

La Correspondencia Holográfica

A black hole with a glowing blue ring and a bright blue beam of light. The background is a dark, swirling vortex of blue and purple, representing the event horizon and the accretion disk. A bright blue beam of light is shown entering the black hole from the top left.

Alberto Güijosa

Depto. de Física de Altas Energías
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
alberto@nucleares.unam.mx

Tema: la **CORRESPONDENCIA HOLOGRÁFICA**,
también llamada
dualidad o correspondencia

AdS/CFT,
norma-gravedad,
norma-cuerdas,
bulto-frontera
o de Maldacena

DUALIDAD = equivalencia entre 2 teorías
aparentemente distintas

Conocemos ejemplos donde

Teoría de **campos** A = Teoría de **campos** B

Teoría de **cuerdas** C = Teoría de **cuerdas** D

En la correspondencia holográfica,

Teoría de **campos** X = Teoría de **cuerdas** Y

(sin gravedad)

(con gravedad)

¿Por qué nos importa?

- Nuevo paradigma teórico: ¡**equivalencia** entre sistemas CON y SIN gravedad!
¡borra la frontera entre **campos y cuerdas**!
- Permite desarrollar intuición sobre algunas **teorías de campo fuertemente acopladas** remotamente similares a QCD, sistemas de materia condensada, o posibles modelos de física más allá del Modelo Estándar o de cosmología
- Ofrece una perspectiva novedosa sobre algunos problemas difíciles en **gravedad cuántica**
- Propicia acercamiento entre distintas comunidades de físicos

Aclaraciones

- ¡¡ NO afirmamos haber resuelto QCD, ni solucionado por completo el problema de la gravedad cuántica, ni cosa similar!! Las teorías bajo control actualmente son interesantes, pero representan apenas **modelos de juguete** del mundo real
- Esta **aplicación** de la teoría de cuerdas es ortogonal a la búsqueda de una teoría UNIFICADA (p.ej. Saúl Ramos en IF-UNAM): **NO buscamos al Modelo Estándar aquí**
Pero, lo que veremos sí ES **la teoría de cuerdas, mostrando ser útil**

Esta es un área muuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuuy extensa:
el artículo original de Maldacena, hep-th/9711200,
¡¡ha recibido más de 13,700 citas!!

En estas 6 horas, intentaré dar una breve
introducción, resaltando algunas de las ideas
principales

Pueden encontrar más detalle en mi

artículo de revisión arXiv: 1611.07472

y en los **apuntes de mi curso de posgrado**

www.nucleares.unam.mx/~alberto

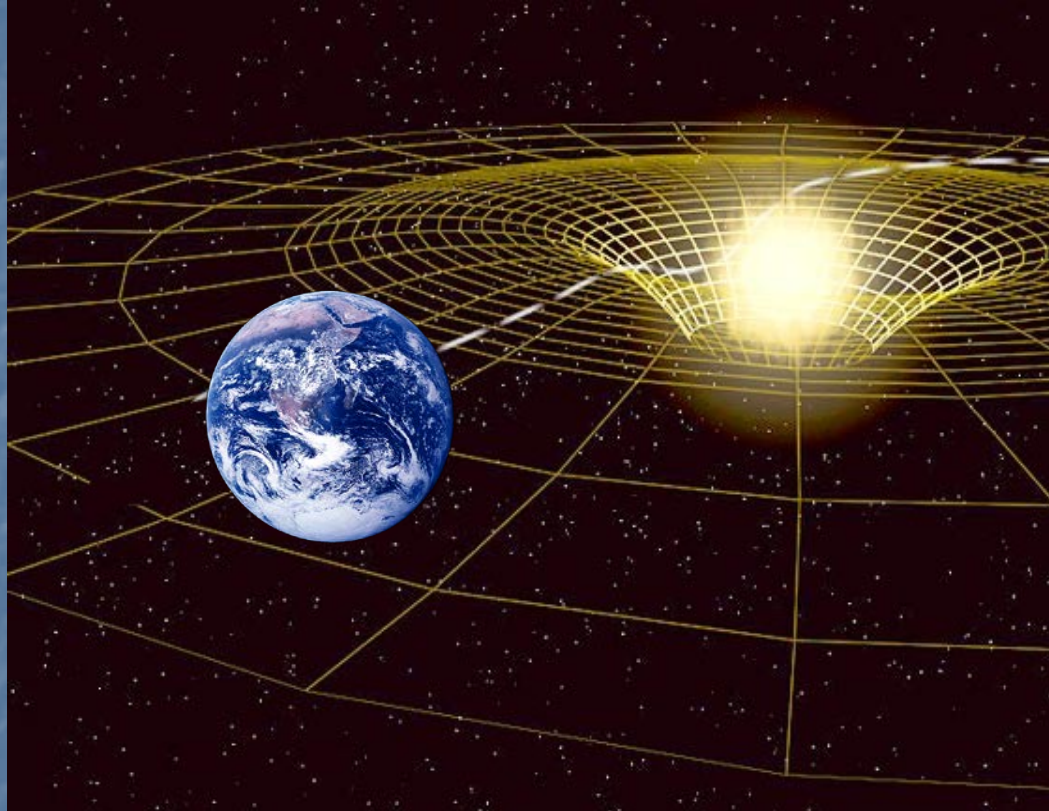
[/apuntes/indice.html#holografia](http://apuntes/indice.html#holografia)

2 pilares de la física moderna:

RELATIVIDAD GENERAL

y **TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS**

Relatividad General

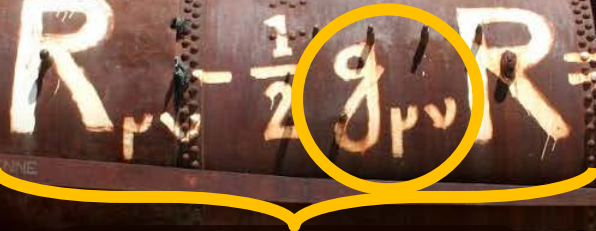


A nivel **macroscópico**, la **GRAVEDAD** se produce porque **el espacio y el tiempo se pueden distorsionar**

[Einstein]

Relatividad General

Métrica



Distorsión del
espaciotiempo

Densidad y flujo de
energía y momento

Describe exitosamente al Sistema Solar, galaxias,
cúmulos, supercúmulos y evolución del Universo

Relatividad General

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

Distorsión del
espaciotiempo

Densidad y flujo de
energía y momento
(incluye cte. cosmológica)

Se puede resumir en un principio variacional:

$$I_g = \frac{1}{16\pi G_N} \int d^D x \sqrt{g} R \quad \text{Acción de Einstein-Hilbert } (+I_{\text{materia}})$$

El espaciotiempo es un medio altamente **NO LINEAL**,
aunque es relativamente **difícil de distorsionar**:

la **longitud de Planck** $\ell_P \approx (G_N)^{1/(D-2)}$ es muy pequeña

Relatividad General

Para examinar **pequeñas fluctuaciones** de la métrica en torno a **un valor dado** (p.ej. Minkowski), descomponemos

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \sqrt{G_N} h_{\mu\nu}$$

Podemos entonces desarrollar la acción en potencias de la fluctuación $h_{\mu\nu}$, obteniendo (esquemáticamente):

$$I_g = \int d^D x \left[\underbrace{\partial h \partial h}_{\text{Gravedad linealizada}} + \underbrace{\sqrt{G_N} h \partial h \partial h + \left(\sqrt{G_N}\right)^2 h^2 \partial h \partial h + \dots}_{\text{Interacciones del espaciotiempo consigo mismo}} \right]$$

Gravedad
linealizada

Interacciones del
espaciotiempo consigo mismo

$$\square h_{\mu\nu} = 16\pi \sqrt{G_N} T_{\mu\nu}$$

Relatividad General

Para examinar **pequeñas fluctuaciones** de la métrica en torno a **un valor dado** (p.ej. Minkowski), descomponemos

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \sqrt{G_N} h_{\mu\nu}$$

Podemos entonces desarrollar la acción en potencias de la fluctuación $h_{\mu\nu}$, obteniendo (esquemáticamente):

$$I_g = \int d^D x \left[\partial h \partial h + \underbrace{\sqrt{G_N} h \partial h \partial h + \left(\sqrt{G_N}\right)^2 h^2 \partial h \partial h + \dots}_{\text{...}} \right]$$

Los detalles serían distintos en una **teoría de gravedad más general**

$$S_g = \frac{1}{16\pi G_N} \int d^D x \sqrt{g} (R + \alpha R^2 + \dots)$$



A nivel microscópico, **GRAVEDAD CUÁNTICA**
~ ¿De qué están hechos el espacio y el tiempo?

Responder esto es indispensable para
entender situaciones extremas, como los
HOYOS NEGROS o el **BIG BANG**

Hoyos Negros

Un **HOYO NEGRO**
es una región donde el
espaciotiempo se ha
distorsionado tanto que
CLÁSICAMENTE nada
(ni siquiera la luz)
puede escapar
[Schwarzschild]



Hoyos Negros

Un **HOYO NEGRO**

es una región de donde
CLÁSICAMENTE nada
puede escapar

Al empezar a tomar en cuenta
efectos CUÁNTICOS, tiene
una **temperatura**

$$T_H = \frac{\text{Gravedad superficial}}{2\pi} \quad [\text{Hawking}]$$

por lo que emite **radiación**,

y tiene una **entropía** (número de configuraciones internas)

$$S_{\text{BH}} = \frac{\text{Area del horizonte}}{4G_N} \quad [\text{Bekenstein, Hawking}]$$



Hoyos Negros

Un **HOYO NEGRO**

es una región de donde
CLÁSICAMENTE nada
puede escapar

Al empezar a tomar en cuenta
efectos CUÁNTICOS, tiene
una **temperatura**
y una **entropía**

Para poder entender estas
propiedades, y tener claro
lo que hay en su interior
(¡o incluso si tiene un interior!),
necesitamos una **TEORÍA DE GRAVEDAD CUÁNTICA**

[Hawking; Susskind, Thorlacius, Uglum; Stephens, 't Hooft, Whiting;
Mathur; Almheiri, Marolf, Polchinski, Sully]



Ahora CAMBIEMOS DE TEMA por un rato,
para hablar de **teorías SIN gravedad...**

Sabemos que **TODO LO QUE VEMOS A NUESTRO ALREDEDOR** está formado por un pequeño número de partículas:

- **12 PARTÍCULAS DE MATERIA**
electrón, quarks, etc.
- **4 PARTÍCULAS MENSAJERAS DE FUERZAS**
fotón, gluón, W, Z
- **1 CAMPO DE HIGGS** que explica el origen de las masas (asociado a la recién descubierta **partícula de Higgs**)

Estos ingredientes se describen
con el **Modelo Estándar**:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

NO incluye
a la
GRAVEDAD

El Modelo Estándar es
una **Teoría de Campos**

Teoría Cuántica de Campos (QFT)

Partículas= excitaciones pequeñas de un **campo cuántico**
(~onditas sobre una 'gelatina' 'indecisa')



¡Nuestro universo está hecho de campos!

