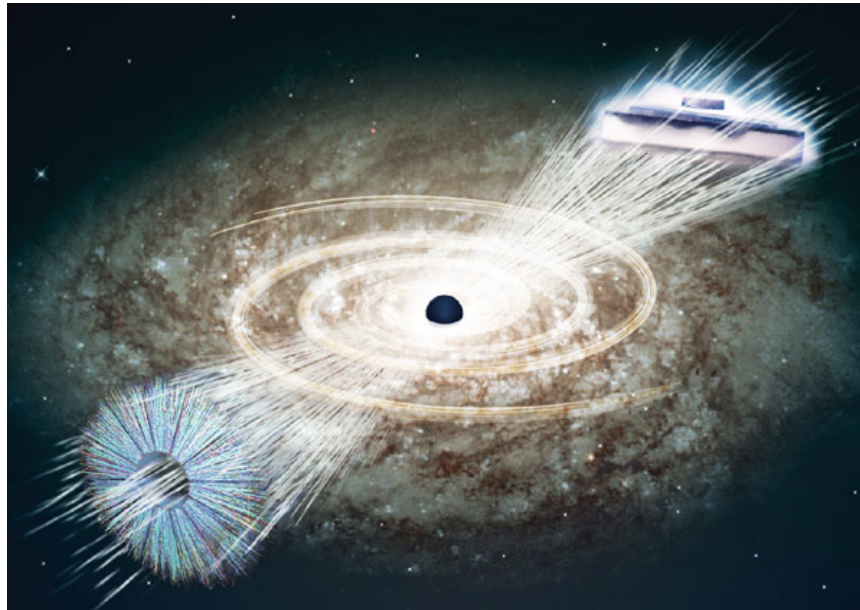


Von der Quantenphysik Schwarzer Löcher zu stark gekoppelten Quantenfeldtheorien (und zurück)



Martin Ammon

03. April 2019



Friedrich
Schiller
Universität
Jena

seit 1558

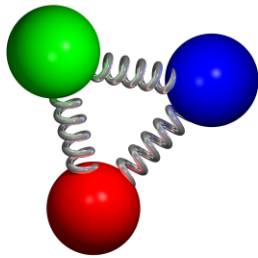
PROLOG

– Themen die mich antreiben –

Untersuchung stark gekoppelter QFTen

Teilchenphysik

Quantumchromodynamik



Kondensierte Materie

stark korrelierte Elektronensysteme

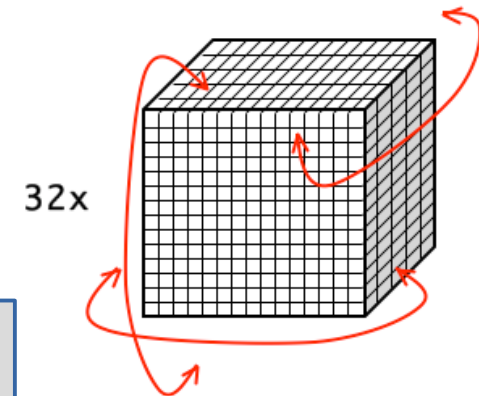


Bei starker Kopplung: Gitter(eich)theorie

Numerische Simulationen nicht immer möglich

Vorzeichenproblem, Dynamik fern des Gleichgewichts

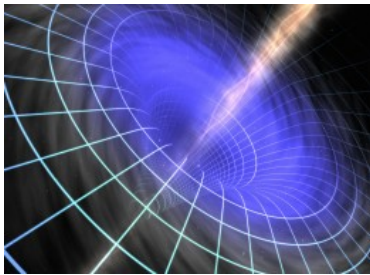
*Ziel: neue Methoden für stark gekoppelte QFTen
(Phasendiagramm, Transport, Dynamik)*



Aspekte von Quantengravitation ...

Gravitation

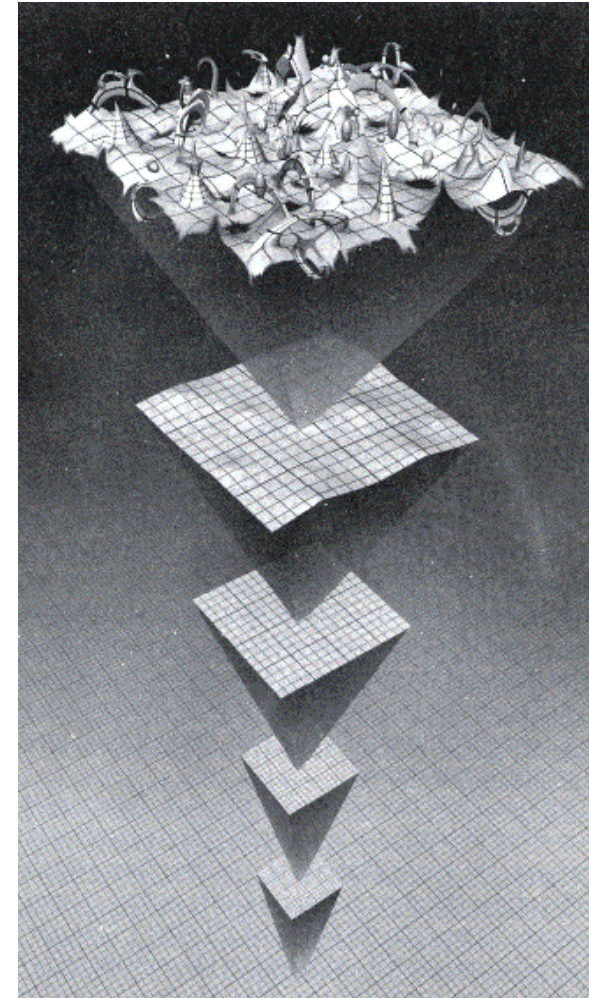
Singularitäten in Schwarzen Löchern & Kosmologie



Neue Freiheitsgrade @ Planck-Skala?

*Quanten-Raumzeit? Aufheben der Singularitäten?
Lösung der Paradoxien von Schwarzen Löchern?*

Ziel: Besseres Verständnis von Quanten –
gravitation, *Stringtheorie*



Beide Ziele sind miteinander verknüpft

Stark gekoppelte QFTen
(Phasendiagramm,
Transport, Dynamik)

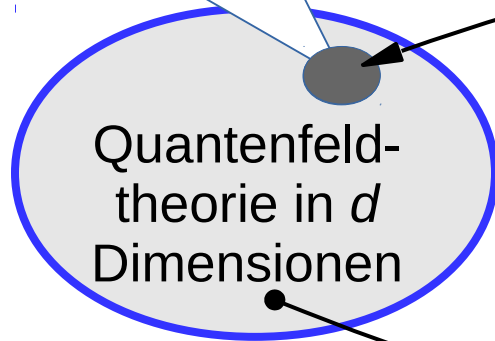
Quantenfeld-
theorie in d
Dimensionen

Stringtheorie
in $(d+1)$ -
dimensionalen
AdS

Untersuche Quanten-
gravitationsaspekte von
Stringtheorie

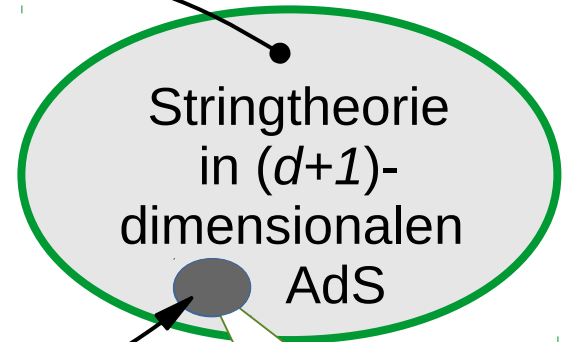
Beide Ziele sind miteinander verknüpft

Stark gekoppelte QFTen
(Phasendiagramm,
Transport, Dynamik)



Holographische
Dualität

A large red double-headed arrow pointing left and right, with the text 'Holographische Dualität' centered below it.



Untersuche Quanten-
gravitationsaspekte von
Stringtheorie

Übersetze die Frage auf die *duale* Seite und löse diese dort!

Teil I

Holographische Dualitäten

– Bedeutung –

*Gravitation und QFTen zwei (unüberbrückbare)
Theoriekonzepte?*

Schwarze
Löcher

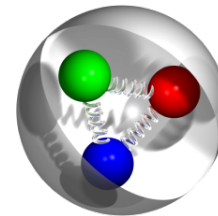


Klassische
Gravitation

Gravitations-
wellen

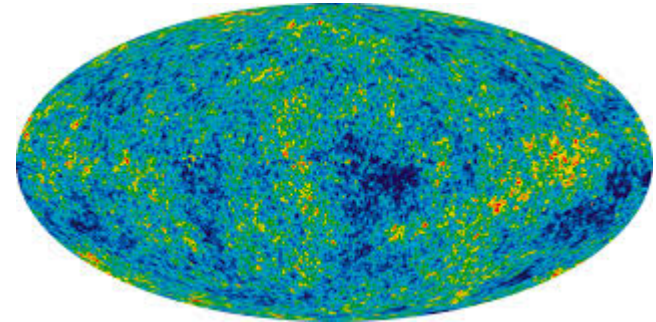
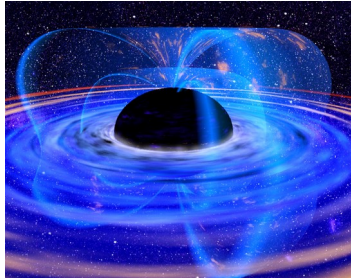
Moderne
Festkörperphysik

Quanten
(Feld-)theorie



Atom-, Kern- &
Teilchenphysik

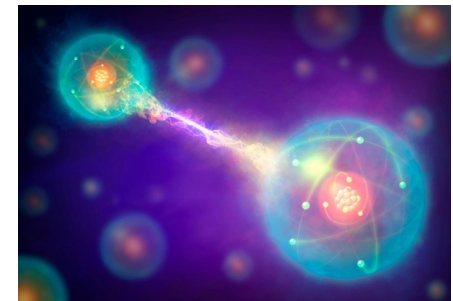
Die Sichtweise auf Quantengravitation vor 1997



