

Schwarze Löcher und das holographische Prinzip

Eine Reise durch mehrere Dimensionen

Daniel Grumiller

Institute for Theoretical Physics
Vienna University of Technology

University meets public, Vienna, Austria, March 2013



Outline

Schwarze Löcher

Thermodynamik Schwarzer Löcher

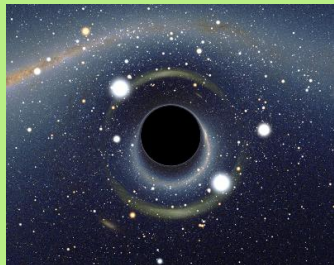
Informationsparadoxon

Das holographische Prinzip

Prolog

Schwarze Löcher haben scheinbar paradoxe Eigenschaften

Schwarze Löcher: die einfachsten
Objekte im Universum



Eigenschaften bestimmt durch

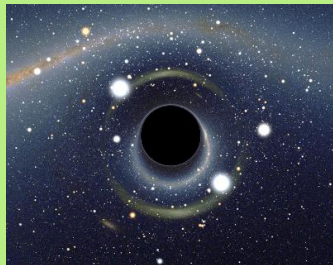
- ▶ Masse M
- ▶ Drehimpuls J
- ▶ Ladung Q

Schwarzes Loch \sim Teilchen!

Prolog

Schwarze Löcher haben scheinbar paradoxe Eigenschaften

Schwarze Löcher: die einfachsten Objekte im Universum

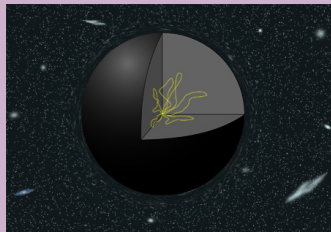


Eigenschaften bestimmt durch

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

Schwarzes Loch \sim Teilchen!

Schwarze Löcher: die komplexesten Objekte im Universum



Quantenmechanik:

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

Bekenstein–Hawking:

$$S_{BH} \sim A_{\text{hor}}/4$$

Outline

Schwarze Löcher

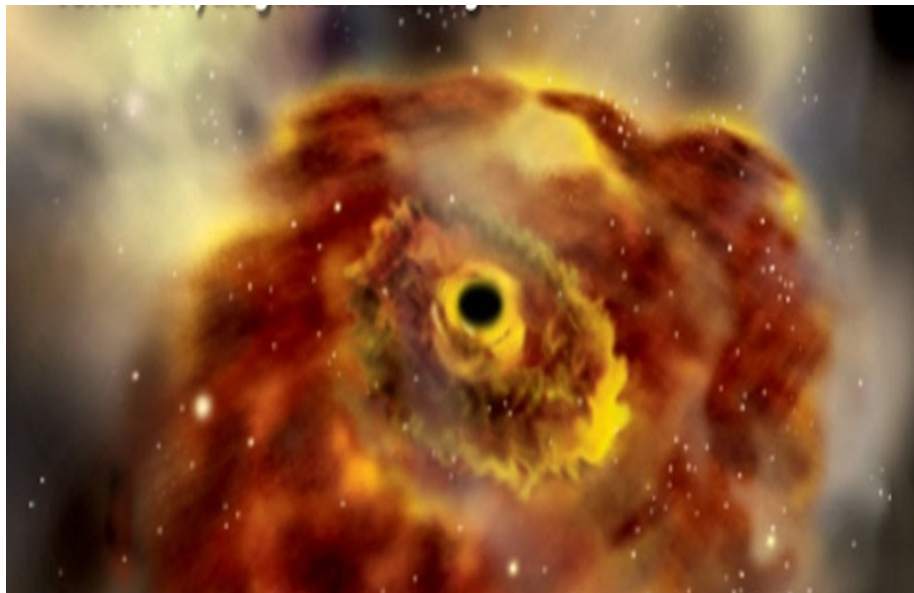
Thermodynamik Schwarzer Löcher

Informationsparadoxon

Das holographische Prinzip

Einleitung

Das derzeit grösste Schwarze Loch: OJ287 (18 Milliarden Sonnenmassen)



Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)
- ▶ K. Schwarzschild (1916): Erste exakte ART Lösung: Schwarzes Loch!

Vorgeschichte Schwarzer Löcher

- ▶ O.C. Rømer (1676): Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- ▶ I. Newton (1686): Gravitationsgesetz

$$F_r = -G_N \frac{mM}{r^2}$$

- ▶ J. Michell (1783): “all light emitted from such a body would be made to return towards it by its own proper gravity”
- ▶ P.S. Laplace (1796): Exposition du système du Monde (“Dunkle Sterne”)
- ▶ T. Young (1801): Interferenzexperimente zeigen, dass Licht Welle ist – Newton’s Lichttheorie ist tot, und Dunkle Sterne ebenfalls
- ▶ A. Einstein (1905): Spezielle Relativitätstheorie
- ▶ A. Einstein (1915): Allgemeine Relativitätstheorie (ART)
- ▶ K. Schwarzschild (1916): Erste exakte ART Lösung: Schwarzes Loch!

Schwarze Löcher sind die einfachsten *und* kompliziertesten Objekte im Universum!

