn't that the universe...

atlantico **News story from Atlantico.fr on Saturday 09 May 2015**
Atlantico.fr, 09 May 2015

wyborcza.pl **Czy Wszechświat jest hologramem?**
Gazeta Wyborcza, 01 May 2015

THE IRRAWADDI POST **The Universe Might Be A Giant Hologram. Cue The Existential Crisis...**
Huffington Post, 30 Apr 2015
Is the world around us really just a trick of the eye? Scientists have long believed the universe could be a giant hologram ...

econews.gr **Το Σύμπαν είναι διαδίστατο ολόγραμμα;**
econews.gr, 29 Apr 2015
Την κρατούσα επιστημονική άποψη ότι το Σύμπαν είναι τρισδιάστατο, ωστόσο διεθνής ομάδα ερευνητών υποστηρίζει ότι είναι πιθανό το...

Forbes **Do We Live In A Hologram? The Idea Just Became A Little Less Crazy**
Forbes, 28 Apr 2015
Everything in our universe might be a lot flatter than it seems, at least, if you do the math.

DESIGN&TREND **The 3-D Universe Could Be A Hologram**
Design & Trend, 28 Apr 2015
Scientists are challenging the assumption that Universe is 3-D claiming that the Universe is a hologram, according to a new...

TECH TIMES **Is The Universe A Hologram? Holographic Principle Suggests 'Yes'**

NATURE WORLD NEWS **Is the 3D Universe Just a Hologram?**
Nature World News, 27 Apr 2015

Slogans zum Mitnehmen:

- ▶ Schwarze Löcher existieren und sind messbare Objekte

Akkretionsscheiben-Spektren, Keplerbahnen, Gravitationswellen, Schatten, ...

Slogans zum Mitnehmen:

- ▶ Schwarze Löcher existieren und sind messbare Objekte
Akkretionsscheiben-Spektren, Keplerbahnen, Gravitationswellen, Schatten, ...
- ▶ Entropie Schwarzer Löcher gegeben durch Fläche, nicht Volumen
Hawkingeffekt, Hawkingtemperatur, Bekenstein–Hawking Entropie, Schwarze-Loch Thermodynamik, ...

Slogans zum Mitnehmen:

- ▶ Schwarze Löcher existieren und sind messbare Objekte
Akkretionsscheiben-Spektren, Keplerbahnen, Gravitationswellen, Schatten, ...
- ▶ Entropie Schwarzer Löcher gegeben durch Fläche, nicht Volumen
Hawkingeffekt, Hawkingtemperatur, Bekenstein–Hawking Entropie, Schwarze-Loch Thermodynamik, ...
- ▶ Holographisches Prinzip: Gravitation in 3D = Quantentheorie in 2D
AdS/CFT Korrespondenz, Eich-/Gravitation-Dualität, Stringtheorie, Quantengravitation, ...

Slogans zum Mitnehmen:

- ▶ Schwarze Löcher existieren und sind messbare Objekte
Akkretionsscheiben-Spektren, Keplerbahnen, Gravitationswellen, Schatten, ...
- ▶ Entropie Schwarzer Löcher gegeben durch Fläche, nicht Volumen
Hawkingeffekt, Hawkingtemperatur, Bekenstein–Hawking Entropie, Schwarze-Loch Thermodynamik, ...
- ▶ Holographisches Prinzip: Gravitation in 3D = Quantentheorie in 2D
AdS/CFT Korrespondenz, Eich-/Gravitation-Dualität, Stringtheorie, Quantengravitation, ...
- ▶ Holographie = nützliches Rechenwerkzeug (schwierig ↔ einfach)
Schwerionenstöße, Quark-Gluon-Plasma, seltsame Metalle, holographische Supraleiter, ...

Slogans zum Mitnehmen:

- ▶ Schwarze Löcher existieren und sind messbare Objekte
- ▶ Entropie Schwarzer Löcher gegeben durch Fläche, nicht Volumen
- ▶ Holographisches Prinzip: Gravitation in 3D = Quantentheorie in 2D
- ▶ Holographie = nützliches Rechenwerkzeug (schwierig ↔ einfach)

Populärwissenschaftlicher Artikel zu holographischer Anwendung:



Artikel |  Open Access |  

Wieviel Energie kann man sich vom Vakuum borgen?

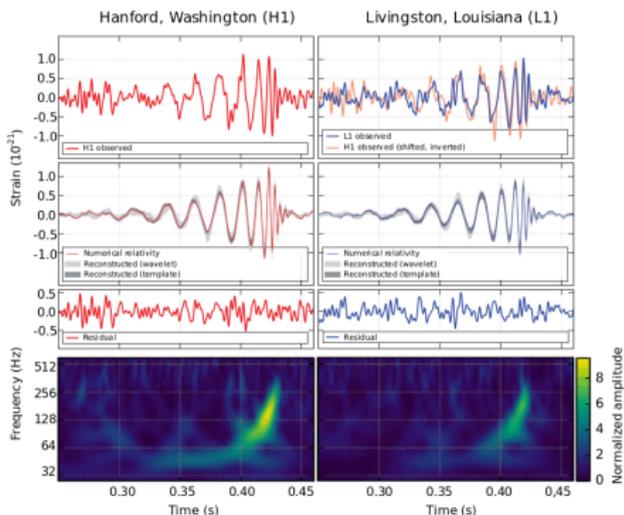
Negative Energieflüsse

Daniel Grumiller  Max Riegler 

First published: 04 January 2021 | <https://doi.org/10.1002/piuz.202001592>

Ich hoffe es hat euch gefallen...

...noch Fragen?



$$S_{\text{BH}} = \frac{A}{4}$$