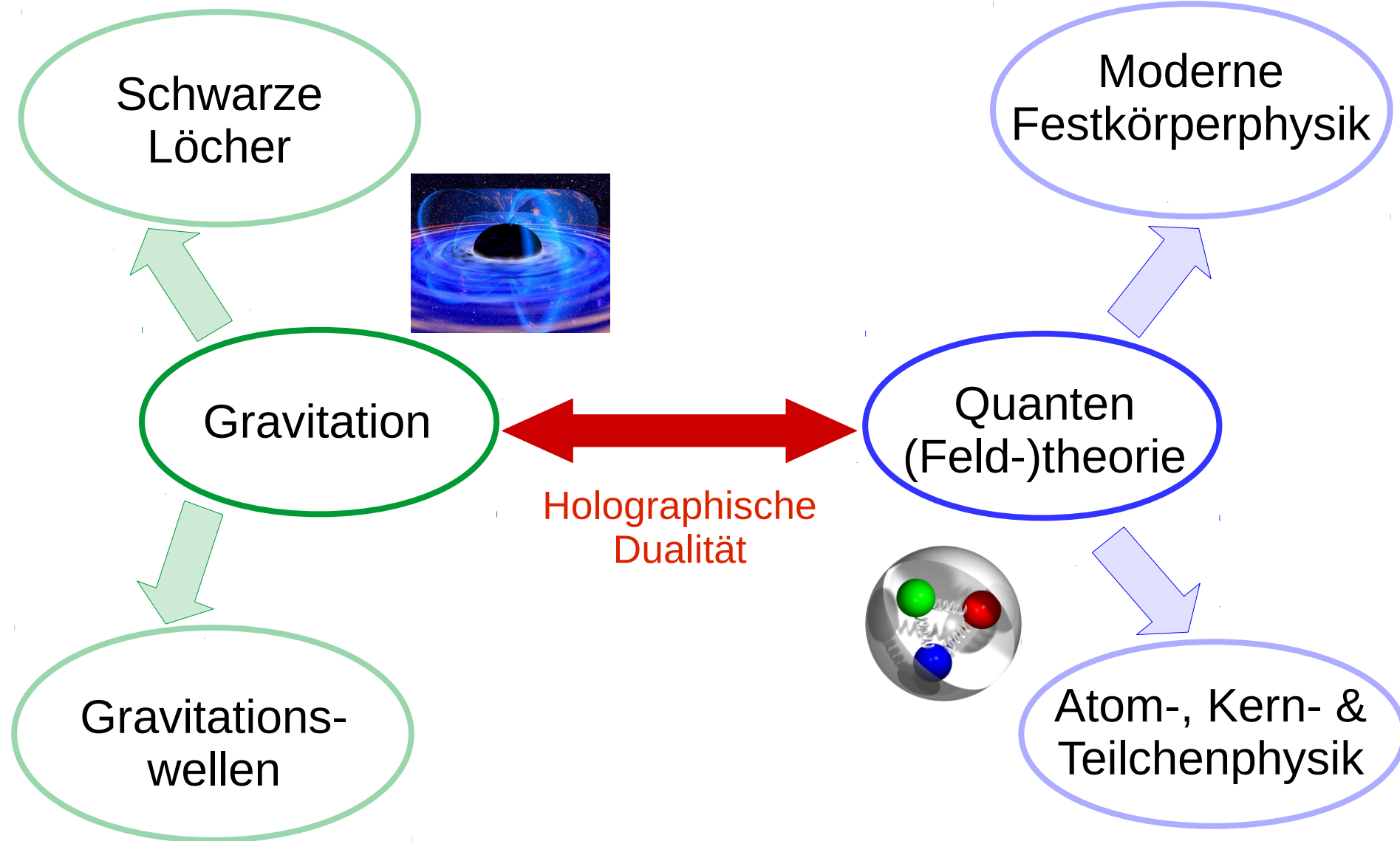
Klassische
Gravitation

Quanten
(Feld-)theorie

Quanten-
gravitation



Gravitation und QFT ein und dasselbe Theoriekonzept?



Teil II

Holographische Dualitäten

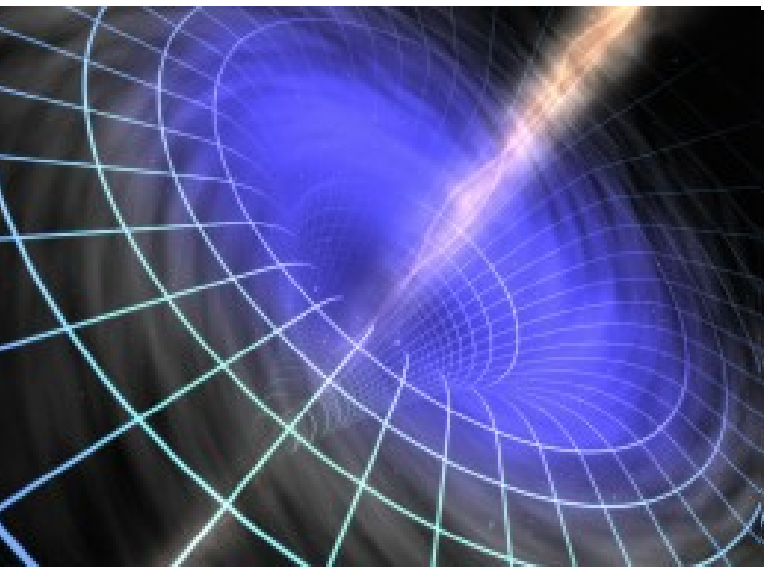
– Grundidee –

Eigenschaften Schwarzer Löcher

Einfachst möglichen Objekte

Klassische Eigenschaften von Schwarzen Löchern in 4 Dimensionen bestimmt durch

- Masse
- Drehimpuls
- Ladung

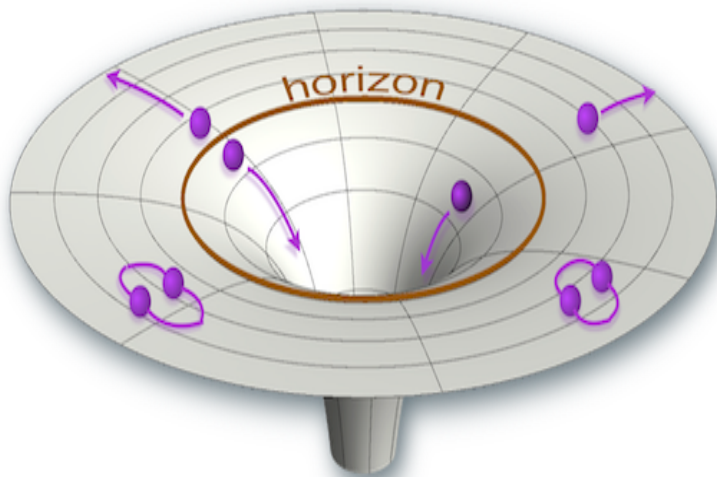


Eigenschaften Schwarzer Löcher

Einfachst möglichen Objekte

Klassische Eigenschaften von Schwarzen Löchern in 4 Dimensionen bestimmt durch

- Masse
- Drehimpuls
- Ladung



Kompliziertesten Objekte

Quanten Schwarze Löcher strahlen

- Spektrum ist thermal
- Schwarze Löcher haben eine endliche Entropie

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

- Viele ungelöste Rätsel

*Mikrozustände,
Informationsverlust Paradoxon*

Eigenschaften Schwarzer Löcher

Einfachst möglichen Objekte

Klassische Eigenschaften von Schwarzen Löchern in 4 Dimensionen bestimmt durch

- Masse
- Drehimpuls
- Ladung

Kompliziertesten Objekte

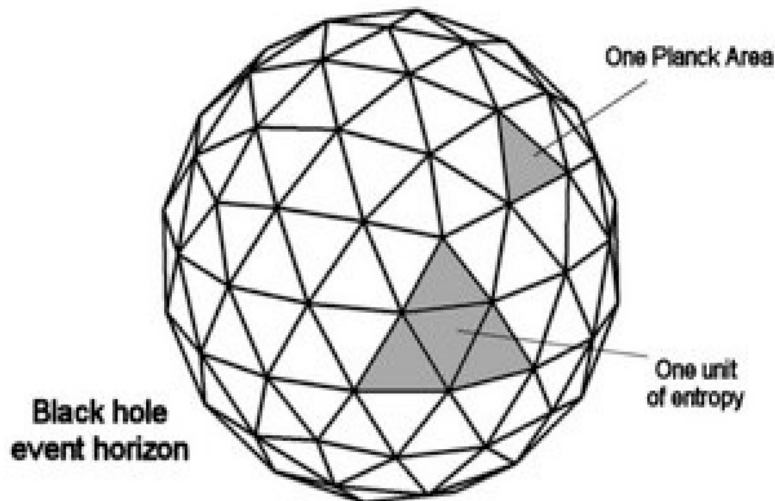
Quanten Schwarze Löcher strahlen

- Spektrum ist thermal
- Schwarze Löcher haben eine endliche Entropie

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

- Viele ungelöste Rätsel

*Mikrozustände,
Informationsverlust Paradoxon*



Einschub: Hawking Strahlung

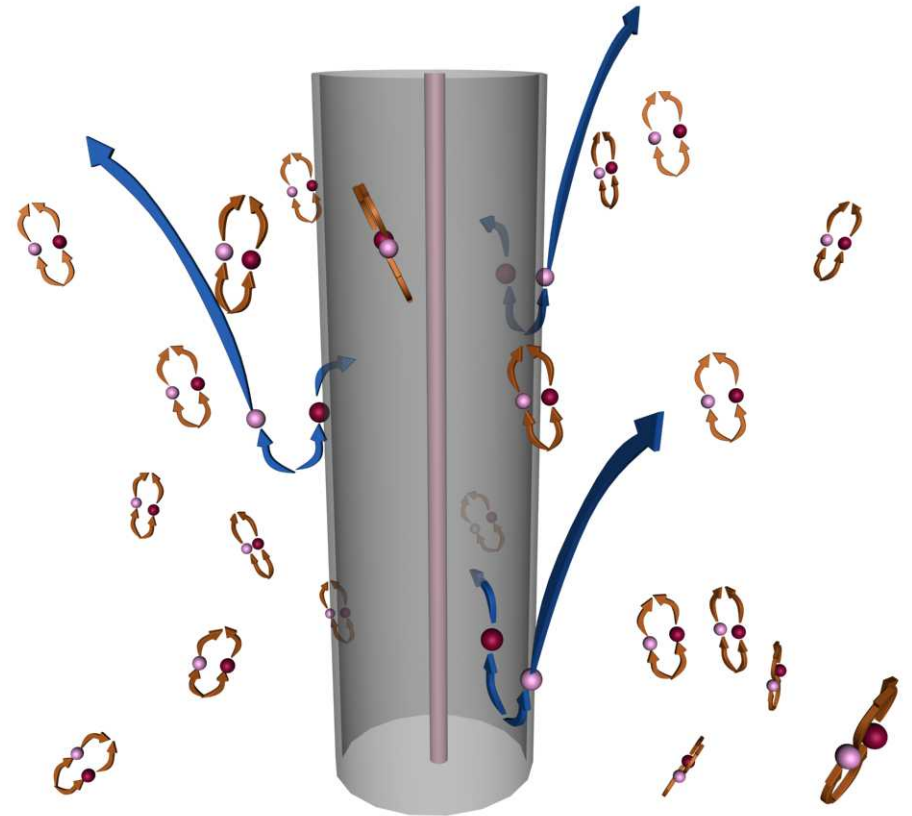
Emittieren Schwarze Löcher doch Licht bzw. Teilchen?

Ja, durch Fluktuationen des Quantenvakuums!

→ Teilchen-Antiteilchenpaare am Ereignishorizont werden getrennt

→ thermische Strahlung mit Temperatur

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



Einschub: Hawking Strahlung

Emittieren Schwarze Löcher doch Licht bzw. Teilchen?

