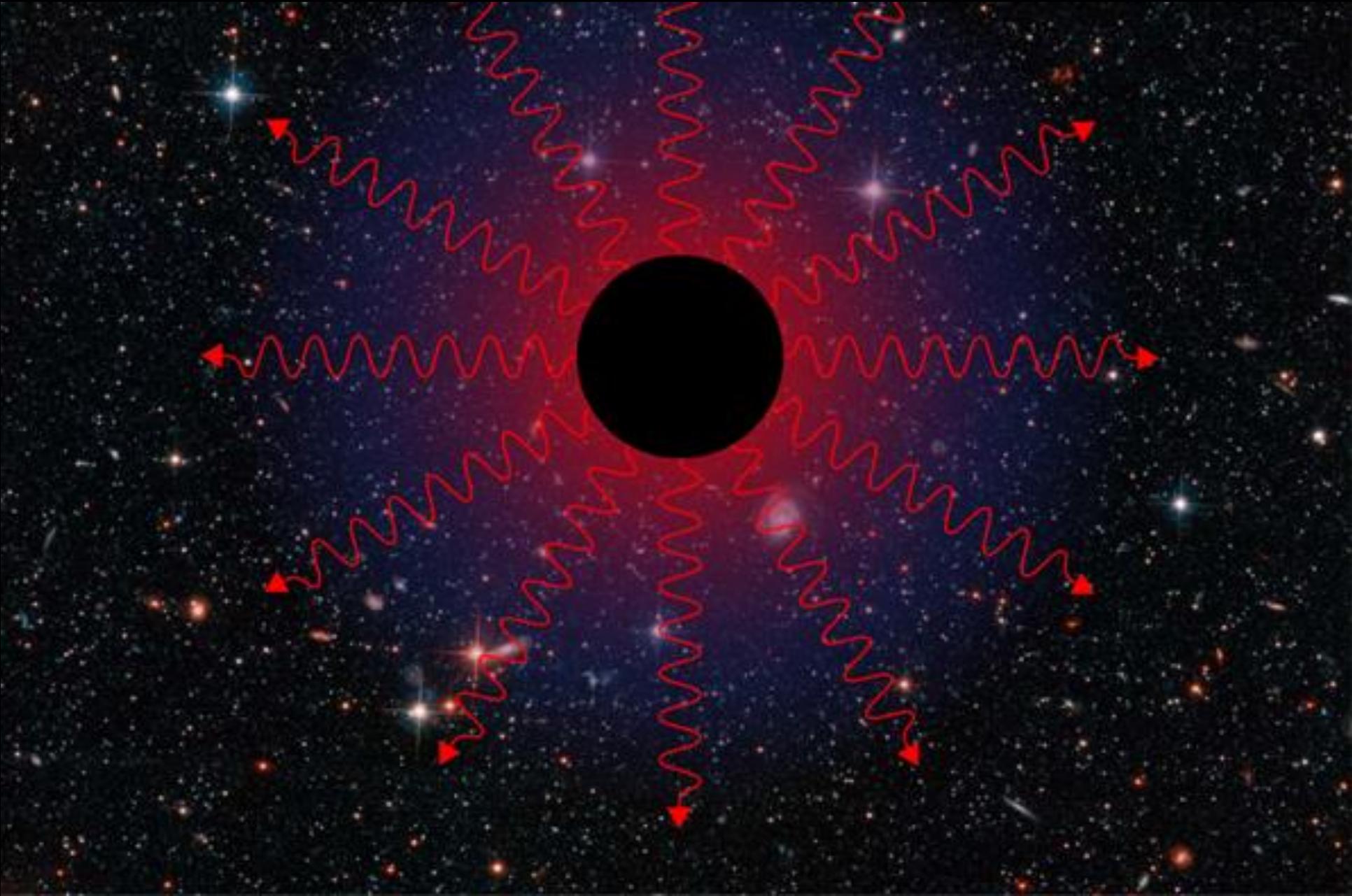


Quantenmechanik und Schwarze Löcher



Die vier fundamentalen Wechselwirkungen der Physik

Fundamental Force	Current Theory	Acts on	Carrier Particle	Mass (GeV/c ²)	Range (m)	Relative Strength
Strong	Quantum chromodynamics (QCD)	Quarks	Gluon	0	$\sim 10^{-15}$	1
Electromagnetic	Quantum electrodynamics (QED)	Charged particles	Photon	0	∞	1/137
Weak	Electroweak Theory (EWT)	Quarks and leptons (decay)	Intermediate vector bosons W [±] and Z ⁰	80.4 and 91.2	$\sim 10^{-18}$	$\sim 10^{-6}$
Gravitational	General Relativity (GR)	Particles with mass and energy	Graviton	0	∞	$\sim 10^{-40}$