Para una teoría interactuante, pero débilmente acoplada,

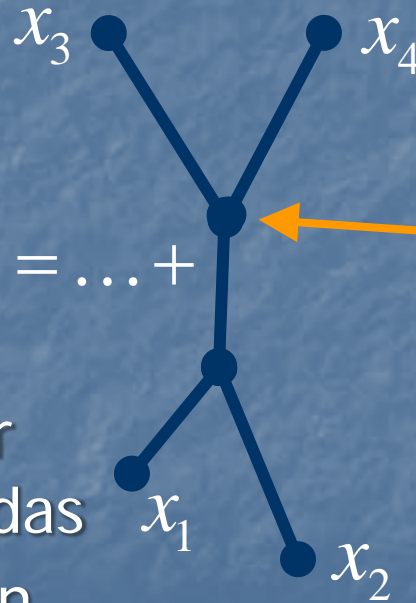
$$I = \int d^D x \left(-\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{1}{2}m^2\phi^2 - \frac{1}{3!}g\phi^3 \right)$$

con $g \ll 1$, la **expansión perturbativa** nos da receta sistemática para calcular **funciones de correlación** (= **correladores**):

$$\langle 0 | T \phi(x_1) \phi(x_2) \phi(x_3) \phi(x_4) | 0 \rangle = \dots +$$

~amplitud de empezar/terminar con partículas en posiciones dadas

Contienen TODA la información física sobre la teoría



Amplitud de probabilidad g "constante de acoplamiento" controla la intensidad de las interacciones

¿Acoplamiento Fuerte?

Isla de la
expansión
Perturbativa

$$g \ll 1$$

$$g \gg 1$$

Nos enfrentamos a acoplamiento fuerte: en QCD, en modelos más allá del Modelo Estándar, en superconductores y otros materiales

hic sunt dracones

Para una teoría interactuante, pero débilmente acoplada,

$$I = \int d^D x \left(-\frac{1}{2}(\partial\varphi)^2 - \frac{1}{2}m^2\varphi^2 - \frac{1}{3!}g\varphi^3 \right)$$

Las "constantes" de acoplamiento (que controlan intensidad de las interacciones)

NO son en realidad constantes

(Los números en la acción sí lo son; pero los números que verdaderamente controlan la expansión perturbativa dependen de la energía)

Para una teoría interactuante, pero débilmente acoplada,

$$I = \int d^D x \left(-\frac{1}{2}(\partial\varphi)^2 - \frac{1}{2}m^2\varphi^2 - \frac{1}{3!}g\varphi^3 \right)$$

Las "constantes" de acoplamiento (que controlan intensidad de las interacciones)

NO son en realidad constantes

Por efectos cuánticos (lazos)

dependen de la ESCALA ENERGÉTICA

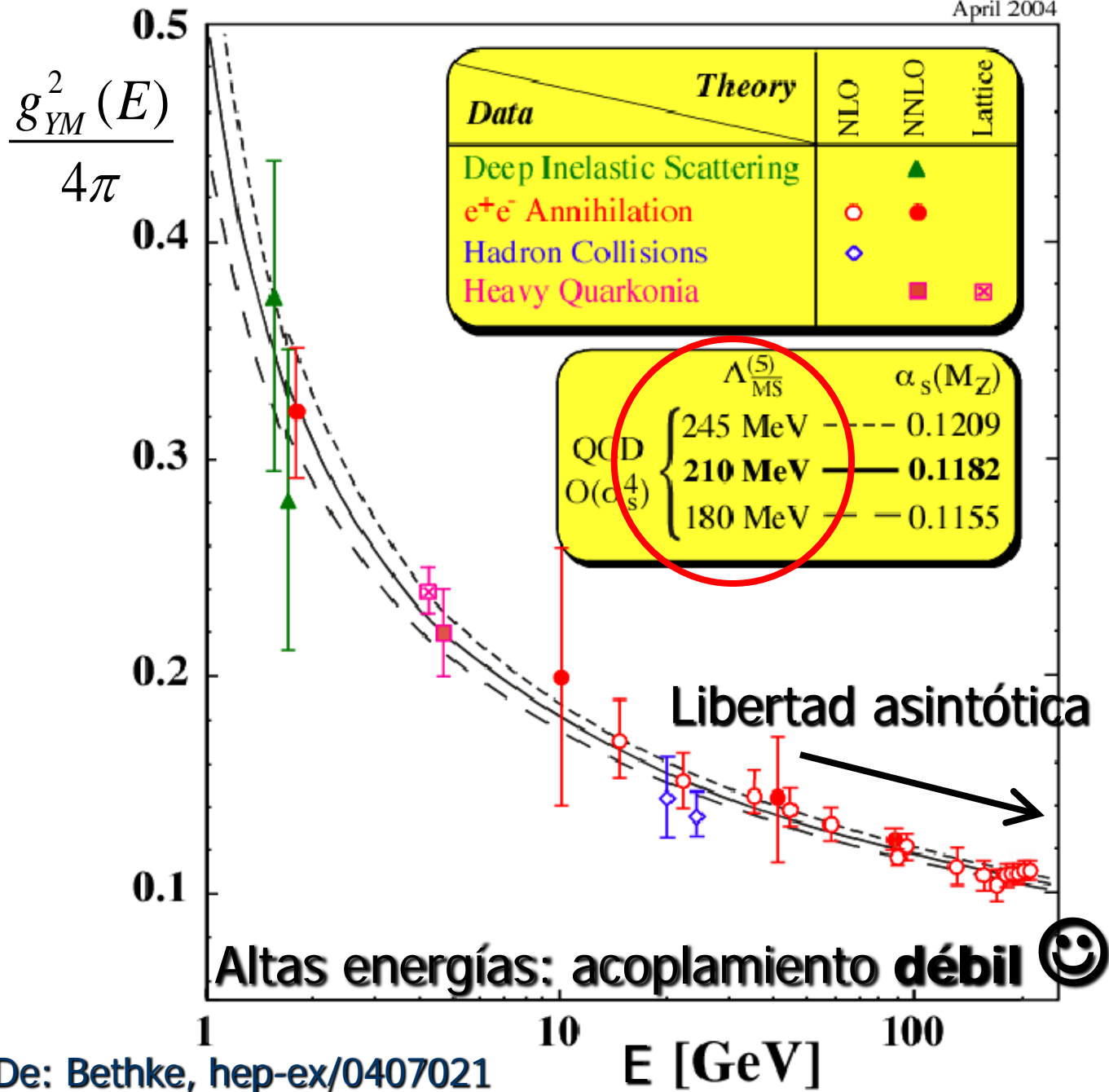
(y por tanto, de la escala de distancia)

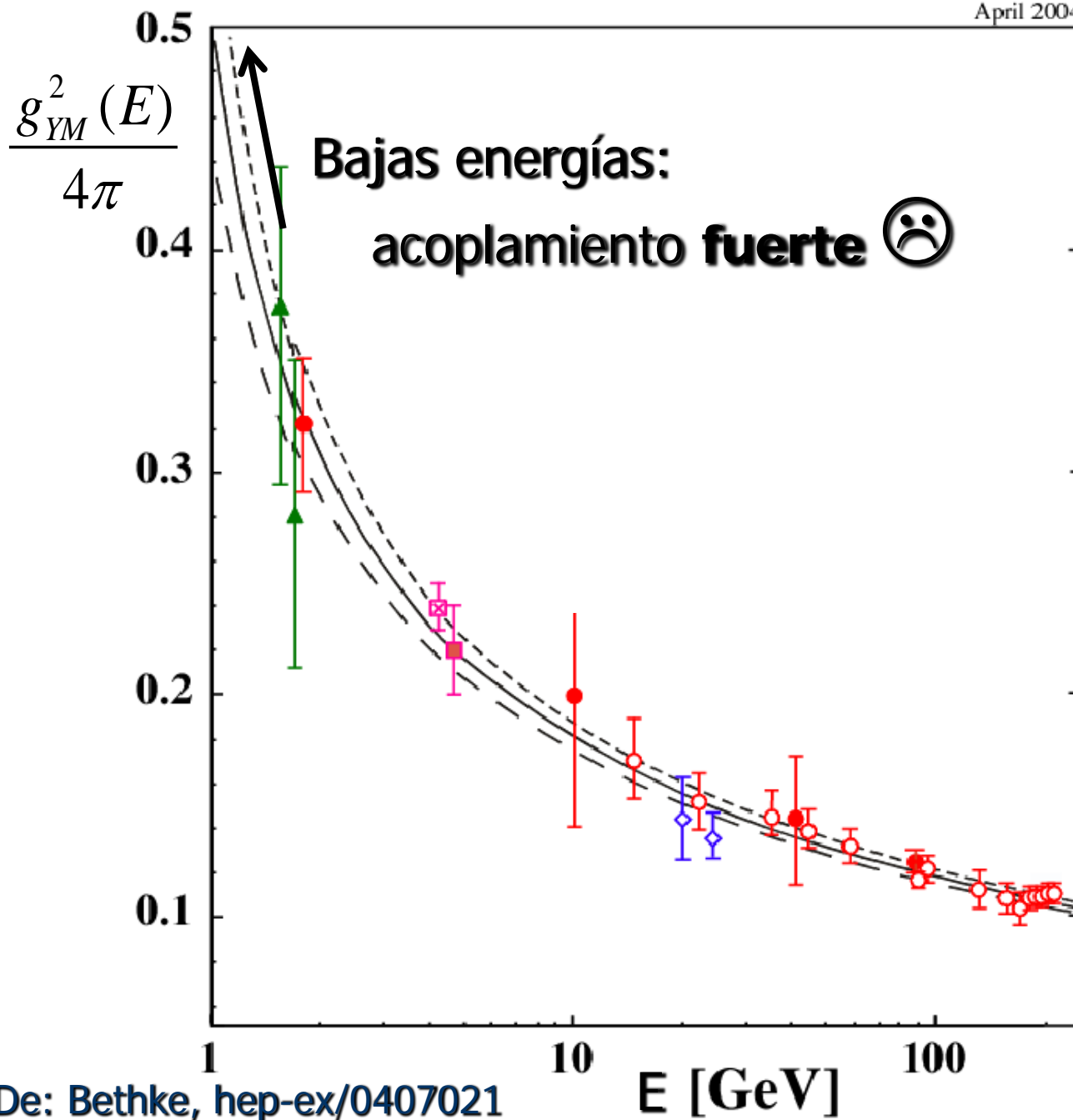
a la cual examinemos la teoría

P.ej. en la Cromodinámica Cuántica (QCD),

$$\frac{g_{YM}^2(E)}{4\pi} \approx \frac{6\pi}{(11N_c - 2N_s) \log(E / \Lambda_{QCD})}$$