→ Temperatur

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

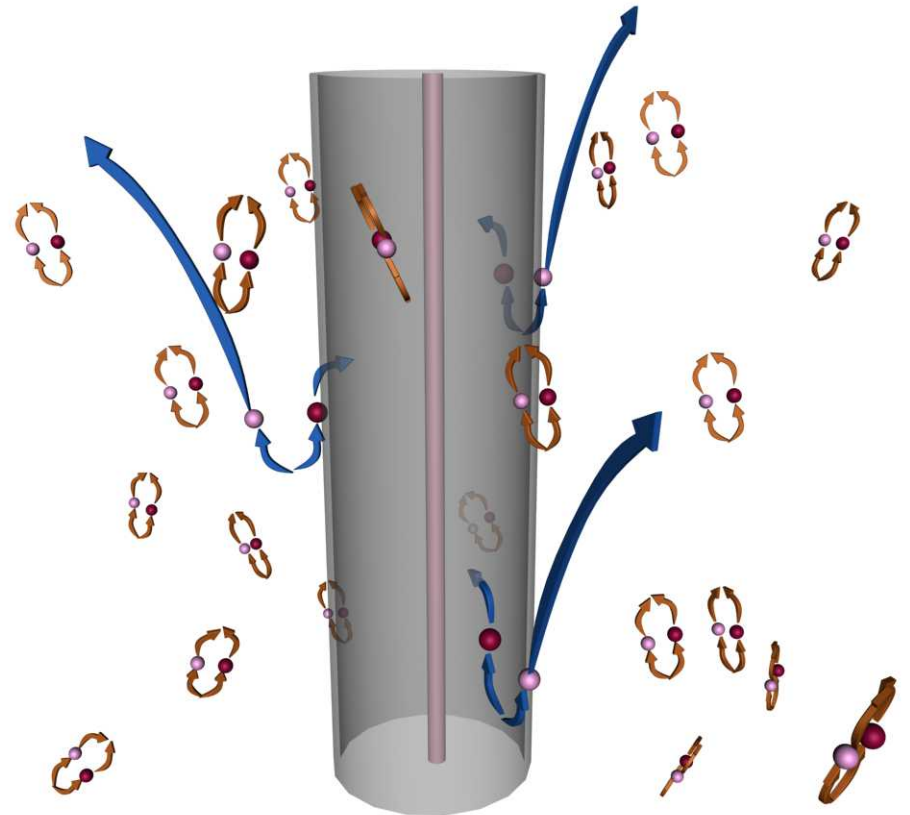
→ Entropie

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

→ Für SL mit 3,2 Sonnenmassen

$$S_{BH} \approx 10^{77} k_B$$

$$T_{BH} \approx 30 \text{ nK}$$



Einschub: Hawking Strahlung

Emittieren Schwarze Löcher doch Licht bzw. Teilchen?

Temperatur

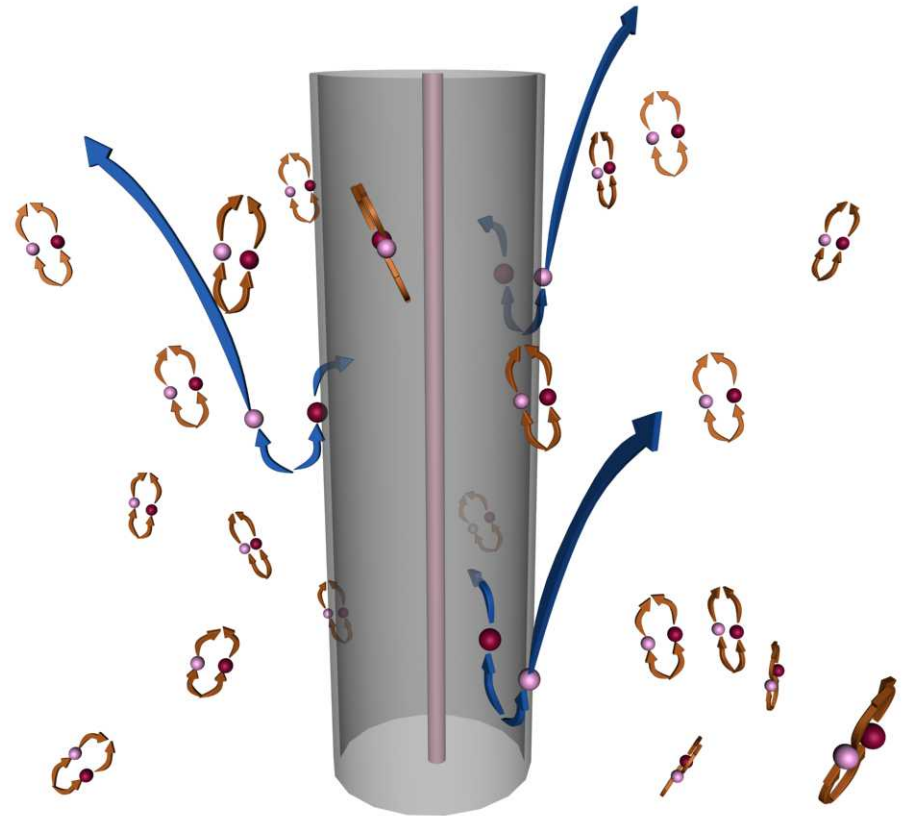
$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G_N M}$$

→ Je kleiner die Masse, desto höher die Temperatur

→ Schwarze Löcher verdampfen!

→ Lebensdauer

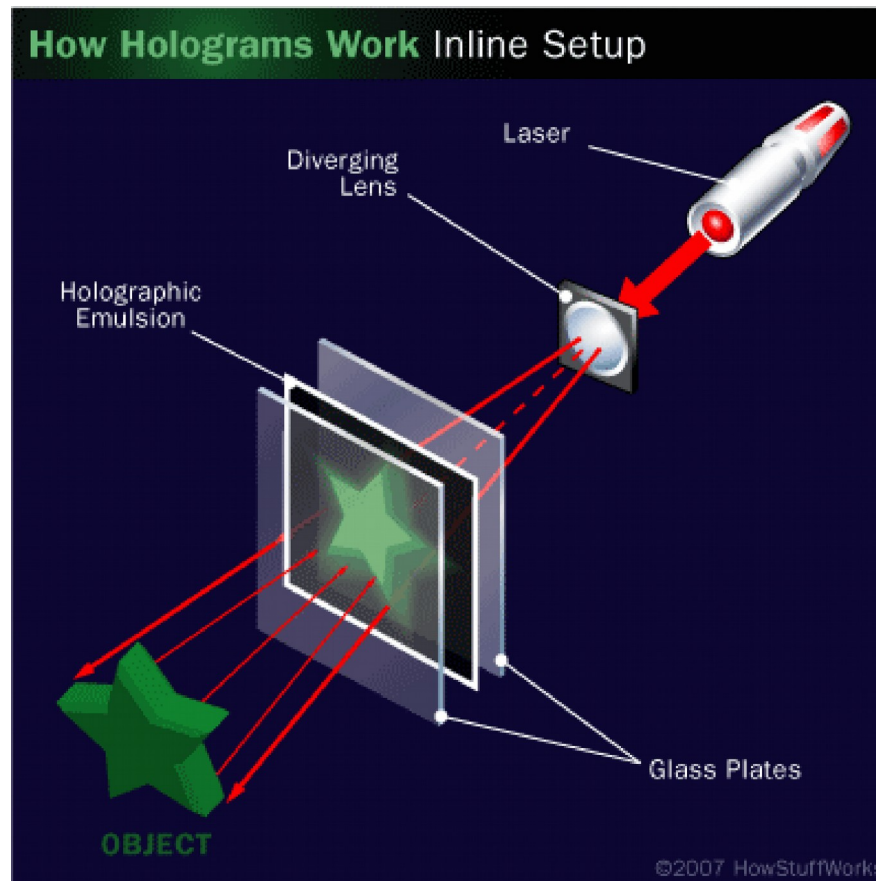
$$\tau_{BH} \approx 10^{66} \frac{M^3}{M_{\text{sonne}}^3} \text{ Jahre}$$



Freiheitsgrade am Horizont

Holographisches Prinzip:

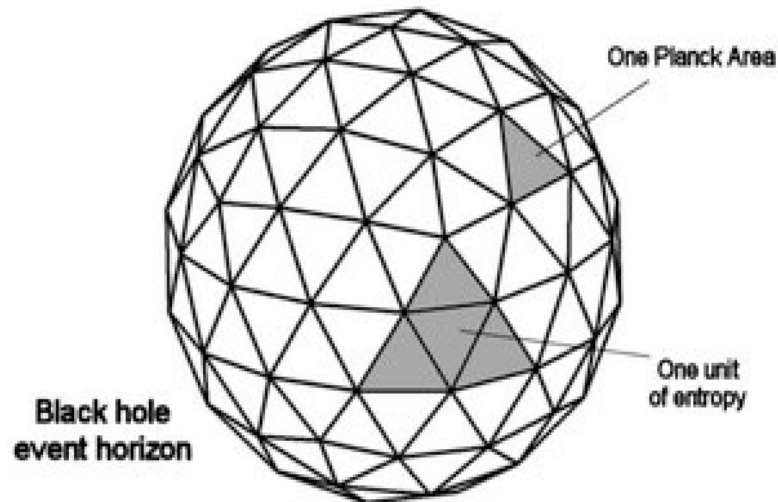
“Freiheitsgrade des Schwarzen Lochs sitzen am Horizont”



Freiheitsgrade am Horizont

Holographisches Prinzip:

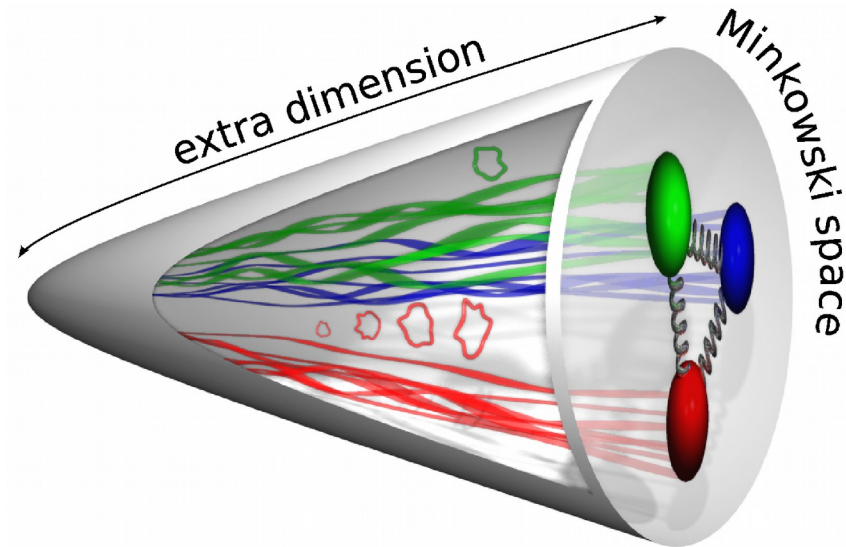
“Freiheitsgrade des Schwarzen Lochs sitzen am Horizont”



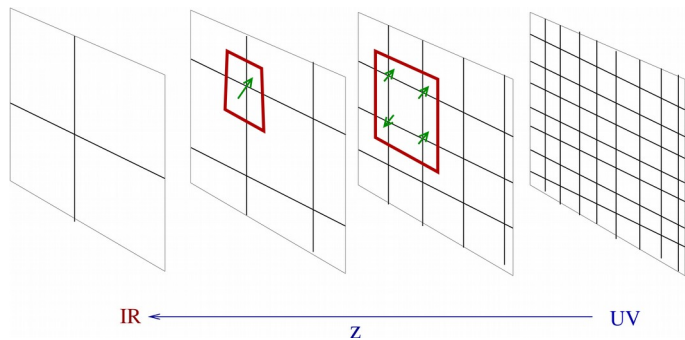
→ Extrapolation zu Quantengravitation

Frage: Kann man die Dynamik der Freiheitsgrade am Horizont durch eine (lokale) Quantenfeldtheorie beschreiben?

