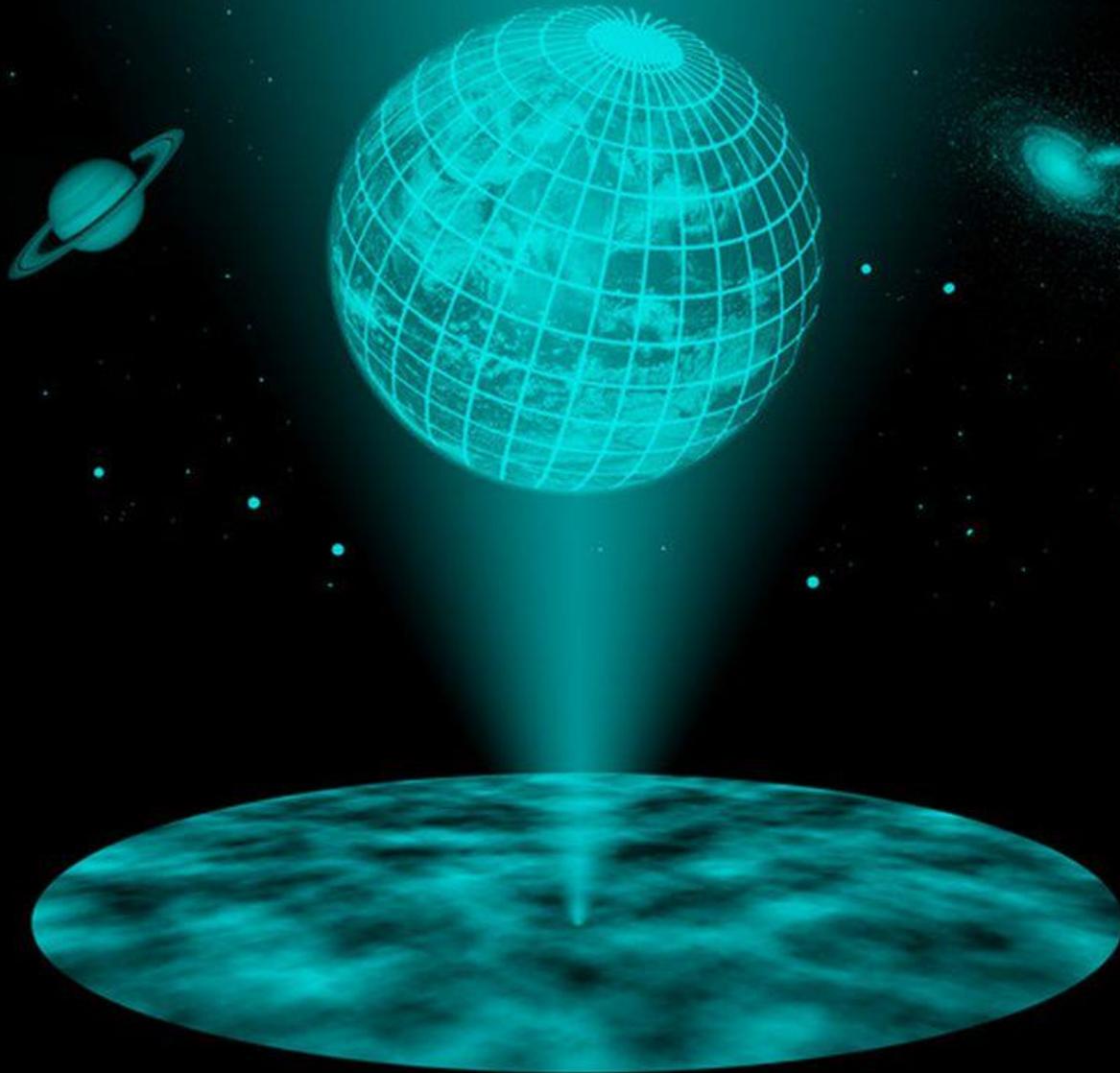


Das Holographische Universum



Die Entdeckung des **holographischen Prinzips** bei Schwarzen Löchern zeigt eine neue Möglichkeit auf, die Quantentheorie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie in Einklang zu bringen. Diese Bemühungen führten zur Theorie des „**Holographischen Universums**“.

