
Emergente Gravitation: Raum als Illusion?

John Wendel

07.01.2021

Big Questions Seminar
Fakultät Physik

Einführung

Allgemeine Relativität

- Allgemeine Relativität (Einstein):
 - Raumzeit abgesehen von gekrümmter Geometrie keine intrinsischen Eigenschaften
 - Gravitation sei Krümmung der Raumzeit
 - Materie bewegt sich unter Krafteinfluss entlang der Raumzeit
- Theorie und Observation stellen diese Konvention in Frage
 - 95% der Energie unbekannt
 - Schwarzslochphysik und Stringtheorie: Andeutungen, dass Raumzeit und Gravitation makroskopische Konsequenzen von mikroskopischen Verschränkungen sind

(Quelle: Emergent Gravity and the Dark Universe, E. Verlinde, 2016)

Quantenverschränkung

- Bekannter Gesamtzustand
 - Zustände einzelner Teilchen unbekannt
 - Messung des einen Zustandes → Determinierung des anderen Zustandes
 - Instantane Bestimmung, ungeachtet der Entfernung
- Neue Theorie: Quantenverschränkung als Basis der Raumzeitgeometrie

(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015)

Building up spacetime with quantum entanglement, M. Van Raamsdonk, 2010)

Anwendung im Anti-de Sitter Raum

AdS CFT Dualität

Anti-de Sitter Raum:

- Theoretischer Raum
- Dreidimensional
- Keine Expansion
- Negative Vakuumenergie
- Gehorcht Einsteins Gravitationsgleichungen

→ "Bulk"

Oberfläche:

- Zweidimensional
- Keine Gravitation
- Mathematisch definierte Membran, unendlich weit von jedem Punkt im Bulk
- Umschließt den Bulk komplett
- Grenzteilchen gehorchen der konformen Feldtheorie (CFT)

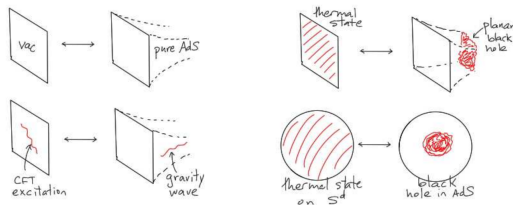
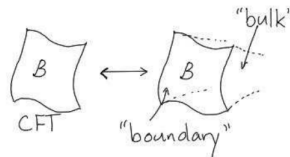
→ "Boundary"

(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015

Building up spacetime with quantum entanglement, M. Van Raamsdonk, 2010)

Informationsgehalt beider Räume

- Beide Räume gleicher Informationsgehalt
- Vgl: 2D Computerchip vs. 3D Computerspiel
- Simple, gravitationsfreie 2D Boundary vs. komplexerer 3D Bulk
- Gravitation im Bulk Quantenfeld im Boundary

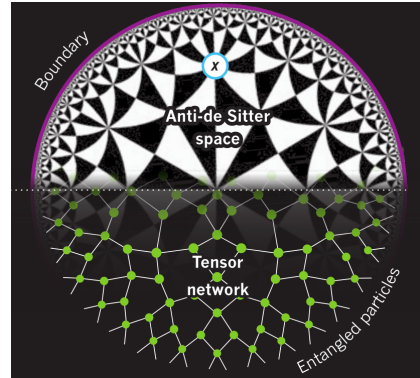


(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015

Lectures on Gravity and Entanglement, M. Van Raamsdonk, 2016)

Geometrische Verschränkung

- Brian Swingle (2007, MIT): Untersuchung Elektroneninteraktionen in Festkörpern
- Nützliche Methode: Netzwerk, welches zunächst benachbarte Elektronen verbindet
- Immer größer werdende Muster → Family Tree
- Kurs Quantenfeldtheorie: Mapping der Bulk-Boundary sah aus wie sein Tensornetzwerk
 - Mehr als nur Zufall: Gleiche Ergebnisse wie zuvor
- Raum sei aufgebaut aus Verschränkungen



(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015)

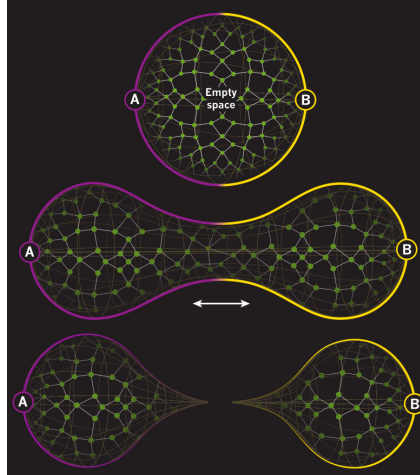
Gravitation

- Verbindung Quantenzustand auf der Boundary und Gravitation im Bulk?
- Hinweise auf Verbindung zwischen Geometrie und Quantenverschränkung in Spezialfällen (z.B. Bulks mit schwarzen Löchern)
- Betrachte leeres Bulk Universum, entspricht einem einzigen Quantenfeld im Boundary
- Enthält die einzige Verschränkung im System
- Langsame, methodische reduktion in der Verschränkung des Boundary:
- Reaktion im Bulk: Raumzeit zieht sich auseinander
- Komplette Auflösung der Quantenverschränkung → Spaltung der Raumzeit in 2 Teile
- Verschränkung notwendig zur Existenz der Raumzeit
- Gravitation = Beschreibung der durch Materie ausgelösten Änderung einer Verschränkung

(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015)

Building up spacetime with quantum entanglement, M. Van Raamsdonk, 2010)

Trennung der Verschränkung



(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015)