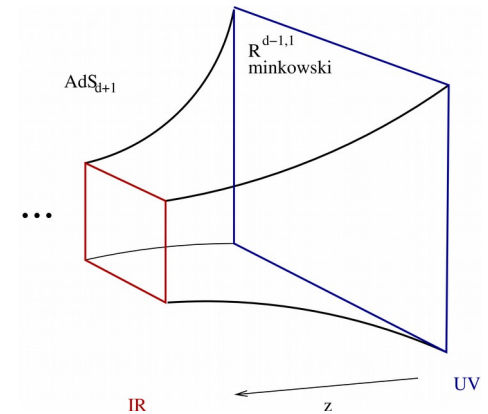
Holographische Dualitäten



Holographische Dualitäten



Renormierungsgruppenfluß



Anti-de Sitter Geometrie

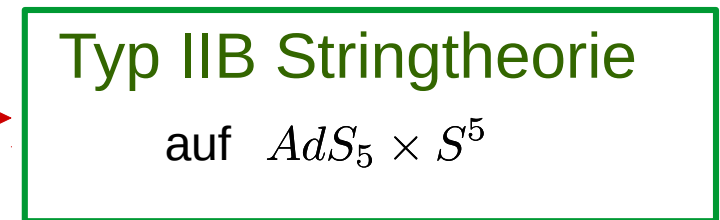
Holographische Dualität = Geometrisieren des RG Flußes!

Holographische Dualitäten



Ein konkretes Beispiel ($d=4$)

[Maldacena '97]



Operatoren $\mathcal{O}(x)$

Felder $\phi(x, z)$

Erzeugendes Funktional

Zustandssumme

$$Z_{CFT}[\phi_0] \equiv \left\langle e^{-\int d^4x \phi_0(x) \mathcal{O}(x)} \right\rangle = Z_{string}[\phi|_{\partial} = \phi_0]$$

Teil III

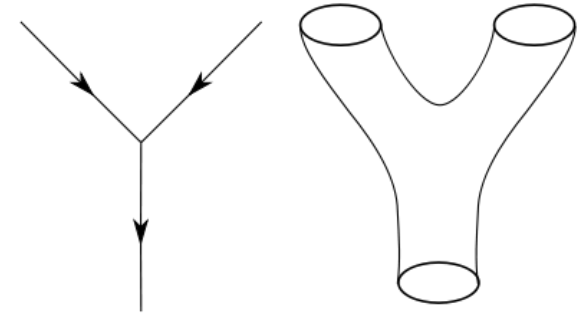
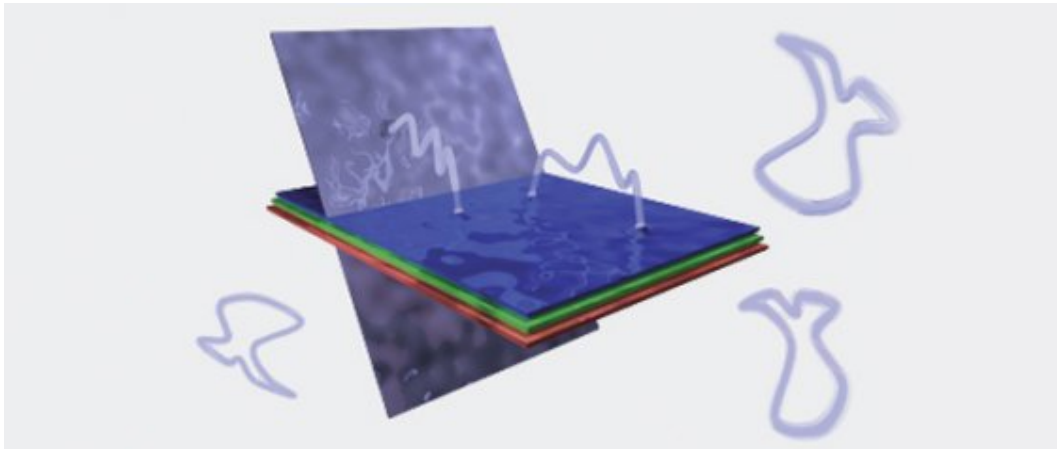
Holographische Dualitäten

– Motivation –

(im Rahmen von Stringtheorie)

Was ist Stringtheorie?

- Freiheitsgrade: **eindimensionale Saiten**
- **Wechselwirkung** von Strings sind **nicht lokal**
- Stringtheorie enthält auch **höherdimensionale Objekte** ("Hyperebenen")

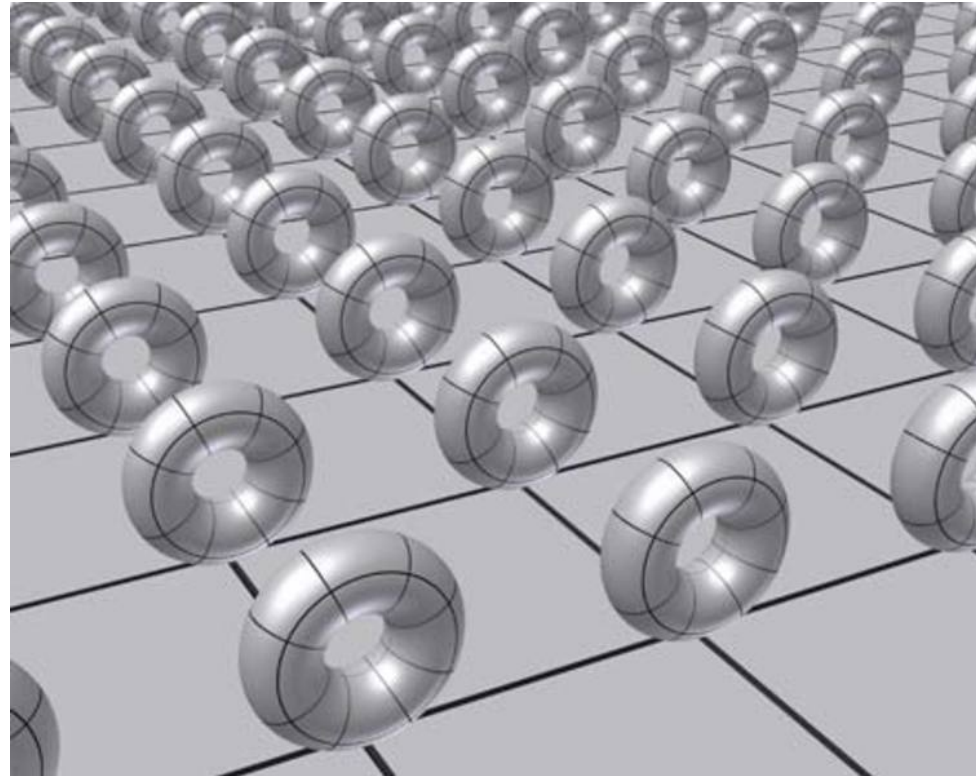


Offene Strings: ~ Photon, Gluonen
Geschlossene Strings: ~ Graviton

- Vereinheitlicht Gravitation und die anderen Wechselwirkungen

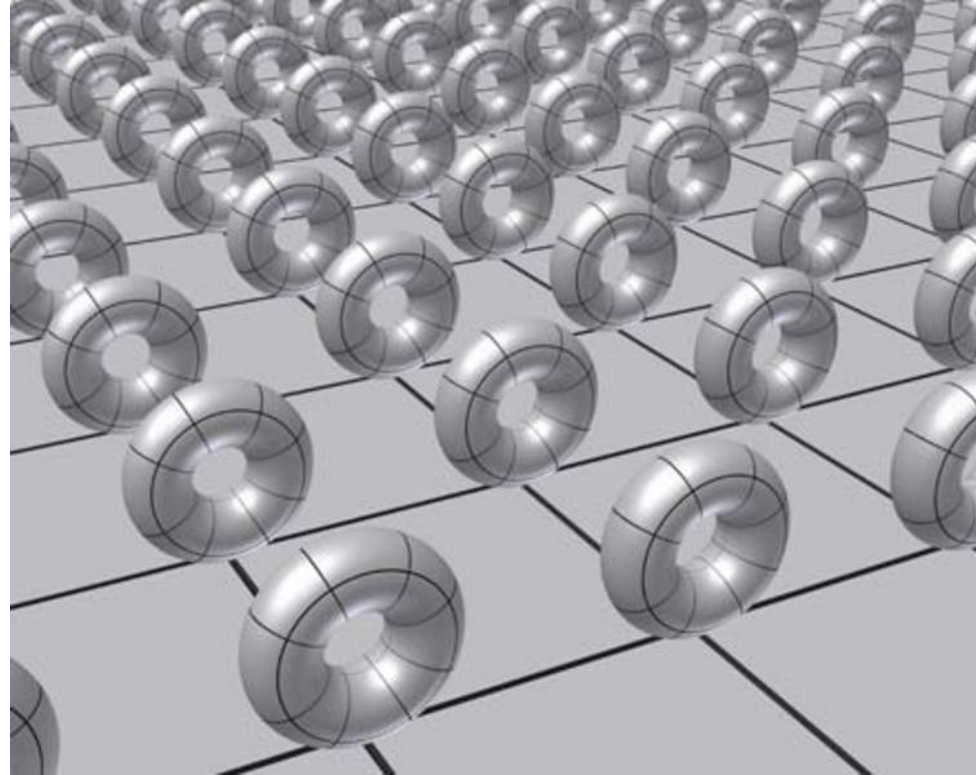
Einschub: Probleme der Stringtheorie

- Problem: Stringtheorie nur in 10 oder 11 Raumzeitdimensionen konsistent
 - **Kompaktifizierungen**
 - **sehr sehr viele mögliche “Vakua” der Theorie**
die Kandidaten für das Standardmodell darstellen
 - Ist Stringtheorie falsifizierbar?



Einschub: Probleme der Stringtheorie

- Problem: Stringtheorie nur in 10 oder 11 Raumzeitdimensionen konsistent
 - **Kompaktifizierungen**
 - **sehr sehr viele mögliche “Vakua” der Theorie** die Kandidaten für das Standardmodell darstellen
 - Ist Stringtheorie falsifizierbar?