These: Zur Beschreibung des Universums braucht man möglicherweise eine räumliche Dimension weniger als es den Anschein hat.

Kann eine 2+1-dimensionale Beschreibung der Welt eine 3+1-dimensionale Realität vollständig beschreiben?

(Ist erst einmal nur ein mathematisch-physikalisches Problem)

Ergebnis: Im Fall eines Black holes scheint das möglich zu sein, da sämtliche Informationen, die darüber Auskunft geben, aus was das Schwarze Loch entstanden ist, auf dessen Ereignishorizont „bitweise“ codiert ist. Das bedeutet, wenn es die Möglichkeit gäbe, diese „Information“ auszulesen, man das „Geschehen“ innerhalb des Ereignishorizonts auch prinzipiell rekonstruieren könnte...

In Analogie zu einem klassischen „optischen“ Hologramm kann man das „Geschehen“ innerhalb eines Schwarzen Lochs als dreidimensionale „Projektion“ der dynamischen Information auf dessen Ereignishorizonts interpretieren.

Dadurch, dass die „Entropie“ eines Schwarzen Lochs maximal ist (Bekenstein-Grenze), reicht die Oberfläche des Ereignishorizonts – gemessen in Quadrat-Plancklängen – aus, um dessen Informationsgehalt (d. h. im Volumen des Black holes) vollständig zu codieren. (Eine Quadrat-Plancklänge = 10^{-66} cm^2)

Analogon Bücherstapel:



- Informationsgehalt nimmt mit dem Volumen zu (und damit auch die Masse)
- Irgendwann wird die Masse des „Bücherstapels“ so groß (d. h. wenn sich dessen Informationsgehalt - ausgedrückt durch die Entropie) – der Bekenstein-Grenze nähert), dass er in einem Gravitationskollaps zu einem Schwarzen Loch zusammenbricht.

Lässt sich das „Holographische Prinzip“ auch auf das Universum „als Ganzes“ anwenden?

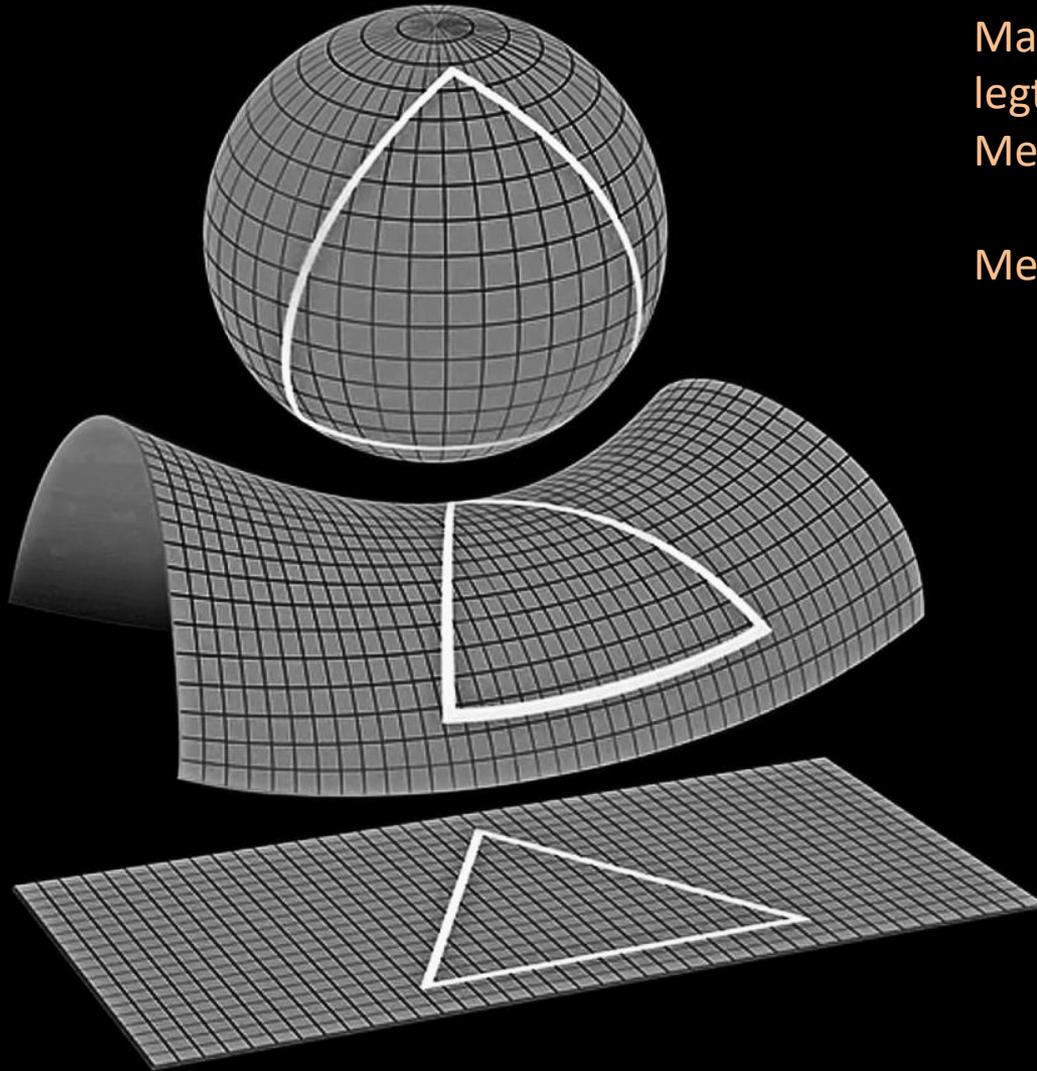
Die Antwort ist „ja“ – unter gewissen Voraussetzungen...

