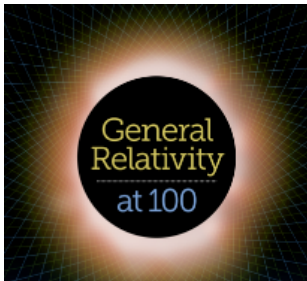


Gravedad Cuántica

Juan Maldacena

Institute for Advanced Study



60^{mo} aniversario del Instituto Balseiro

Diciembre 2015

La relatividad general produjo dos predicciones sorprendentes:

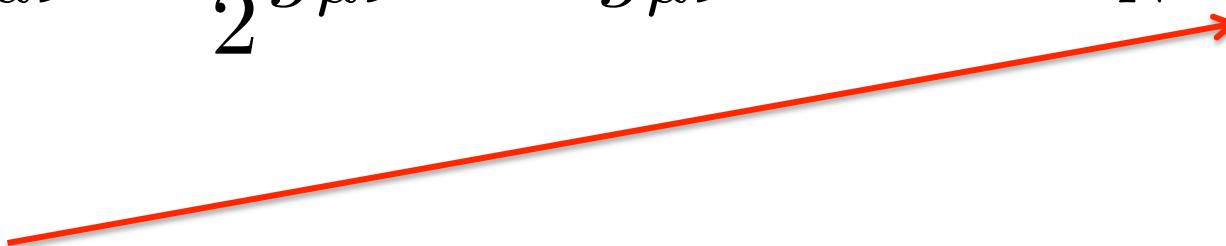
- Agujeros Negros
- La Expansión del Universo

“Tu matemática está bien, pero tu física es un desastre”

(Einstein to LeMaitre)

En ambos casos el espacio o el tiempo se deforman muchísimo

Cuantización

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + g_{\mu\nu}\Lambda = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$


Materia $\rightarrow$ mecánica cuántica $\rightarrow$ lado izquierdo también debería ser gobernado por la mecánica cuántica

El tensor de energía impulso es cuántico $\rightarrow$ la geometría también !

En la mayoría de las circunstancias podemos ignorar las fluctuaciones cuánticas. In most circumstances we can neglect the quantum fluctuations

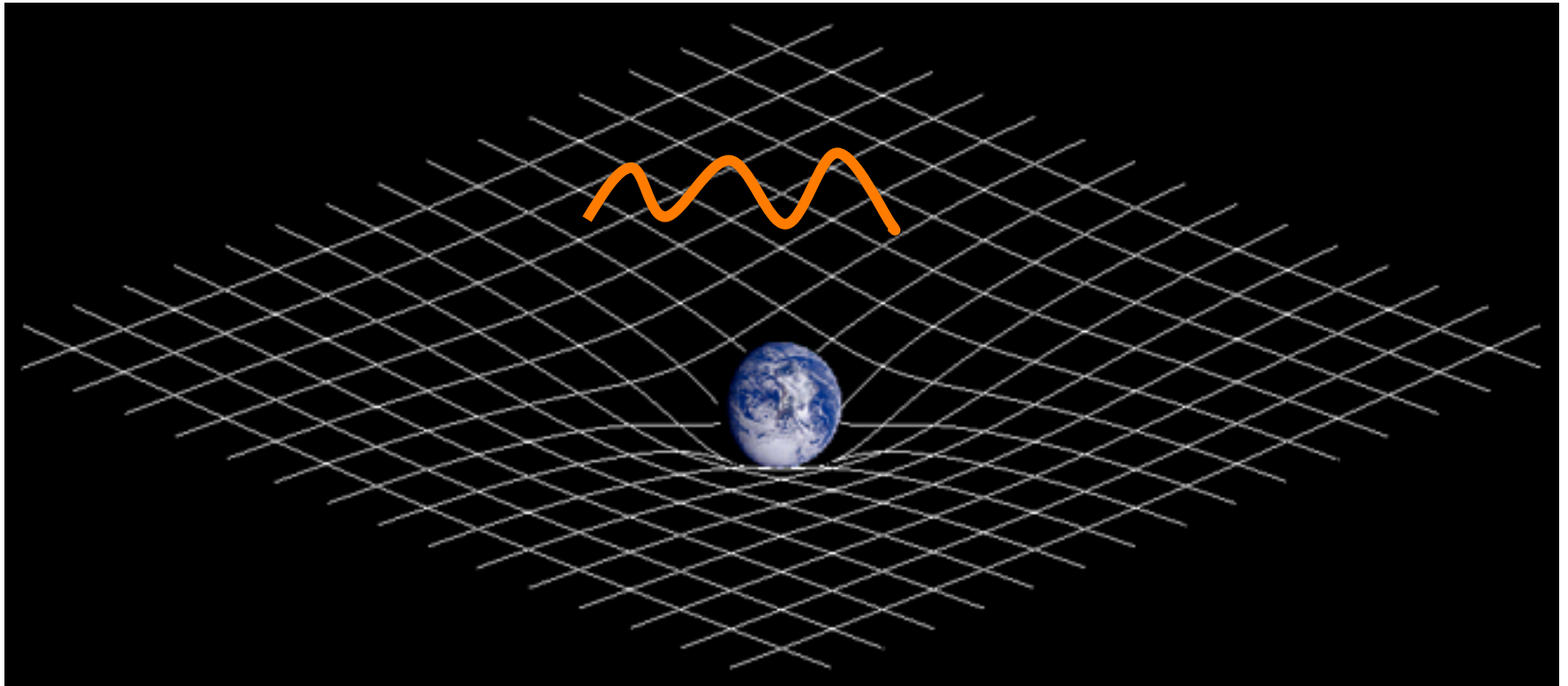
A veces son cruciales. Ej. en el principio del Big Bang.

Resultados de tres puntos de vista

- 1) Teoría de campos efectiva.
- 2) Teoría perturbativa bien definida. Teoría de cuerdas.
- 3) Algunos resultados exactos (no perturbativos).

Campos cuánticos en una geometría de fondo fija.

Pequeñas deformaciones de la geometría $\rightarrow$ las tratamos como un campo cuántico más.



- Incluso esta simple aproximación produce resultados sorprendentes !

Dos predicciones sorprendentes

- Agujeros negros tienen una temperatura

$$T \sim \frac{\hbar}{r_H}$$

Hawking



Habría “agujeros negros” blancos

- Un universo que se expande en forma acelerada tiene una temperatura

$$T \sim \hbar H = \frac{\hbar}{R_H}$$

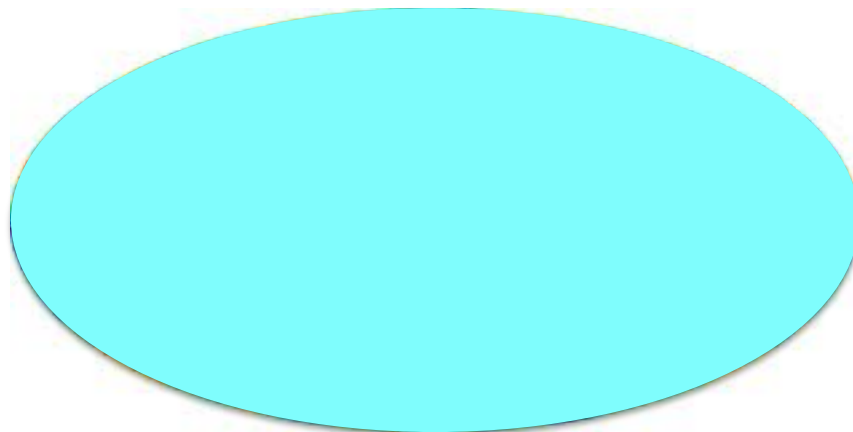
Chernikov, Tagirov,
Figari, Hoegh-Krohn, Nappi,
Gibbons, Hawking,
Bunch, Davies,

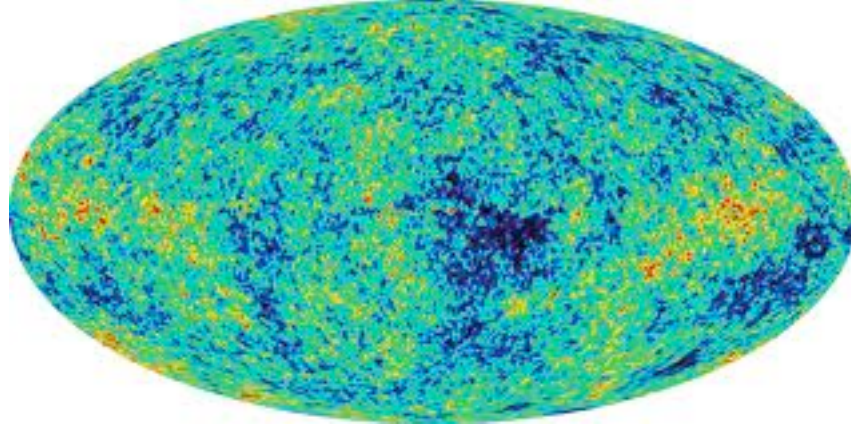
Muy relevante para nosotros !

Inflación

Starobinski, Mukhanov
Guth, Linde,
Albrecht, Steinhardt, ...

- Período de expansión con aceleración casi constante
- Produce un gran universo homogéneo



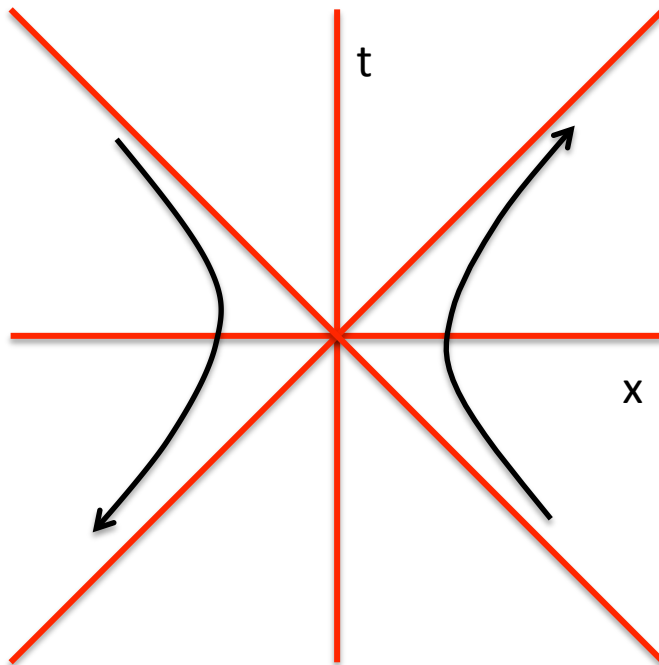


La mecánica cuántica es crucial para entender la geometría del universo a gran escala.