Problem: Die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung werden im Rahmen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik durch Quantenfeldtheorien (hervorragend genau) beschrieben.

Die Gravitation wird dagegen „klassisch“ als „metrisches Feld“, d. h. als „Krümmung der Raum-Zeit“ beschrieben (sie ist keine Quantentheorie)

Da die Gravitation eine extrem schwache, aber universell wirkende Naturkraft ist, machen sich bei ihr quantenmechanische Effekte erst unter extremsten Bedingungen empirisch bemerkbar: Das sind:

- In den ersten Sekundenbruchteilen des Urknalls
- Bei Schwarzen Löchern (mit Einschränkungen bereits bei Neutronensternen)
- Bei extrem geringen Abständen, die mit der Planck-Länge vergleichbar sind

Oder anders ausgedrückt: Gravitative Quanteneffekte sind gegenwärtig empirisch so gut wie nicht erforschbar. Man ist hier vollkommen auf theoretische Konzepte angewiesen.

Verschiedene theoretische Konzepte führen zu unterschiedlichen Vorhersagen ...

→ Überprüfung dieser Vorhersagen anhand empirischer Daten (Black holes, Urknall) durchaus möglich (beispielsweise anhand des Temperaturmusters der kosmischen Mikrowellenstrahlung)



String-Theorie Schleifenquantengravitation Supergravitation --

Die ersten theoretischen Ansätze einer Verbindung zwischen klassischen Schwarzen Löchern und Quanteneffekten wurden 1973 von *Jacob Bekenstein* (1947-2015) formuliert: **Entropie Schwarzer Löcher**

Aus diesem Konzept folgt zwingend, dass Black holes im Bereich ihres Ereignishorizontes eine Art thermische Strahlung emittieren müssen, die sie im Laufe der Zeit schrumpfen lassen. Die Entstehung dieser Strahlung lässt sich nur quantenmechanisch erklären. Der entsprechende Mechanismus wurde 1975 von *Stephen Hawking* (1942-2018) entdeckt: **Hawking-Strahlung**

Der Begriff der Entropie (im informationstheoretischen Sinn nach Shannon) impliziert, dass Information durch ein Black hole vernichtet wird (d. h. wenn ein Körper erst einmal in ein Black hole gefallen ist, ist nicht mehr dessen Entwicklungsweg und Zusammensetzung (was ja eine Art „Information“ ist) rekonstruierbar. In der Quantentheorie ist jedoch die „Information“ im abstrakten Sinn eine Art „Erhaltungsgröße“, die nicht vernichtet werden kann (Unitarität der Zeitentwicklung der Wellenfunktion). Das führt zu dem von *Leonard Susskind* und *Joseph Polchinsky* entdeckten **Informationsparadoxon Schwarzer Löcher**.

Eine Auflösung dieses Paradoxons stellt das sogenannte „**Holographische Prinzip**“ dar, welches das No Hair-Theorem der Physik Schwarzer Löcher infrage stellt.

Die Hauptsätze der Physik Schwarzer Löcher

Die Gravitationsbeschleunigung an der Oberfläche der Schwarzschild-Sphäre (Ereignishorizont) bezeichnet man als **Oberflächengravitation**.

0.Hauptsatz

Die Oberflächengravitation ist auf dem Ereignishorizont überall konstant (selbst wenn er wie bei einem Kerr-Loch abgeplattet ist)

1.Hauptsatz

Die Masseänderung eines Black holes ist gleich dem Produkt aus Oberflächengravitation und der Änderung der Oberfläche der Schwarzschildsphäre plus der Änderung des Drehimpulses und entspricht somit dem (allgemein-relativistischen) Energieerhaltungssatz.