Schwarze Löcher — Wirklichkeit und Phantasie

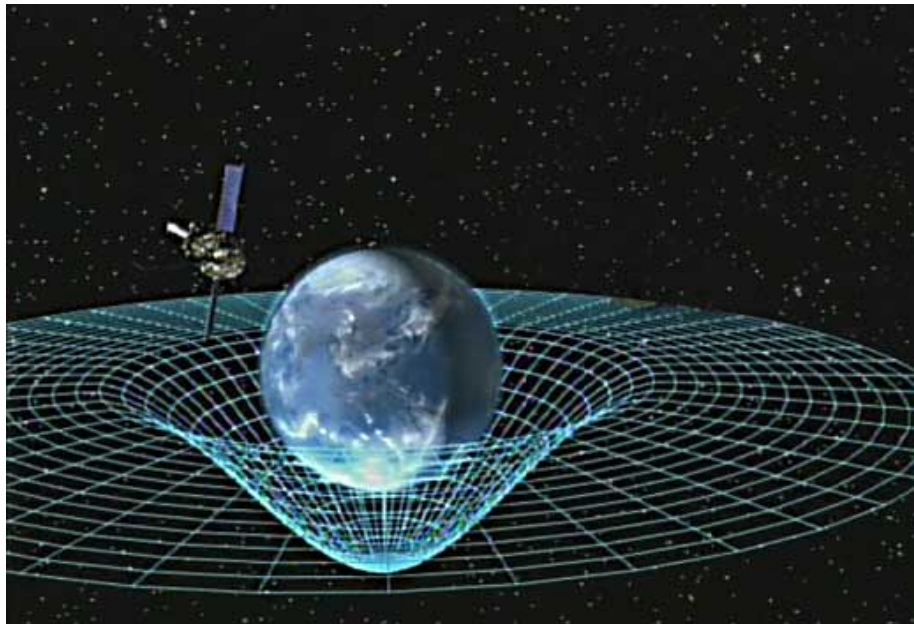
Astrophysikalisches Schwarzes Loch



Erfundene Yu-Gi-Oh! Karte

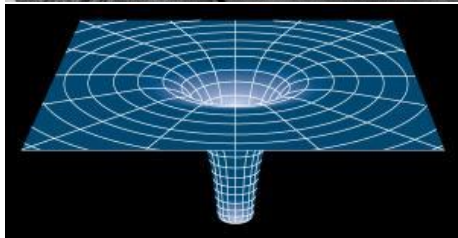
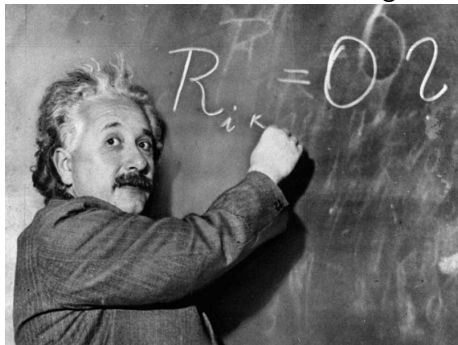


Gravitation als Raumkrümmung

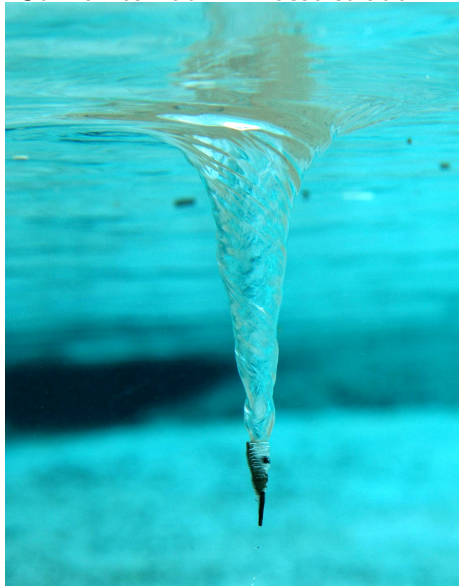


Schwarzes Loch: Raumkrümmung wird stark!

Schwarze Loch Raumkrümmung



“Schwarzes Loch”: Wasserstrudel



Ausgewählte Meilensteine in der klassischen Ära

- ▶ [R. Kerr](#) (1963): Exakte rotierende Schwarze Loch Lösung von Interesse für Astrophysik
- ▶ Cygnus X-1 (1964): erste Beobachtung von Röntgenstrahlen eines Schwarzen Loch Binärsystemes
- ▶ [J. Wheeler](#) (December 1967): Erfindet den Ausdruck “Schwarzes Loch”

Ausgewählte Meilensteine in der klassischen Ära

- ▶ **R. Kerr** (1963): Exakte rotierende Schwarze Loch Lösung von Interesse für Astrophysik
- ▶ **Cygnus X-1** (1964): erste Beobachtung von Röntgenstrahlen eines Schwarzen Loch Binärsystemes
- ▶ **J. Wheeler** (December 1967): Erfindet den Ausdruck “Schwarzes Loch”
- ▶ **J. Bekenstein** (1972): Spekulation das Schwarze Löcher Entropie haben könnten
- ▶ **J. Bardeen, B. Carter and S. Hawking** (1973): Vier Hauptsätze der Schwarzen Loch Mechanik

Ausgewählte Meilensteine in der klassischen Ära

- ▶ **R. Kerr** (1963): Exakte rotierende Schwarze Loch Lösung von Interesse für Astrophysik
- ▶ **Cygnus X-1** (1964): erste Beobachtung von Röntgenstrahlen eines Schwarzen Loch Binärsystemes
- ▶ **J. Wheeler** (December 1967): Erfindet den Ausdruck “Schwarzes Loch”
- ▶ **J. Bekenstein** (1972): Spekulation das Schwarze Löcher Entropie haben könnten
- ▶ **J. Bardeen, B. Carter and S. Hawking** (1973): Vier Hauptsätze der Schwarzen Loch Mechanik
- ▶ **S. Hawking** (1974): **Schwarze Löcher verdampfen aufgrund von Quanteneffekten**

Beginn eines jahrzehntelangen Disputes zu Informationsverlust in Schwarzen Löchern

Outline

Schwarze Löcher

Thermodynamik Schwarzer Löcher

Informationsparadoxon

Das holographische Prinzip

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"

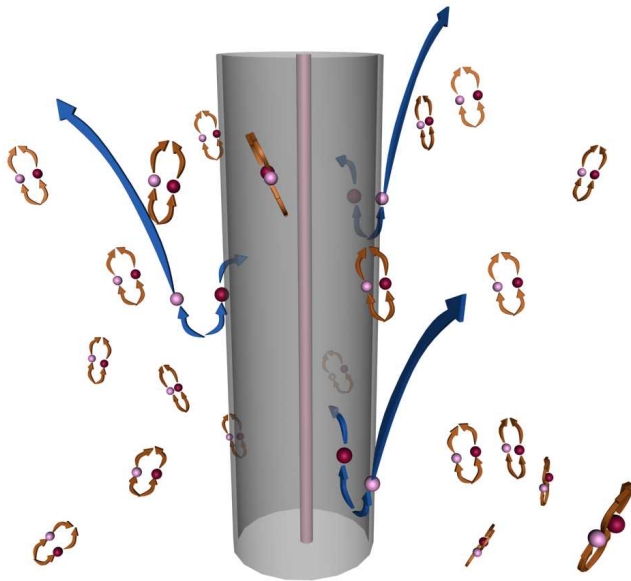
M : Masse

A : Oberfläche (des Horizontes)

Formale Analogie oder echte Physik?