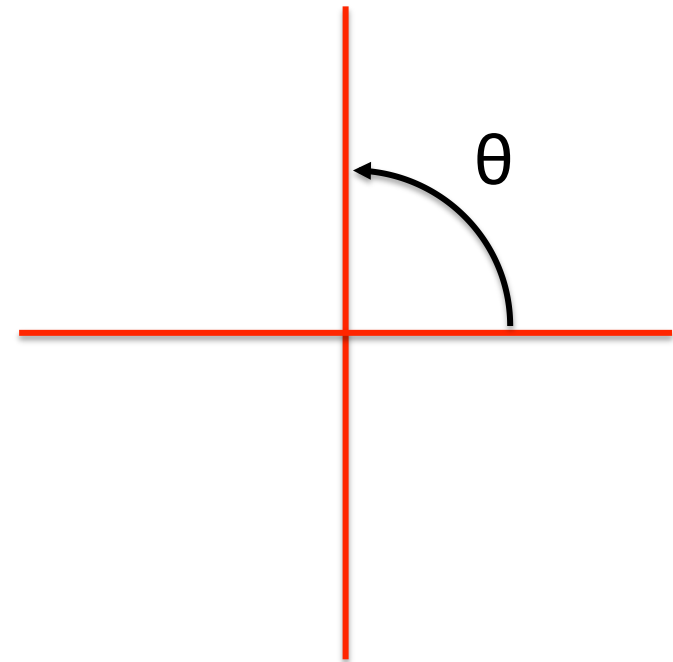
¿Por qué una temperatura?

- Consecuencia de la relatividad especial + la mecánica cuántica.

¿Por qué una temperatura?



Lorentziano

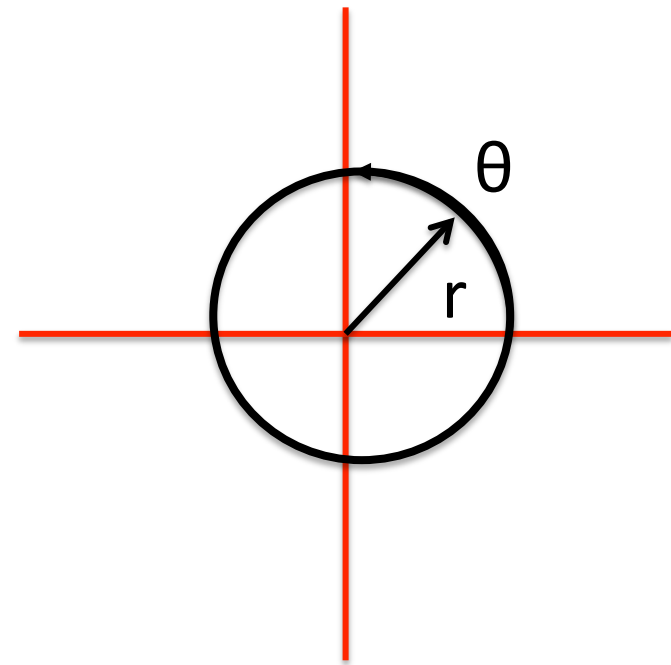
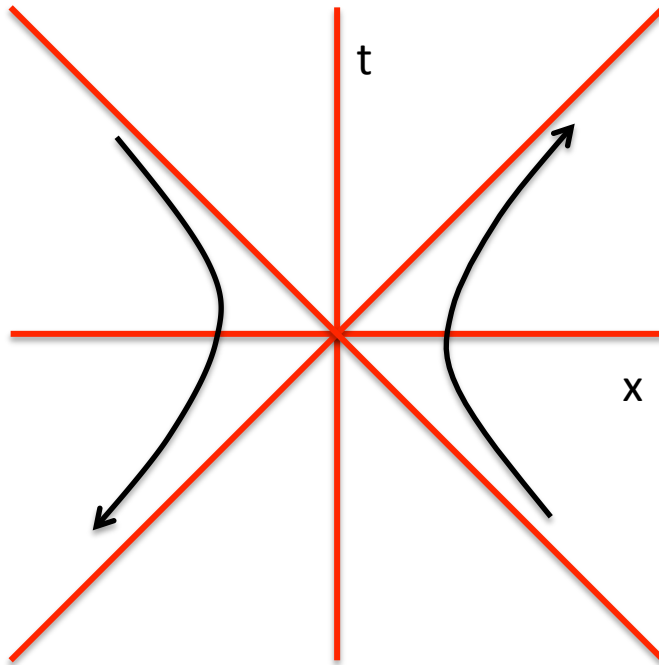


Euclideo

Observador acelerado $\rightarrow$ energía = generador de boosts.

Continuando al espacio Euclideo $\rightarrow$ boost corresponde a una rotación.

¿Por qué una temperatura?



Continuando al espacio Euclideo $\rightarrow$ boost corresponde a una rotación.

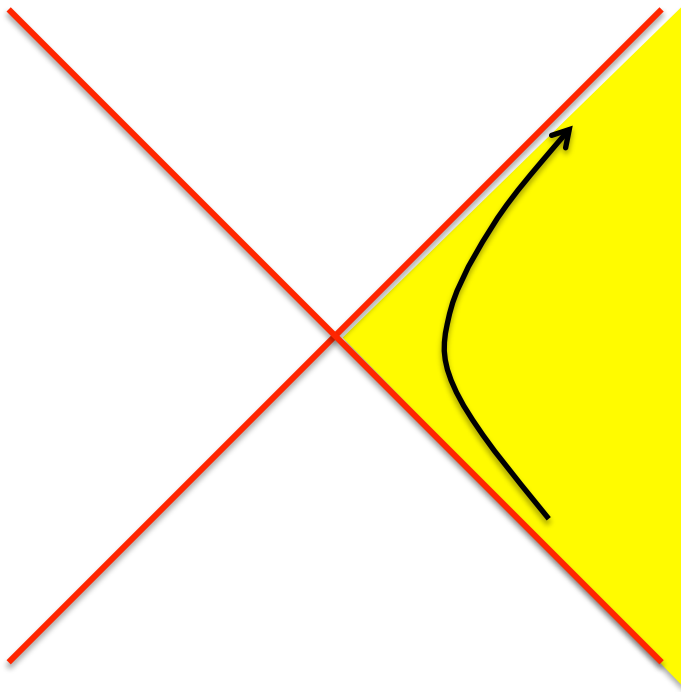
Ángulo periódico $\rightarrow$ temperatura

$$\beta = \frac{1}{T} = 2\pi r = \frac{2\pi}{a}$$

Aceleraciones ordinarias son muy chicas, $g = 9.8 \text{ m/s}^2 \rightarrow \beta = 1 \text{ año luz}$

Bisognano Weichman, Unruh

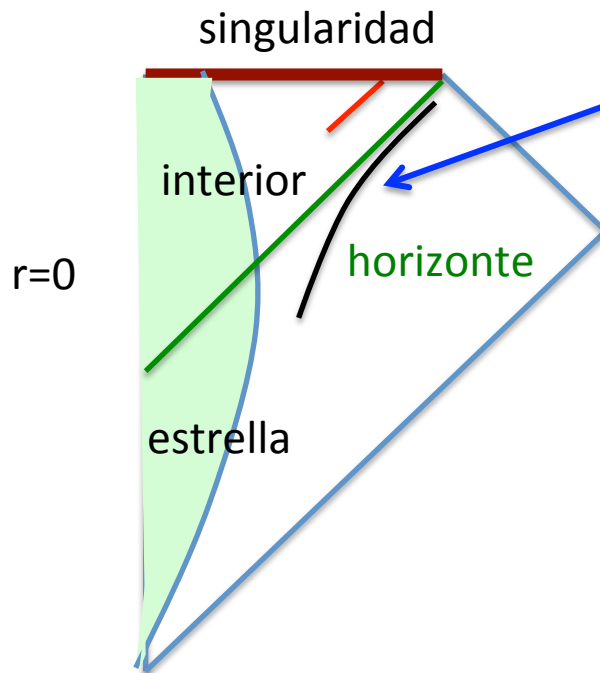
Entrelazamiento y temperatura



Horizonte: el observador acelerado solo tiene acceso al triangulo derecho $\rightarrow$ no ve todo el sistema $\rightarrow$ observa un estado mezclado (y una temperatura finita).

El vacío está muy entrelazado !

Agujero negro



Principio de equivalencia: la región cerca del horizon es como el espacio plano.

Si nos quedamos afuera →
estamos acelerando → temperatura.

Agujero negro producido por el colapso de una estrella.

Teoría efectiva de bajas energías

- La fuerza de la gravedad aumenta a altas energías.

$$g_{\text{eff}}^2 \sim \frac{(\text{energía})^2}{M_{\text{Planck}}^2} = \frac{l_{\text{Planck}}^2}{(\text{distancia})^2}$$

$$l_{\text{Planck}} \sim 10^{-35} m , \quad M_{\text{Planck}} = 10^{16} \text{TeV}$$

- Efectos cuánticos son pequeños a bajas energías.

Limitaciones de esta expansión

- Expansión en potencias de g_{eff}^2 .
- Infinitos $\rightarrow$ contratérminos $\rightarrow$ nuevos parametros
- No es una teoría bien definida.

2) Una teoría de la gravedad con una expansión bien definida

- Gravedad: partícula con $m=0$, spin 2 . $\delta g_{\mu\nu}$
- Agregamos partículas con $m=0$, spin $> 2 \rightarrow$
una ``extraña'' teoría $\Lambda \neq 0$ Vasiliev
- Agregamos partículas con $m > 0$, spin $> 2 \rightarrow ?$
Ejemplo: Teoría de Cuerdas.

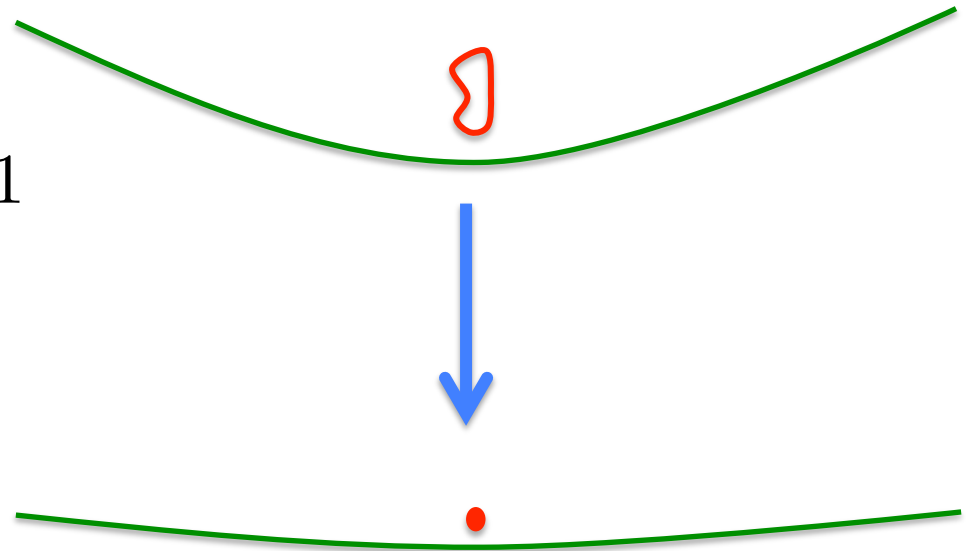
Veneziano,, Green, Schwarz,....

Teoría de Cuerdas

- Partículas libres $\rightarrow$ Cuerdas libres
- Diferentes modos de oscilación dan origen a distintas partículas.
- Modo mas bajo $\rightarrow m=0$, spin =2 $\rightarrow$ gravitón.
- Se reduce a la gravedad de Einstein a bajas energías.