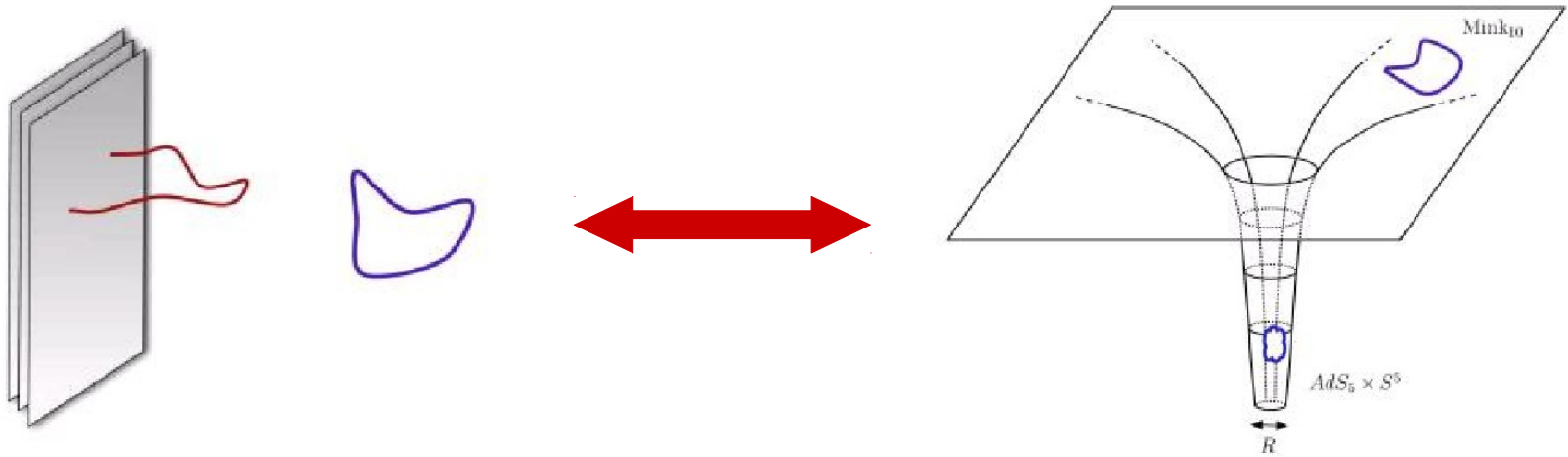


Ja – Durch Untersuchung von quantengravitativen Eigenschaften der Stringtheorie

Wie motiviert man holographische Dualitäten aus Stringtheorie?

Dynamik der “Hyperebenen”

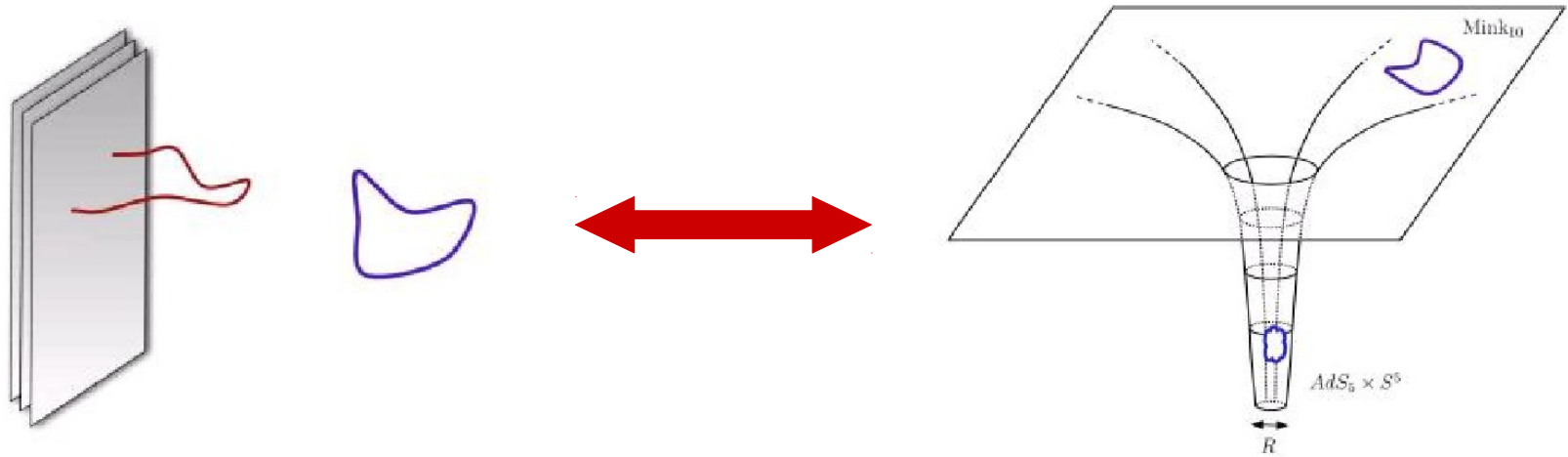
(hier: vier dimensionale Raumzeit Ebenen \rightarrow D3-Branen)



Wie motiviert man holographische Dualitäten aus Stringtheorie?

Dynamik der "Hyperebenen"

(hier: vier dimensionale Raumzeit Ebenen \rightarrow D3-Branen)



Quantenfeld-
theorie in 4
Dimensionen

Stringtheorie
in 5-dimensionalen
AdS

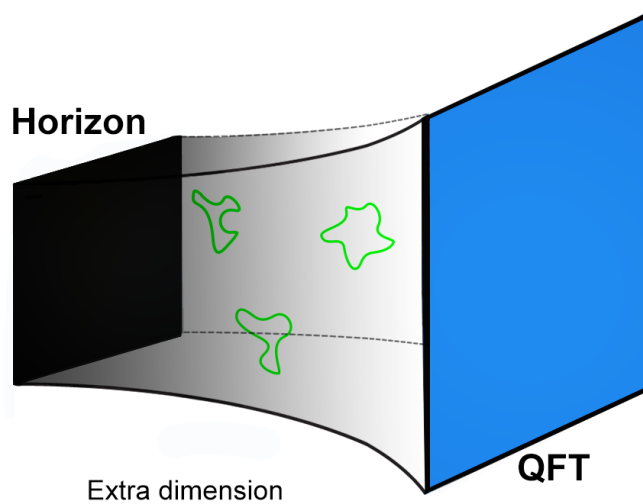
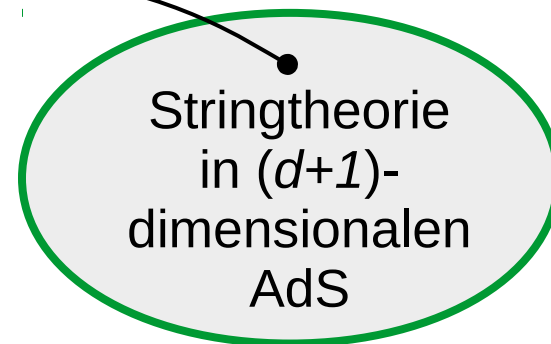
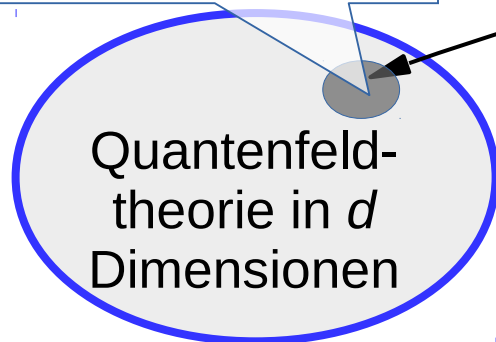
Teil IV

Holographische Dualitäten

– Lektion für Quantenfeldtheorie –

Anwendungen für Teilchenphysik &
kondensierte Materie

Stark gekoppelte QFTen
(Phasendiagramm,
Transport, Dynamik)



Limes:

Stark gekoppelte
large N QFT



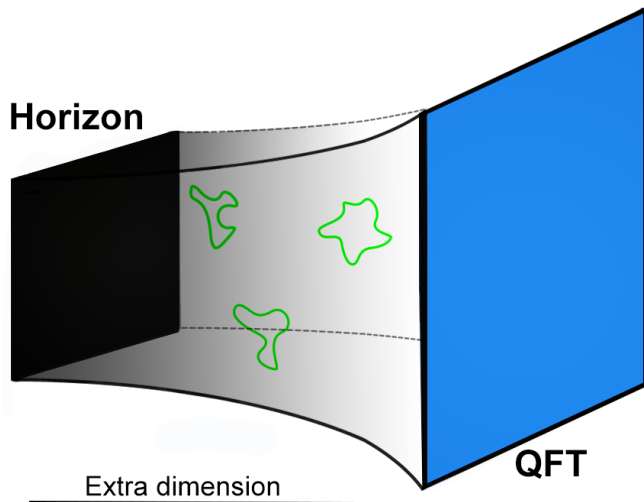
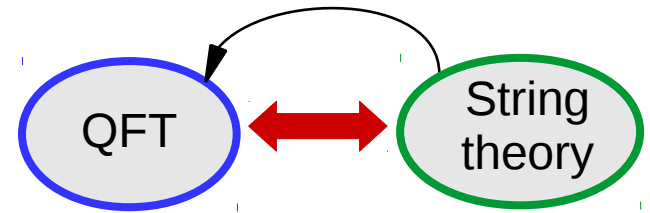
Super-
gravitation

Anwendung: stark gekoppelte QFT

Phasendiagramm von QFT



Identifiziere duale Schwarze Loch Lösung



Thermaler Zustand:

$$\rho = e^{-\beta(\hat{H} - \mu\hat{N})}$$



$$\beta = T^{-1}$$

Schwarzes Loch mit

- Hawking Temperatur T
- Elektrisches Feld

$$E \sim F_{tr} \sim \mu$$

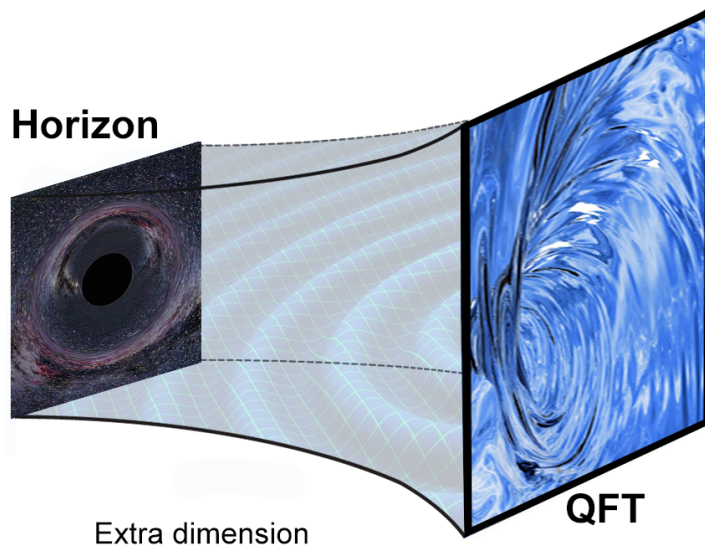
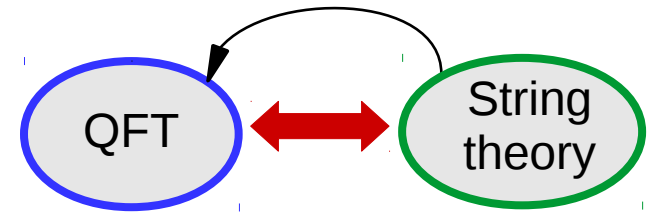
Schwarze Löcher dual zu thermalen Zuständen

Anwendung: stark gekoppelte QFT

Dynamik fern des Gleichgewichts



Dynamik von Schwarzen Löchern (Kollaps,...)