[Gross, Wilczek; Politzer]

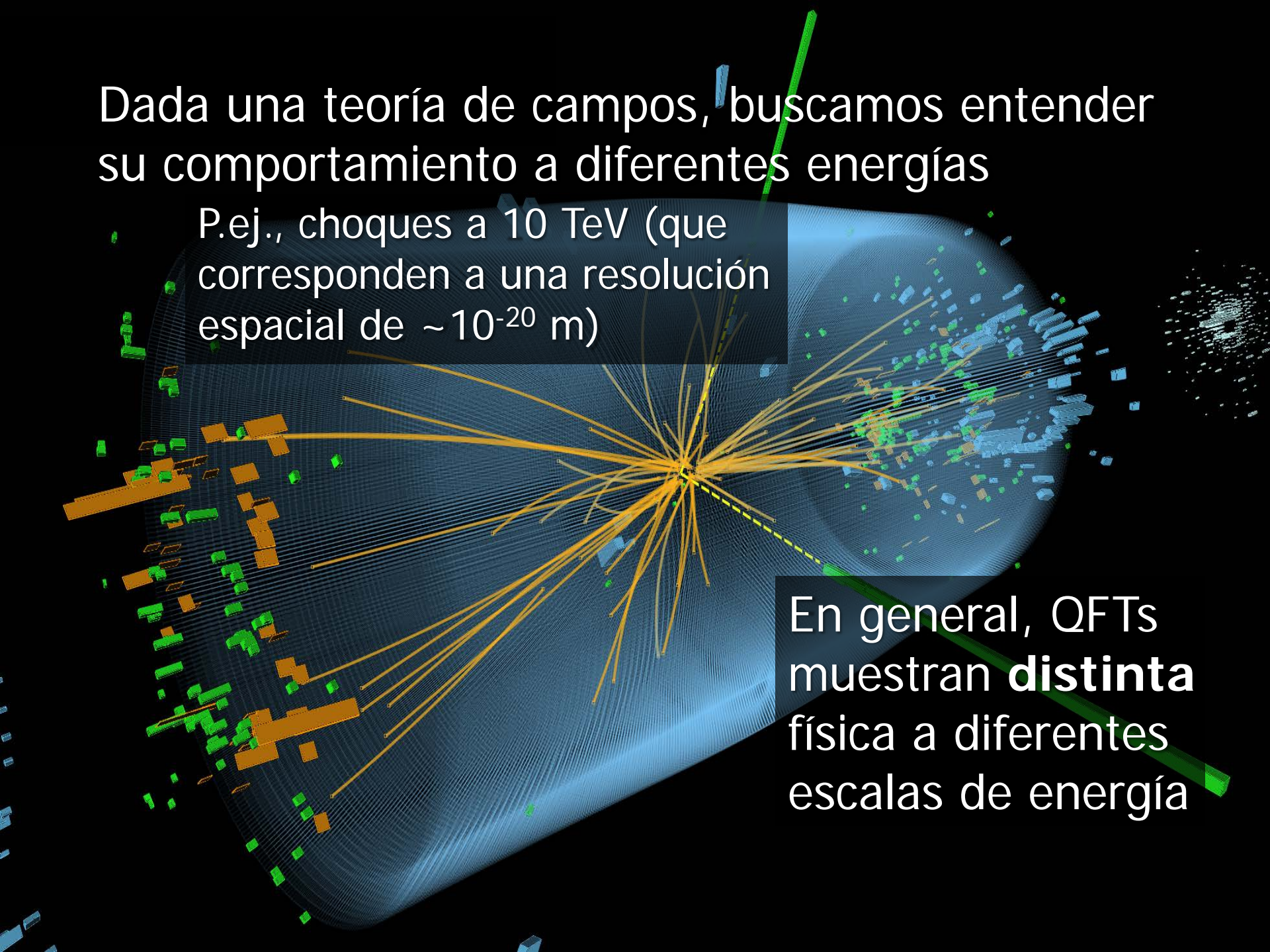




Dada una teoría de campos, buscamos entender su comportamiento a diferentes energías

P.ej., choques a 10 TeV (que corresponden a una resolución espacial de $\sim 10^{-20}$ m)

En general, QFTs muestran **distinta** física a diferentes escalas de energía



Jugarán un papel central en nuestra discusión las

Teorías de Campo Conformes (CFTs)

que lucen exactamente IGUAL a cualquier energía

(NO tienen ninguna escala energética característica)

Las CFTs son **INVARIANTES BAJO REESCALAMIENTOS**

Jugarán un papel central en nuestra discusión las
Teorías de Campo Conformes (CFTs)
que lucen exactamente IGUAL a cualquier energía
(NO tienen ninguna escala energética característica)

A primera vista esto suena exótico e inútil...

P.ej. QCD con quarks sin masa sería conforme clásicamente;
pero cuánticamente surge una escala por arriba de la cual
el acoplamiento se vuelve pequeño ($\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200 \text{ MeV}$)

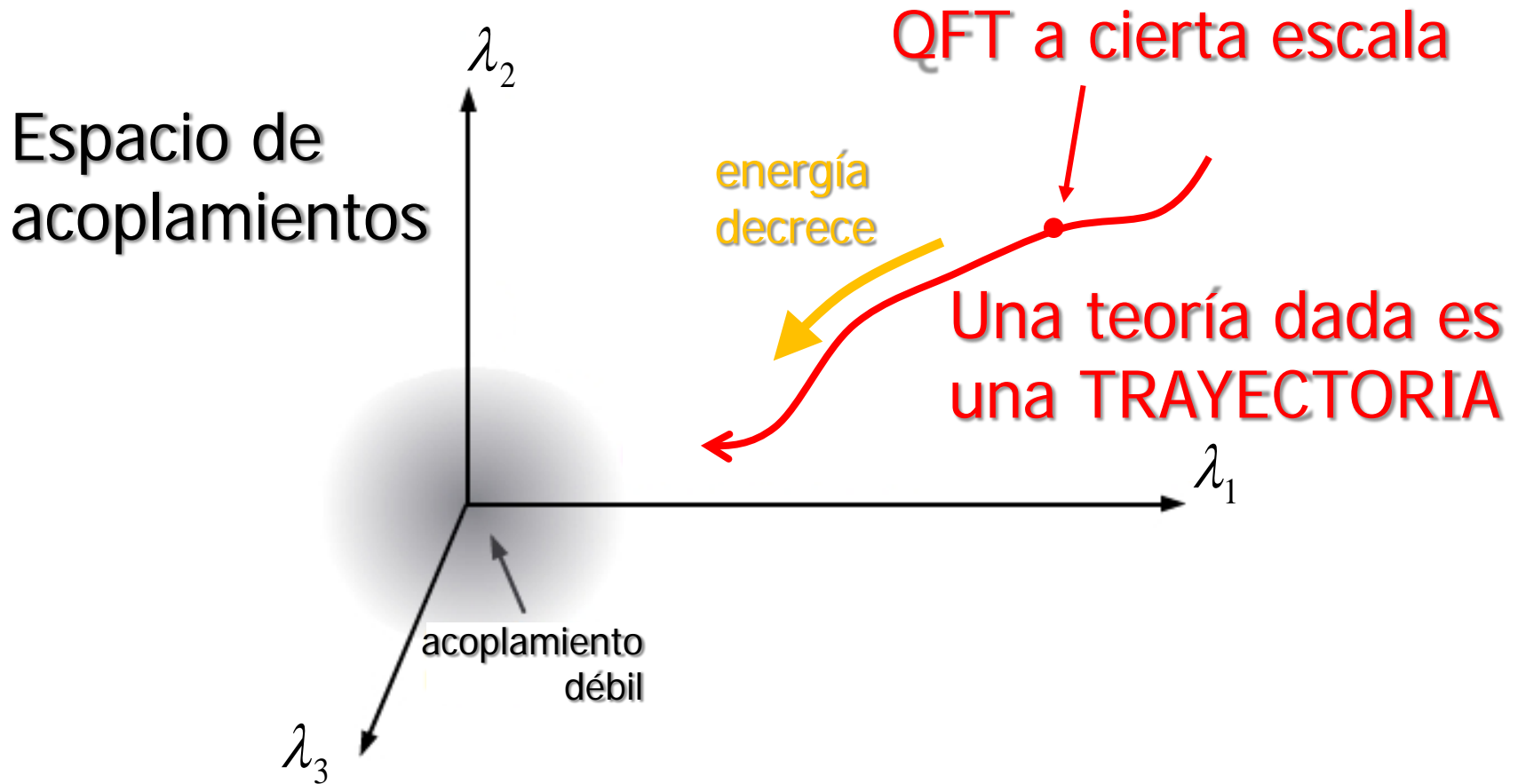
Pero CFTs son MUY importantes. De hecho,
**cualquier QFT bien definida a todas las energías
se reduce a una CFT a altas energías- el "UV"**