- Das „reale“ Universum ist ein räumliches Gebilde, welches sich in der Zeit verändert, d. h. die Raumzeit ist 3+1-dimensional
- Die 3+1-dimensionale Raumzeit muss eine 2+1-dimensionale Begrenzung besitzen

Da das „reale“ Universum viel zu kompliziert ist, hat man theoretisch besonders einfache Raum-Zeiten untersucht, um für sie eine holographische Beschreibung zu entwickeln.

(Stephen Hawking, Leonard Susskind, Juan Maldacena, Alexander Polyakow)

Standard-Kosmologie = Friedman-Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen



Materieinhalt -> **kosmische Massendichte**
legt das Expansionsverhalten und die
Metrik fest

Metrik = Robertson-Walker-Metrik

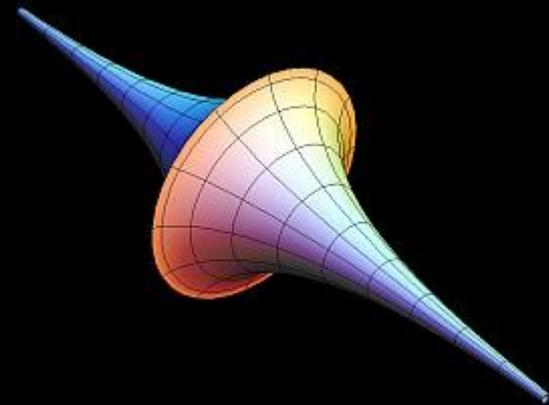
Vereinfachtes Modelle: deSitter-Räume

Eigenschaften von deSitter-Räumen

- leer (haben keinen Materieinhalt)
- gekrümmt (Krümmung wird durch die kosmologische Konstante Λ bewirkt)
- symmetrisch
- beschleunigte Expansion (analog zur „realen“ Raumzeit)

Vermutung: Unsere „reale“ Raumzeit wird sich in Zukunft immer mehr einer deSitter-Raumzeit annähern...