Hawkingeffekt

SL verdampfen wegen Quanteneffekten!



Natürliche
Einheiten:

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

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

Schwarzschild
(SI Einheiten):

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G_N k_B M}$$

$$S_{BH} = \frac{c^3 A}{4G_N \hbar}$$

Outline

Schwarze Löcher

Thermodynamik Schwarzer Löcher

Informationsparadoxon

Das holographische Prinzip

Entropie = mittlere zu erwartende Information

Entropie = mittlere zu erwartende Information

Formales Beispiel mit Bits: Zustand niedriger Entropie:

00

Zustand hoher Entropie:

011010101001011110101000001001101001011101

Beide Zustände sind mikroskopisch betrachtet gleich wahrscheinlich. Aber der zweite ist makroskopisch typischer, da er im Wesentlichen ununterscheidbar ist von z.B.

010101010111101010101001010101110000110101

Entropie = mittlere zu erwartende Information

Formales Beispiel mit Bits: Zustand niedriger Entropie:

00

Zustand hoher Entropie:

01101010100101111010100001001101001011101

Beide Zustände sind mikroskopisch betrachtet gleich wahrscheinlich. Aber der zweite ist makroskopisch typischer, da er im Wesentlichen ununterscheidbar ist von z.B.

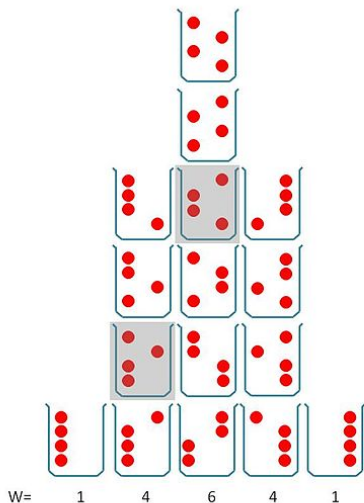
010101010111101010101001010101110000110101

Dieselben Betrachtungen treffen z.B. auf die Verteilung der Luftmoleküle in diesem Raum zu!

Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

Bild von Wikipedia:

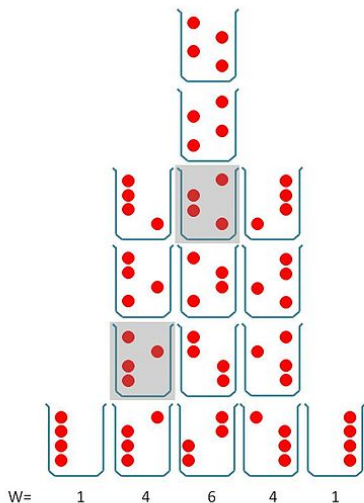
- ▶ Jedes Molekül links oder rechts



Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

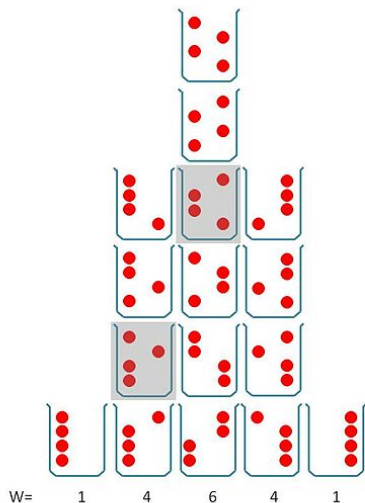
Bild von Wikipedia:

- ▶ Jedes Molekül links oder rechts
- ▶ 4 bits an Information



Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

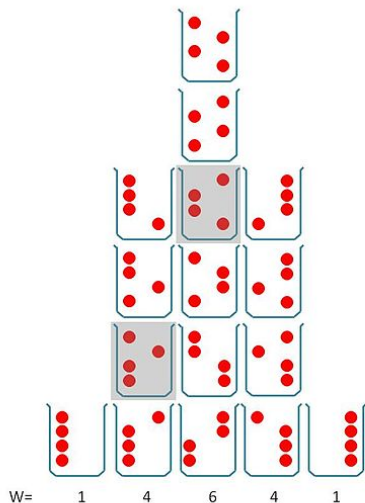
Bild von Wikipedia:



- ▶ Jedes Molekül links oder rechts
- ▶ 4 bits an Information
- ▶ $2^4 = 16$ Mikrozustände

Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

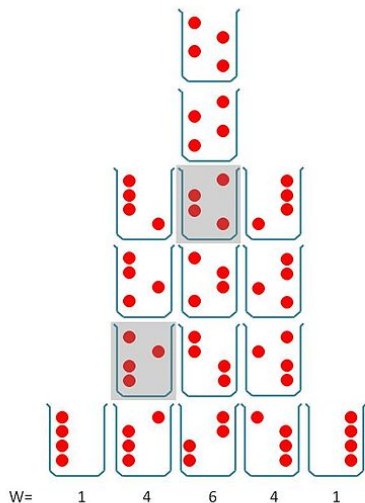
Bild von Wikipedia:



- ▶ Jedes Molekül links oder rechts
- ▶ 4 bits an Information
- ▶ $2^4 = 16$ Mikrozustände
- ▶ Nur 5 Makrozustände

Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

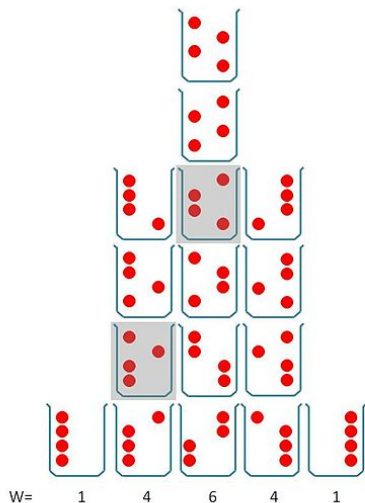
Bild von Wikipedia:



- ▶ Jedes Molekül links oder rechts
- ▶ 4 bits an Information
- ▶ $2^4 = 16$ Mikrozustände
- ▶ Nur 5 Makrozustände
- ▶ Am wahrscheinlichsten: gleich viele Moleküle links und rechts

Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

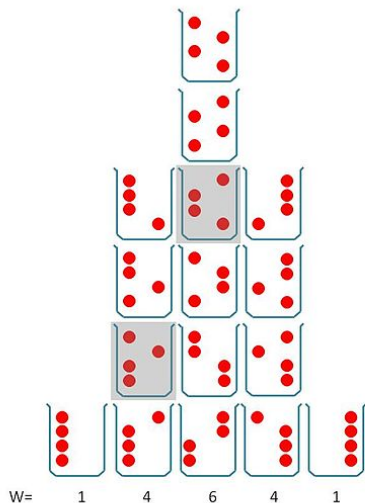
Bild von Wikipedia:



- ▶ Jedes Molekül links oder rechts
- ▶ 4 bits an Information
- ▶ $2^4 = 16$ Mikrozustände
- ▶ Nur 5 Makrozustände
- ▶ Am wahrscheinlichsten: gleich viele Moleküle links und rechts
- ▶ “Typischer” Makrozustand

Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

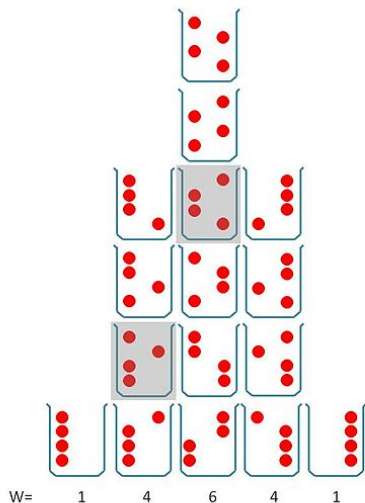
Bild von Wikipedia:



- ▶ Jedes Molekül links oder rechts
- ▶ 4 bits an Information
- ▶ $2^4 = 16$ Mikrozustände
- ▶ Nur 5 Makrozustände
- ▶ Am wahrscheinlichsten: gleich viele Moleküle links und rechts
- ▶ “Typischer” Makrozustand
- ▶ Je mehr Moleküle, umso wahrscheinlicher der “typische” Makrozustand

Spielzeugmodell: Raum mit vier Molekülen

Bild von Wikipedia:



- ▶ Jedes Molekül links oder rechts
- ▶ 4 bits an Information
- ▶ $2^4 = 16$ Mikrozustände
- ▶ Nur 5 Makrozustände
- ▶ Am wahrscheinlichsten: gleich viele Moleküle links und rechts
- ▶ “Typischer” Makrozustand
- ▶ Je mehr Moleküle, umso wahrscheinlicher der “typische” Makrozustand
- ▶ Systeme mit sehr vielen Molekülen werden erstaunlich vorhersagbar in Bezug auf “typische” Eigenschaften!

Statistische Interpretation von Entropie

Ludwig Boltzmann's Grab



Boltzmann'sche Formel für Entropie S :

$$S = k \log W$$

k : Boltzmannkonstante (setzen $k = 1$)

W : Anzahl der Mikrozustände zu einem vorgegebenen Makrozustand

Wiener Zentralfriedhof

Statistische Interpretation von Entropie

Ludwig Boltzmann's Grab



Wiener Zentralfriedhof

Boltzmann'sche Formel für Entropie S :

$$S = k \log W$$

k : Boltzmannkonstante (setzen $k = 1$)

W : Anzahl der Mikrozustände zu einem vorgegebenen Makrozustand Beispiel:

Luft in diesem Raum (etwa 100kg)
Anzahl der Luftmoleküle $N \approx 10^{27}$

Makrozustand: gegeben durch Volumen V und Temperatur T

Anzahl der Mikrozustände die zu demselben Makrozustand führen:

$$W \approx e^N \approx e^{10^{27}}$$

Statistische Interpretation von Entropie

Ludwig Boltzmann's Grab



Wiener Zentralfriedhof

Boltzmann'sche Formel für Entropie S :

$$S = k \log W$$

k : Boltzmannkonstante (setzen $k = 1$)

W : Anzahl der Mikrozustände zu einem vorgegebenen Makrozustand Beispiel:

Luft in diesem Raum (etwa 100kg)
Anzahl der Luftmoleküle $N \approx 10^{27}$

Makrozustand: gegeben durch Volumen V und Temperatur T

Anzahl der Mikrozustände die zu demselben Makrozustand führen:

$$W \approx e^N \approx e^{10^{27}}$$

Entropie der Luft in diesem Raum:

$$S \approx \log e^{10^{27}} = 10^{27} \approx N \propto V$$

Zurück zu Schwarzen Löchern...

Überraschungen:

Zurück zu Schwarzen Löchern...

Überraschungen:

1. Schwarze Löcher strahlen und haben eine Entropie S_{BH}

Zurück zu Schwarzen Löchern...

Überraschungen:

1. Schwarze Löcher strahlen und haben eine Entropie S_{BH}
2. Die Entropie skaliert nicht mit dem Volumen sondern mit der Fläche

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

G_N ist die Newtonsche Gravitationskonstante (setzen $G_N = 1$)

A ist die Oberfläche des Horizontes des Schwarzen Loches

Zurück zu Schwarzen Löchern...

