

# Was ist Gravitation?

## *Über die Einheit fundamentaler Wechselwirkungen zur Natur schwarzer Löcher*

Hans Peter Nilles

Physikalisches Institut, Universität Bonn



Bethe Center for  
Theoretical Physics

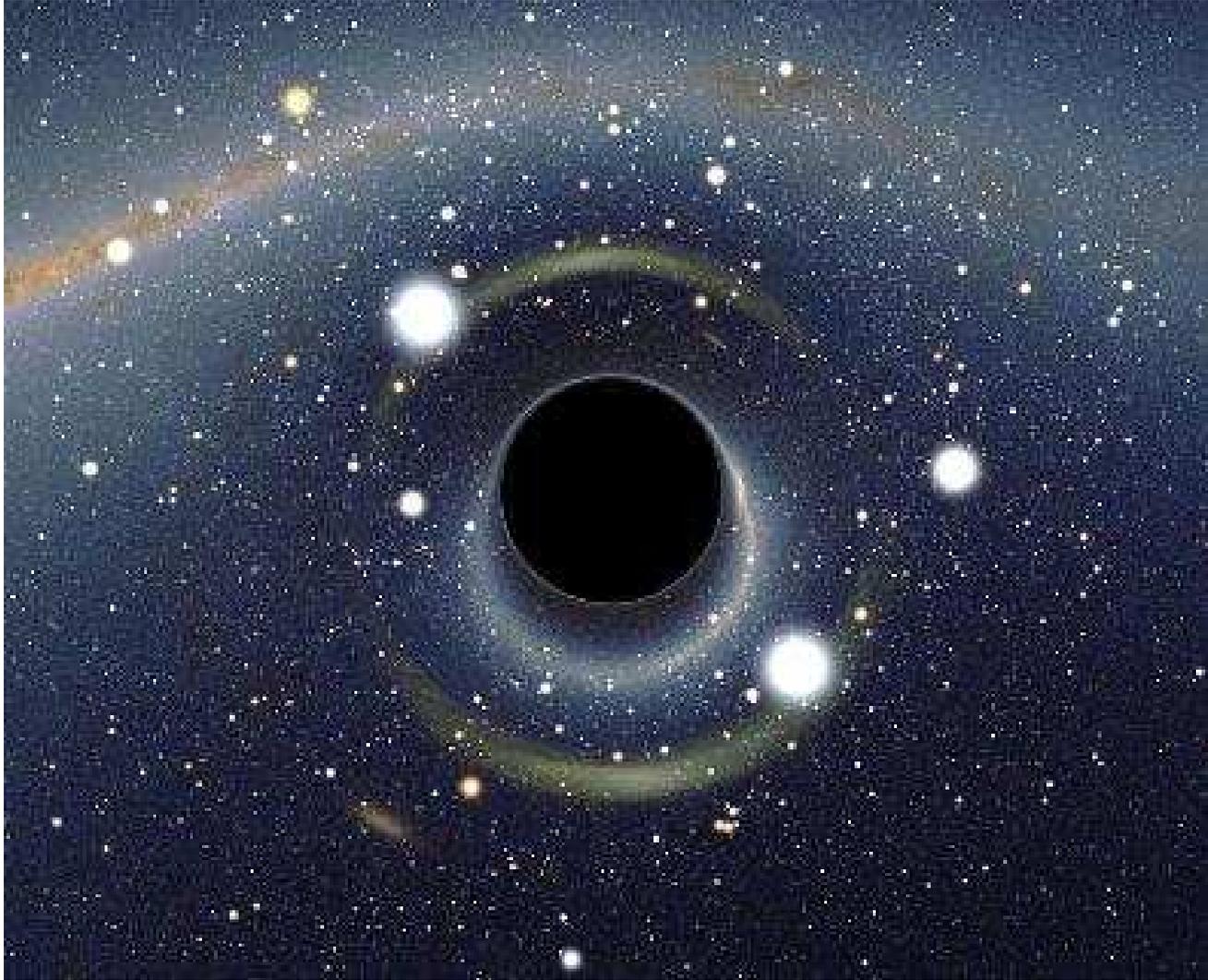
# Schwerkraft=Gravitation

- die wohl am längsten bekannte Kraft
- erste bedeutende Erkenntnisse durch Newton
- Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins
- trotzdem bisher nur sehr eingeschränktes Verständnis:  
die am wenigsten verstandene der fundamentalen  
Kräfte

# Schwerkraft=Gravitation

- die wohl am längsten bekannte Kraft
- erste bedeutende Erkenntnisse durch Newton
- Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins
- trotzdem bisher nur sehr eingeschränktes Verständnis:  
die am wenigsten verstandene der fundamentalen Kräfte
  