Razón intuitiva: escalas intrínsecas se vuelven despreciables

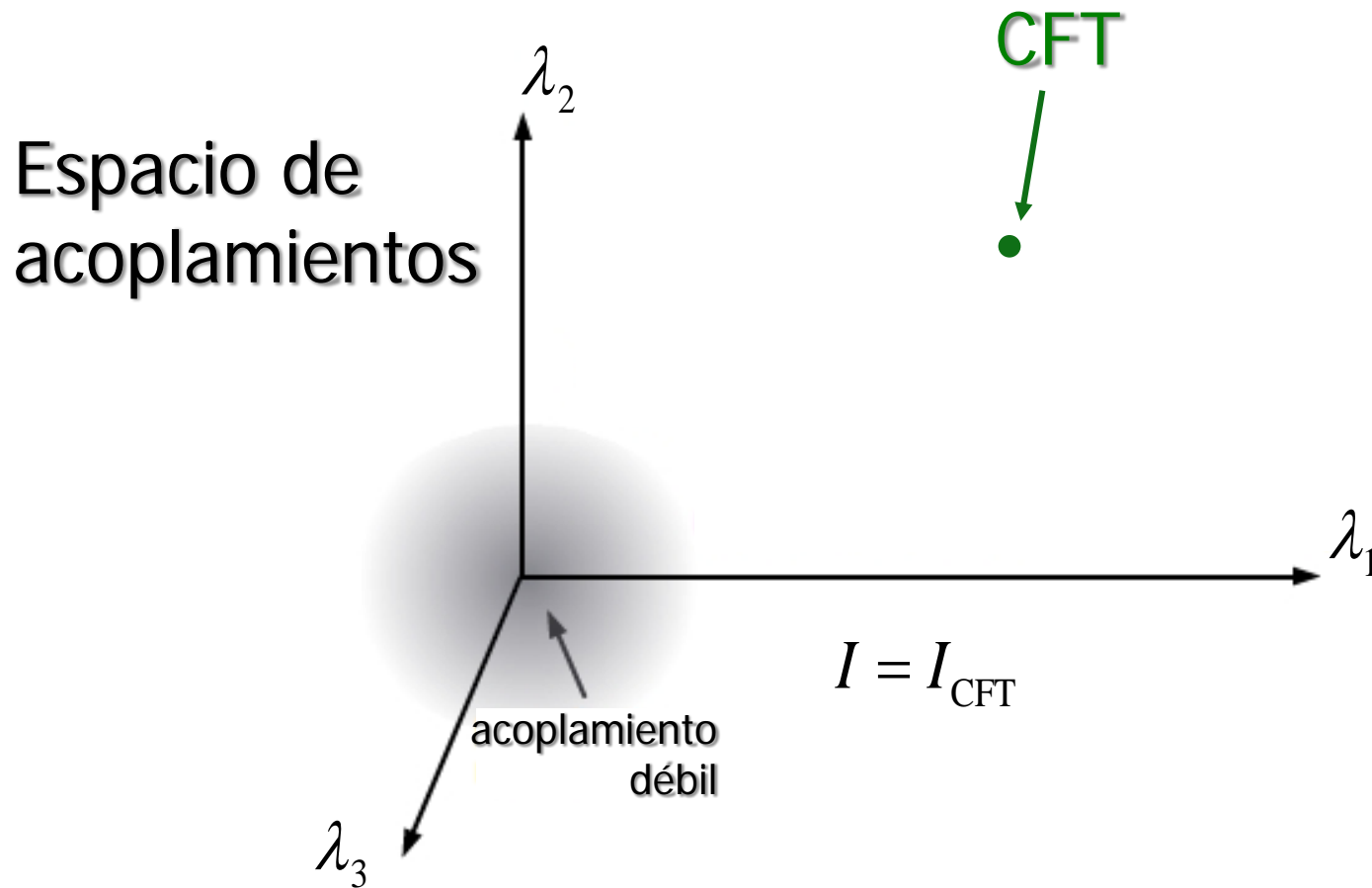
P.ej., por "libertad asintótica", QCD en UV se aproxima a
una CFT con gluones libres y quarks libres sin masa

CFTs en general son **interactuantes**

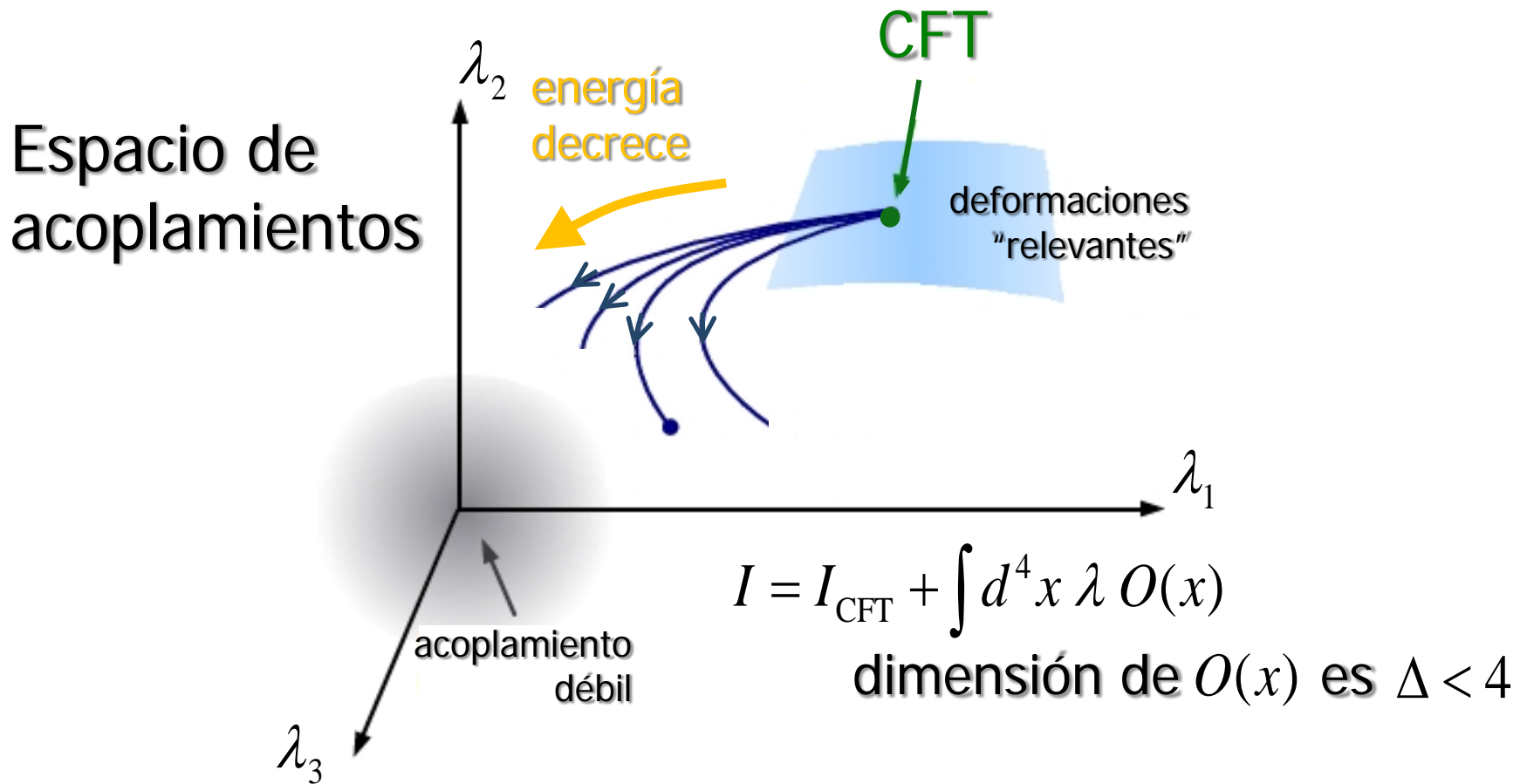
Es útil pensar en las distintas QFTs contemplando el **espacio de posibles acoplamientos**:



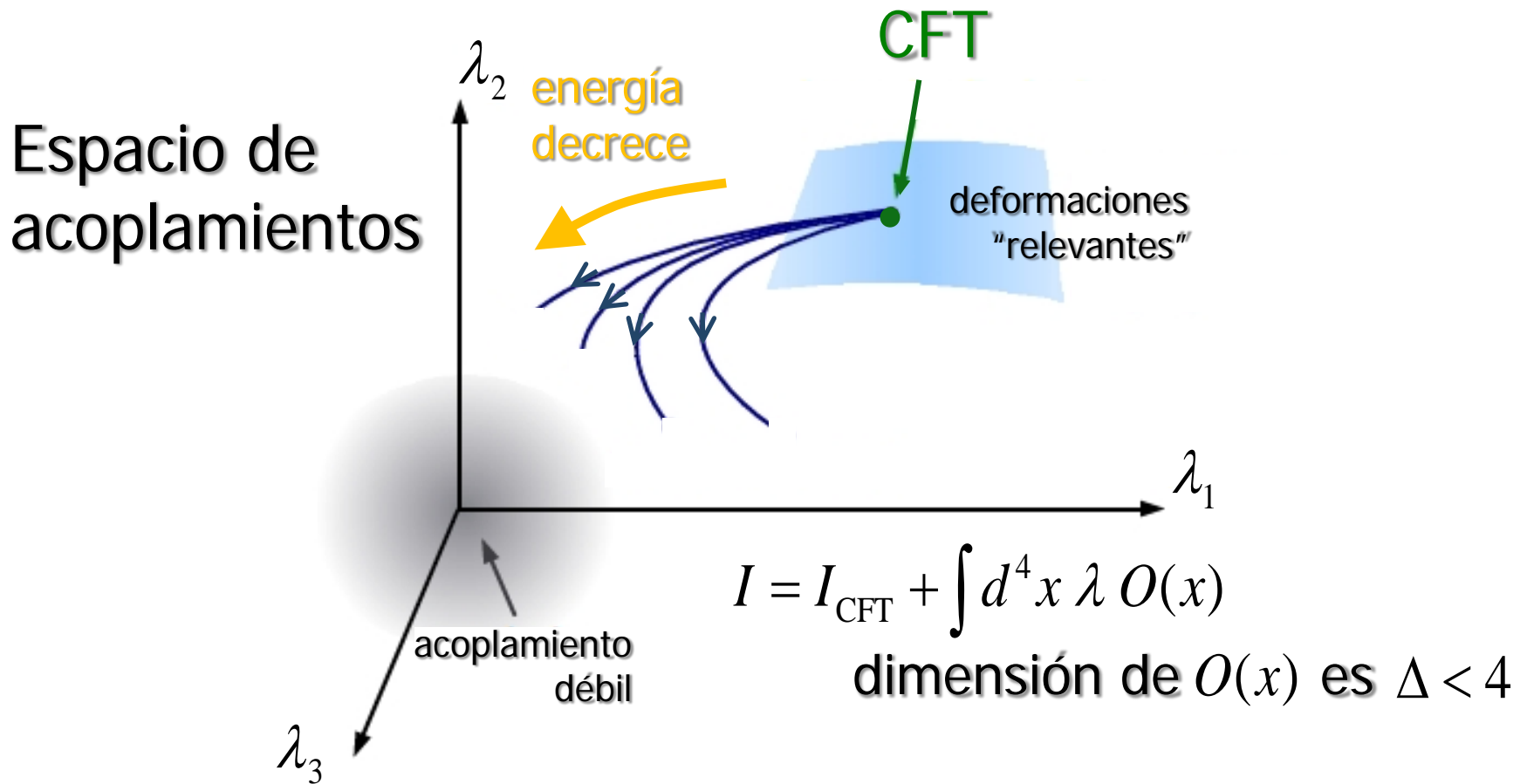
QFTs arbitrarias se definen así:
empezamos con CFT en UV (un "punto fijo UV")