Gravedad desde las cuerdas

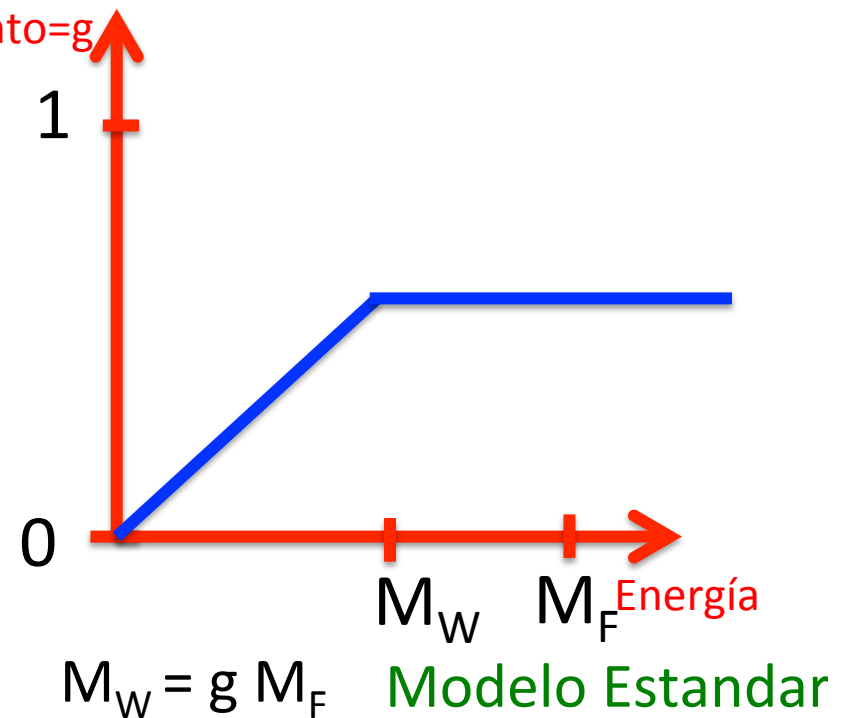
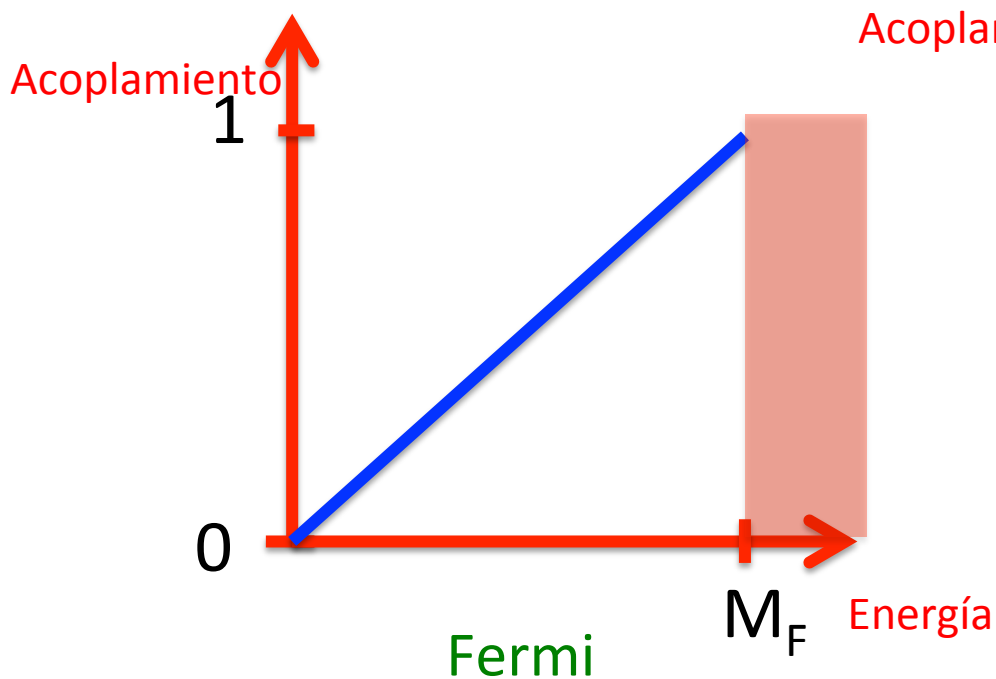
$\frac{\text{Radio de curvatura}}{\text{tamano de la cuerda}} \gg 1$



Se reduce a la gravedad de Einstein

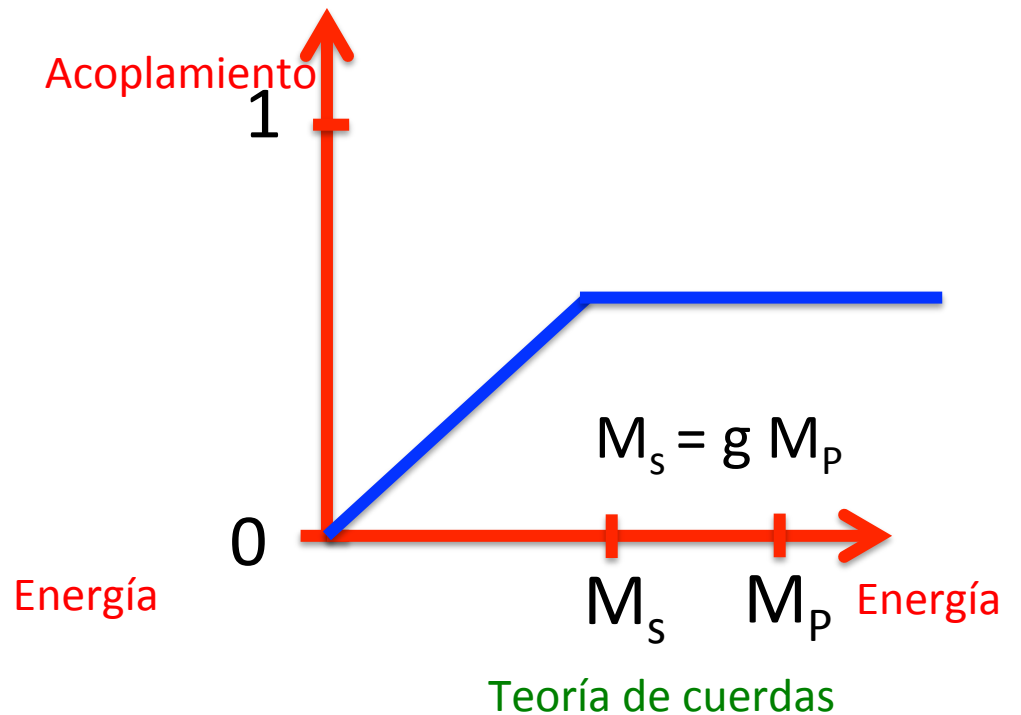
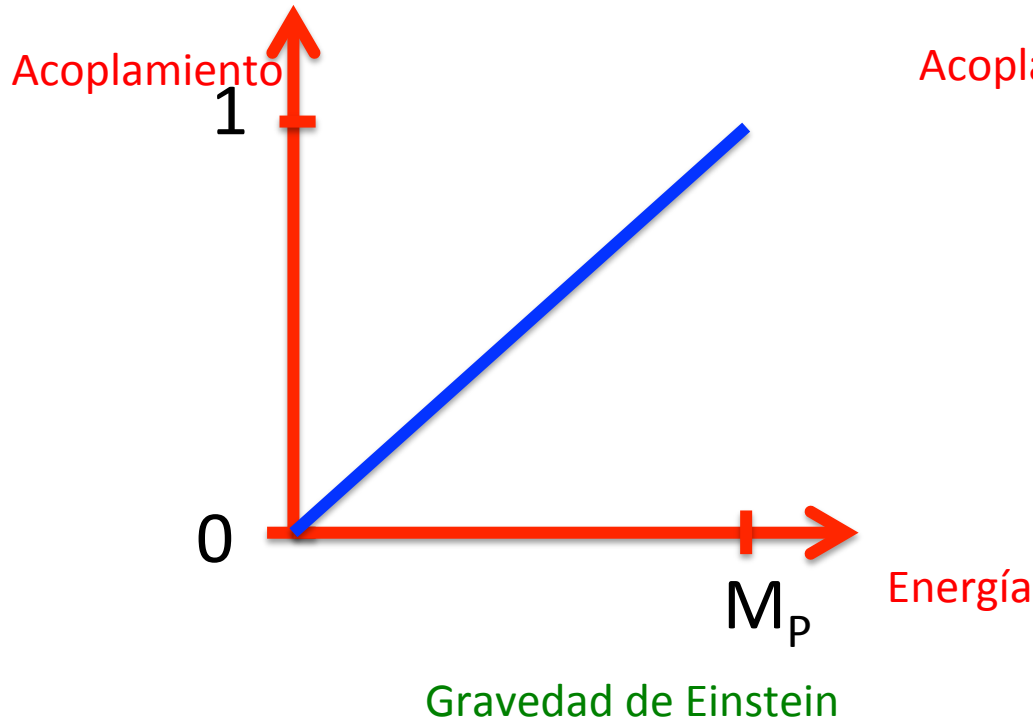
Analogía: Débil vs. gravedad

- Teoría de Fermi de las interacciones débiles
- $G_N \rightarrow G_F = 1/M_F^2$



Débil vs. gravedad

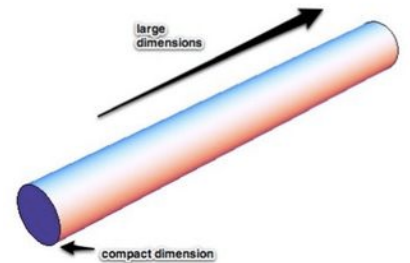
- Similar para cuerdas.



M_S = masa de la partícula más liviana con $\text{spin} > 2$

El atractivo de la teoría de cuerdas

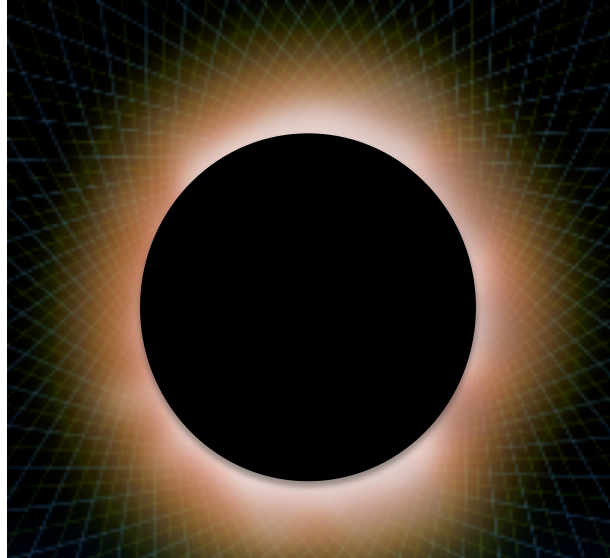
- No hay divergencias ultravioletas. Teoría bien definida.
- Dimensión del espacio (plano) debe ser 10.
- 4 grandes + 6 chicas $\rightarrow$ podría explicar el resto de las fuerzas
- Incorpora interacciones de gauge quirales y la gran unificación.
- Supersimetría and supergravedad (pequeñas dimensiones fermiónicas)



3) Descripción exacta en algunos casos.