- Gravitation und Quantentheorie?  
das “Jahrhundertproblem”
- das Rätsel der schwarzen Löcher

# Schwarzes Loch



# Schwerkraft=Gravitation

- die wohl am längsten bekannte Kraft
- erste bedeutende Erkenntnisse durch Newton
- Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins
- trotzdem bisher nur sehr eingeschränktes Verständnis:  
die am wenigsten verstandene der fundamentalen Kräfte
- Gravitation und Quantentheorie?  
das “Jahrhundertsproblem”
- das Rätsel der schwarzen Löcher
- Fortschritt auf Umwegen: müssen wohl zuerst die anderen Kräfte verstehen.

# Was ist Kraft?

Klassifikation: welche Kräfte gibt es?

- Muskelkraft
- Wasserkraft, Sonnenkraft (Sonnenenergie)
- Himmelskraft
- Lebenskraft.....

# Was ist Kraft?

Klassifikation: welche Kräfte gibt es?

- Muskelkraft
- Wasserkraft, Sonnenkraft (Sonnenenergie)
- Himmelskraft
- Lebenskraft.....

Wichtig ist eine präzise Definition:

- Was bewirkt eine Kraft?
- Gibt es “fundamentale” Kräfte?
- Was ist der Ursprung dieser Kräfte?

# Gravitation

- Definition des Begriffes Kraft
- Grundlegende Erkenntnisse zur Schwerkraft (Gravitation)



(I. Newton, 1642-1726)

- Kraft = Masse x Beschleunigung
- Bewegung der Himmelskörper und Erdanziehung haben den gleichen Ursprung und werden durch die gleichen Gesetze beschrieben!

# Fundamentale Kräfte

- genügen einfachen Gesetzen
- tragen zum Verständnis der Naturphänomene bei
- **vereinheitlichte Beschreibung der Kräfte**

# Fundamentale Kräfte

- genügen einfachen Gesetzen
- tragen zum Verständnis der Naturphänomene bei
- vereinheitlichte Beschreibung der Kräfte

Gravitation:

- Gravitation erscheint (vorläufig) als fundamental
- gibt es andere fundamentale Kräfte?
- Elektrizität?
- Magnetismus?

# Elektrizität und Magnetismus

- Maxwellsche Gleichungen
- Elektromagnetische Wechselwirkungen



J. C. Maxwell, 1831-1879

- Die Einheit von Elektrizität und Magnetismus
- Der Begriff des elektromagnetischen Feldes
- Endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit!

# Elektromagnetische Wellen

- Elektromagnetisches Feld hat physikalische Bedeutung
- und ist nicht nur ein mathematisches Konstrukt.



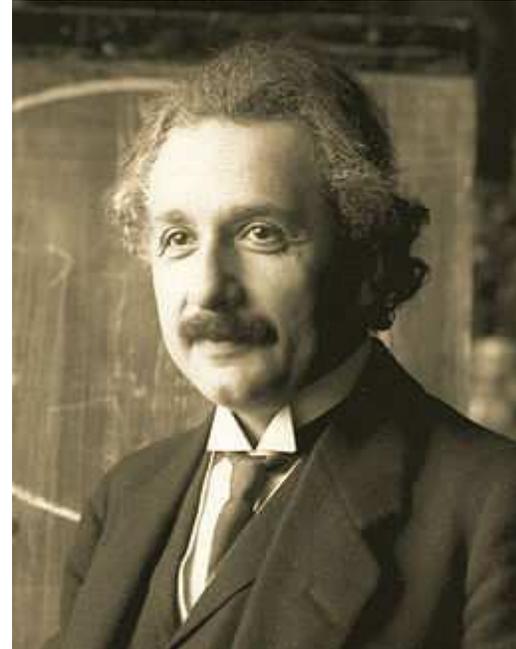
(H.Hertz, 1857-1894)

- Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen
- Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit!

# Die Substanz des Feldes

- Spezielle Relativitätstheorie

- Photo-Effekt:  
Lichtquanten  
(Photonen)



(A. Einstein, 1879-1955)

- Feld-Quanten als Substanz der Kraftfelder
- das Konzept des Austauschteilchens fundamentaler Wechselwirkungen

# Allgemeine Relativitätstheorie

Die allgemeine Relativitätstheorie ist die relativistische Erweiterung der Newtonschen Theorie der Gravitation

- beschrieben durch ein Gravitationsfeld
- endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der gravitationellen Wirkung
- Gravitation als geometrische Eigenschaft (Krümmung) der Raum-Zeit
- Existenz von Gravitationswellen?
- Graviton als Feldquant?