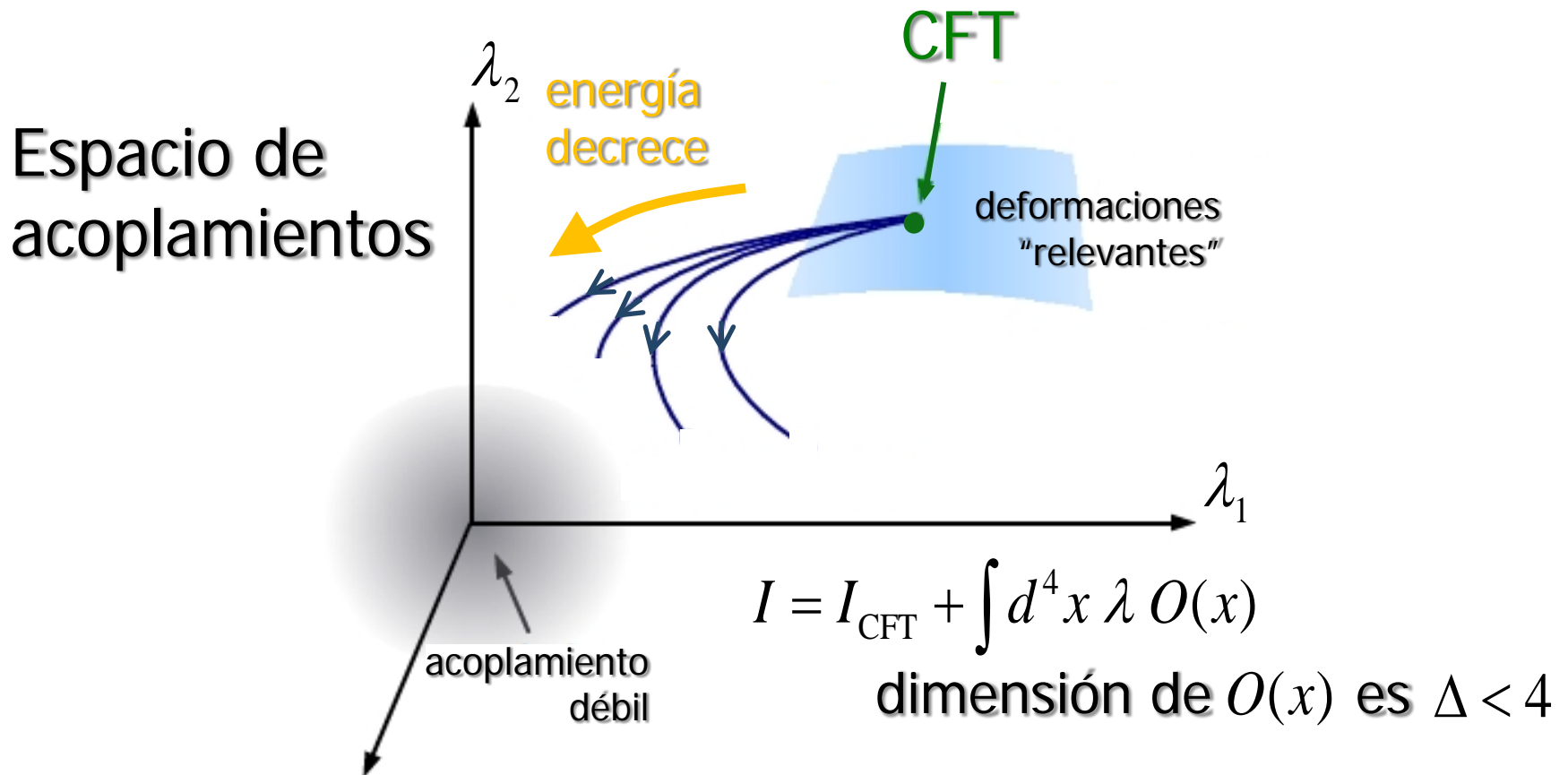
QFTs arbitrarias se definen así:
 empezamos con CFT en UV (un "punto fijo UV")
 y agregamos términos que son despreciables
 en UV pero importantes en IR ("relevantes")



P.ej., $I_{\text{QCD}} = \int d^4x \left[\text{Tr}(\partial A \partial A) + \bar{\psi} i \gamma \partial \psi \right]$
 $+ \int d^4x \left[\text{Tr}(g A A \partial A + g^2 A A A A) + g \bar{\psi} i \gamma \partial \psi A - m \bar{\psi} \psi \right]$



La información de **cómo cambia una QFT** cuando la examinamos a diferentes energías se llama el **"Grupo de Renormalización (RG)"**



La información de **cómo cambia una QFT** cuando la examinamos a diferentes energías se llama el **"Grupo de Renormalización (RG)"**

La **Correspondencia Holográfica (o AdS/CFT)** es una **geometrización del Grupo de Renormalización**

[de Boer,Verlinde,Verlinde; Heemskerk,Polchinski; Liu,Faulkner,Rangamani]

Idea básica: empezar con una QFT

y hacer un "cambio de variables muy complicado" para pasar a una **descripción diferente**, donde la **escala de energía E en la QFT**, (o la **escala de resolución espacial $\ell \equiv 1/E$**) se **reinterpreta como nueva dimensión espacial!!!**

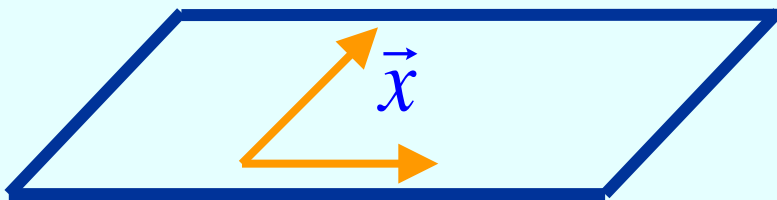
[Susskind,Witten; Polchinski,Peet]

Esta nueva coordenada espacial se denota $u \equiv E$, o $z \equiv \ell$, y se le llama la **dirección 'radial'**

La información de **cómo cambia una QFT** cuando la examinamos a diferentes energías se llama el **"Grupo de Renormalización (RG)"**

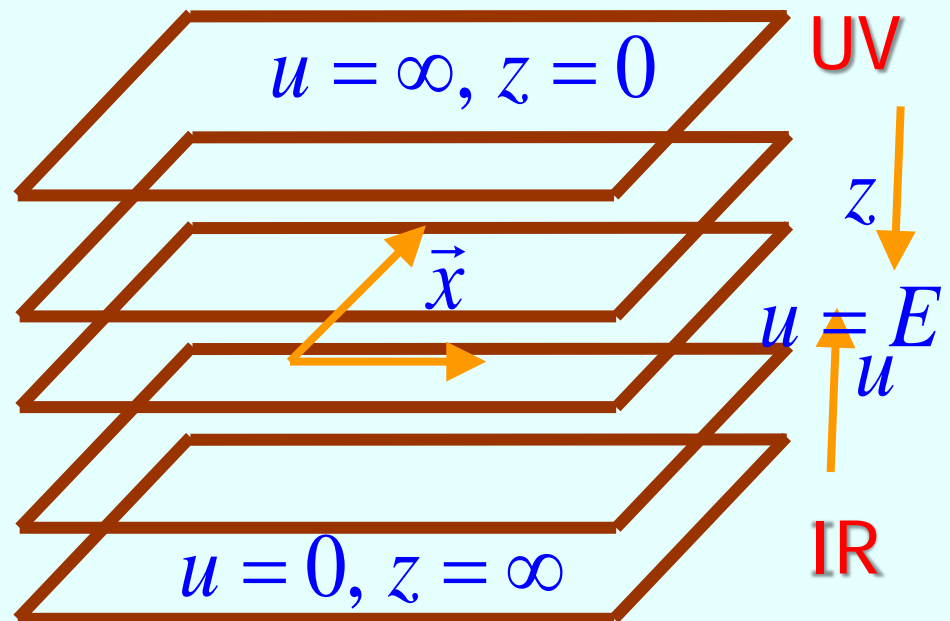
La Correspondencia Holográfica (o AdS/CFT) es una **geometrización del Grupo de Renormalización**

QFT en
Minkowski



$$ds^2 = -dt^2 + d\vec{x}^2$$

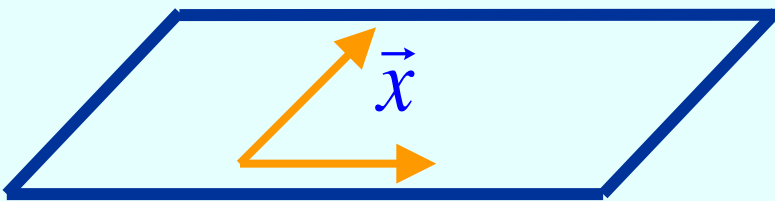
Descripción geometrizada



La información de **cómo cambia una QFT** cuando la examinamos a diferentes energías se llama el **"Grupo de Renormalización (RG)"**