2.Hauptsatz

Die Fläche der Schwarzschildsphäre bleibt konstant oder nimmt zu (bei Masseinfall oder auch beim Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher)

3.Hauptsatz

Ein Zustand, bei dem die Oberflächengravitation eines Schwarzen Loches verschwindet, ist nie erreichbar. Hinweis: verbietet extreme Kerr-Lösung

Mitte der 1970er entdeckte man die **auffällige Analogie** zwischen den Hauptsätzen der Physik Schwarzer Löcher und den gut bekannten Hauptsätzen der Thermodynamik:

0.Hauptsatz

Im thermodynamische Gleichgewicht ist die Temperatur überall gleich.

Die Oberflächengravitation ist auf dem Ereignishorizont überall konstant

1.Hauptsatz

$$dU = \delta Q + \delta W$$

$$dM_H = T_H dS_H + \Omega_H dJ_H$$

Die Energie ist in einem abgeschlossenen System konstant (Energieerhaltung)

Die Masseänderung eines Black holes ist gleich dem Produkt aus Oberflächengravitation und der Änderung der Oberfläche der Schwarzschildsphäre plus der Änderung des Drehimpulses und entspricht somit dem (allgemein-relativistischen) Energieerhaltungssatz.

2.Hauptsatz

In einem abgeschlossenen System ist die Entropie konstant oder nimmt zu.

Die Fläche der Schwarzschildsphäre bleibt konstant oder nimmt zu (bei Masseinfall oder auch beim Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher)

3.Hauptsatz

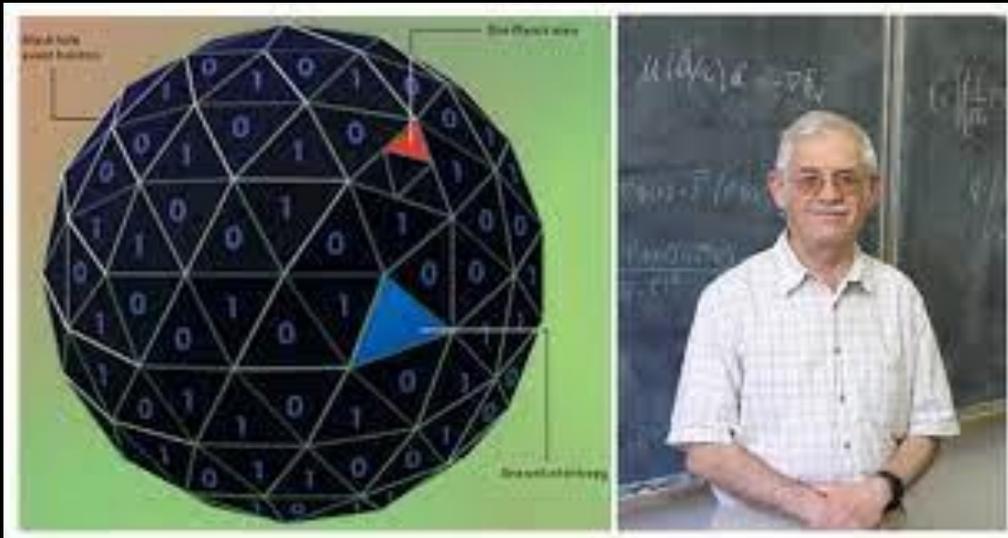
Es ist unmöglich, ein System bis zum absoluten Nullpunkt abzukühlen.

Ein Zustand, bei dem die Oberflächengravitation eines Schwarzen Loches verschwindet, ist nie erreichbar.