¿Por qué nos importa?

- Problemas con agujeros negros
- Big Bang y el multiverso.



Agujeros negros tienen temperatura

Pregunda de Wheeler a Bekenstein

¿Obedecen las leyes de la termodinámica ?

Entropía de los agujeros negros

$$T \sim \frac{\hbar}{r_H}$$

$$r_H \leftrightarrow M$$

Ecuación de Einstein

$$dM = TdS$$

1^{ra} ley

$$S = \frac{(\text{Area})}{4\hbar G_N}$$

Entropía de los agujeros negros.

Bekenstein, Hawking

2^{da} Ley $\rightarrow$ area aumenta por las ecuaciones de Einstein y la condición de positividad (nula) de la energía .

Hawking,....,

Casini, Wall: incluyendo efectos cuánticos y entropía relativa.

Relatividad general y termodinámica

- Agujero negro visto desde afuera= sistema a temperatura finita.
- ¿Hay una descripción exacta donde se preserve la información?
- Sí, pero hay que ir más allá de la teoría perturbativa...

3) Descripción exacta.

Teoría de Cuerdas: más allá de la teoría perturbativa

- Cuerdas $\rightarrow$ originalmente $\rightarrow$ perturbativa
- Solitones interesantes: D-branas.
- D-branas inspiraron ciertas definiciones no perturbativas.

Polchinski

Teoría de matrices: Banks, Fischler, Shenker, Susskind

Dualidad de gauge-gravedad: JM, Gubser, Klebanov, Polyakov, Witten

Dualidad de gauge-gravedad

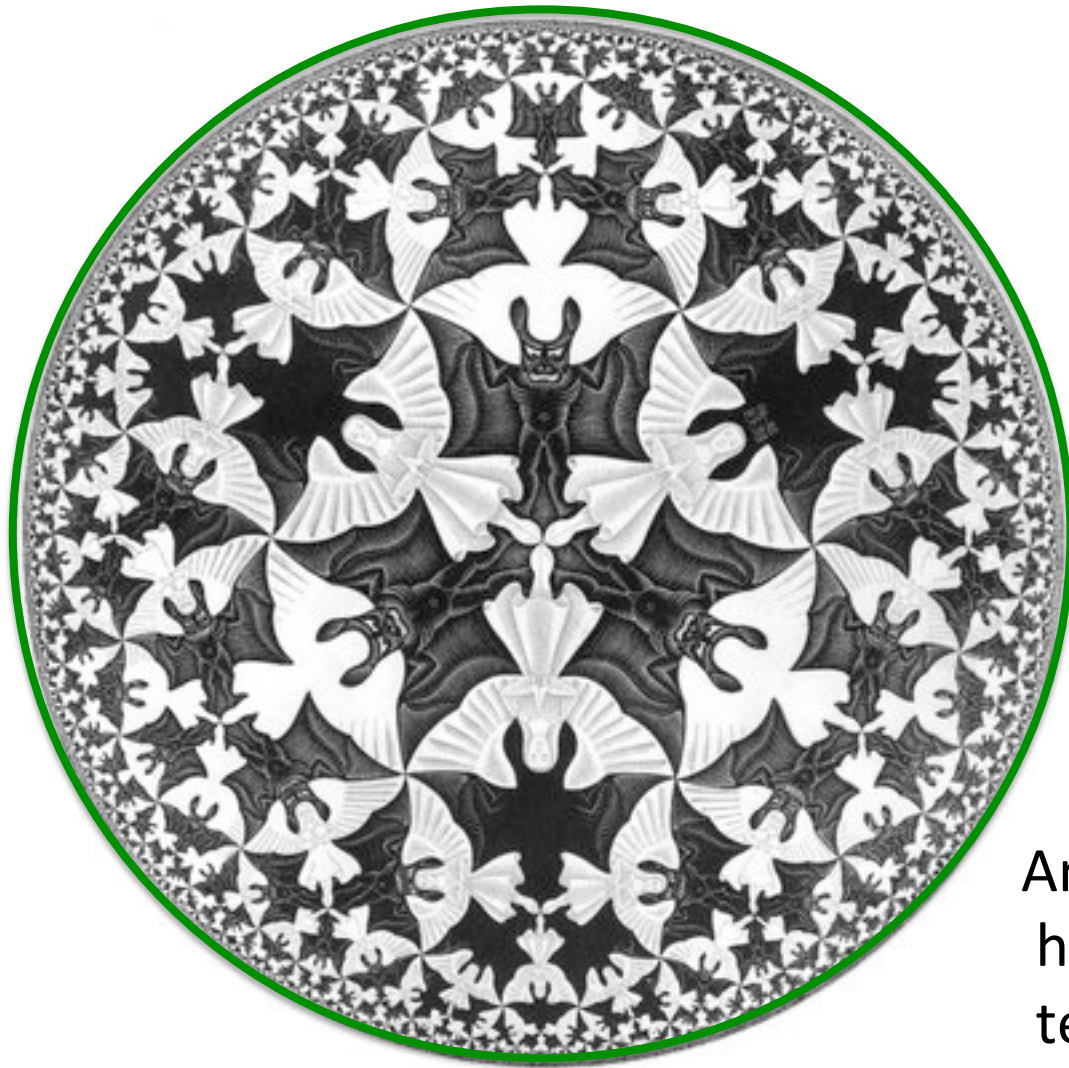
(o dualidad de gauge/cuerdas, AdS/CFT, holografía)

Teorías de partículas
cuánticas
interactuantes



Espacio tiempo
dinámico
(gravedad cuántica,
cuerdas)

Gravedad en anti-de-Sitter



Anti de Sitter = espacio
hiperbólico con una dimensión
temporal

Gravedad en anti-de-Sitter

Dualidad



Gravedad,
cuerdas

partículas cuánticas
interactuantes
Teoría cuántica de campos



Cuerdas de la cromodinámica.

- Cromodinámica $\rightarrow$ SU(N, líneas de Faraday $\rightarrow$ cuerdas dinámicas.