Anwendung im de Sitter Raum

De Sitter Raum

- Konzeptionellen Ideen emergenter Raumzeit scheinen allgemein gültig und anwendbar auf andere Räume
- Nun: Anwendung auf unser Universum mit möglichst gleicher Herangehensweise
- Weniger theoretische Kontrolle durch mangelnde mikroskopische Beschreibung der Raumzeit mit positiver kosmologischer Konstante
- Kosmologischer Horizont beschrieben durch Hubble Konstante H_0 und Hubbleskala L :

$$a_0 = cH_0 = \frac{c^2}{L}$$

- Endliche Entropie und Temperatur:

$$S = \frac{A}{4G\hbar} \quad T = \frac{\hbar a_0}{2\pi}$$

(Quelle: Emergent Gravity and the Dark Universe, E. Verlinde, 2016)

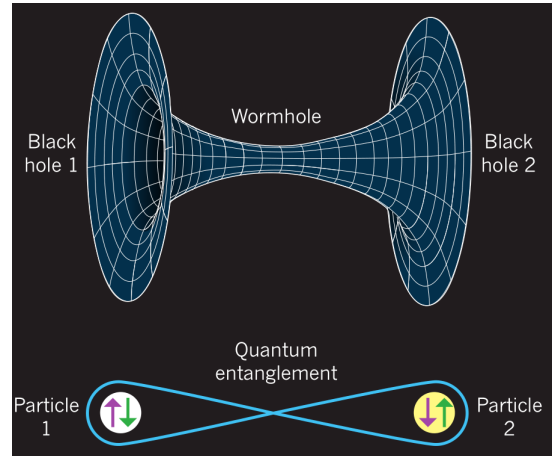
Kein Boundary

- De Sitter Raum hat kein Boundary im unendlichen
- Zweifel an holographischer Beschreibung
- Interpretation Kosmologischer Horizont und Abwesenheit räumlicher Unendlichkeit als Unterschiede der Verschränkungsstruktur zwischen AdS und dS
- Horizontentropie und Temperatur zeigen: Mikroskopischer de Sitter Raum entspricht thermischen Zustand
- Ein Teil der mikroskopischen Freiheitsgrade wird "thermalisiert"

(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015)

ER=EPR

- Einstein-Rosen-Brücke (Wormloch)
 - Tunnel durch die Raumzeit
 - Verbindet zwei schwarze Löcher
 - Nicht durchquerbar für reale Teilchen
- EPR (Einstein, Rosen, Podolsky)
→ Verschränkung
- ER=EPR
- Verschränkung beschreibbar durch mikroskopische WurmLöcher
- Bisher noch nicht gefunden, jedoch mathematisch konsistent



(Quelle: Space. Time. Entanglement, nature vol. 527, 2015)

"missing mass problem"

- Dunkle Energie und Phänomene dunkler Materie verbunden mit a_0
- Betrachte Sphärisches Volumen mit Oberfläche $A = 4\pi r^2$ mit Materie der Gesamtmasse M nahe des Zentrums
- Definiere Oberflächenmassedichte (für gravitative Phänomäne ausgelöst durch Dunkle Materie):

$$\Sigma = \frac{M}{A} < \frac{a_0}{8\pi G}$$
$$S_M = \frac{2\pi M}{\hbar a_0} < \frac{A}{4G\hbar}$$

- links: Änderung de Sitter Entropie, wenn Masse M addiert wird
- rechts: Entropie eines schwarzen Lochs, welches in eine Fläche A passt

(Quelle: Emergent Gravity and the Dark Universe, E. Verlinde, 2016)

Interpretation

- Ungleichung nicht erfüllt (kleines a_0): Entropie wird durch Vakuum dominiert
 - Entspricht Entropie eines schwarzen Lochs
- Ungleichung erfüllt (großes a_0): De Sitter Entropie dominiert
 - Hängt nicht nur von Oberfläche, sondern auch von Volumen ab
 - Korrekturen Allgemeiner Relativitätstheorie, sieht aus wie Dunkle Materie/Energie

(Quelle: Emergent Gravity and the Dark Universe, E. Verlinde, 2016)

Dunkle Materie als Folge emergenter Gravitation

- Verschränkungsentropie wandelt "steife" Geometrie der Raumzeit in ein elastisches Medium
- "Dunkle" Gravitationskraft verursacht durch dunkle Materie
- Unter richtigen Umständen gehorchen baryonische und dunkle Materie in d Raumzeitdimensionen:

$$\frac{2\pi}{\hbar a_0} M_D^2 = \frac{A}{4G\hbar} \frac{M_B}{d-1} \quad \text{und} \quad \Sigma_D^2 = \frac{a_0}{8\pi G} \frac{\Sigma_B}{d-1}$$

- Alternativ ausgedrückt durch gravitative Beschleunigungen:

$$\Sigma_D = \frac{d-2}{d-3} \frac{g_D}{8\pi G} \quad \text{und} \quad \Sigma_B = \frac{d-2}{d-3} \frac{g_B}{8\pi G}$$

- Relation: $g_D = \sqrt{g_B a_M}$, mit $a_M = \frac{d-3}{(d-2)(d-1)} a_0$
- Für $d=4$: $a_M = a_0/6$, entspricht Observation galaktischer Rotationskurven

(Quelle: Emergent Gravity and the Dark Universe, E. Verlinde, 2016)

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Observation und Theorie stellen konventionelle ART in Frage
- Idee: Verschränkung als Raumzeit
- Untersuchung im Anti de Sitter Raum:
 - "Boundary" als zweidimensionale Hülle
 - Informationen im Raum beschreibbar mit CFT auf der Boundary
 - Auflösen der Verschränkungen im Boundary → Separierung der Raumzeit
- Verschränkungen nötig zur Existenz von Raumzeit
- Anwendung im de Sitter Raum:
 - Verschränkungen sehen auf großen Skalen aus wie Dunkle Energie/Materie