Überraschungen:

1. Schwarze Löcher strahlen und haben eine Entropie S_{BH}
2. Die Entropie skaliert nicht mit dem Volumen sondern mit der Fläche

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

G_N ist die Newtonsche Gravitationskonstante (setzen $G_N = 1$)

A ist die Oberfläche des Horizontes des Schwarzen Loches

3. Die Entropie Schwarzer Löcher ist gigantisch!

Das kleinste astrophysikalische Schwarze Loch hat eine Entropie

$$S_{\text{kleinstes } BH} \approx 10^{77}$$

Das sind 50 Größenordnungen über der Entropie der Luft hier!

Preisfrage:

Wenn Schwarze Löcher die einfachsten makroskopischen Objekte sind, warum haben sie dann so eine unglaublich grosse Entropie?

Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzem Loch und Verdampfung desselbigen:

Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzem Loch und Verdampfung desselbigen:

- ▶ Anfangszustand: reiner Quantenzustand

Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzen Loch und Verdampfung desselbigen:

- ▶ Anfangszustand: reiner Quantenzustand
- ▶ Zwischenzustand: Schwarzes Loch

Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzem Loch und Verdampfung desselbigen:

- ▶ Anfangszustand: reiner Quantenzustand
- ▶ Zwischenzustand: Schwarzes Loch
- ▶ Endzustand: Hawkingstrahlung

Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzem Loch und Verdampfung desselbigen:

- ▶ Anfangszustand: reiner Quantenzustand
- ▶ Zwischenzustand: Schwarzes Loch
- ▶ Endzustand: Hawkingstrahlung

Widerspricht der Quantenmechanik! (Unitarität)

Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzem Loch und Verdampfung desselbigen:

- ▶ Anfangszustand: reiner Quantenzustand
- ▶ Zwischenzustand: Schwarzes Loch
- ▶ Endzustand: Hawkingstrahlung

Widerspricht der Quantenmechanik! (Unitarität)

THE BLACK HOLE WAR

LEONARD SUSSKIND

MY BATTLE WITH
STEPHEN HAWKING
TO MAKE THE
WORLD SAFE FOR
QUANTUM MECHANICS

- ▶ Beginn eines Jahrzehntelangen Disputes

Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzem Loch und Verdampfung desselbigen:

- ▶ Anfangszustand: reiner Quantenzustand
- ▶ Zwischenzustand: Schwarzes Loch
- ▶ Endzustand: Hawkingstrahlung

Widerspricht der Quantenmechanik! (Unitarität)

THE BLACK HOLE WAR

LEONARD SUSSKIND

MY BATTLE WITH
STEPHEN HAWKING
TO MAKE THE
WORLD SAFE FOR
QUANTUM MECHANICS

- ▶ Beginn eines Jahrzehntelangen Disputes
- ▶ Hawking: Information geht verloren



Die Essenz des Informationsparadoxons

Kollaps von Materie zu Schwarzem Loch und Verdampfung desselbigen:

- ▶ Anfangszustand: reiner Quantenzustand
- ▶ Zwischenzustand: Schwarzes Loch
- ▶ Endzustand: Hawkingstrahlung

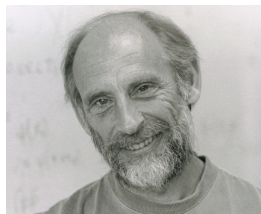
Widerspricht der Quantenmechanik! (Unitarität)

THE BLACK HOLE WAR

LEONARD SUSSKIND

MY BATTLE WITH
STEPHEN HAWKING
TO MAKE THE
WORLD SAFE FOR
QUANTUM MECHANICS

- ▶ Beginn eines Jahrzehntelangen Disputes
- ▶ Hawking: Information geht verloren
- ▶ Susskind: Information geht nicht verloren



Die Wette

Whereas Stephen Hawking and Kip Thorne firmly believe that information swallowed by a black hole is forever hidden from the outside universe, and can never be revealed even as the black hole evaporates and completely disappears,

And whereas John Preskill firmly believes that a mechanism for the information to be released by the evaporating black hole must and will be found in the correct theory of quantum gravity,

Therefore Preskill offers, and Hawking/Thorne accept, a wager that:

When an initial pure quantum state undergoes gravitational collapse to form a black hole, the final state at the end of black hole evaporation will always be a pure quantum state.

The loser(s) will reward the winner(s) with an encyclopedia of the winner's choice, from which information can be recovered at will.

Stephen W. Hawking, Kip S. Thorne, John P. Preskill
Pasadena, California, 6 February 1997

Outline

Schwarze Löcher

Thermodynamik Schwarzer Löcher

Informationsparadoxon

Das holographische Prinzip

Entropievergleich

Entropie eines Gases:

$$S \sim V \sim L^d$$

L : Länge

d : Anzahl der Raumdimensionen

Entropievergleich

Entropie eines Gases:

$$S \sim V \sim L^d$$

L : Länge

d : Anzahl der Raumdimensionen

Entropie eines Schwarzen Loches:

$$S_{BH} \sim A \sim L^{d-1}$$

L : Länge

d : Anzahl der Raumdimensionen

Entropievergleich

Entropie eines Gases:

$$S \sim V \sim L^d$$

L : Länge

d : Anzahl der Raumdimensionen

Entropie eines Schwarzen Loches:

$$S_{BH} \sim A \sim L^{d-1}$$

L : Länge

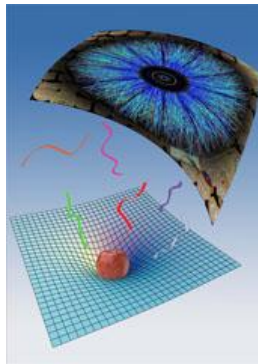
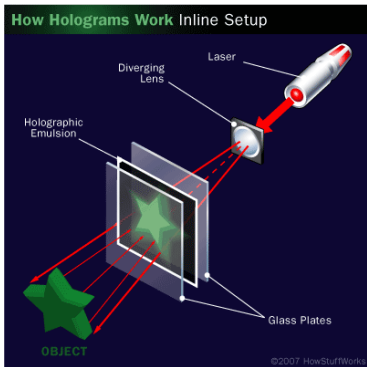
d : Anzahl der Raumdimensionen

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

Holographisches Prinzip:

Konsistente Quantengravitation in $d + 1$ Dimensionen ist äquivalent zu einer gewöhnlichen Quantentheorie ohne Gravitation in d Dimensionen