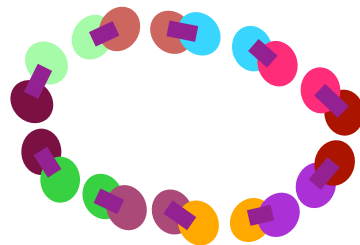
Cuerdas de la cromodinámica

Gluón: color y anti-color

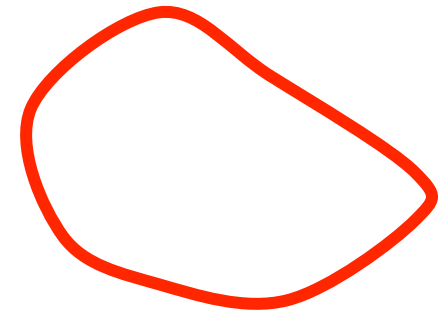


N colores $SU(N)$

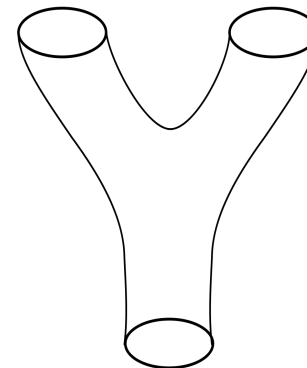
N grande



t' Hooft '74



Acoplamiento $\sim 1/N$



Evidencia experimental

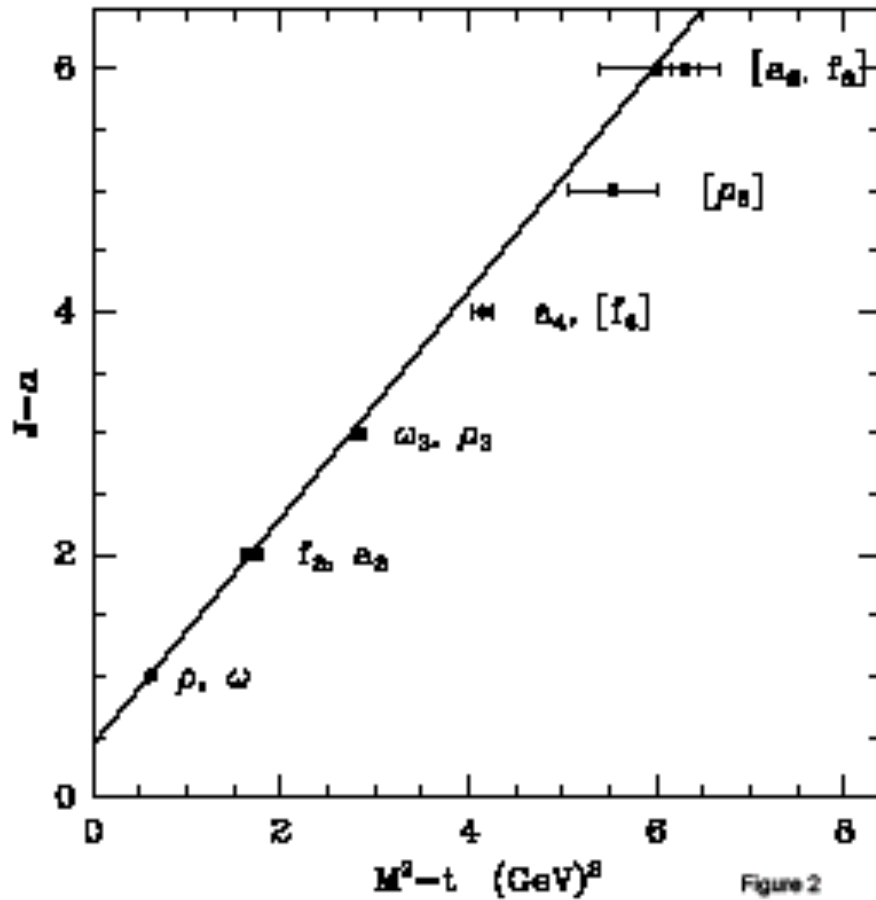


Figure 2

De E. Klempt hep-ex/0101031

Cuerda rotante

$$m^2 \sim TJ_{\max} + \text{const}$$

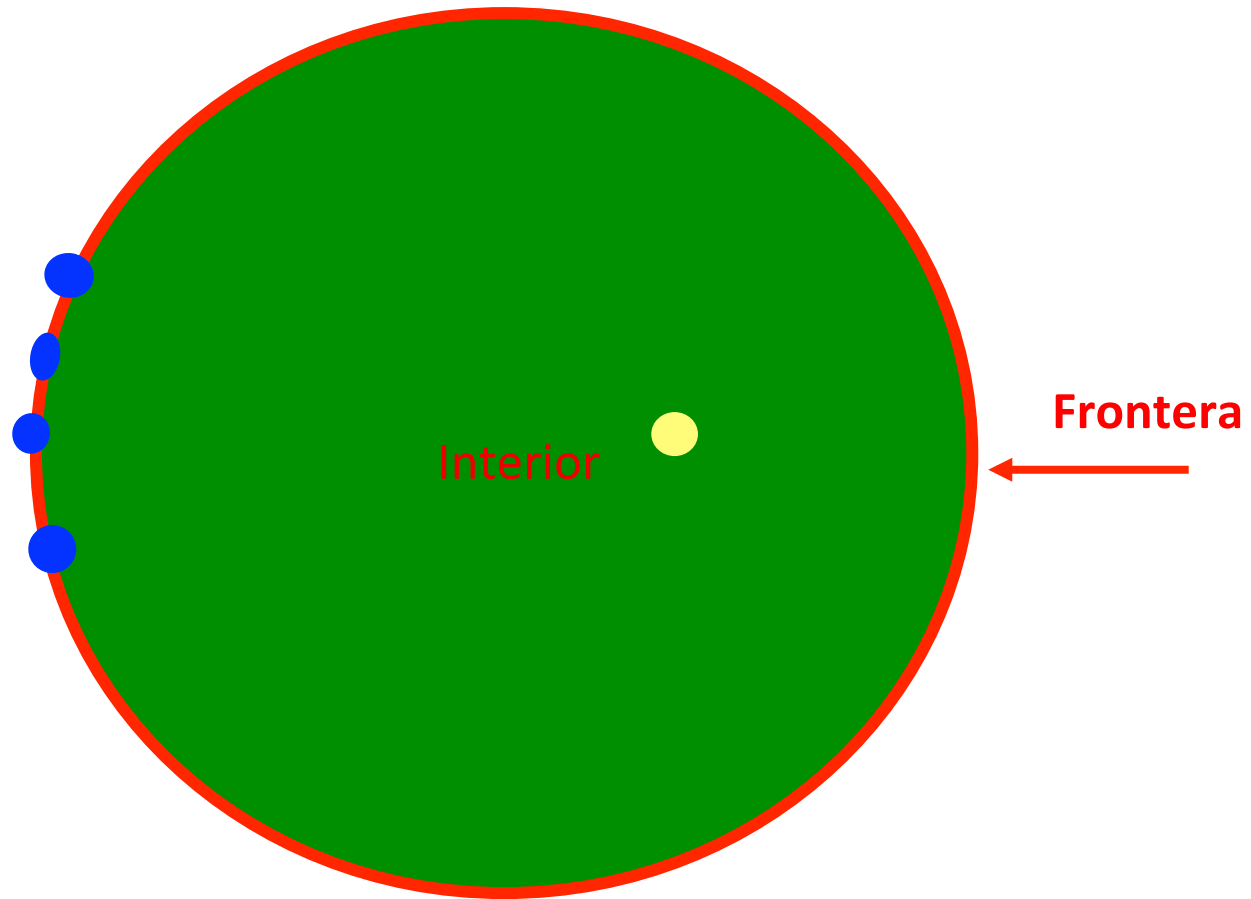
Cuerdas de la cromodinámica son las
cuerdas de la “teoría de cuerdas”.

=

Gravedad cuántica en una dimensión
más.

Cuerdas de la cromodinámica
supersimétrica en 4d son las cuerdas
en 10 dimensiones

Gravedad de Einstein $\rightarrow$ Necesitamos N grande
y acoplamiento grande.



Gravedad de Einstein en el interior $\rightarrow$ Partículas muy fuertemente interactuantes en la frontera.

Agujeros negros = Estados termalizados con energías bastante grandes

- Entropía = Área del horizonte = $\text{Log}[\text{Número de estados en la frontera}]$

Strominger, Vafa,...

- Caer en el agujero negro = termalización en la frontera.
- Unitario visto desde afuera.

Agujeros negro como fuente de información!

- Problems con partículas fuertemente interactuantes → problemas simples en la gravedad.

Plasma de quarks y gluones, superconductores de alta temperatura

- Geometrización de la física!

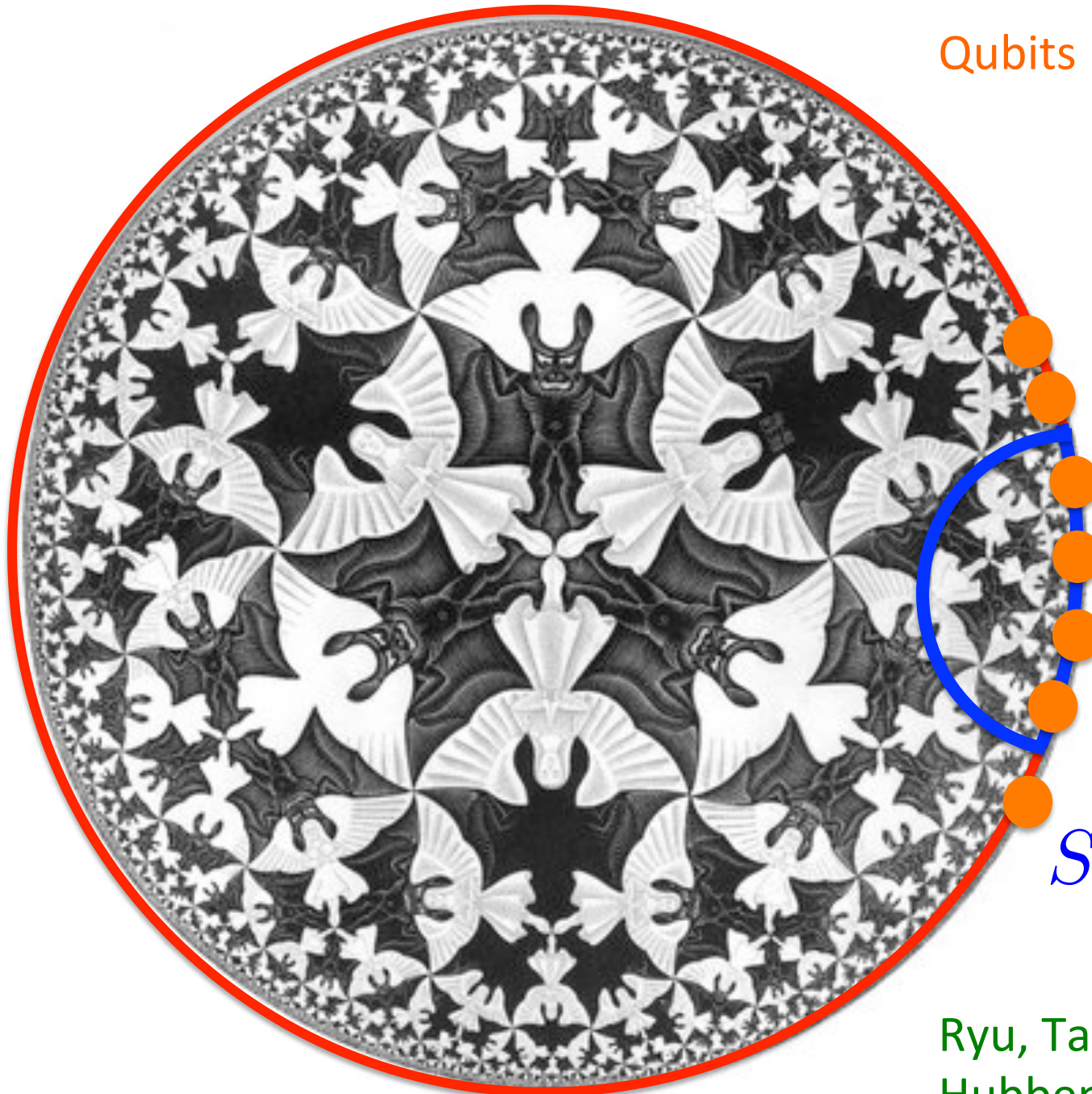
Geometría emergente

- Descripción exacta $\rightarrow$ la frontera.
- Espacio-tiempo en el interior “emerge” cuando N es grande y las interacciones son fuertes.

Entrelazamiento y geometría

It from qubit : colaboración: Casini + JM + others

Qubits muy entrelazados



$$S(R) = \frac{A_{\min}}{4G_N}$$

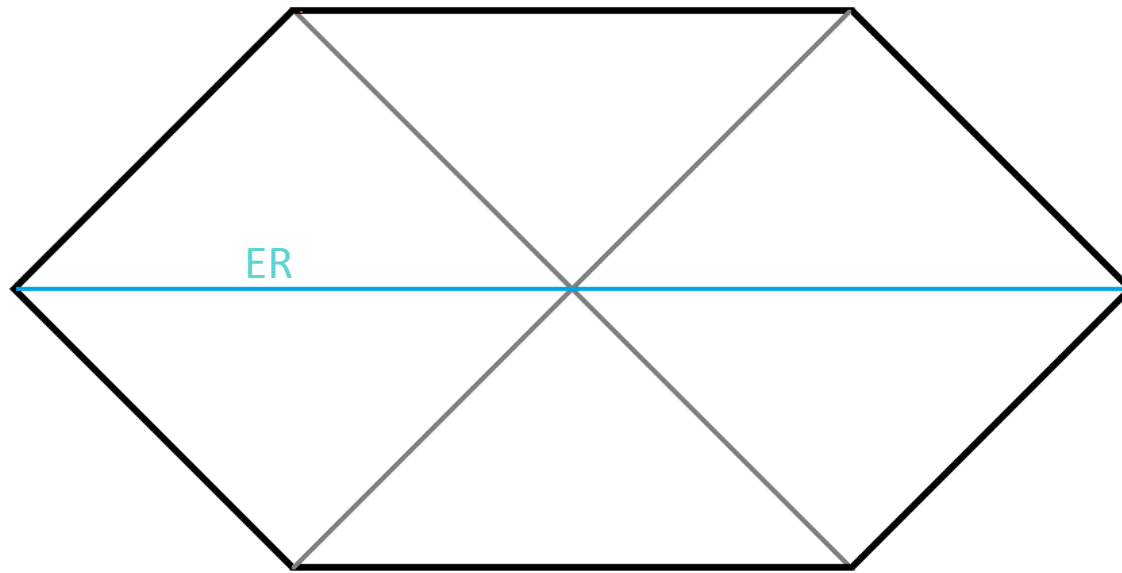
Ryu, Takayanagi,
Hubbeny, Rangamani

Entrelazamiento y geometría

- El patrón de entrelazamiento en la frontera se traduce a aspectos geometricos en el interior.
Van Raamsdonk, Swingle
- Slogan: Entrelazamiento son los hilos que tejen el espacio...