Gravitationswechselwirkungen sehr viel schwächer als elektromagnetische Wechselwirkungen.

# Fundamentale Wechselwirkungen

Zu diesem Zeitpunkt kannte man zwei fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation und Elektromagnetismus

# Fundamentale Wechselwirkungen

Zu diesem Zeitpunkt kannte man zwei fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation und Elektromagnetismus

Physik der Atome und Moleküle kann komplett durch elektromagnetische Wechselwirkungen erklärt werden

- Suche nach einheitlicher Theorie (Welt-Formel)
- Entdeckung zweier neuer (offenbar fundamentaler) Kräfte
- Schwache und starke Wechselwirkung im subatomaren Bereich

# Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**  
Stärke 1, Reichweite  $10^{-13}$  cm

# Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**  
Stärke 1, Reichweite  $10^{-13}$  cm
- **Elektromagnetismus:**  
Stärke  $10^{-2}$ , Reichweite  $\infty$ , Photon, Spin 1

# Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**  
Stärke 1, Reichweite  $10^{-13}$  cm
- **Elektromagnetismus:**  
Stärke  $10^{-2}$ , Reichweite  $\infty$ , Photon, Spin 1
- **Schwache Wechselwirkung:**  
Stärke  $10^{-5}$ , Reichweite  $10^{-15}$  cm

# Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**  
Stärke 1, Reichweite  $10^{-13}$  cm
- **Elektromagnetismus:**  
Stärke  $10^{-2}$ , Reichweite  $\infty$ , Photon, Spin 1
- **Schwache Wechselwirkung:**  
Stärke  $10^{-5}$ , Reichweite  $10^{-15}$  cm
- **Gravitation:**  
Stärke  $10^{-38}$ , Reichweite  $\infty$ , Graviton, Spin 2

# Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- **Quantenelektrodynamik (QED)** als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen

# Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED

# Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED
- Die Beschreibung von schwacher und starker Wechselwirkung im Rahmen von Eichtheorien

# Theoretische Entwicklungen

Einbettung der Wechselwirkungen im Rahmen der Quantentheorie (=Quantenfeldtheorie)

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED
- Die Beschreibung von schwacher und starker Wechselwirkung im Rahmen von Eichtheorien
- Einheitliche Beschreibung von schwacher Wechselwirkung und Elektromagnetismus

# Glashow-Salam-Weinberg



- Beschreibung der schwachen und elektromagnetischen WW im Rahmen der Eichtheorie  $SU(2) \times U(1)$
- Vorhersage der Eichbosonen  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  (1967)
- Nachweis 1983 am CERN in Genf

# Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**

Stärke 1, Reichweite  $10^{-13}$  cm, **Gluon, Spin 1**

- **Elektromagnetismus:**

Stärke  $10^{-2}$ , Reichweite  $\infty$ , **Photon, Spin 1**

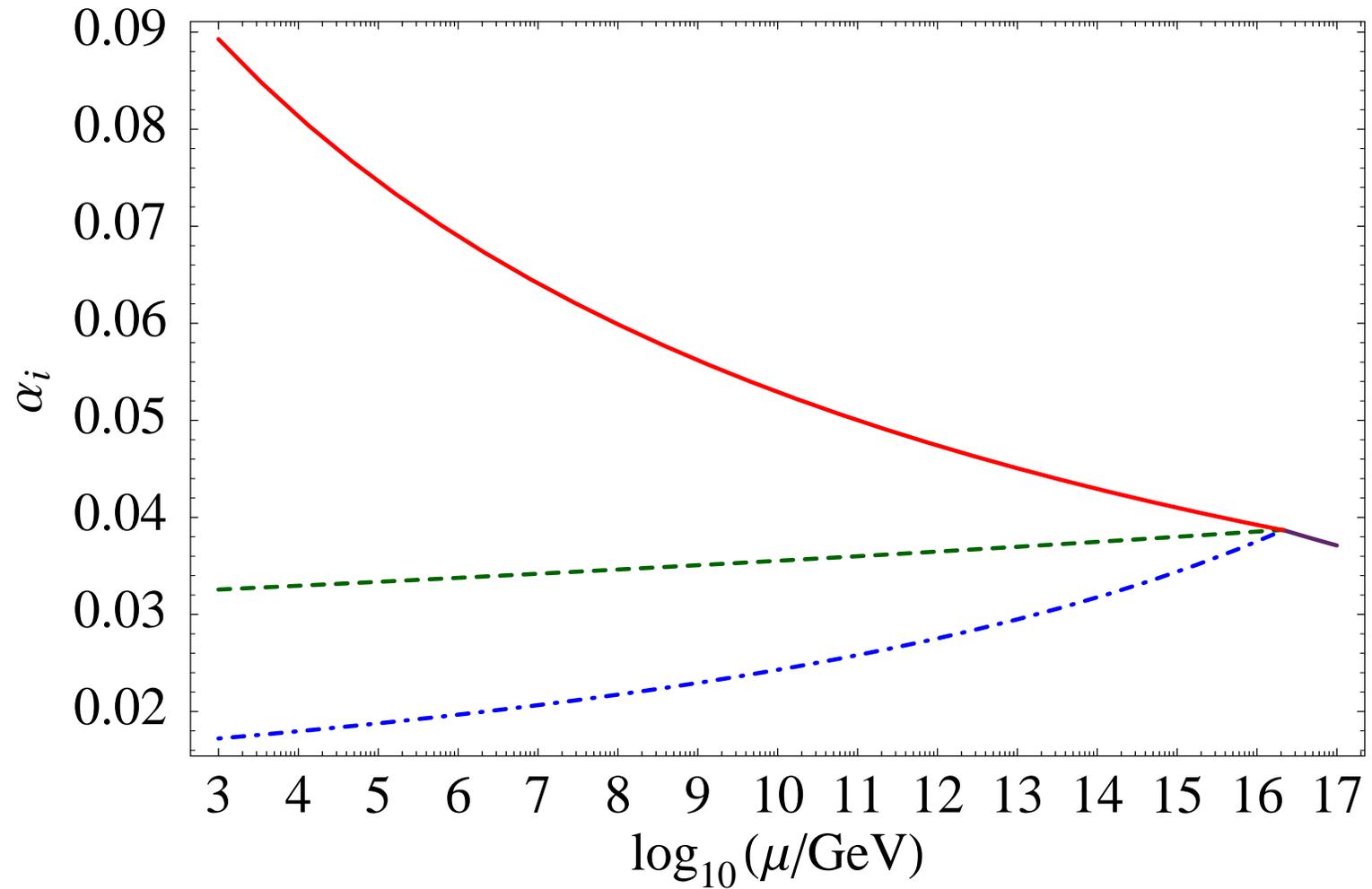
- **Schwache Wechselwirkung:**

Stärke  $10^{-5}$ , Reichweite  $10^{-15}$  cm,  **$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ , Spin 1**