Zweidimensionales Analogon für eine negativ gekrümmte Raumzeit: Anti-Sphäre



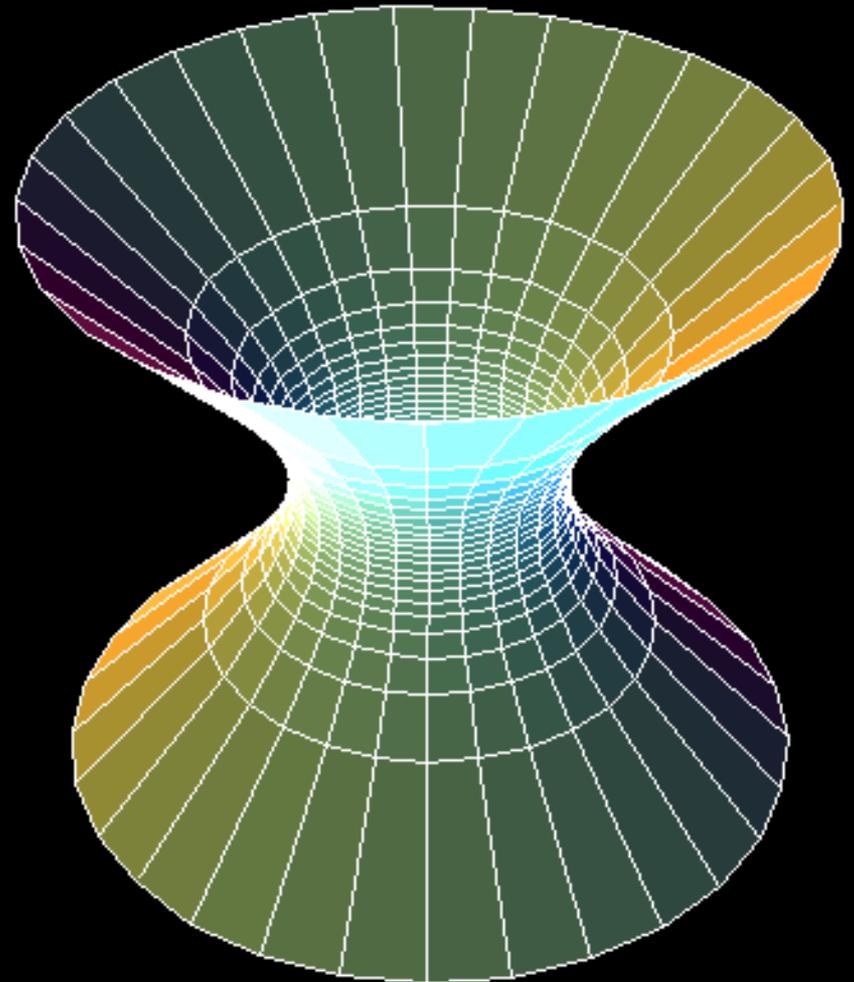
In der String-Theorie verwendet man gern eine negativ gekrümmte Anti-deSitter-Raumzeit (AdS), um die Theorie möglichst einfach zu formulieren.

→ negative kosmologische Konstante

(der reale Kosmos besitzt eine positive kosmologische Konstante)

→ ein Anti-deSitter-Raum besitzt eine „Begrenzung“ im „Unendlichen“

Ein AdS sieht überall und zu allen Zeiten gleich aus, von einer Raum-Expansion oder einer Kontraktion zu reden macht daher keinen Sinn – im Gegensatz zum de-Sitter-Raum oder zum beobachteten Universum.



Physikalische Eigenschaften eines Anti-deSitter-Raumes

Wenn man irgendwo frei in einem solchen Raum schwebt, hat man den Eindruck, sich am Boden eines **Gravitationspotentials** aufzuhalten:

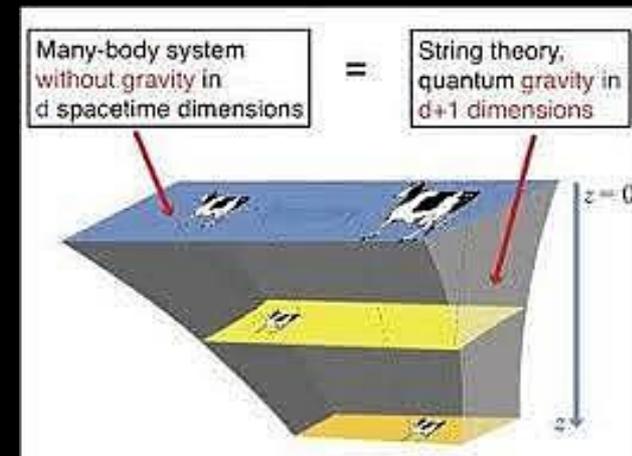
→ *jedes Objekt, das man fortschleudert, kehrt zurück.*

Die Zeit bis zur Rückkehr hängt nicht von der Wucht des Wurfs ab: Das Objekt entfernt sich auf seiner Rundreise zwar desto weiter, je mehr Schwung man ihm gibt, aber die Rückkehrzeit bleibt stets dieselbe.

Auf der Grundlage eines 3+1 – dimensionalen Anti-deSitter-Raums lässt sich eine Quantenfeldtheorie für punktförmige Teilchen „ohne Gravitation“ entwickeln.



Auf der Grundlage der String-Theorie lässt sich in einem 4+1 – dimensionalen Anti-deSitter-Raum eine Quantenfeldtheorie für zweidimensionale Superstrings „mit Gravitation“ entwickeln, die dem AdS-Modell in 3+1-Dimensionen äquivalent ist.



Schlussfolgerung:

Eine **String-Theorie mit Gravitation** kann einer **Quantenfeldtheorie ohne Gravitation** äquivalent sein.

„Das bedeutet, dass zwei scheinbar völlig verschiedene Theorien – die nicht einmal in Räumen derselben Dimensionszahl gelten – äquivalent sind. Intelligente Bewohner eines dieser Universen könnten nicht unterscheiden, ob sie in einem fünfdimensionalen, von einer Stringtheorie beschriebenen Kosmos leben oder in einer vierdimensionalen Welt, auf die eine Quantenfeldtheorie mit punktförmigen Teilchen zutrifft. Natürlich könnte ihnen die Struktur ihres Gehirns ein massives Vorurteil zugunsten einer dieser Beschreibungen aufdrängen – so wie unser angeborener "gesunder Menschenverstand" die Wahrnehmung konstruiert, dass unser Universum drei räumliche Dimensionen besitzt.“ Jacob D. Bekenstein

Der „Charm“ des Modells des „Holographischen Universums“ besteht darin, dass die Gravitation als vierte fundamentale Wechselwirkung nicht explizit quantisiert werden muss, da sie sich automatisch als „entropische Kraftwirkung“ ergibt.

→ interessanter Ansatz für eine Quantengravitationstheorie

Lässt sich das „Holographische“ Universum beweisen?

Wenn man es ernst nimmt (und das tun nur Wenige), prinzipiell ja.