Aufgrund dieser thermodynamischen Analogie ist es möglich, Schwarzen Löcher eine **Entropie** und eine **Temperatur** zuzuweisen, die allesamt mit der Fläche der Schwarzschildsphäre verbunden sind:

- Die Entropie wächst mit der Fläche des Ereignishorizonts
- Die Temperatur erhöht sich mit Verkleinerung des Ereignishorizonts

Die Bekenstein-Entropie eines Black holes



Planck-Länge: 10^{-35} Meter



ENTROPIEPARADOX

Die Gesamtentropie eines Schwarzen Lochs ist gleich der Fläche des Ereignishorizonts gemessen in Plancklängen

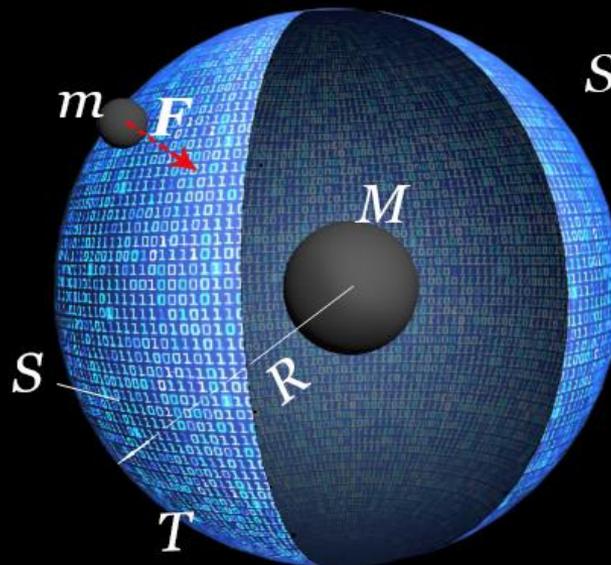
Sonne: Gesamtentropie ist durch deren Volumen festgelegt und beträgt 10^{58} kb

Als Black hole: Gesamtentropie ist durch die Fläche der Schwarzschildsphäre festgelegt und beträgt 10^{77} kb

Die extrem große Entropie eines Schwarzen Lochs erscheint völlig unphysikalisch, lässt sich aber dann schlüssig interpretieren, wenn man sie mit dem Begriff der Entropie im Sinne der Informationstheorie (Entropie nach Shannon) und im Sinn der unitären Quantenmechanik in Zusammenhang bringt. Dann ist sie nämlich ein Maß für den Informationsverlust im Außenraum, wenn „Information“ in ein Black hole stürzt und dort quasi verschwindet.

→ Sie verschwindet aber nicht, sondern wird auf dem Ereignishorizont quasi kodiert

Holographisches Prinzip



Entropische Gravitation

Bekenstein, Hawking equations

$$S = k_B \frac{Ac}{4\pi G\hbar} \quad T = \frac{\hbar g}{2\pi c}$$

$$dE = TdS$$

The first law of TD

$$dM = \frac{g}{2\pi} \frac{dA}{4G}$$

Einstein equation

Die Temperatur Schwarzer Löcher und die Hawking-Strahlung

Interessanterweise lässt sich über die Analogien zu den thermodynamischen Hauptsätzen eine Gleichung für die „Temperatur“ des Ereignishorizonts eines Black holes ableiten, welche neben den Naturkonstanten der klassischen Thermodynamik auch das Plancksche Wirkungsquantum enthält und damit anschaulich zeigt, dass es eine direkte Verbindung zwischen der das Black hole beschreibenden ART und der Quantenmechanik geben muss.

Die Gleichung wurde 1975 von Stephen Hawking abgeleitet:

$$\begin{aligned} T_H &= \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M} \\ &\simeq 6.2 \times 10^{-14} \text{ K} \left(\frac{10^6 M_\odot}{M} \right) \\ &\simeq 6.2 \times 10^{-8} \text{ K} \left(\frac{1 M_\odot}{M} \right) \\ &\simeq 1.2 \times 10^{11} \text{ K} \left(\frac{10^{15} \text{ g}}{M} \right) \\ &\simeq 7.7 \times 10^{29} \text{ K} \left(\frac{1 \text{ TeV}}{M} \right) \end{aligned}$$

Diese Temperatur impliziert eine Wärmestrahlung gemäß der Planckschen Strahlungskurve

Nur extrem massearme (d. h. „Kleine“) Schwarze Löcher emittieren Strahlung in nachweisbarer Intensität

Ein Schwarzes Loch von der Masse eines Berges (Mt. Everest, $\sim 10^{12}$ kg) besitzt eine Temperatur von 100 Milliarden Kelvin und verliert durch den Abstrahlungsprozess rapide an Masse. Erreicht die Masse ca. 1000 kg, dann explodiert es mit einer „Sprengkraft“ von mehreren Megatonnen TNT-Äquivalenz.