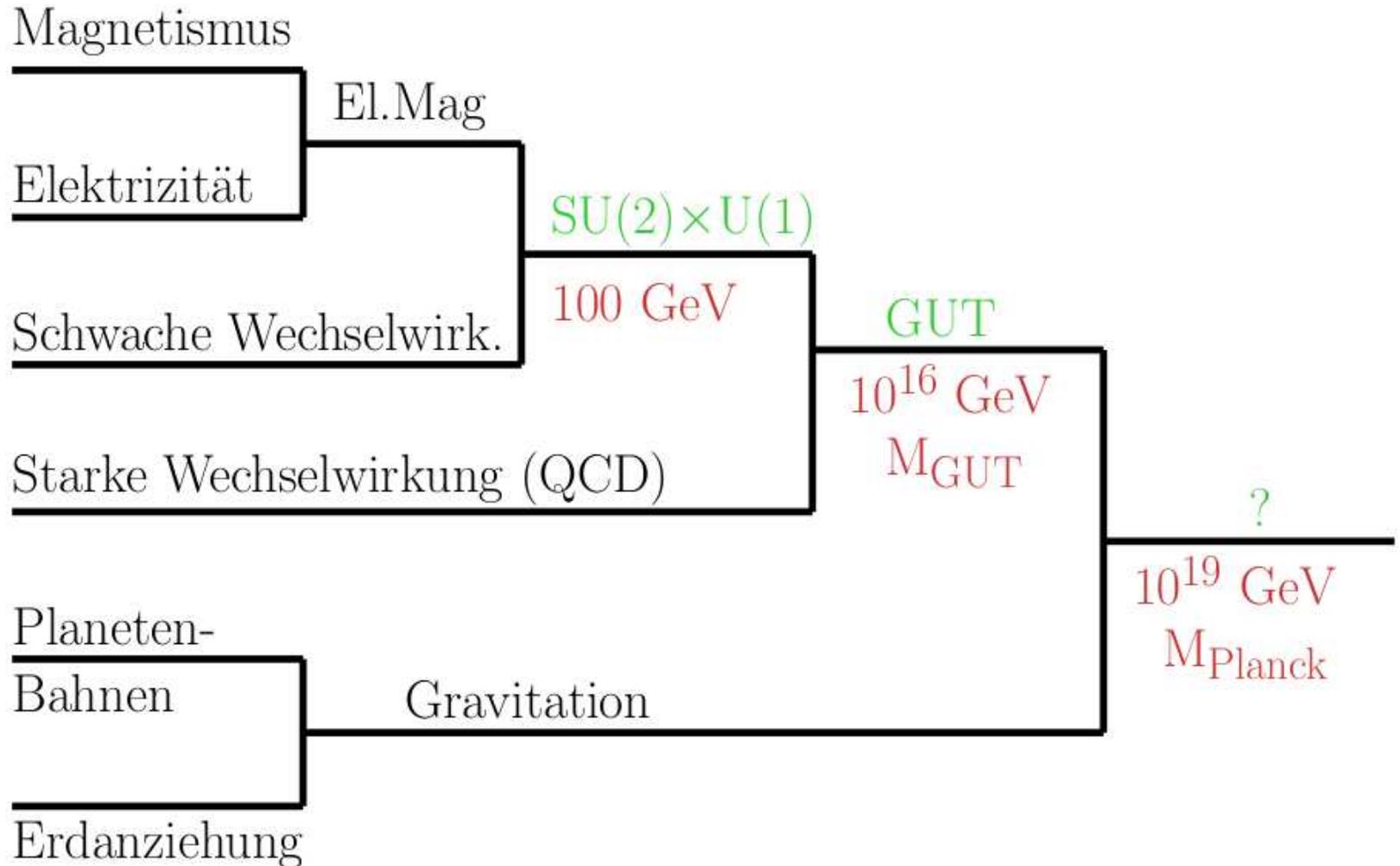
- **Gravitation:**

Stärke  $10^{-38}$ , Reichweite  $\infty$ , **Graviton, Spin 2**

# Evolution der Eichkopplungen



# Grand Unification



# Gravitation heute

Klassisch beschrieben durch die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins

- Gravitationsfeld mit endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit der gravitationellen Wirkung
- Gravitationswellen?
- Graviton als Feldquant (Spin 2)?
- Gravitation als “Geometrie” der Raum-Zeit
- schwächste der fundamentalen Kräfte

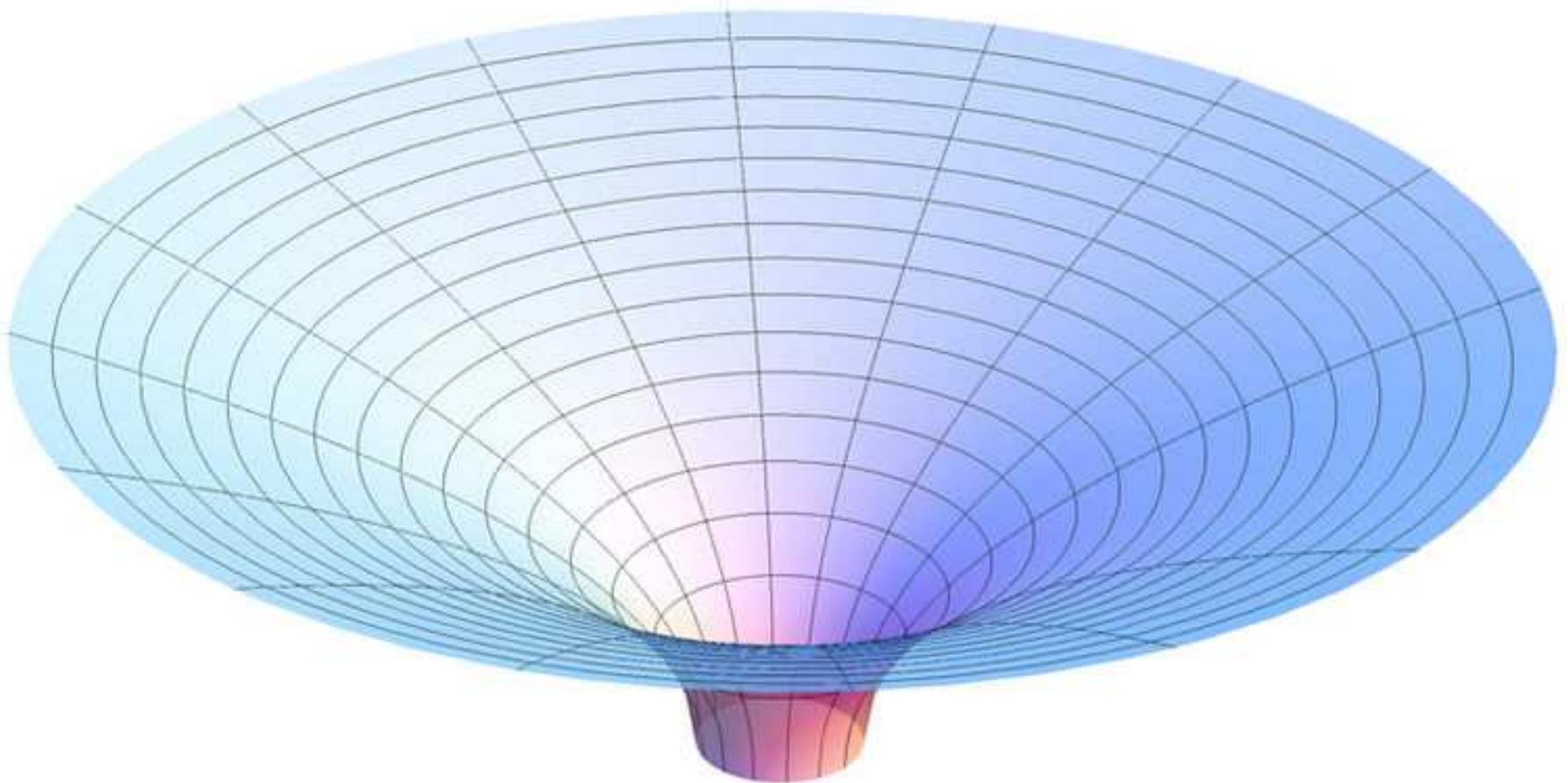
Konsistente Einbettung in die Quantentheorie noch nicht geglückt!