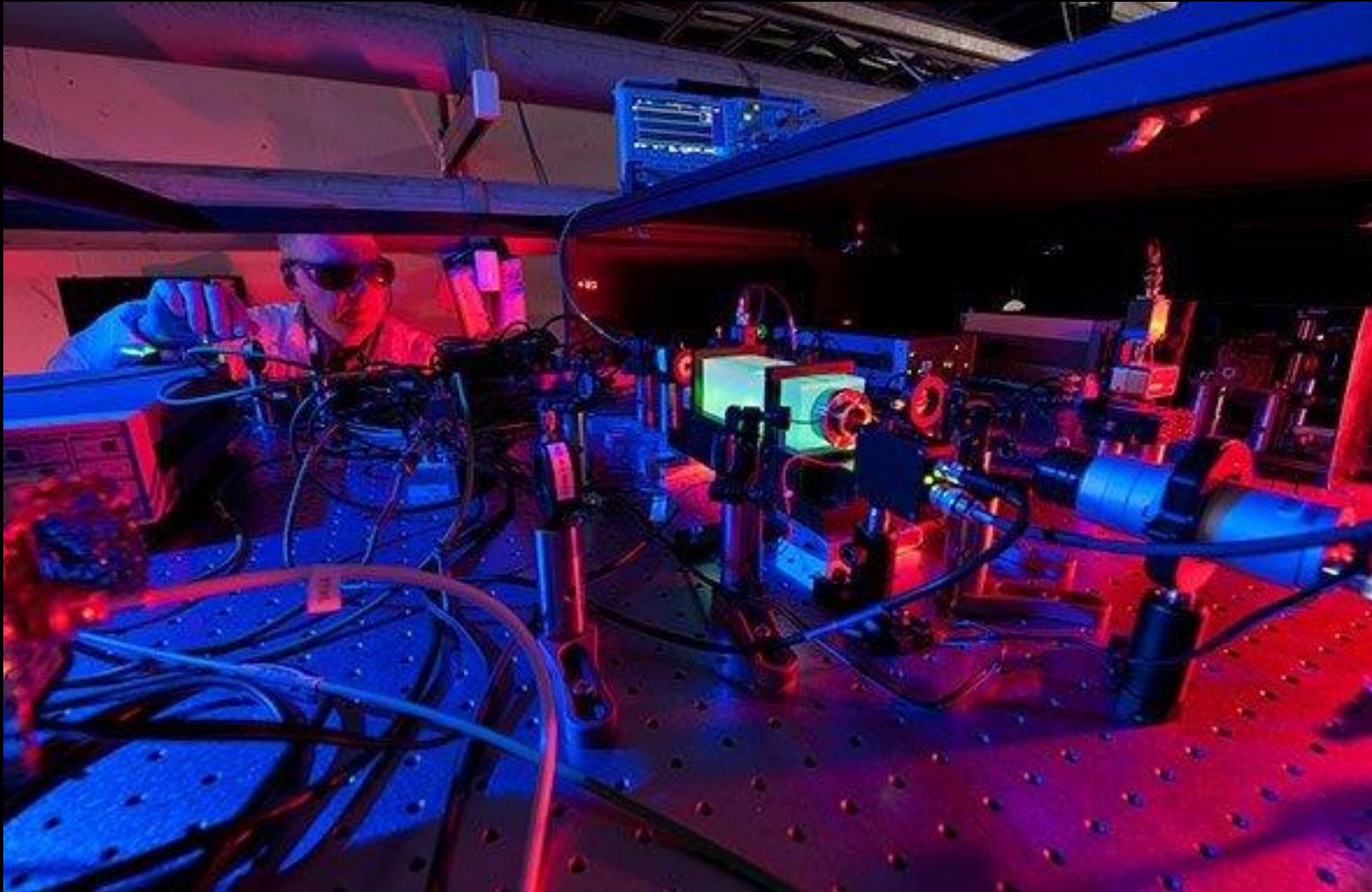
- Spektrum / räumliche Struktur der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung
- Interferometermessungen (Korrelation der Signale in orthogonalen Richtungen sind unterschiedlich, wenn Theorie stimmig ist)