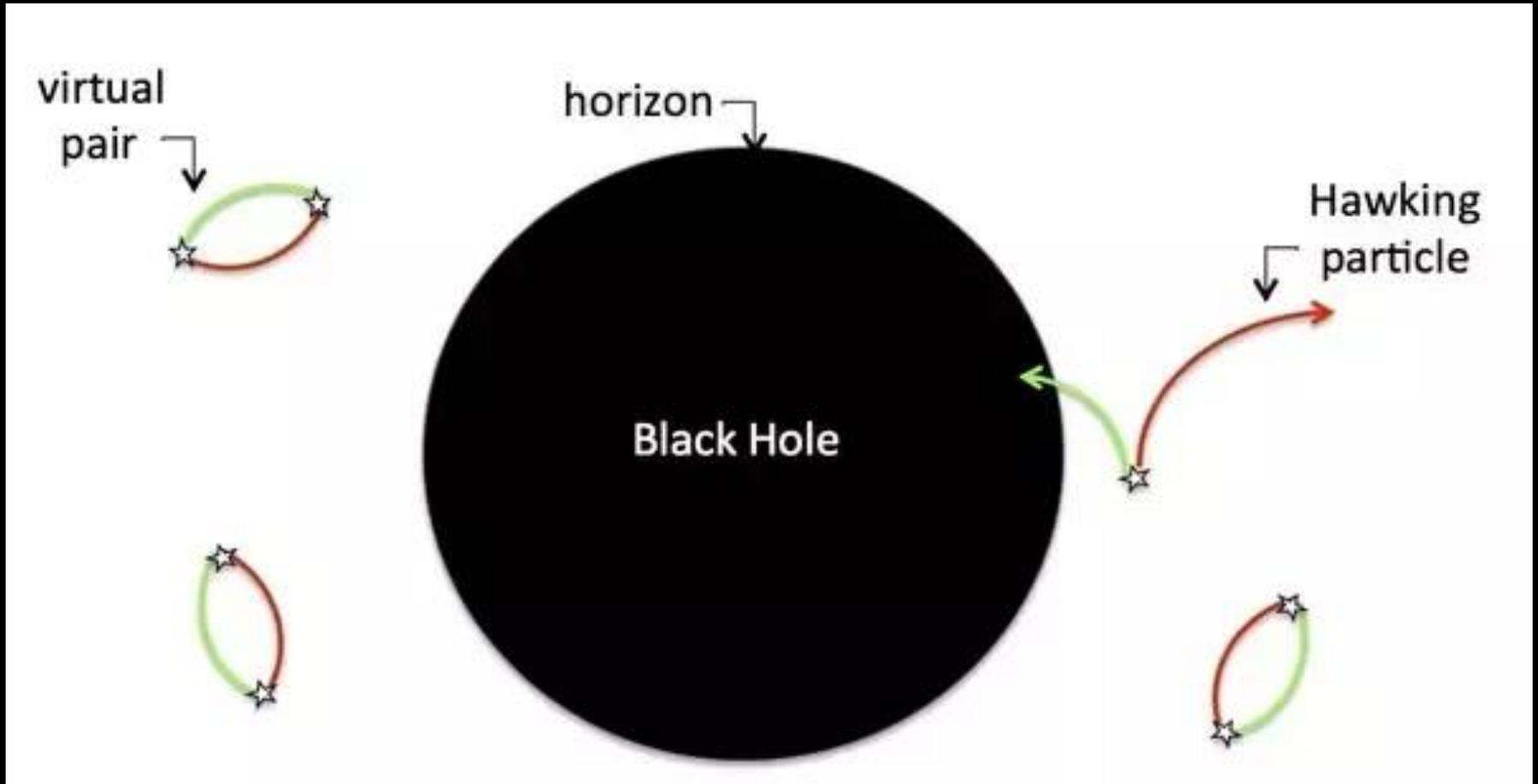
Durch den Hawking-Prozess ist die Lebensdauer von Schwarzen Löchern endlich.