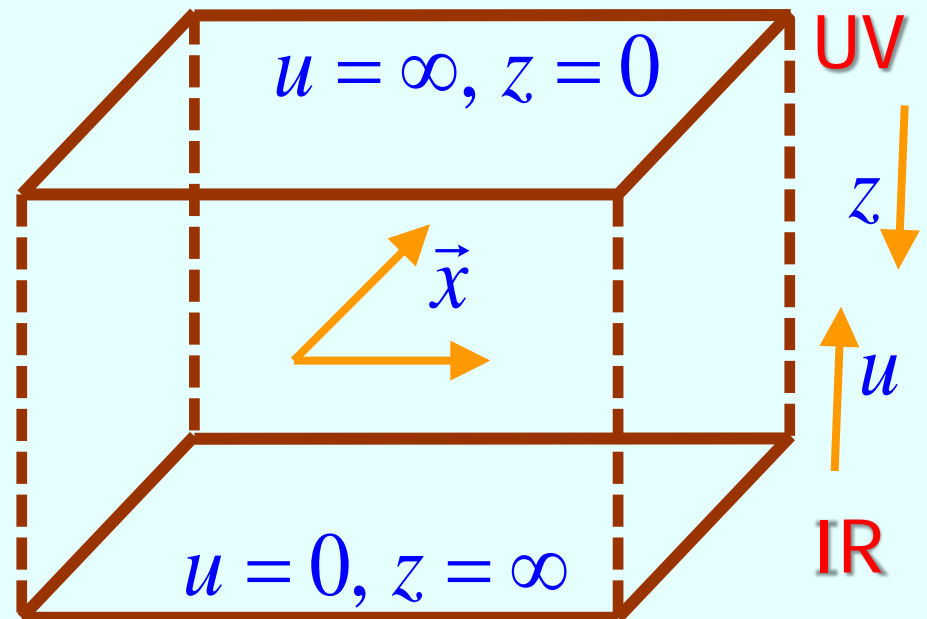
La Correspondencia Holográfica (o AdS/CFT) es una **geometrización del Grupo de Renormalización**

QFT en
Minkowski



$$ds^2 = -dt^2 + d\vec{x}^2$$

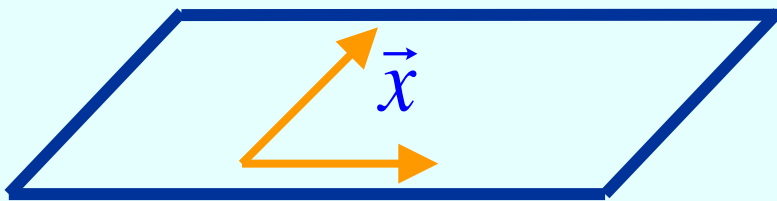
Descripción geometrizada



La información de **cómo cambia una QFT** cuando la examinamos a diferentes energías se llama el **"Grupo de Renormalización (RG)"**

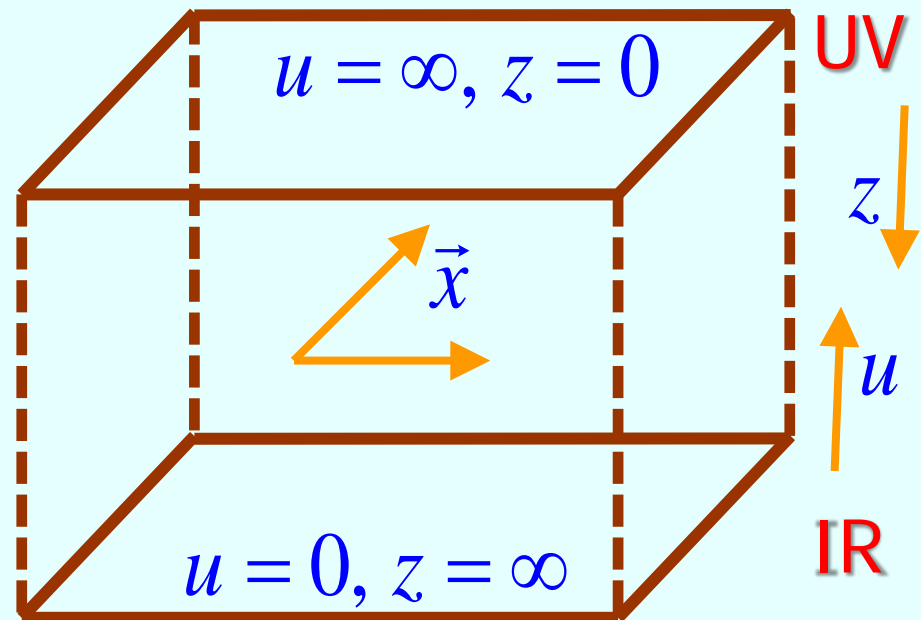
La Correspondencia Holográfica (o AdS/CFT) es una **geometrización del Grupo de Renormalización**

QFT en 3+1 dim



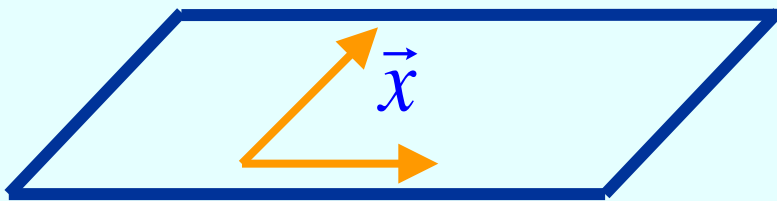
$$ds^2 = -dt^2 + d\vec{x}^2$$

Descripción en 4+1 dim



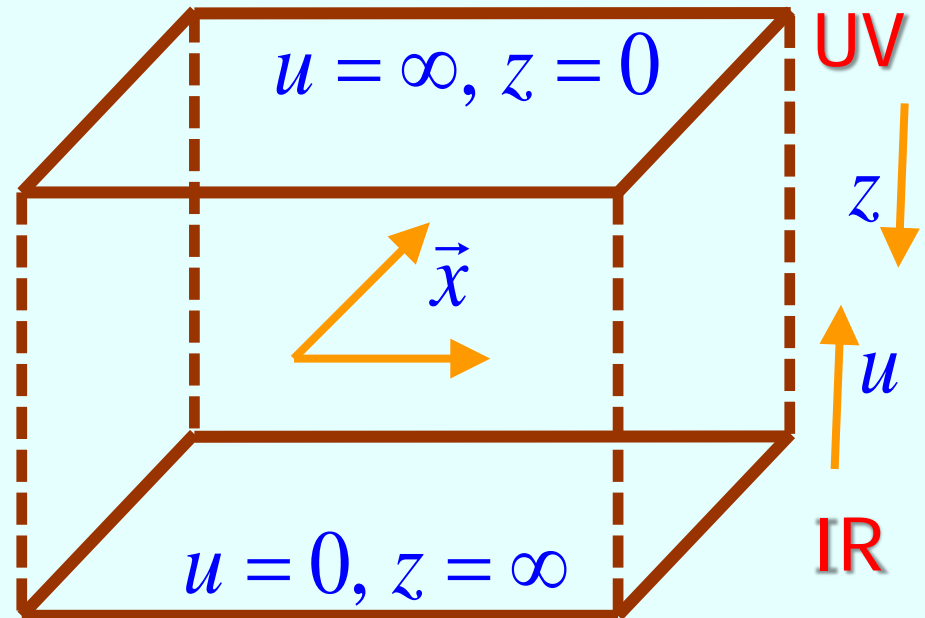
Sorpresa: la descripción después de este peculiar cambio de variables será **reconocible físicamente**

QFT en 3+1 dim



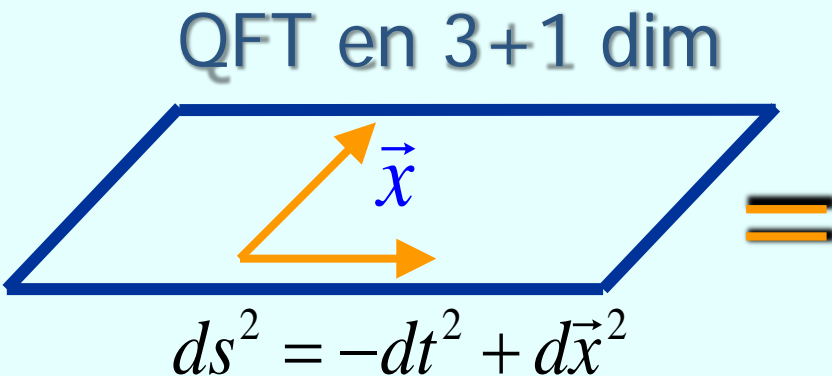
$$ds^2 = -dt^2 + d\vec{x}^2$$

Descripción en 4+1 dim

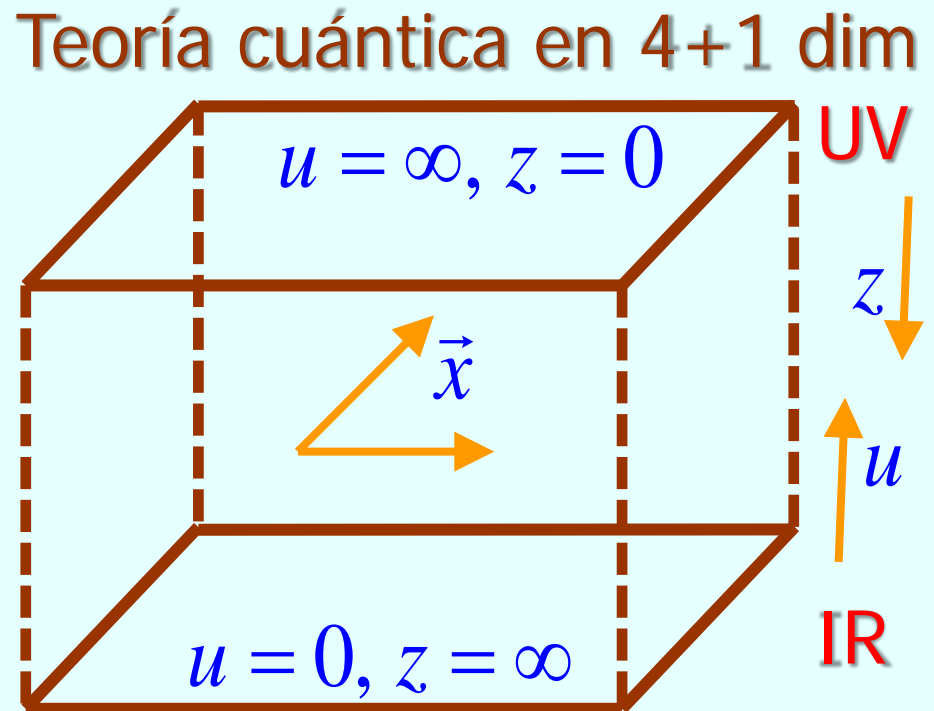


Sorpresa: la descripción después de este peculiar cambio de variables será **reconocible físicamente**

¡Existe una **nueva teoría física en 4+1 dim** que es completamente **EQUIVALENTE** a la Teoría de Campos!