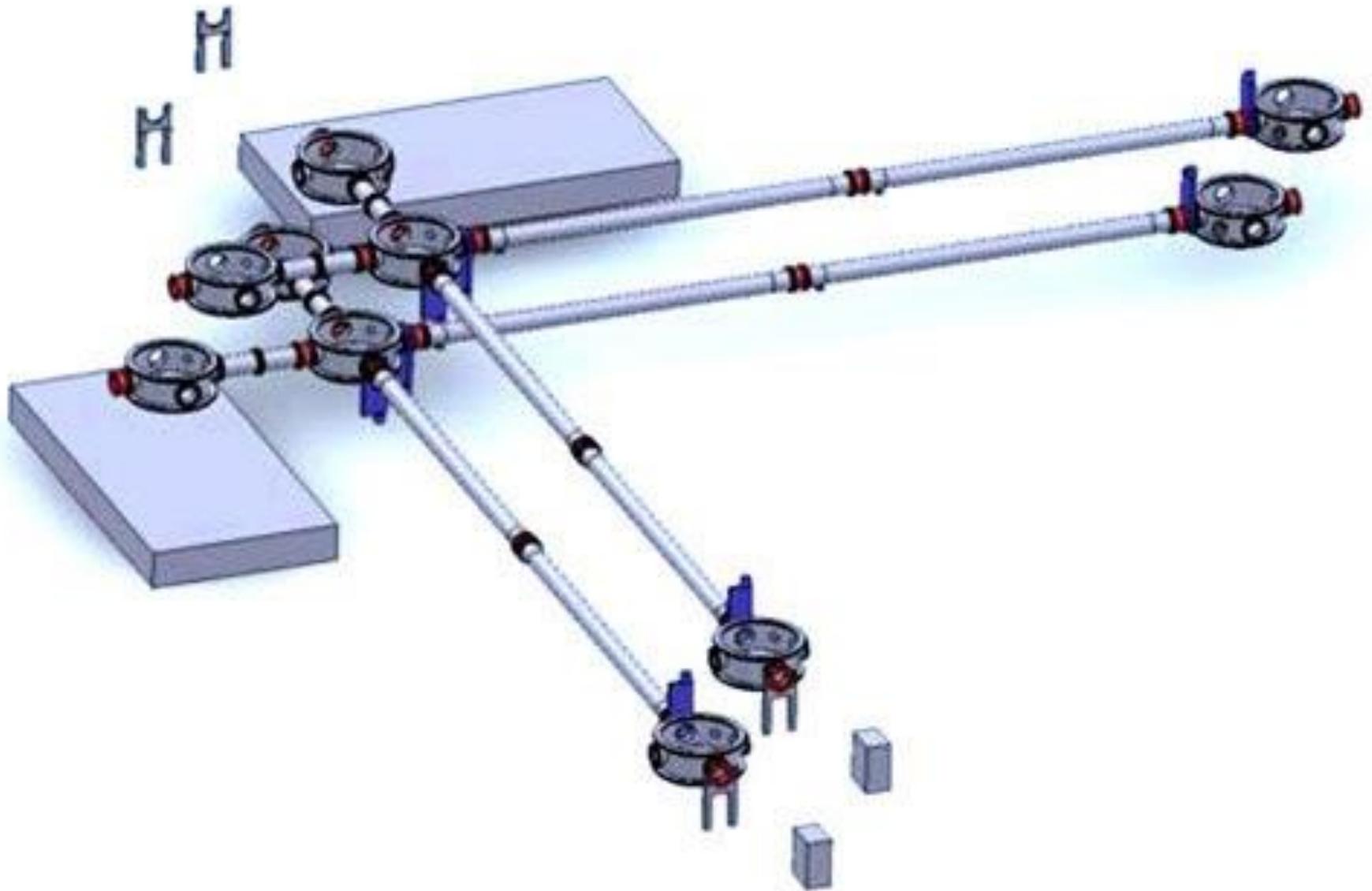


SIND WIR ALLE HOLOGRAMME?

Das „FermiLab-Holometer“ – Experiment

Nachweis von „holographischen Fluktuationen“ der Raumzeit





Das empfindlichste Michelson-Interferometer der Welt: Auflösung im Attometerbereich

Ziel der Messungen:

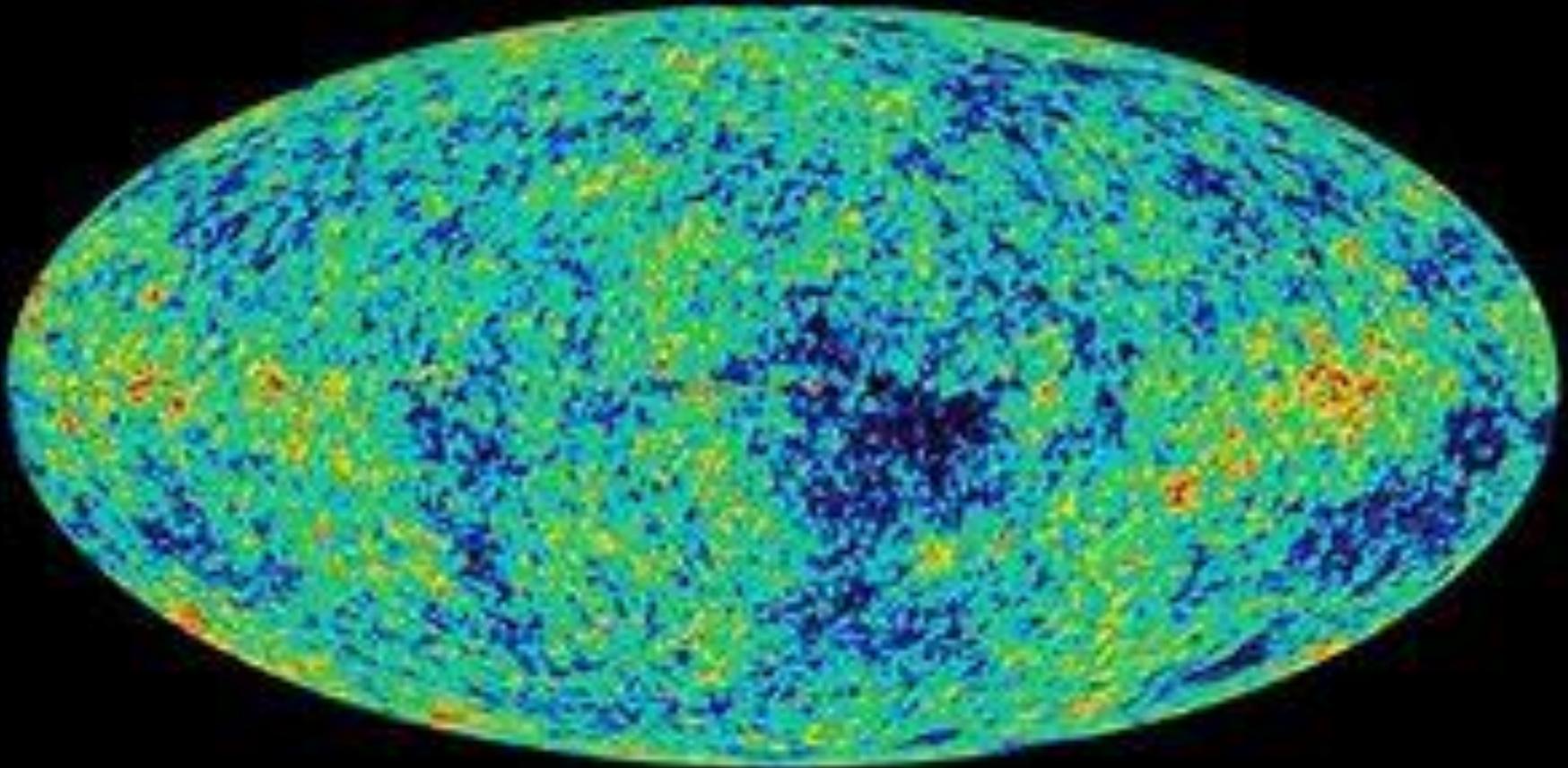
Nachweis des „Quantenrauschens“ auf der Längenskala der Plancklänge (10^{-35} m)

Ist die „Welt“ im Bereich der Plancklänge zweidimensional, dann sollten sich Abweichungen zu den theoretischen Erwartungen geben. Diese Abweichungen werden als „holographisches Rauschen“ bezeichnet und kann vom „Quantenrauschen“ unterschieden werden.

Vorläufiges Ergebnis:

Die Ergebnisse konnten mit hoher statistischer Signifikanz (4,6 Sigma) die Existenz einer diskreten Raumzeitstruktur im Sinne des Modells des „Holographischen Universums“ ausschließen.

Kosmischer Mikrowellenhintergrund



Die Statistik der beobachteten Temperaturfluktuationen stimmen sowohl mit den Vorhersagen der Standard-Kosmologie als auch mit der Theorie des holographischen Universums überein. Eine eindeutige Unterscheidung ist (noch) nicht möglich.