Die Lebensdauer eines Schwarzen Loches ist proportional zur dritten Potenz seiner ursprünglichen Masse und **beträgt bei einem Schwarzen Loch mit der Masse unserer Sonne ungefähr 10^{64} Jahre**. Sie liegt damit jenseits sämtlicher vorstellbarer Zeithorizonte (*Weltalter ca. $14 \cdot 10^9$ Jahre*)



Sollten während des Urknalls massearme Schwarze Löcher entstanden sein (sogenannte „primordiale Schwarze Löcher“, so sollten sie heute explodieren und als intensiver Gammastrahlungsblitz beobachtbar sein. Zwar beobachtet man Gammastrahlungsblitze in großer Zahl, aber nicht in der Art, wie man sie beim „Verdampfen“ Schwarzer Löcher erwarten würde.

Der Hawking-Strahlungsprozess



Im quantenmechanischen Vakuum entstehen und vergehen stetig virtuelle Teilchenpaare

Verdampfen primordialier Black holes

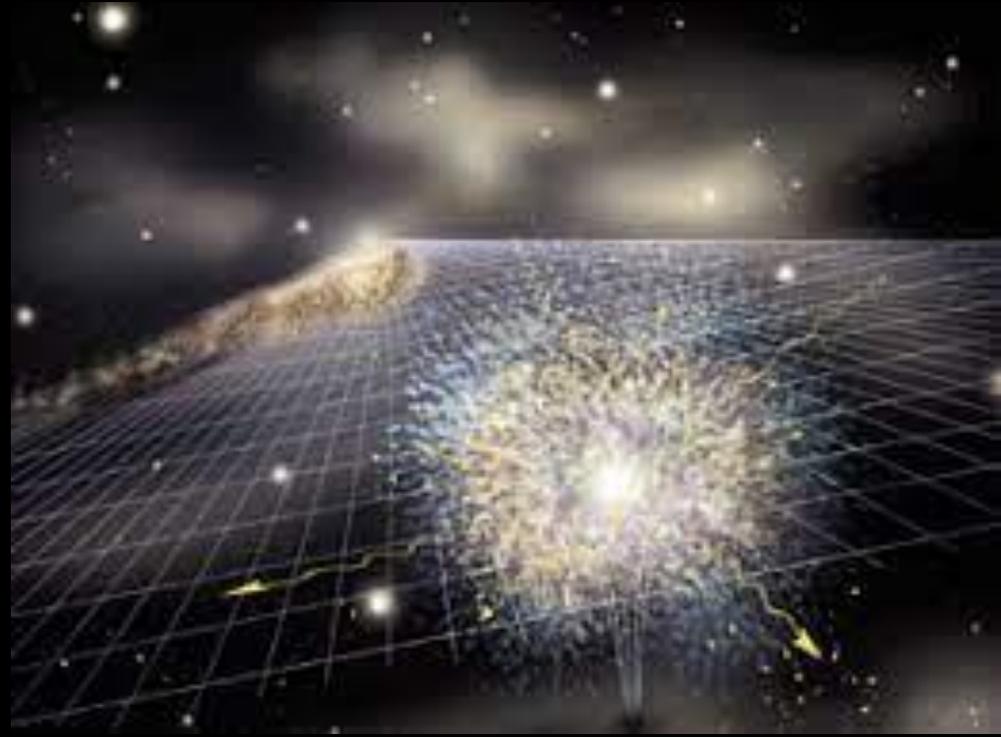
Wichtig für die Unterscheidung von „normalen“ Gammabursts: Das Intensitätsspektrum weicht aufgrund quantenmechanischer Effekte stark von einem thermischen Spektrum ab.

Die Energie der Hawking-Strahlung hängt davon ab, welches Teilchen am Horizont materialisiert. Mit Schrumpfung des Loches durch Hawking-Emission und dem damit verbundenen Temperaturanstieg, wird schließlich die Ruhemasse verschiedener Teilchenspezies überschritten, so dass ein ganzer Teilchenzoo emittiert werden könnte.

Verdampfungszeitskala:

$$\tau \approx 10^{64} \cdot \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3 \text{ Jahre}$$

Nach ungefähr 10^{100} Jahren sind alle Schwarzen Löcher im Universum verschwunden...



The Lifecycle of a Star