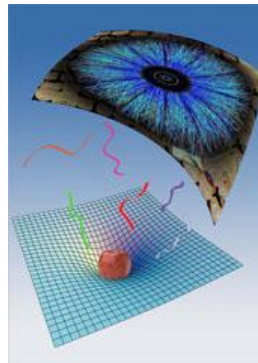
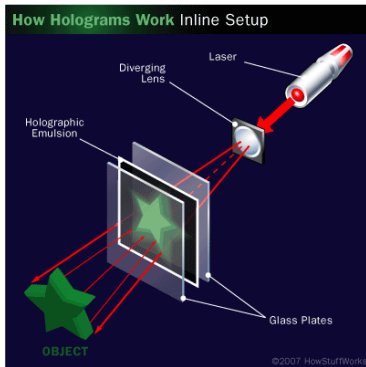
Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten Ideen der zeitgenössischen theoretischen Physik:

- ▶ Anzahl der Dimensionen hängt von der Perspektive ab

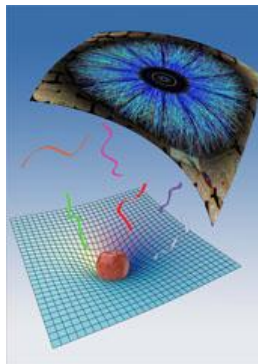
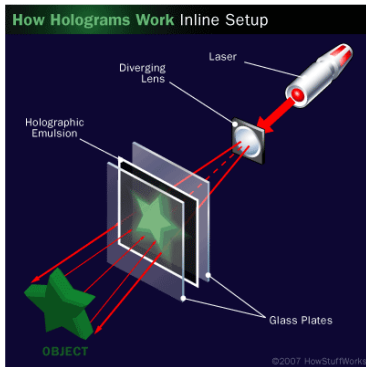
Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten Ideen der zeitgenössischen theoretischen Physik:

- ▶ Anzahl der Dimensionen hängt von der Perspektive ab
- ▶ Können dieselbe physikalische Situation mit zwei unterschiedlichen Formulierungen in verschiedenen Dimensionen beschreiben

Konsequenzen des holographischen Prinzips



Eine der fruchtbarsten Ideen der zeitgenössischen theoretischen Physik:

- ▶ Anzahl der Dimensionen hängt von der Perspektive ab
- ▶ Können dieselbe physikalische Situation mit zwei unterschiedlichen Formulierungen in verschiedenen Dimensionen beschreiben
- ▶ Formulierung in höherer Dimension ist Gravitationstheorie
- ▶ Formulierung in niedrigerer Dimension ist Quantentheorie ohne Gravitation

“Leute ohne Ideen haben Prinzipien”

Gibt es Theorien die das holographische Prinzip auch realisieren?

- ▶ Einige Zeit war das holographische Prinzip eher das Prinzip Hoffnung

“Leute ohne Ideen haben Prinzipien”

Gibt es Theorien die das holographische Prinzip auch realisieren?

- ▶ Einige Zeit war das holographische Prinzip eher das Prinzip Hoffnung
- ▶ Es gab keine konkreten Beispiele für die Realisierung dieses Prinzips

“Leute ohne Ideen haben Prinzipien”

Gibt es Theorien die das holographische Prinzip auch realisieren?

- ▶ Einige Zeit war das holographische Prinzip eher das Prinzip Hoffnung
- ▶ Es gab keine konkreten Beispiele für die Realisierung dieses Prinzips
- ▶ Durchbruch von Maldacena 1997: Holographisches Prinzip ist auf konkrete Weise realisiert in Stringtheorie

“Leute ohne Ideen haben Prinzipien”

Gibt es Theorien die das holographische Prinzip auch realisieren?

- ▶ Einige Zeit war das holographische Prinzip eher das Prinzip Hoffnung
- ▶ Es gab keine konkreten Beispiele für die Realisierung dieses Prinzips
- ▶ Durchbruch von Maldacena 1997: Holographisches Prinzip ist auf konkrete Weise realisiert in Stringtheorie

AdS/CFT Korrespondenz:

Typ IIB Stringtheorie auf $\text{AdS}_5 \times S^5$ ist äquivalent zu $\mathcal{N} = 4$ Super-Yang-Mills-Theorie in 4 Dimensionen

“Leute ohne Ideen haben Prinzipien”

Gibt es Theorien die das holographische Prinzip auch realisieren?

- ▶ Einige Zeit war das holographische Prinzip eher das Prinzip Hoffnung
- ▶ Es gab keine konkreten Beispiele für die Realisierung dieses Prinzips
- ▶ Durchbruch von Maldacena 1997: Holographisches Prinzip ist auf konkrete Weise realisiert in Stringtheorie

AdS/CFT Korrespondenz:

Typ IIB Stringtheorie auf $\text{AdS}_5 \times S^5$ ist äquivalent zu $\mathcal{N} = 4$ Super-Yang-Mills-Theorie in 4 Dimensionen

- ▶ Klingt sehr kompliziert

“Leute ohne Ideen haben Prinzipien”

Gibt es Theorien die das holographische Prinzip auch realisieren?

- ▶ Einige Zeit war das holographische Prinzip eher das Prinzip Hoffnung
- ▶ Es gab keine konkreten Beispiele für die Realisierung dieses Prinzips
- ▶ Durchbruch von Maldacena 1997: Holographisches Prinzip ist auf konkrete Weise realisiert in Stringtheorie

AdS/CFT Korrespondenz:

Typ IIB Stringtheorie auf $\text{AdS}_5 \times S^5$ ist äquivalent zu $\mathcal{N} = 4$ Super-Yang-Mills-Theorie in 4 Dimensionen

- ▶ Klingt sehr kompliziert
- ▶ Ist es auch

“Leute ohne Ideen haben Prinzipien”

Gibt es Theorien die das holographische Prinzip auch realisieren?