Zeitabhängige Szenarien ideal für holographische Dualität

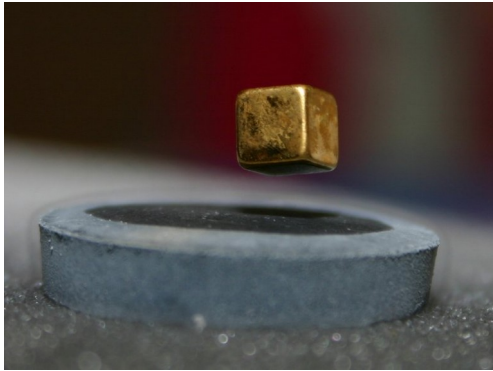
Wir untersuchen:

- Nichtgleichgewichtszustände
- Quenches
- Turbulenz (Superfluide)
- Hydrodynamik,

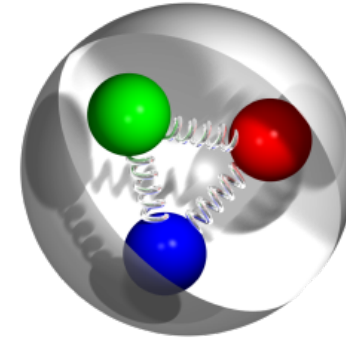
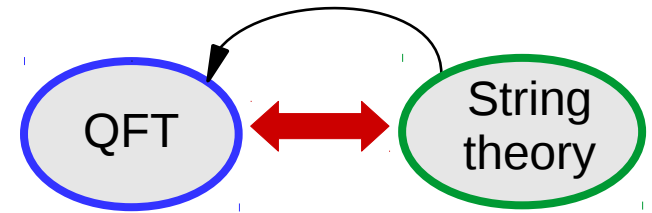
*Schwarze Löcher
thermalisieren sehr schnell*

Anwendung: stark gekoppelte QFT

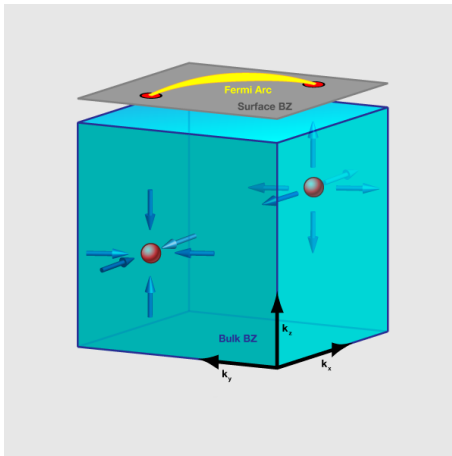
Anwendungen für



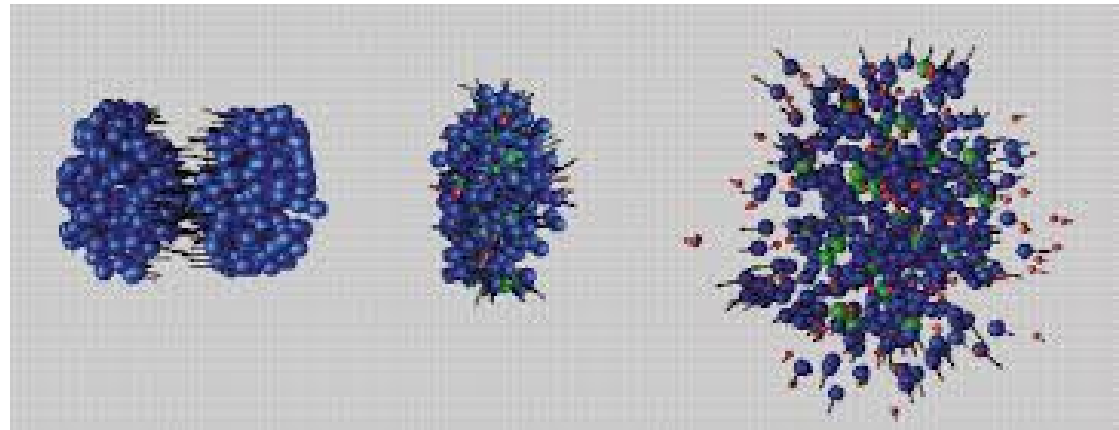
Hochtemperatursupraleiter



Quantenchromodynamik



Weyl Semimetalle



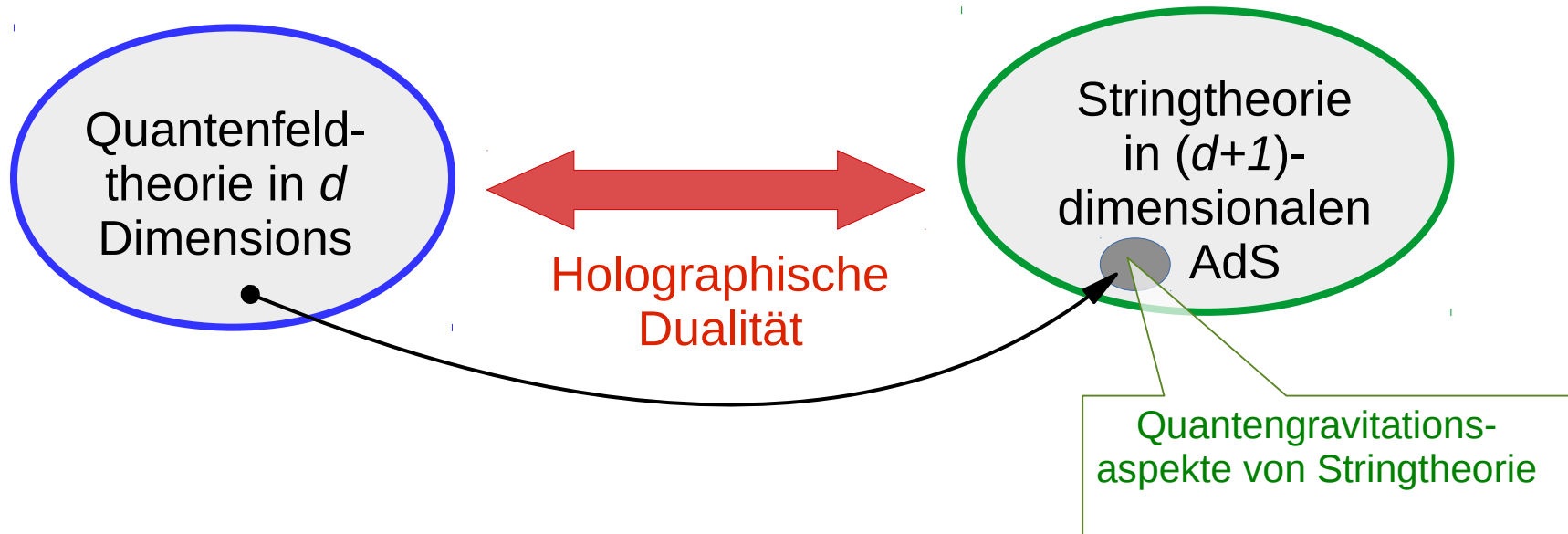
Schwerionenstöße

Teil V

Holographische Dualitäten

– Lektion für Quantengravitation –

Strategie

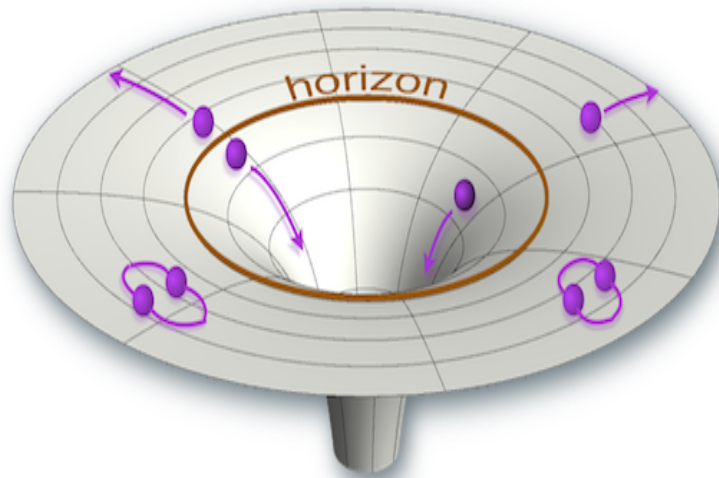


Strategie

Untersuche quantengravitationsaspekte von Stringtheorie mittels exakt lösbarer Quantenfeldtheorien

Herausforderungen in Quantengravitation ...

Quantenpuzzle der Schwarzen Löcher (I)



- Klassische Aspekte Schwarzer Löcher gut verstanden
- Schwarze Löcher emittieren eine thermische Strahlung
 - endliche Temperatur & Entropie

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

Wo sind die Mikrozustände? $S_{BH} = k_B \log \Omega$

Idee: • Neuartige masselose Zustände am Horizont

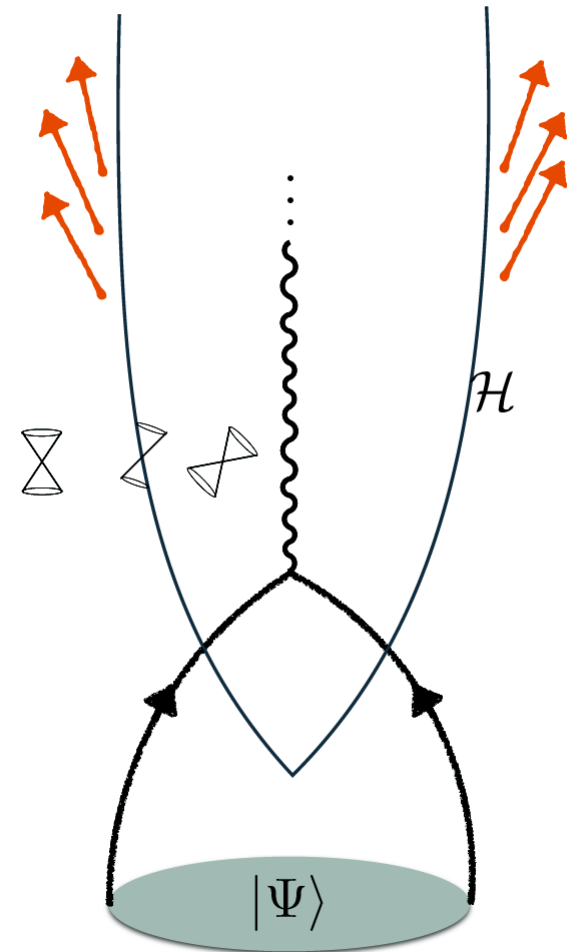
“soft hair” [Hawking, Perry, Strominger PRL '16]

[MA et. al. JHEP '17 + ongoing]

Herausforderungen in Quantengravitation ...