=



Primero, consideremos una **CFT**, en su estado base $|0\rangle$
 "Vacío" es **invariante** bajo Poincaré y **reescalamientos**

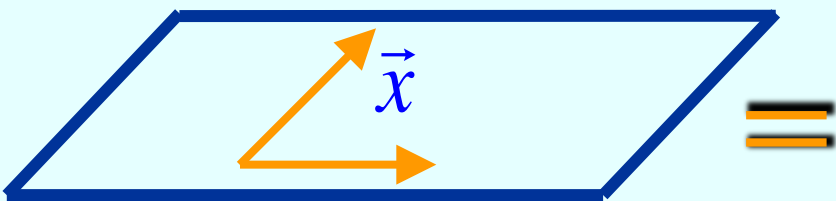
$$x^\mu \rightarrow ax^\mu, \quad z \equiv \ell \rightarrow az \quad (u \equiv E \rightarrow u/a)$$

cte. sin determinar

Simetrías determinan de
 manera única la **métrica** 4+1:

$$ds^2 = \frac{L^2}{z^2} (-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2)$$

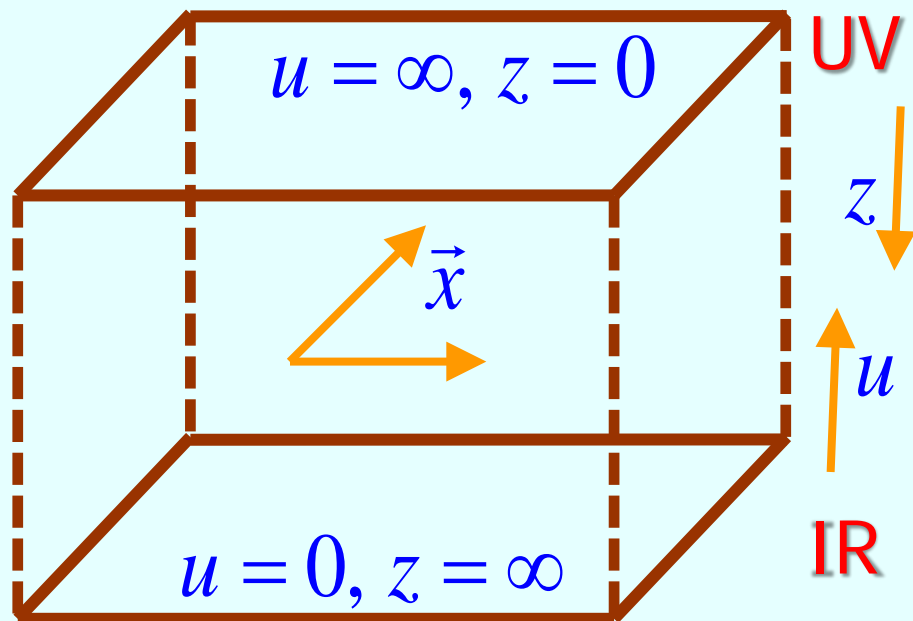
CFT en 3+1 dim



$$ds^2 = -dt^2 + d\vec{x}^2$$

=

Teoría cuántica en 4+1 dim

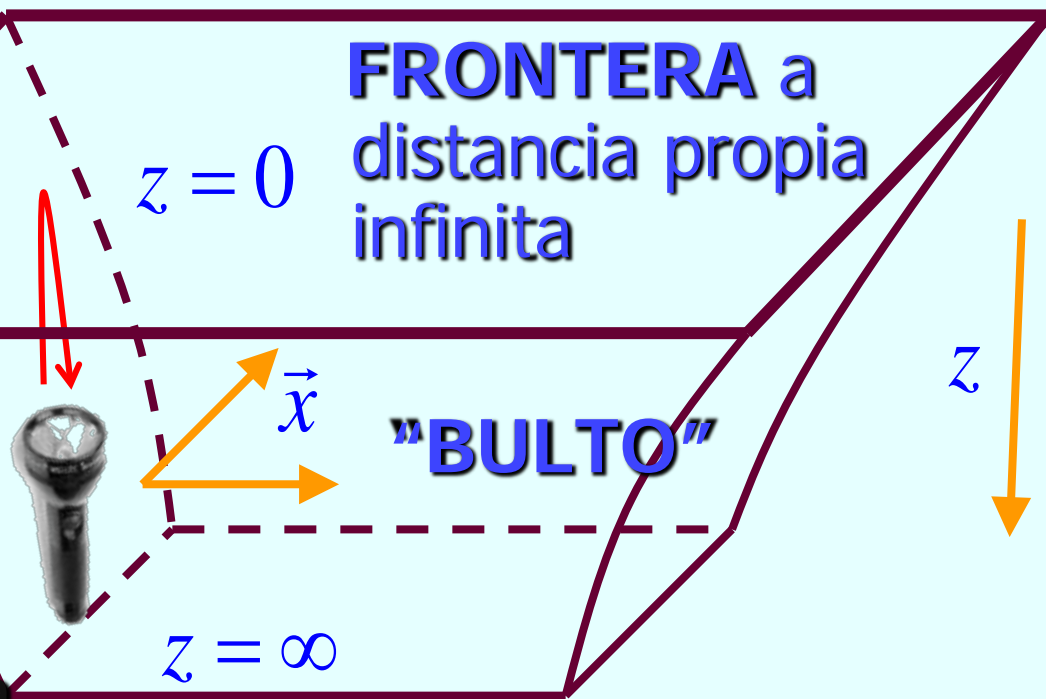


Primero, consideremos una **CFT**, en su estado base $|0\rangle$
"Vacío" es **invariante** bajo Poincaré y **reescalamientos**

$$x^\mu \rightarrow ax^\mu, \quad z \equiv \ell \rightarrow az \quad (u \equiv E \rightarrow u/a)$$

Simetrías determinan de
manera única la **métrica** 4+1: $ds^2 = \frac{L^2}{z^2} (-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2)$

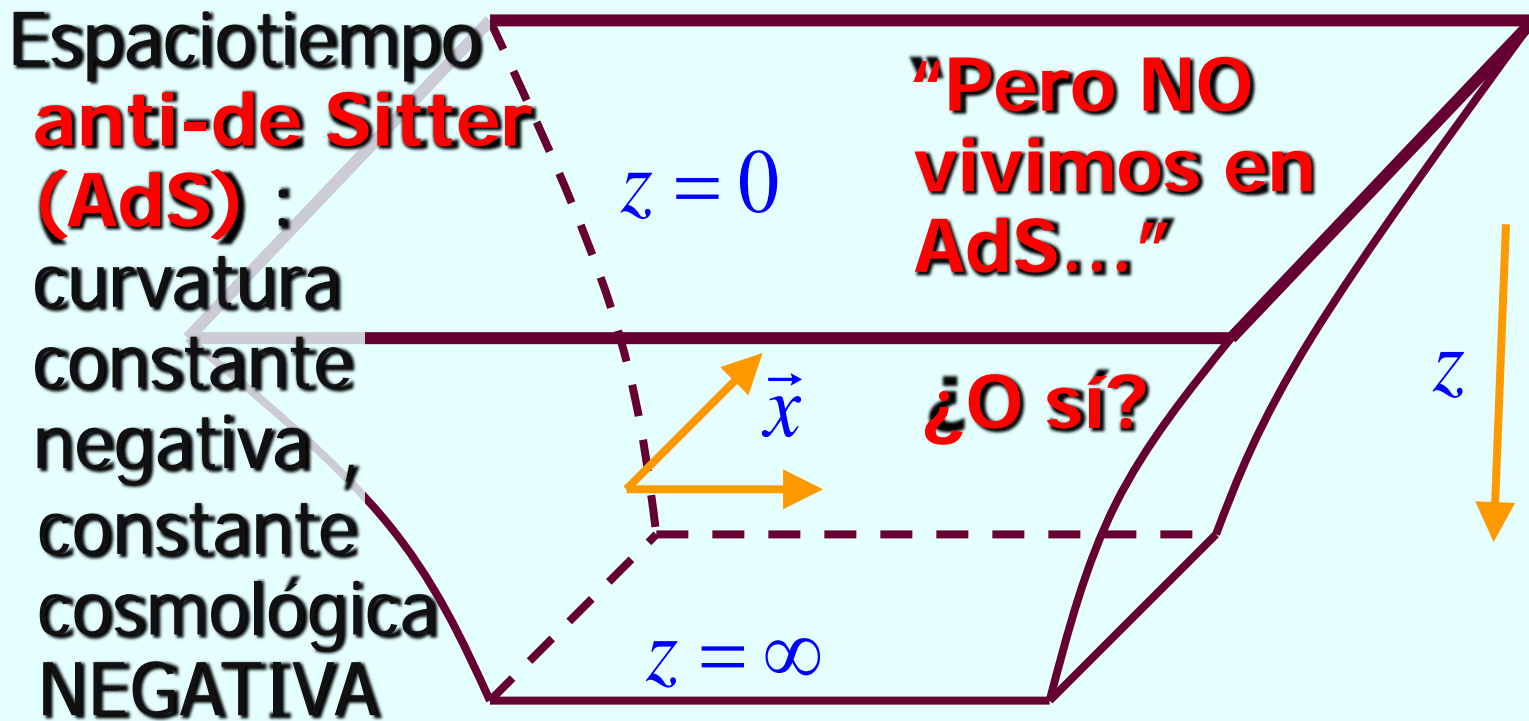
Pero la luz
la alcanza
en un tiempo
finito: son
necesarias
**condiciones
de frontera**
para definir
la nueva teoría



Primero, consideremos una **CFT**, en su estado base $|0\rangle$
"Vacío" es **invariante** bajo Poincaré y **reescalamientos**

$$x^\mu \rightarrow ax^\mu, \quad z \equiv \ell \rightarrow az \quad (u \equiv E \rightarrow u/a)$$

Simetrías determinan de manera única la **métrica** 4+1: $ds^2 = \frac{L^2}{z^2} (-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2)$