- ▶ Einige Zeit war das holographische Prinzip eher das Prinzip Hoffnung
- ▶ Es gab keine konkreten Beispiele für die Realisierung dieses Prinzips
- ▶ Durchbruch von Maldacena 1997: Holographisches Prinzip ist auf konkrete Weise realisiert in Stringtheorie

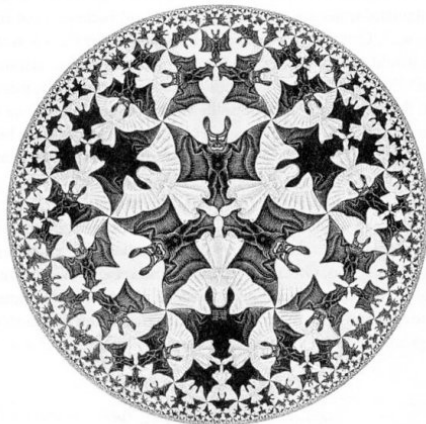
AdS/CFT Korrespondenz:

Typ IIB Stringtheorie auf $\text{AdS}_5 \times S^5$ ist äquivalent zu $\mathcal{N} = 4$ Super-Yang-Mills-Theorie in 4 Dimensionen

- ▶ Klingt sehr kompliziert
- ▶ Ist es auch
- ▶ Hat vielfältige Anwendungen (meistzitierte wissenschaftliche Arbeit in theoretischer Physik!)

Einfacheres Beispiel: AdS_3/CFT_2 Korrespondenz

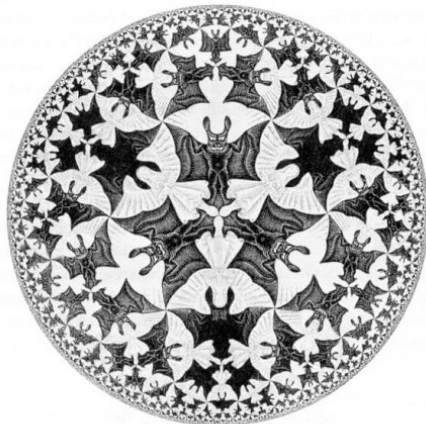
- ▶ AdS ist eine negativ gekrümmte Raumzeit



Open Universe Looking from inside, boundary at infinity
Limit Circle IV, by M. C. Escher

Einfacheres Beispiel: AdS_3/CFT_2 Korrespondenz

- ▶ AdS ist eine negativ gekrümmte Raumzeit
- ▶ CFT ist eine Quantenfeldtheorie mit konformer Symmetrie
Diese lebt am Rand der Gravitationstheorie



Open Universe Looking from inside, boundary at infinity
Limit Circle IV, by M. C. Escher

Zeit ist die vierte Dimension, aber was ist die fünfte?

Konforme Symmetrie inkludiert Skaleninvarianz

$$\text{Koordinaten: } x^\mu \rightarrow \lambda x^\mu \quad \text{Energie: } E \rightarrow E/\lambda$$

Zeit ist die vierte Dimension, aber was ist die fünfte?

Konforme Symmetrie inkludiert Skaleninvarianz

$$\text{Koordinaten: } x^\mu \rightarrow \lambda x^\mu \quad \text{Energie: } E \rightarrow E/\lambda$$

Idee: betrachte Energie als fünfte Koordinate

$$ds^2 = E^2 \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + 1/E^2 dE^2$$

Zeit ist die vierte Dimension, aber was ist die fünfte?

Konforme Symmetrie inkludiert Skaleninvarianz

$$\text{Koordinaten: } x^\mu \rightarrow \lambda x^\mu \quad \text{Energie: } E \rightarrow E/\lambda$$

Idee: betrachte Energie als fünfte Koordinate

$$ds^2 = E^2 \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + 1/E^2 dE^2$$

Das ist genau das AdS Linienelement in einer Dimension höher!

Zeit ist die vierte Dimension, aber was ist die fünfte?

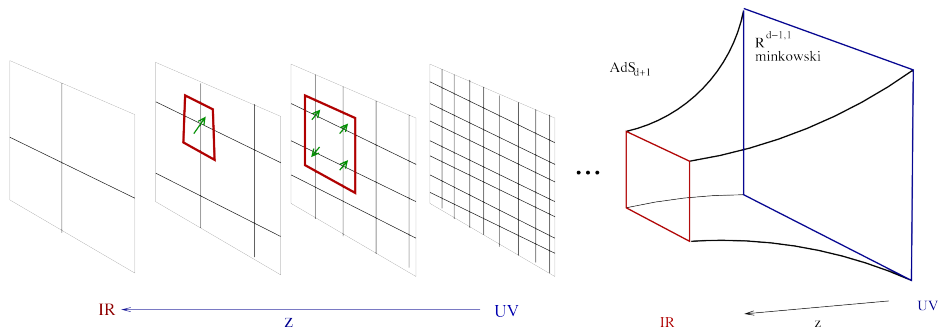
Konforme Symmetrie inkludiert Skaleninvarianz

$$\text{Koordinaten: } x^\mu \rightarrow \lambda x^\mu \quad \text{Energie: } E \rightarrow E/\lambda$$

Idee: betrachte Energie als fünfte Koordinate

$$ds^2 = E^2 \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + 1/E^2 dE^2$$

Das ist genau das AdS Linienelement in einer Dimension höher!



Nochmals zurück zu Schwarzen Löchern

Wie hilft uns die AdS/CFT Korrespondenz beim Verständnis des Informationsparadoxon?

Holographische Tatsachen:

Nochmals zurück zu Schwarzen Löchern

Wie hilft uns die AdS/CFT Korrespondenz beim Verständnis des Informationsparadoxon?

Holographische Tatsachen:

1. Wenn Quantengravitation (in d Dim.) äquivalent ist zu einer Quantentheorie ohne Gravitation (in $d - 1$ Dim.) dann *kann* es keinen Informationsverlust bei der Verdampfung Schwarzer Löcher geben!

Nochmals zurück zu Schwarzen Löchern

Wie hilft uns die AdS/CFT Korrespondenz beim Verständnis des Informationsparadoxon?