Quantenpuzzle der Schwarzen Löcher (II)

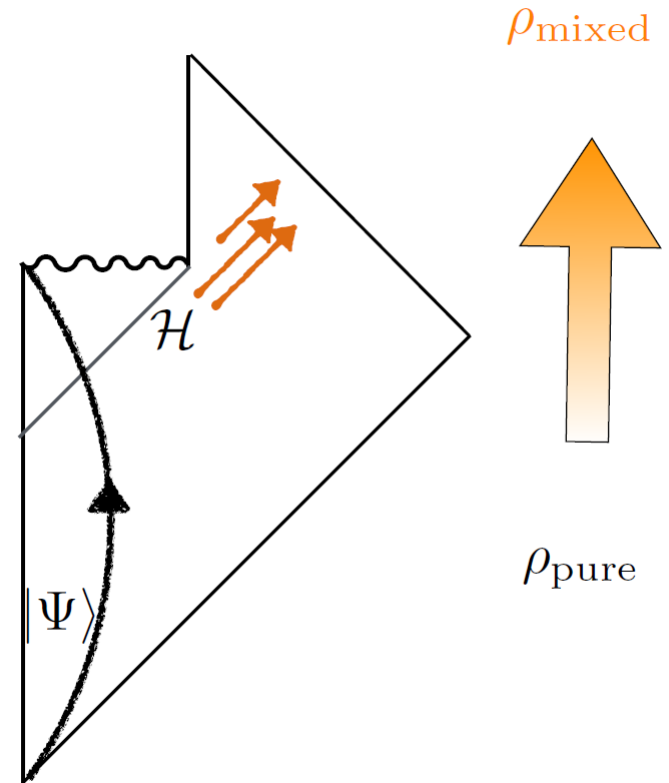
- **Ausgestrahlte** Hawking Strahlung ist thermal, Schwarzes Loch besitzt Entropie
- Ein **Horizont** umschließt die Singularität
- Anfänglich **reiner Zustand** $|\Psi\rangle$ kollabiert



Herausforderungen in Quantengravitation ...

Quantenpuzzle der Schwarzen Löcher (III)

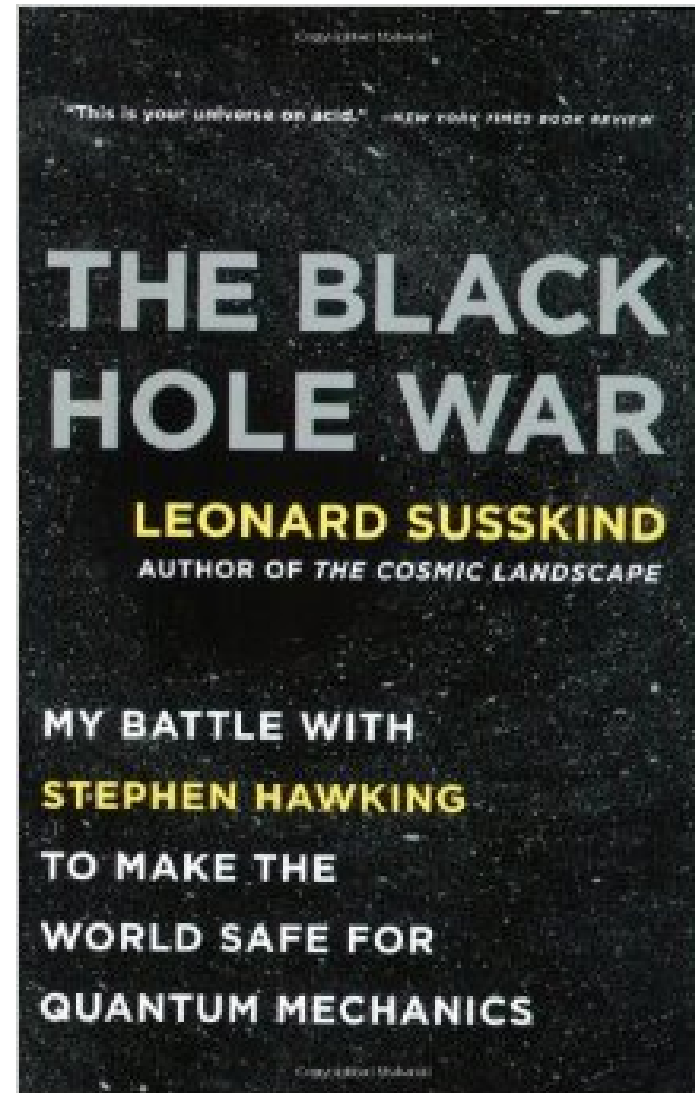
- **Jedoch** Schwarzes Loch verdampft
- Evolution von einem reinen zu einem gemischten Zustand
 - Geht Information verloren?
 - oder ist Quantenmechanik unvollständig?



Herausforderungen in Quantengravitation ...

Quantenpuzzle der Schwarzen Löcher (IV)

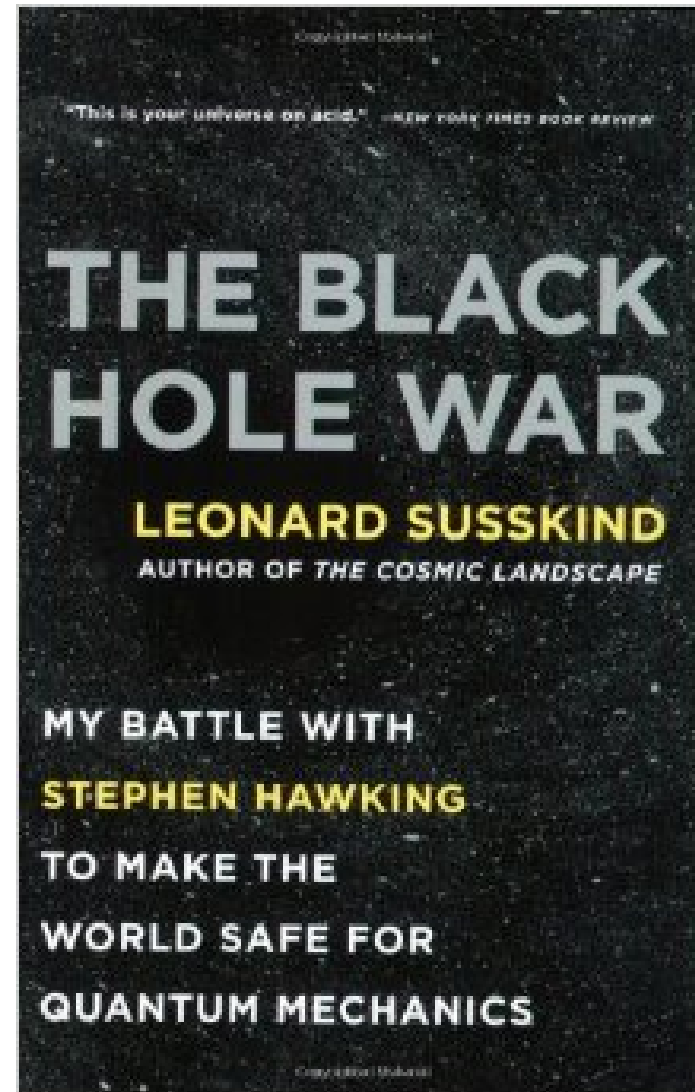
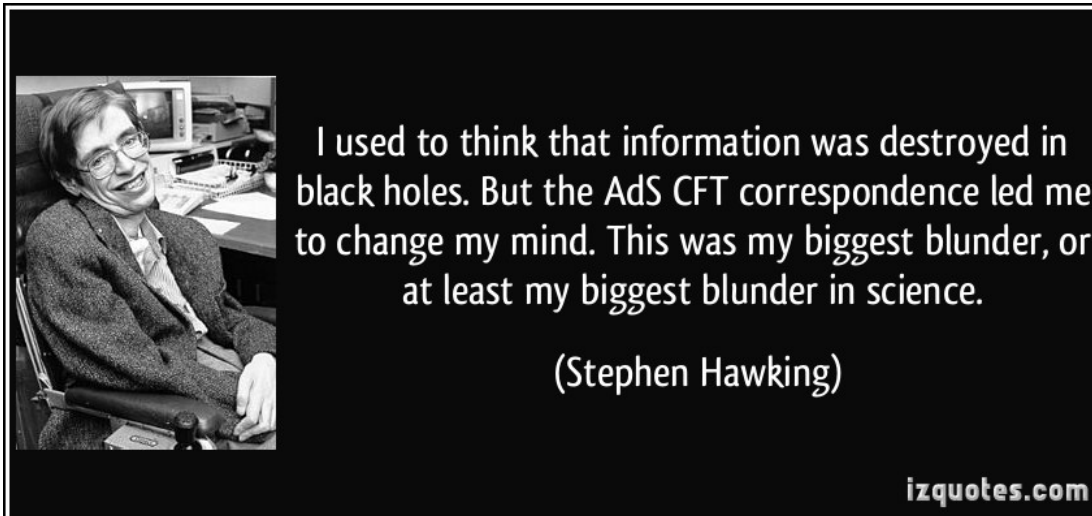
- **Start** einer Jahrzehntelangen Debatte



Herausforderungen in Quantengravitation ...

Quantenpuzzle der Schwarzen Löcher (IV)

- **Start** einer Jahrzehntelangen Debatte
- Hawking gibt sich geschlagen:

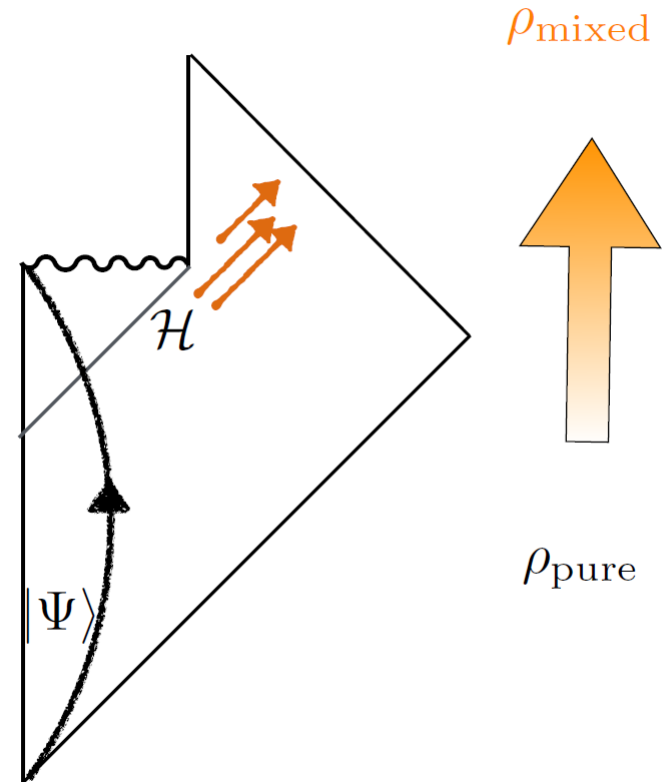


Herausforderungen in Quantengravitation ...