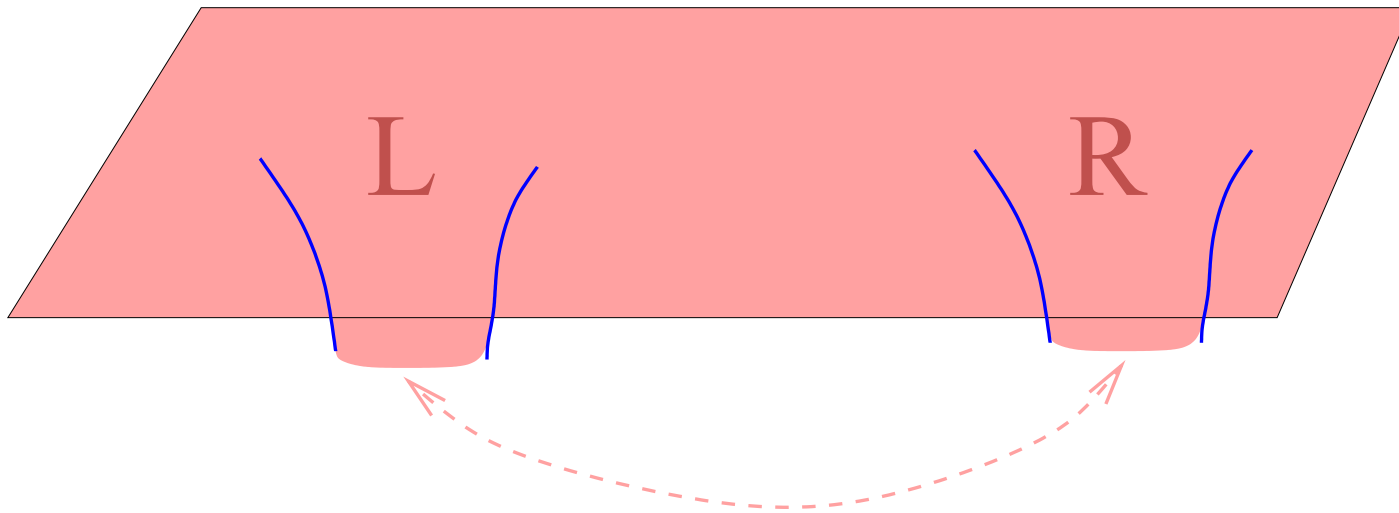
Solución de Schwarzschild completa



Eddington, Lemaitre,
Einstein, Rosen,
Finkelstein
Kruskal

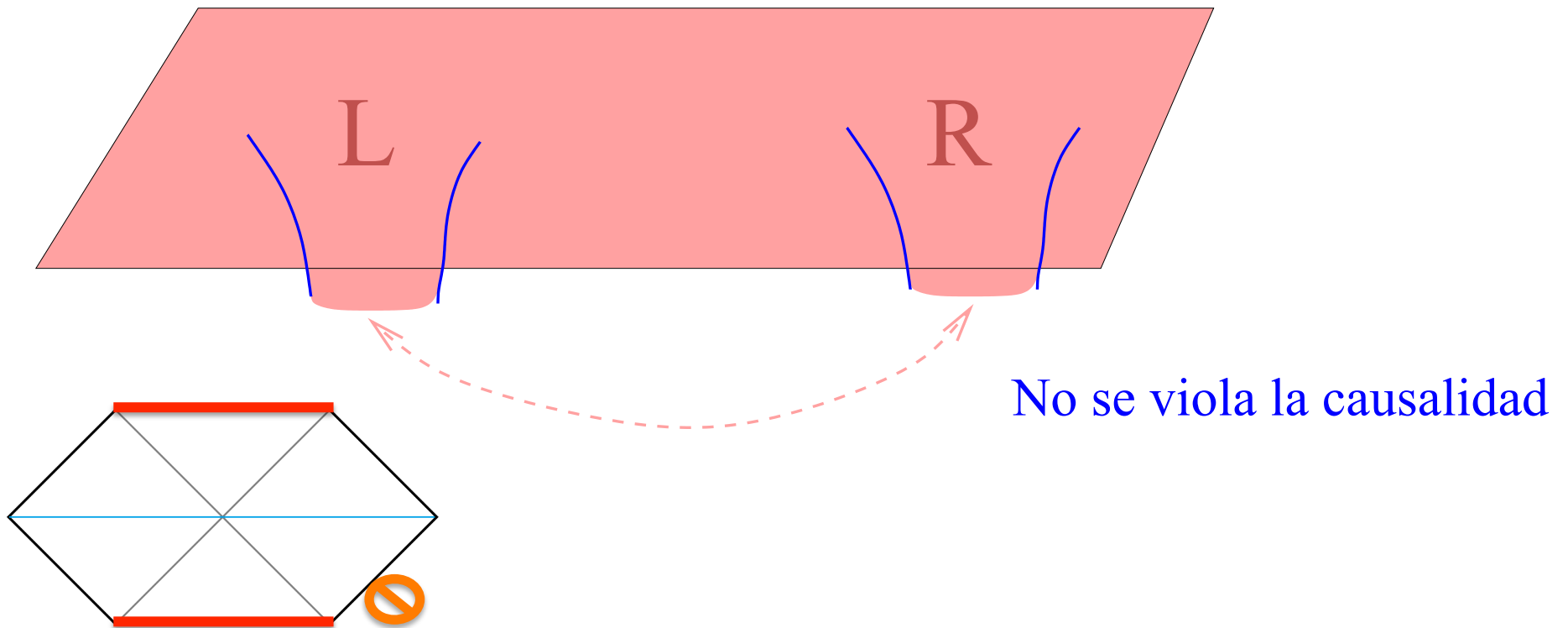
Solución más simple

Agujero de gusano

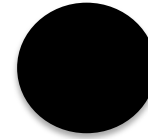
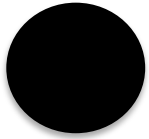


No se producen en nuestro universo...

No hay viajes más rápido que la luz



Fuller, Wheeler, Friedman, Schleich, Witt, Galloway, Wooglar



Teoría exacta: cada agujero se describe completamente mediante un número finito de micro-estados

Agujero de gusano: estado entrelazado

$$|\Psi\rangle = \sum_n e^{-\beta E_n/2} |\bar{E}_n\rangle_L \times |E_n\rangle_R$$

EPR

Israel
JM

Geometría conexa
por entrelazamiento

ER = EPR

Susskind JM
Stanford, Shenker, Roberts, Susskind

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

EPR

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

The Particle Problem in the General Theory of Relativity

A. EINSTEIN AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton*

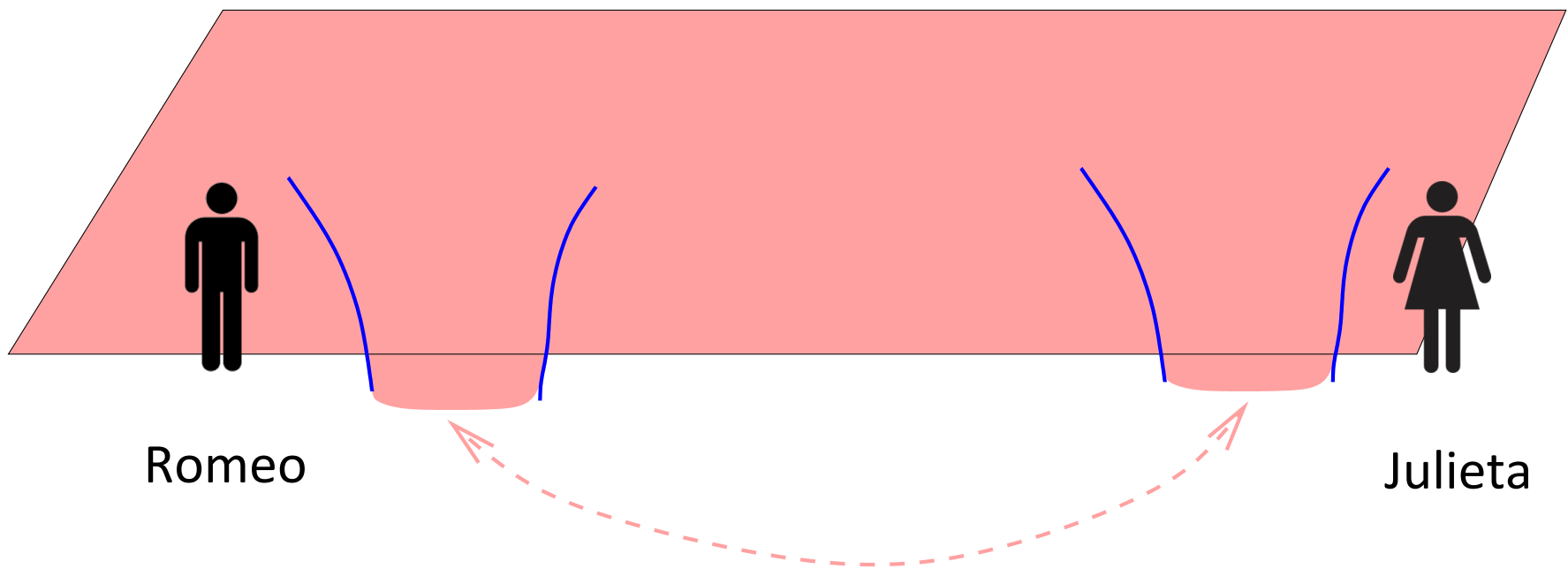
(Received May 8, 1935)

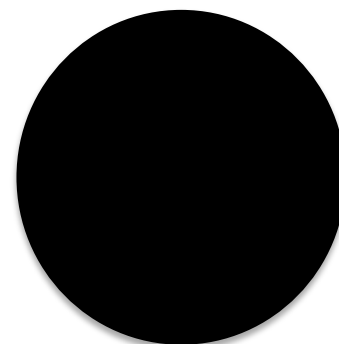
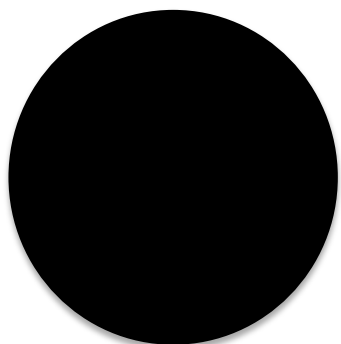
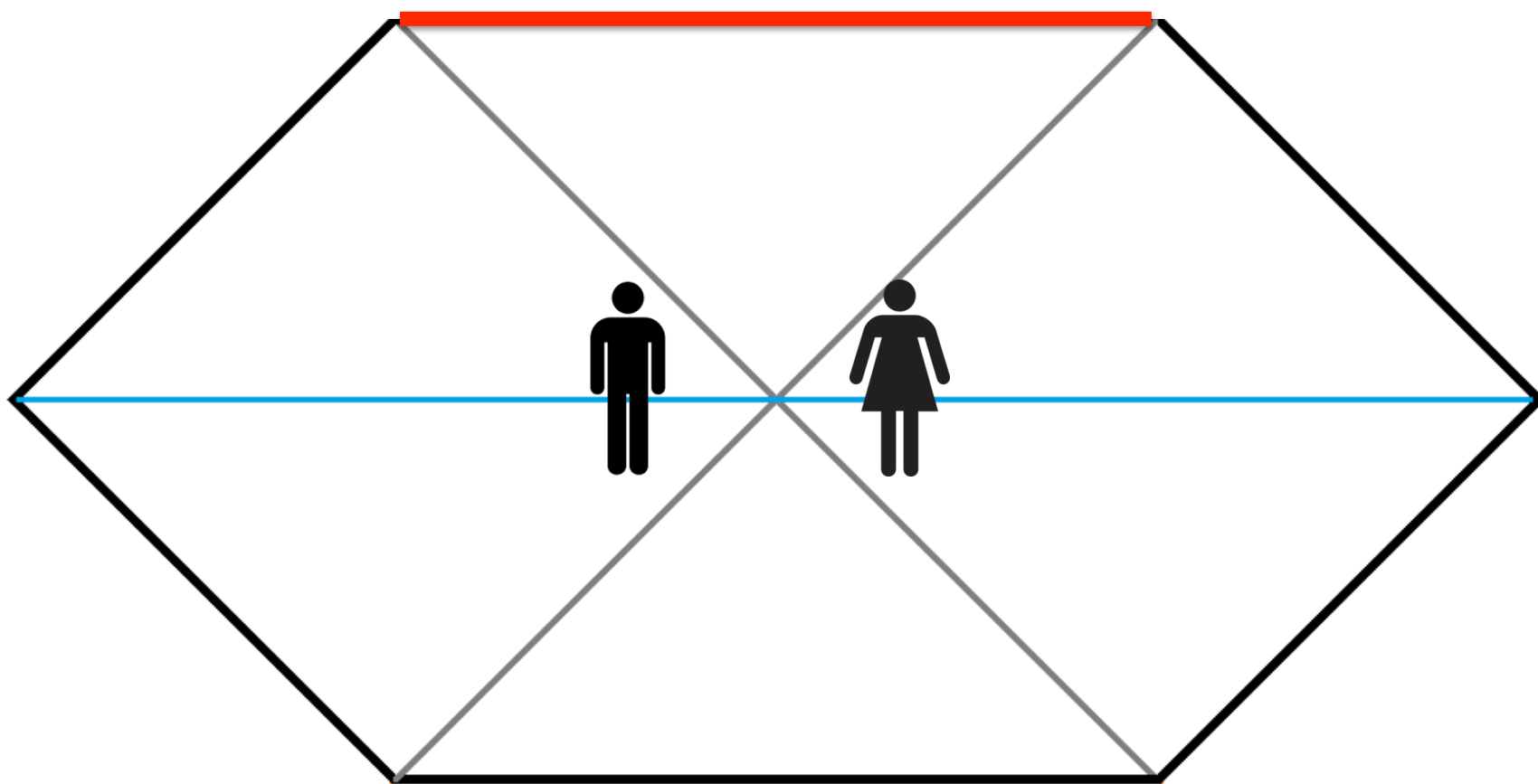
ER