Holographische Tatsachen:

1. Wenn Quantengravitation (in d Dim.) äquivalent ist zu einer Quantentheorie ohne Gravitation (in $d - 1$ Dim.) dann *kann* es keinen Informationsverlust bei der Verdampfung Schwarzer Löcher geben!
2. Die Proportionalität

$$S \propto V_{d-1} \propto A_d \propto S_{BH}$$

kommt automatisch richtig heraus, da eine Fläche in d Dimensionen einem Volumen in $d - 1$ Dimensionen entspricht

Nochmals zurück zu Schwarzen Löchern

Wie hilft uns die AdS/CFT Korrespondenz beim Verständnis des Informationsparadoxon?

Holographische Tatsachen:

1. Wenn Quantengravitation (in d Dim.) äquivalent ist zu einer Quantentheorie ohne Gravitation (in $d - 1$ Dim.) dann *kann* es keinen Informationsverlust bei der Verdampfung Schwarzer Löcher geben!
2. Die Proportionalität

$$S \propto V_{d-1} \propto A_d \propto S_{BH}$$

kommt automatisch richtig heraus, da eine Fläche in d Dimensionen einem Volumen in $d - 1$ Dimensionen entspricht

3. Berechnungen der Entropie auf der Quantentheorieseite der Korrespondenz zeigen: Auch der Proportionalitätsfaktor kommt richtig heraus:

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

Nochmals zurück zu Schwarzen Löchern

Wie hilft uns die AdS/CFT Korrespondenz beim Verständnis des Informationsparadoxon?

Holographische Tatsachen:

1. Wenn Quantengravitation (in d Dim.) äquivalent ist zu einer Quantentheorie ohne Gravitation (in $d - 1$ Dim.) dann *kann* es keinen Informationsverlust bei der Verdampfung Schwarzer Löcher geben!
2. Die Proportionalität

$$S \propto V_{d-1} \propto A_d \propto S_{BH}$$

kommt automatisch richtig heraus, da eine Fläche in d Dimensionen einem Volumen in $d - 1$ Dimensionen entspricht

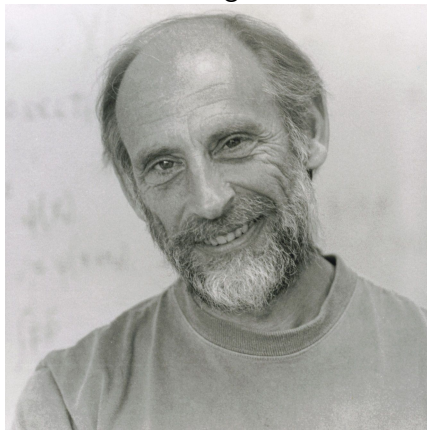
3. Berechnungen der Entropie auf der Quantentheorieseite der Korrespondenz zeigen: Auch der Proportionalitätsfaktor kommt richtig heraus:

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

Fazit: Information geht nicht verloren!

Quantenmechanik stimmt auch in Anwesenheit von Schwarzen Löchern!

Anlässlich Hawking's 60. Geburtstag



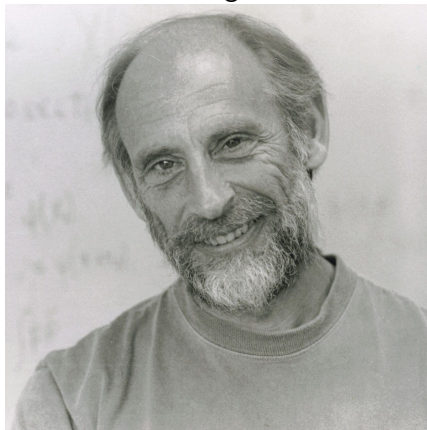
Stephen, as we all know, is by far the most stubborn and infuriating person in the universe.

My own scientific relation with him I think can be called adversarial.

We have disagreed profoundly about deep issues concerning black holes, information and all that kind of thing.

(Quelle: <http://arxiv.org/abs/hep-th/0204027>)

Anlässlich Hawking's 60. Geburtstag



Stephen, as we all know, is by far the most stubborn and infuriating person in the universe.

My own scientific relation with him I think can be called adversarial.

We have disagreed profoundly about deep issues concerning black holes, information and all that kind of thing.

(Quelle: <http://arxiv.org/abs/hep-th/0204027>)

At times he has caused me to pull my hair out in frustration – and you can plainly see the result. I can assure you that when we began to argue more than two decades ago, I had a full head of hair.

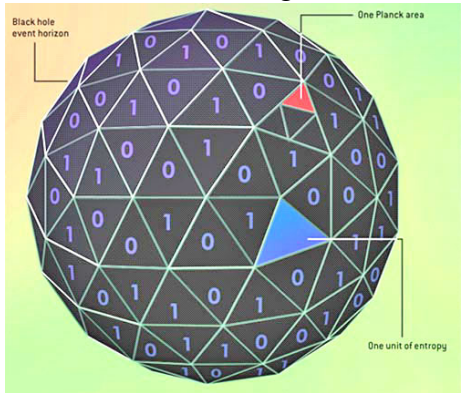
Hawking verliert seine Wette, 2004

GR17 Konferenz in Dublin, Photo von der Times

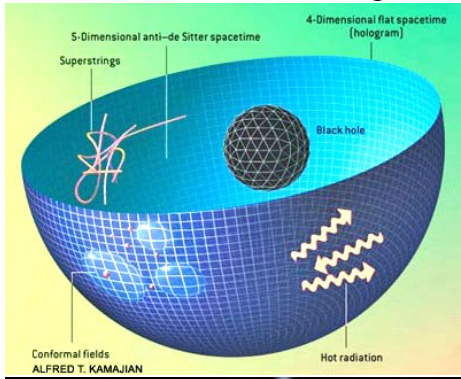


In 1997, Kip Thorne and I bet John Preskill that information was lost in black holes. The loser or losers of the bet are to provide the winner or winners with an encyclopaedia of their own choice, from which information can be recovered with ease. I'm now ready to concede the bet...

Ich hoffe es hat Ihnen gefallen...



...noch Fragen?



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