# Probleme der Gravitation

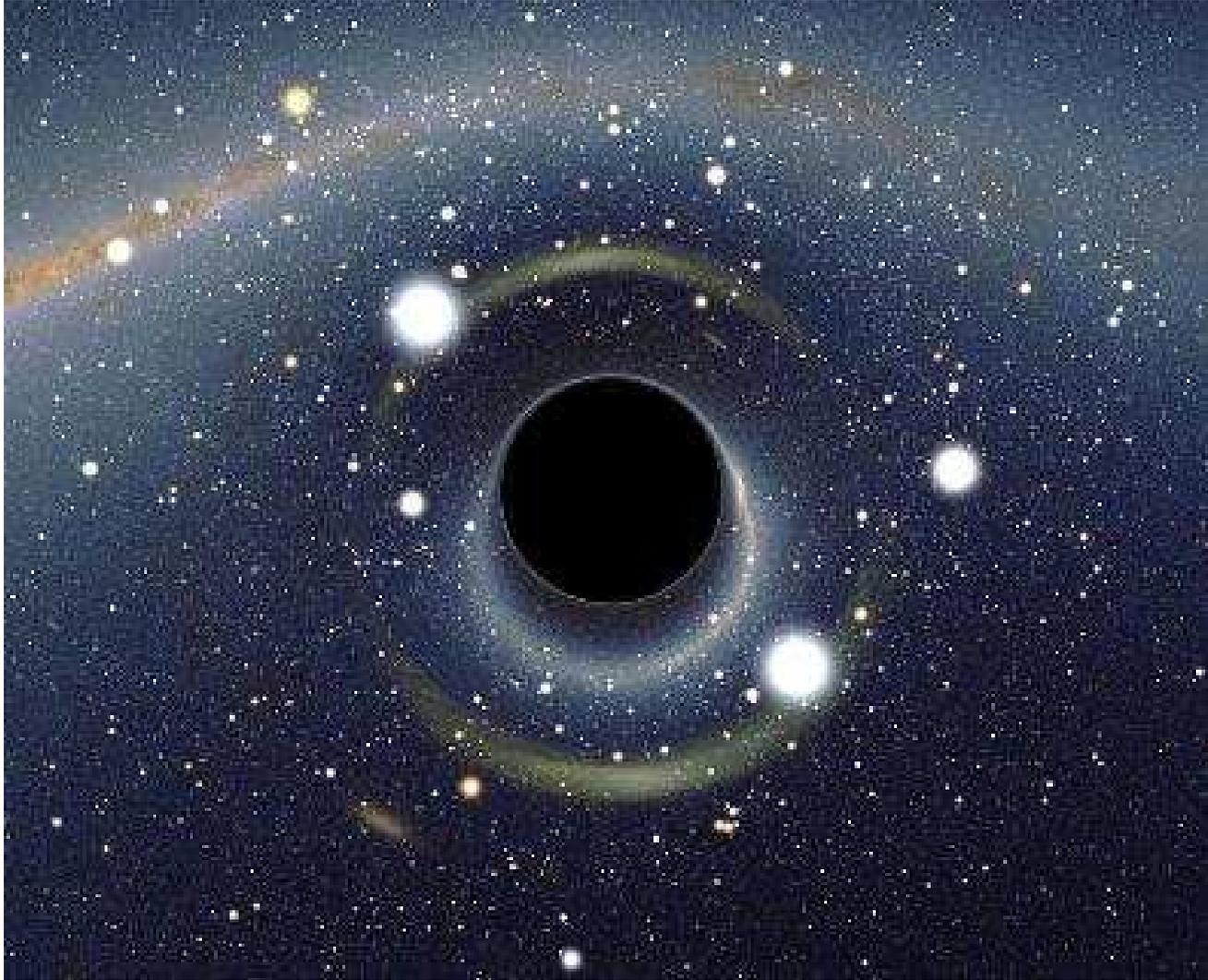
Probleme sind rein theoretischer Natur

- Singularitäten und Renormierbarkeit
- Graviton als Feldquant (Spin 2)?
- Schwarzschildlösung und **schwarze Löcher**

# Schwarzschild-Metrik

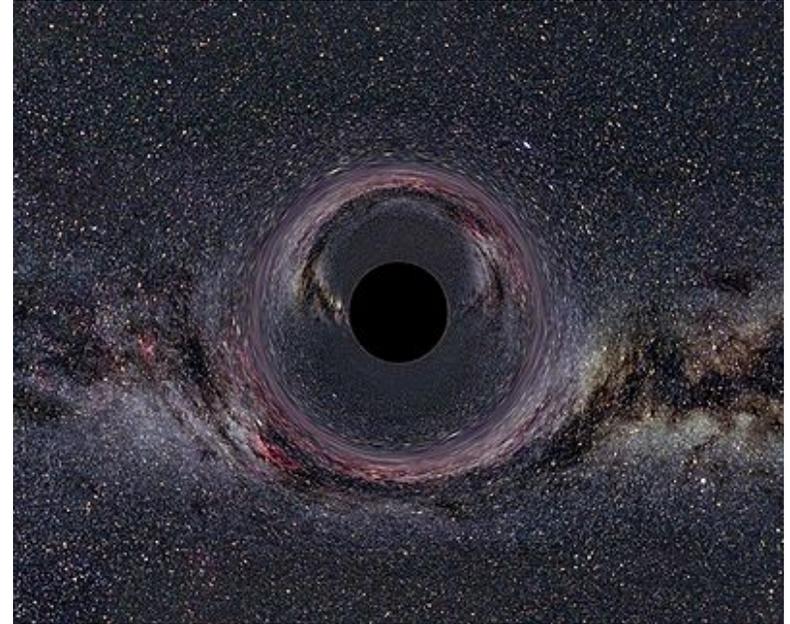


# Schwarzes Loch



# Die Rätsel schwarzer Löcher

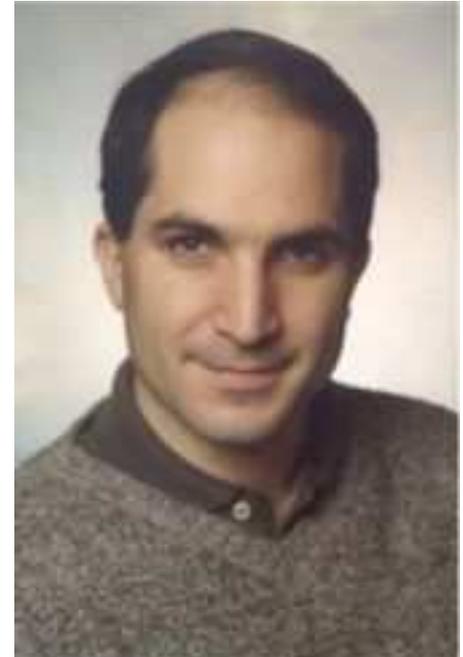
- Hawking-Strahlung: das schwarze Loch ist gar nicht schwarz
- der Horizont des schwarzen Loches



- Oberfläche und Volumen: holographisches Prinzip
- Entropie wächst mit der Oberfläche
- der Horizont als physikalisches Objekt

# Dualitäten

- Dualitäten der Stringtheorie verknüpfen verschiedene Theorien
- AdS/CFT relevant für die Gravitation
- eine Quantenfeldtheorie am Rand beschreibt Gravitation im Innern
- vielfältige Anwendungen (AdS/QCD, AdS/CondMat.....)
- erlaubt quantenmechanisch konsistente Beschreibung schwarzer Löcher



(J. Maldacena, 1968- )