Quantenpuzzle der Schwarzen Löcher (V)

Meine Spekulation:

- **Subtile nicht-perturbative** Korrekturen führen zu einer unitären Dynamik
 - *Erste Indizien in zwei Dimensionen*
 - *gilt das auch für asymptotisch flache Raumzeiten?*

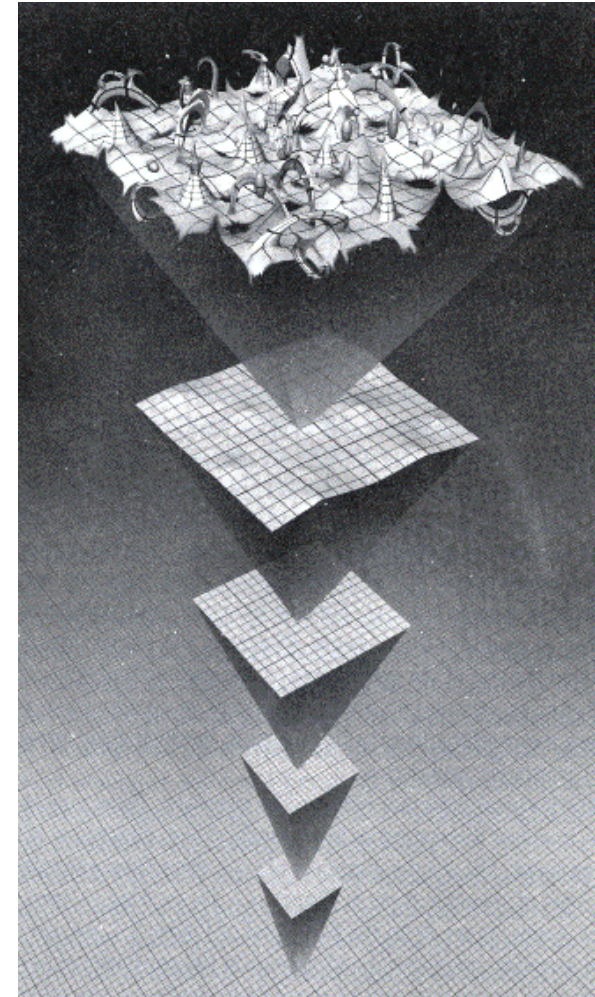


Herausforderungen in Quantengravitation ...

Wie sieht Raumzeit in der Quantengravitation aus?

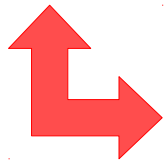
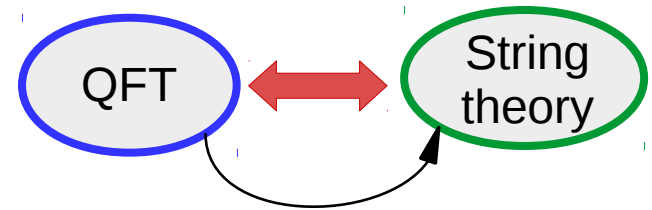
Interessante Fragen:

- Raumzeitstruktur von Quantengravitation bzw. Stringtheorie?
- Hintergrundunabhängigkeit von Stringtheorie?

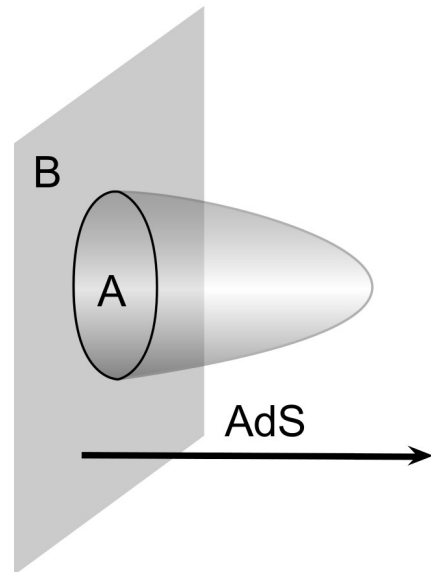


Vorgehensweise

We findet man die duale Geometrie zu einem gegebenen Zustand der QFT?



Quantuminformationstheorie
(Verschränkungsentropie, Komplexität, ...)

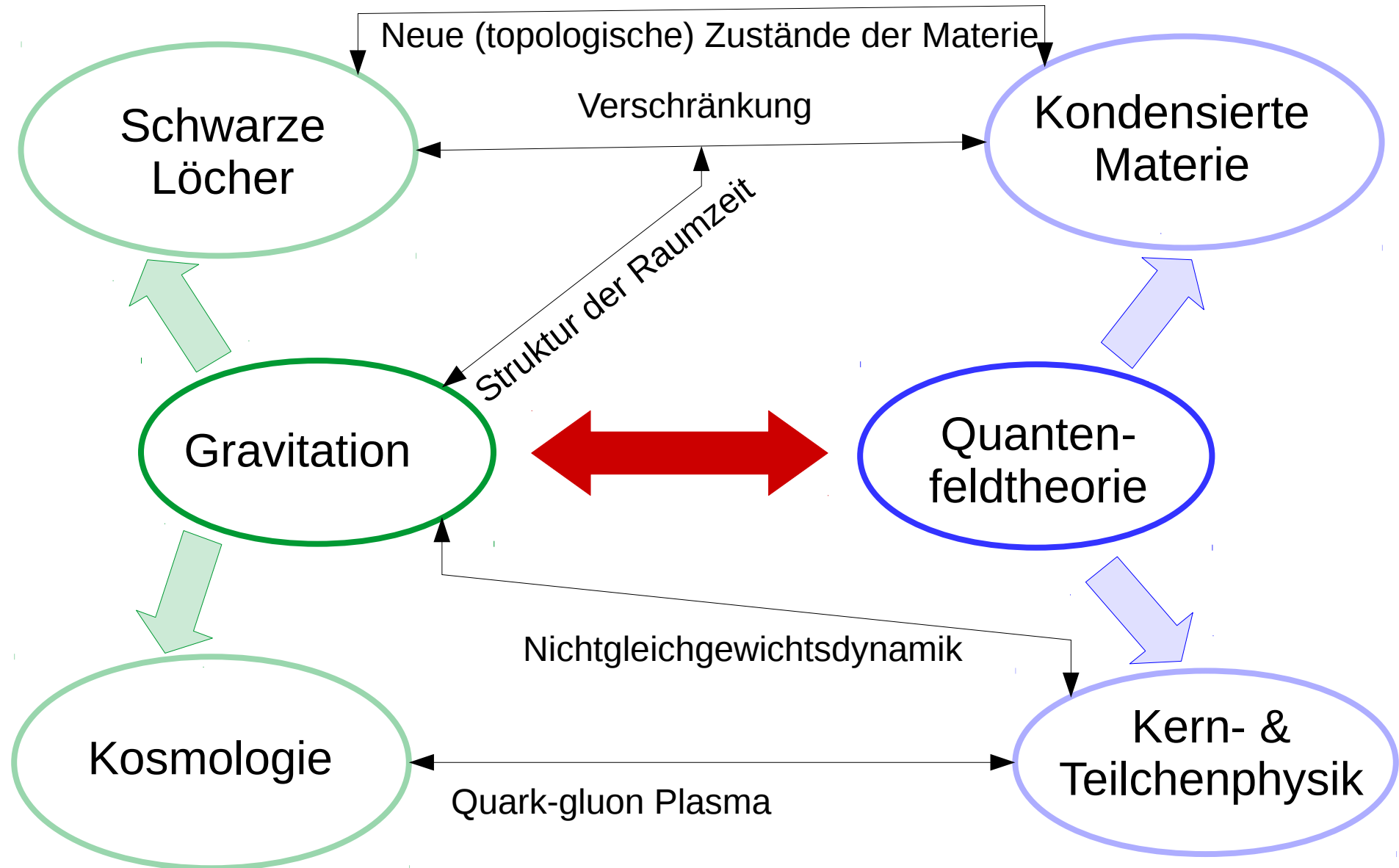


Mittels Verschränkungsentropie kann man Einsichten in die Quantennatur von Raumzeit erhalten.

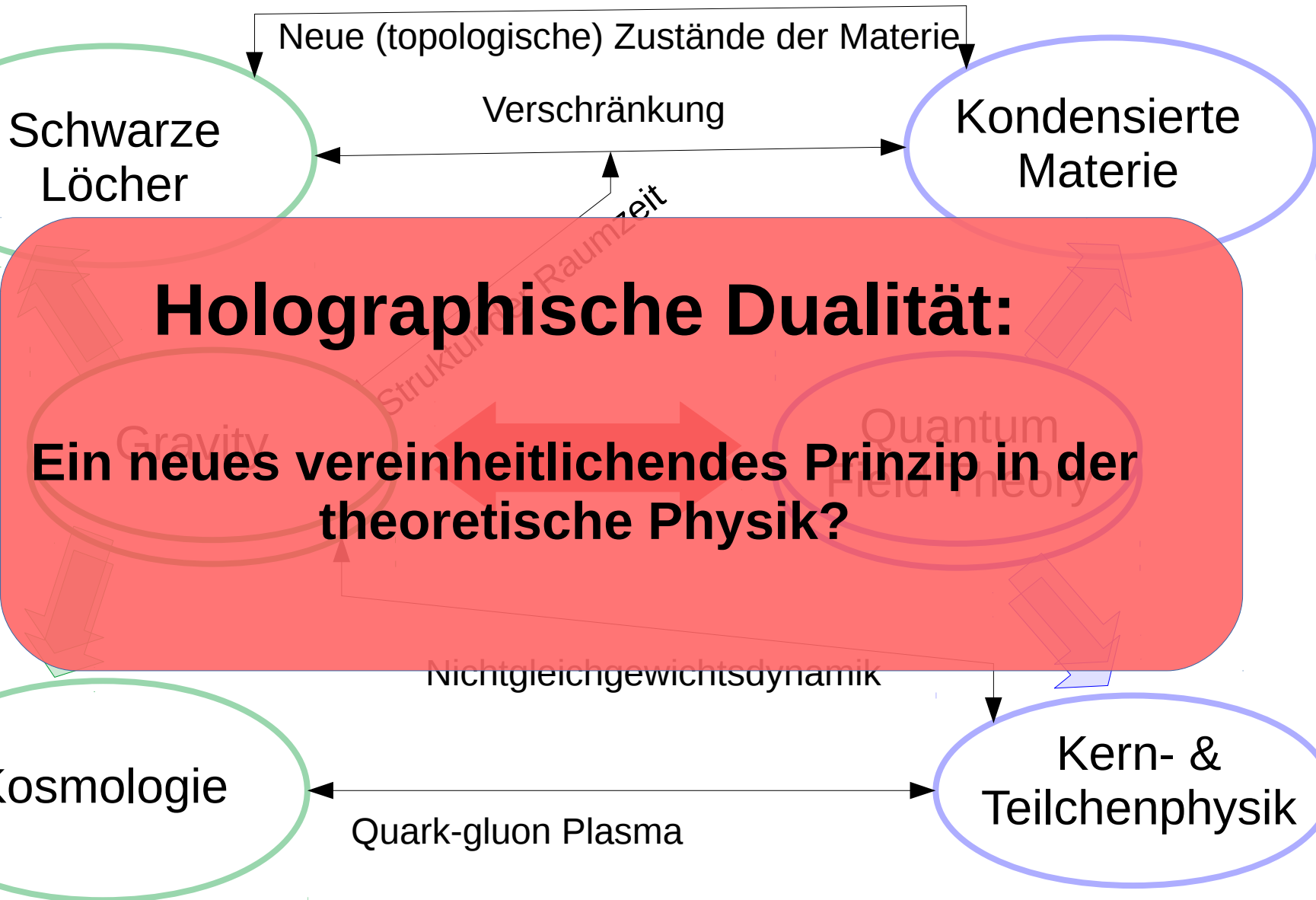
$$S_{EE}(A) =$$
$$\rho_A = \text{Tr}_{A^c} \rho$$

Zusammenfassung

Holographie deckt interessante Gemeinsamkeiten auf



Holographie deckt interessante Gemeinsamkeiten auf



EPILOG

– eine weitere provokative Frage –

Ist auch unser Universum ein Hologramm?



*Und ist es dual zu einer stark gekoppelten
Quantenfeldtheorie am Rande unseres Universums ?*

**Thank you very much
for your attention!**



seit 1558

www.uni-jena.de