The writers investigate the possibility of an atomistic theory of matter and electricity which, while excluding singularities of the field, makes use of no other variables than the $g_{\mu\nu}$ of the general relativity theory and the φ_μ of the Maxwell theory. By the consideration of a simple example they are led to modify slightly the gravitational equations which then admit regular solutions for the static spherically symmetric case. These solutions involve the mathematical representation of physical space by a space of two identical sheets, a particle being represented by a "bridge" connecting these sheets. One is able to understand why no neutral particles of negative mass are to be

found. The combined system of gravitational and electromagnetic equations are treated similarly and lead to a similar interpretation. The most natural elementary charged particle is found to be one of zero mass. The many-particle system is expected to be represented by a regular solution of the field equations corresponding to a space of two identical sheets joined by many bridges. In this case, because of the absence of singularities, the field equations determine both the field and the motion of the particles. The many-particle problem, which would decide the value of the theory, has not yet been treated.

Un encuentro prohibido





Misterios

- Interior de agujeros negros
- Descripción exacta para espacios sin frontera
- Singularidad del Big bang
- Multiverso.

The Multiverso

- Los efectos de la cuántica pueden ser más importantes a distancias más grandes que el universo observable.



The Multiverso

- La teoría final puede tener muchas soluciones posibles. Ej: cuerdas → muchas soluciones porque hay muchas posibilidades para el espacio de 6 dimensiones.
- Inflación e inflación eterna, pueden “poblar” todas esas soluciones

- Multiverso + restricciones anthropicas podrían explicar el valor de la constante cosmológica.
- No sabemos como calcular... Hay mas propuestas que autores...
- No entendemos bien la teoría aún..

Conclusiones

- Mecánica cuántica en espacios curvos llevó la radiación de Hawking y a las fluctuaciones primordiales en la inflación.
- Estos efectos son cruciales para explicar aspectos de nuestro universo.
- La termodinámica de agujeros negros da origen a problemas interesantes: Entropía, unitariedad, etc.

Conclusiones

- Explorar estos problemas dió origen a una relación entre la gravedad y sistemas con interacciones fuertes.
- Relatividad general aplicada a otras áreas de la física (ej. Materia condensada)
- Conexión entre entrelazamiento y geometría.

Preguntas

- Interior de agujeros negros ?
- Singularidad del Big bang ?
- Probabilidades en el multiverso ?



Extra slides

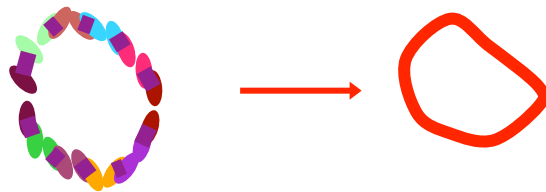
Incorporating Quantum Mechanics

A simple approach

- General relativity $\rightarrow$ is a classical field theory
- We should quantize it
- It is hard to change the shape of spacetime
- For most situations $\rightarrow$ quantum fields in a fixed geometry is a good approximation
- General relativity as an effective field theory
 $\rightarrow$ systematic low energy approximation.

How well established is the gauge/ gravity duality ?

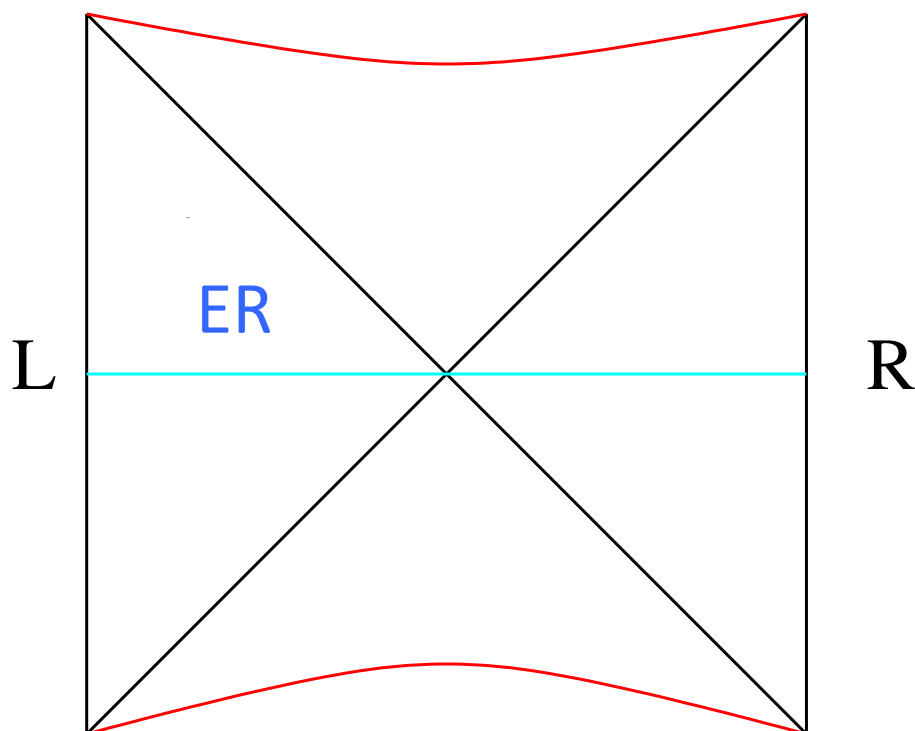
- Lots of evidence in the simplest examples.
- Large N: Techniques of integrability → computations at any value of the effective coupling.



Minahan, Zarembo,
Beisert, Eden, Staudacher
Gromov, Kazakov, Vieira
Arutynov, Frolov
Bombardeli, Fioravanti, Tateo
....

- No explicit change of variables between bulk and boundary theories (as in a Fourier transform).

Two sided AdS black hole



Entangled state in
two non-interacting
CFT's.

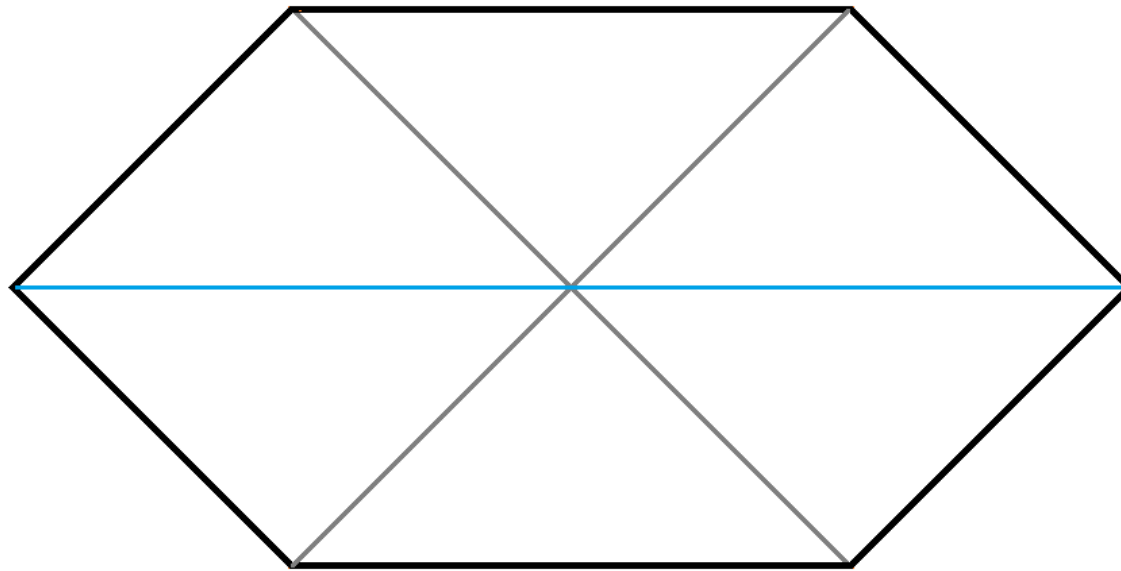
Geometric connection
from entanglement

Israel
JM

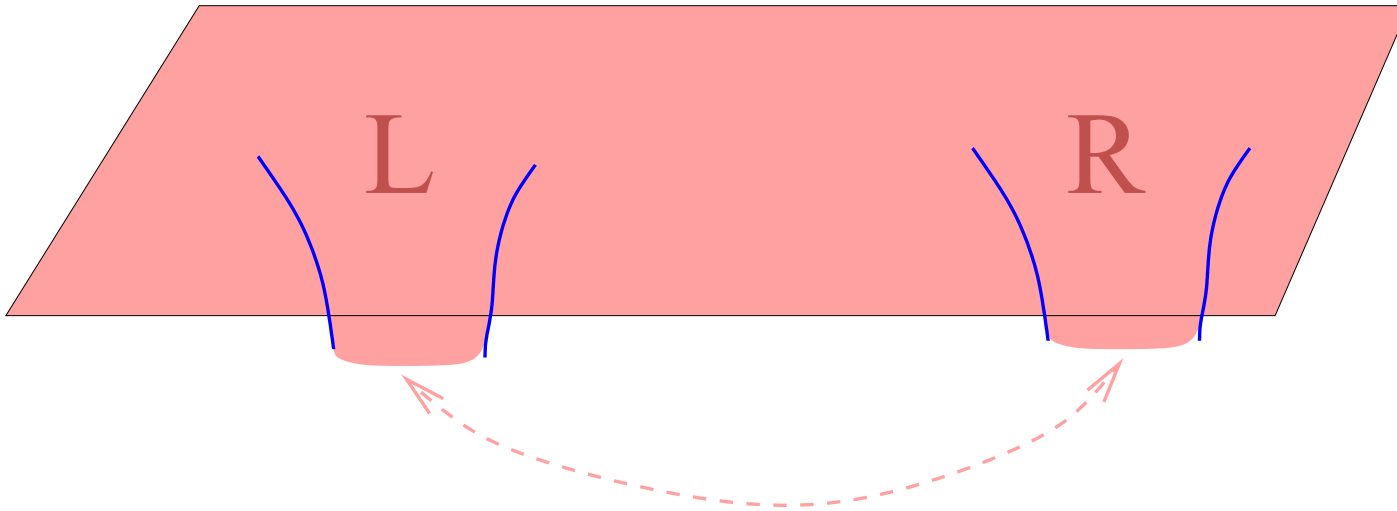
$$|\Psi\rangle = \sum_n e^{-\beta E_n/2} |\bar{E}_n\rangle_L \times |E_n\rangle_R$$