# Quanten-Gravitation

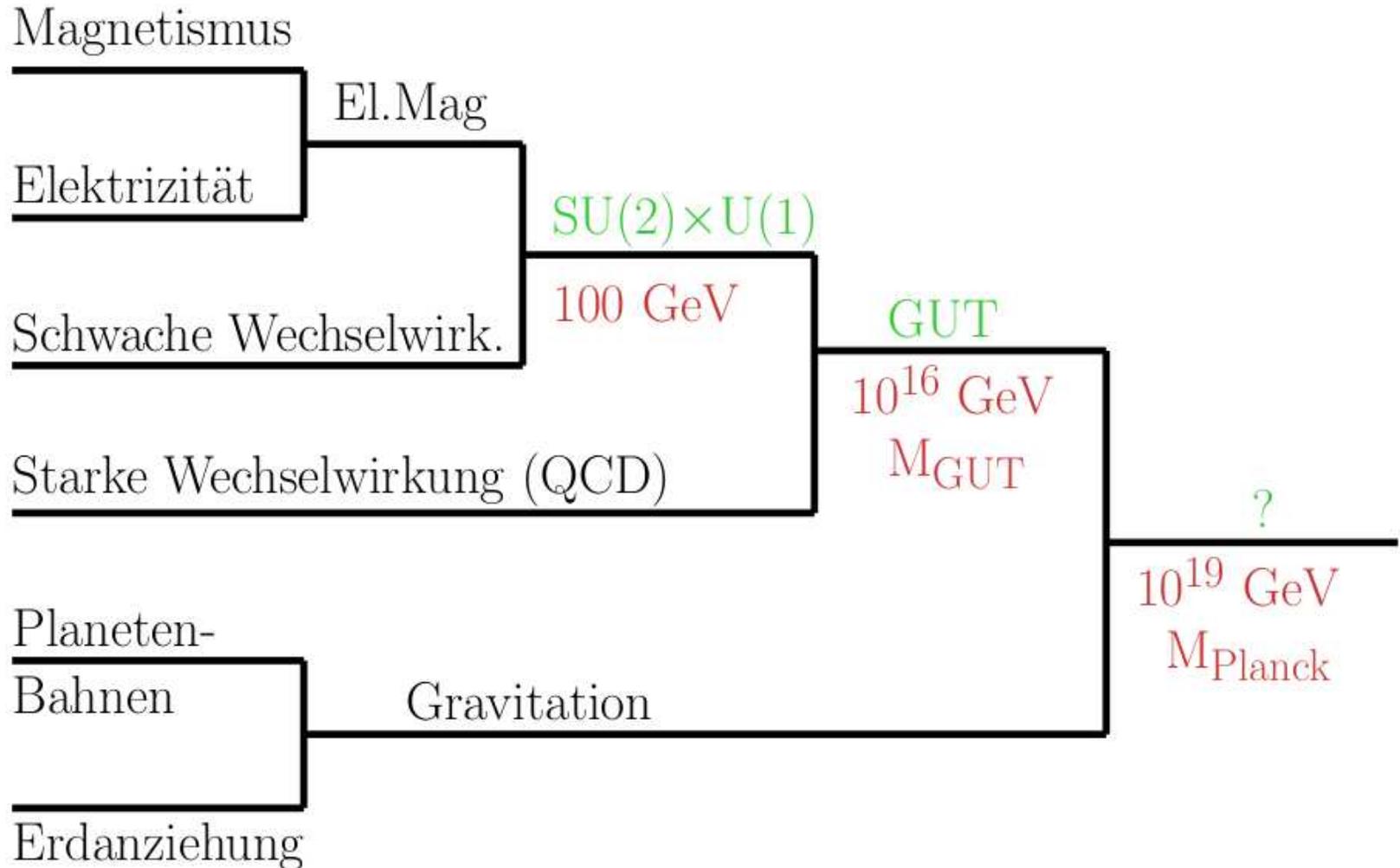
## Die Suche nach der “Weltformel”

- Stringtheorie
- zusätzliche Raumdimensionen (Kaluza-Klein)
- 10-dimensionale Raumzeit und Bran-Welten
- holographisches Prinzip: AdS/CFT Dualität

## Die Gravitation als “Chamäleon”

- **Alle bekannten Kräfte könnten ihren Ursprung in höherdimensionaler Gravitation finden.**
- oder die Gravitation ist nichts anderes als eine Eichtheorie am Rande des Volumens.

# Vereinheitlichte Wechselwirkungen



# Die Rolle der Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**  
Stabilität der Atomkerne und damit aller Materie
- **Elektromagnetismus:**  
Atom- und Molekülphysik, Biologie
- **Schwache Wechselwirkung:**  
Sternentwicklung, Sonnenenergie
- **Gravitation:**  
Entwicklung des Kosmos als Ganzem

Alle fundamentalen Wechselwirkungen sind von großer Bedeutung für unsere Existenz!

# Calabi Yau Manifold