EPR

Back to the two sided Schwarzschild solution

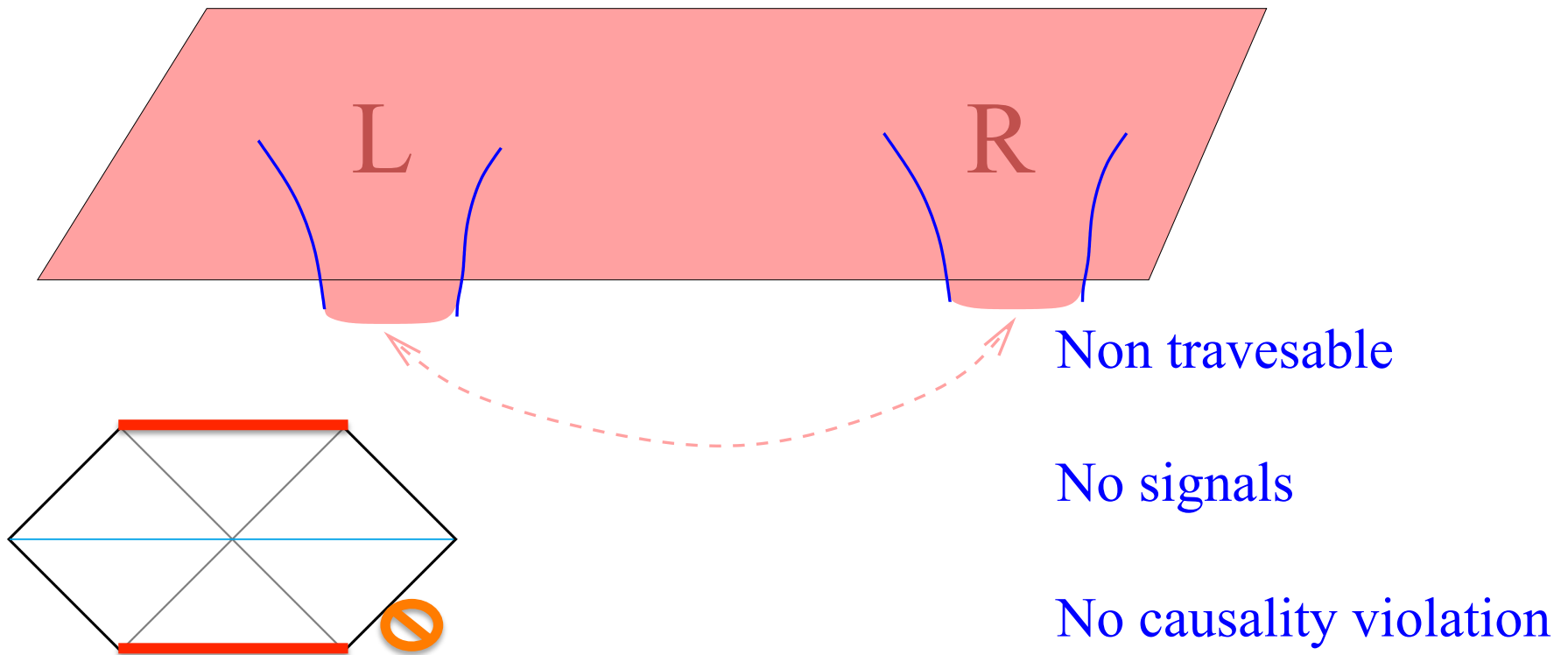


Wormhole interpretation.



Note: If you find two black holes in nature, produced by gravitational collapse, they will not be described by this geometry

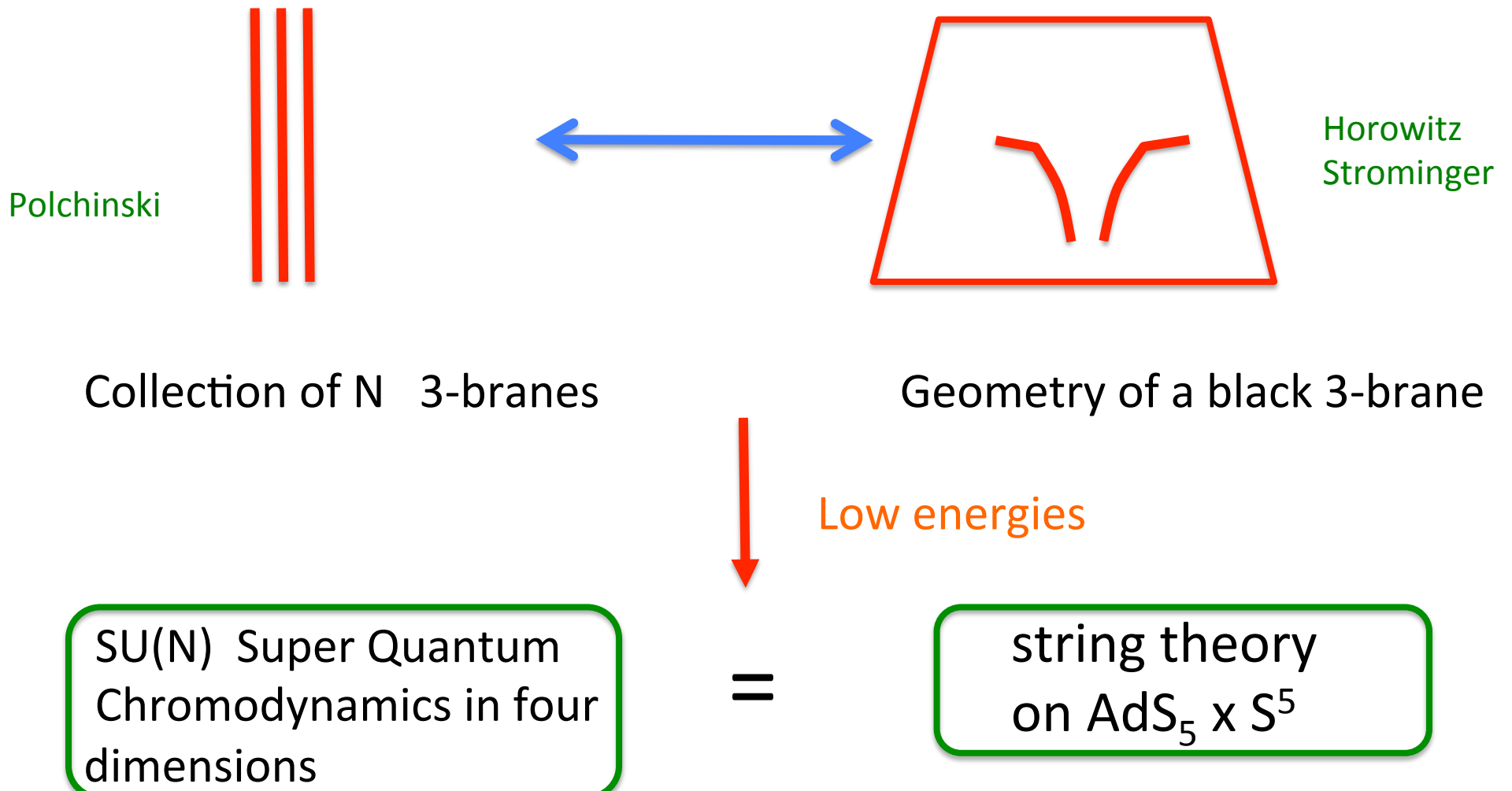
No faster than light travel



Fuller, Wheeler, Friedman, Schleich, Witt, Galloway, Wooglar

Brane argument

JM 1997



$$\text{ER} = \text{EPR}$$

- Wormhole = EPR pair of two black holes in a particular entangled state:
- Large amounts of entanglement can give rise to a geometric connection. J.M., Susskind
- We can complicate the entanglement of the two sided black hole → get longer wormhole

Stanford, Shenker, Roberts, Susskind

Black hole interior

- We do not understand how to describe it in the boundary theory.
- General relativity tells us that we have an interior but it is not clear that the exterior is unitary.

- Some paradoxes arise in some naïve constructions

Hawking,
Mathur, Almheiri, Marolf,
Polchinski, Sully, Stanford

- Actively explored... Under construction...

Error correcting codes

Nonlinear quantum mechanics

Entanglement

Firewalls/Fuzzballs

Non-locality

Final state projection

General relativity and thermodynamics

- Viewing the black hole from outside, this suggests that that general relativity is giving us a thermodynamic (approximate) description of the system if we stay outside.
- Quantum mechanics suggests that there should be an exact description where entropy does not increase. (As viewed from outside). And where Hawking radiation is not mixed.
- 2nd law already suggests that information is not lost (if information were lost, why should the 2nd law be valid ?).

Unitarity from outside ?

- Identify the degrees of freedom that give rise to black hole entropy.
 - Black hole entropy depends only on gravity → fundamental degrees of freedom of quantum gravity.
 - Should reveal the quantum structure of spacetime.
 - Understand their dynamics.
-
- This seems to requires going beyond perturbation theory.

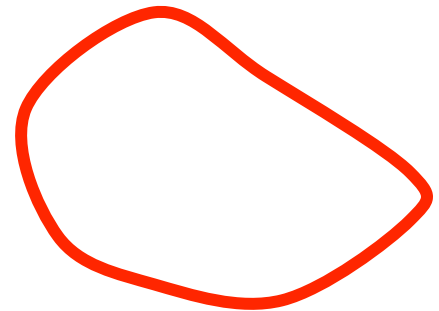
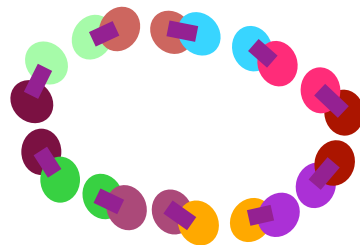
Strings from gauge theories

Gluon: color and anti-color 

Take N colors instead of 3, $SU(N)$

t' Hooft '74

Large N limit



$g^2 N$ = effective interaction strength.

Keep it fixed when $N \rightarrow \text{infinity}$

Closed strings $\rightarrow$ glueballs

String coupling $\sim 1/N$

Unitarity from the outside

- We can form a black hole and predict what comes out by using the boundary theory.
- If you assume the duality $\rightarrow$ unitary evolution for the outside observer, no information loss.