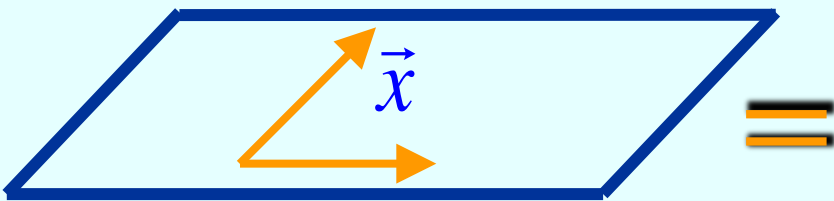


Primero, consideremos una **CFT**, en su estado base $|0\rangle$
 "Vacío" es **invariante** bajo Poincaré y **reescalamientos**

$$x^\mu \rightarrow ax^\mu, \quad z \equiv \ell \rightarrow az \quad (u \equiv E \rightarrow u/a)$$

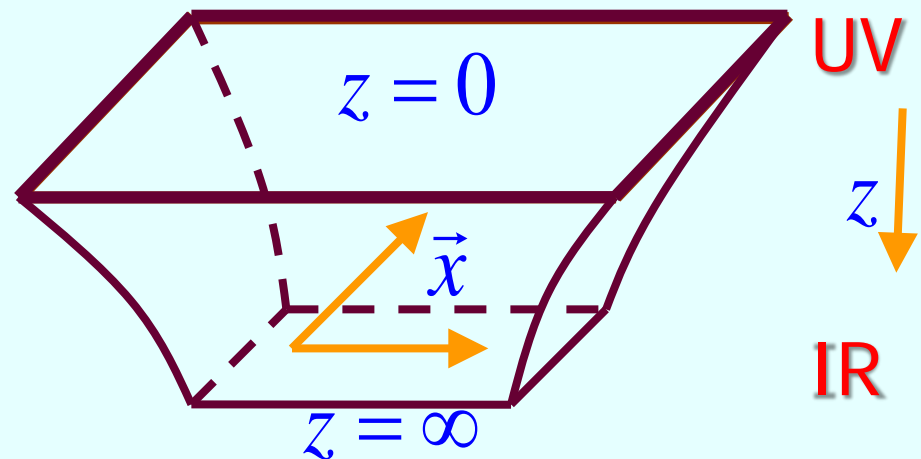
Simetrías determinan de manera única la **métrica** 4+1: $ds^2 = \frac{L^2}{z^2} (-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2)$

CFT en 3+1 dim



$$ds^2 = -dt^2 + d\vec{x}^2$$

Teoría cuántica en 4+1 dim



anti-de Sitter (AdS)

¡codifica vacío de CFT en Minkowski!

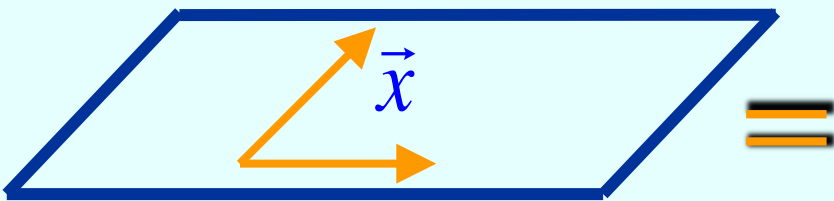
Primero, consideremos una **CFT**, en su estado base $|0\rangle$
"Vacío" es **invariante** bajo Poincaré y **reescalamientos**

$$x^\mu \rightarrow ax^\mu, \quad z \equiv \ell \rightarrow az \quad (u \equiv E \rightarrow u/a)$$

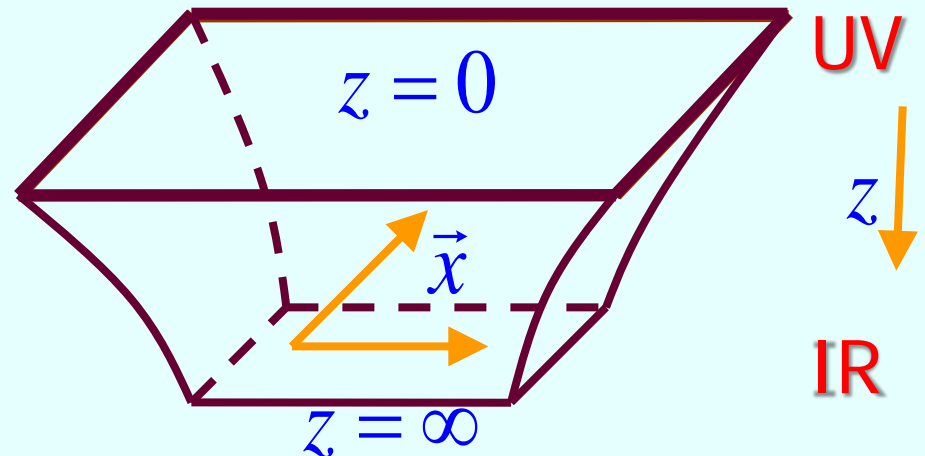
Simetrías determinan de manera única la **métrica** 4+1: $ds^2 = \frac{L^2}{z^2} (-dt^2 + d\vec{x}^2 + dz^2)$

Teoría cuántica en AdS 4+1 dim

CFT en 3+1 dim



=



**Con esto hemos aprendido por qué
AdS va de la mano de CFT: AdS/CFT**

CFT: estado vacío $|0\rangle \longleftrightarrow$ espaciotiempo AdS vacío

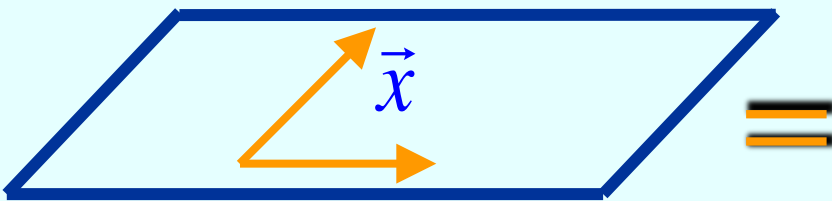
estados **excitados** $|\psi\rangle \longleftrightarrow$ **excitaciones** sobre AdS

$|\psi\rangle = O(x^\mu)|0\rangle$ distintos estados se pueden obtener con distintos **operadores** (construidos con los campos y sus derivadas)

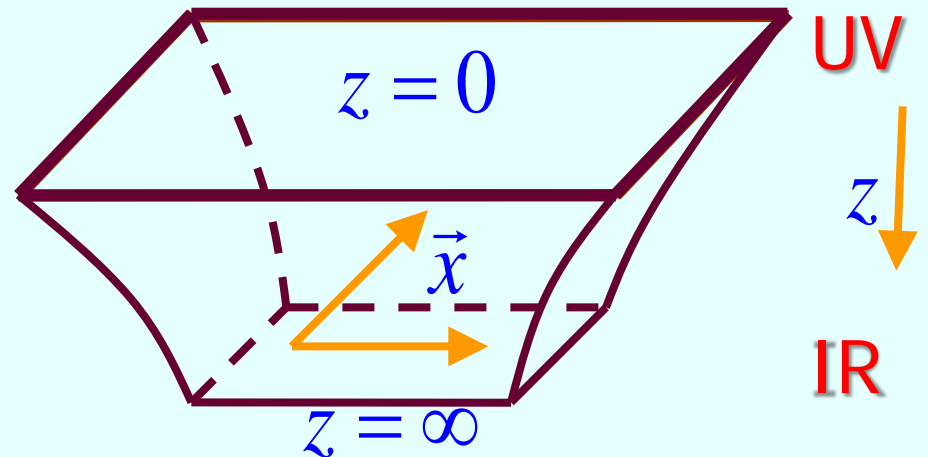


Teoría cuántica en AdS 4+1 dim

CFT en 3+1 dim



=



Operador $O(x^\mu) \longleftrightarrow$ Campo $\phi(x^\mu, z)$

Los objetos de las 2 teorías son traducibles entre sí

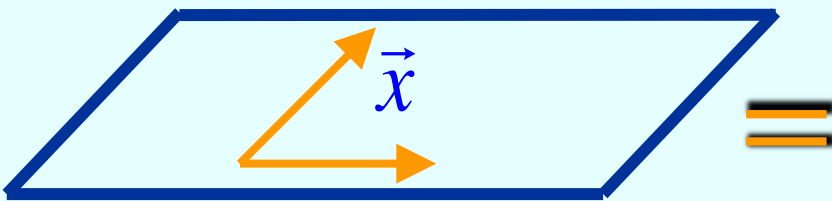
CFT: estado vacío $|0\rangle \longleftrightarrow$ espaciotiempo AdS vacío

estados excitados $|\psi\rangle \longleftrightarrow$ excitaciones sobre AdS

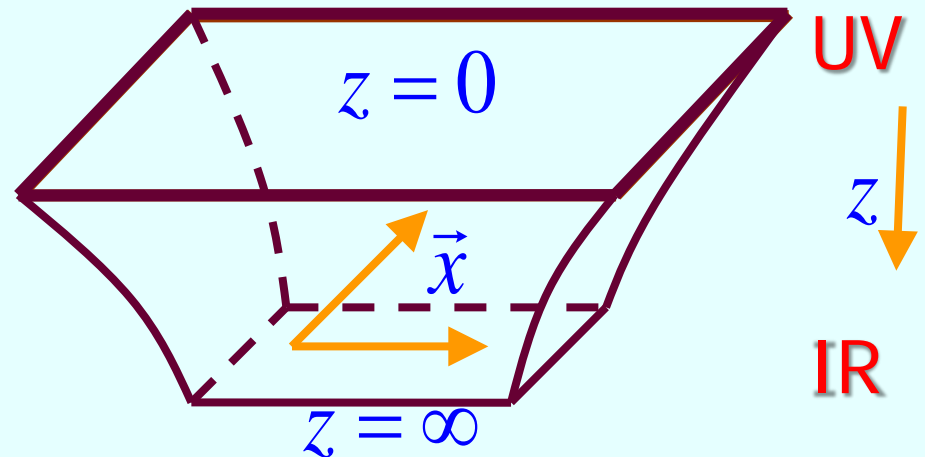
$|\psi\rangle = O(x^\mu)|0\rangle$ distintos estados se pueden obtener con distintos **operadores** (construidos con los campos y sus derivadas)

Teoría cuántica en AdS 4+1 dim

CFT en 3+1 dim



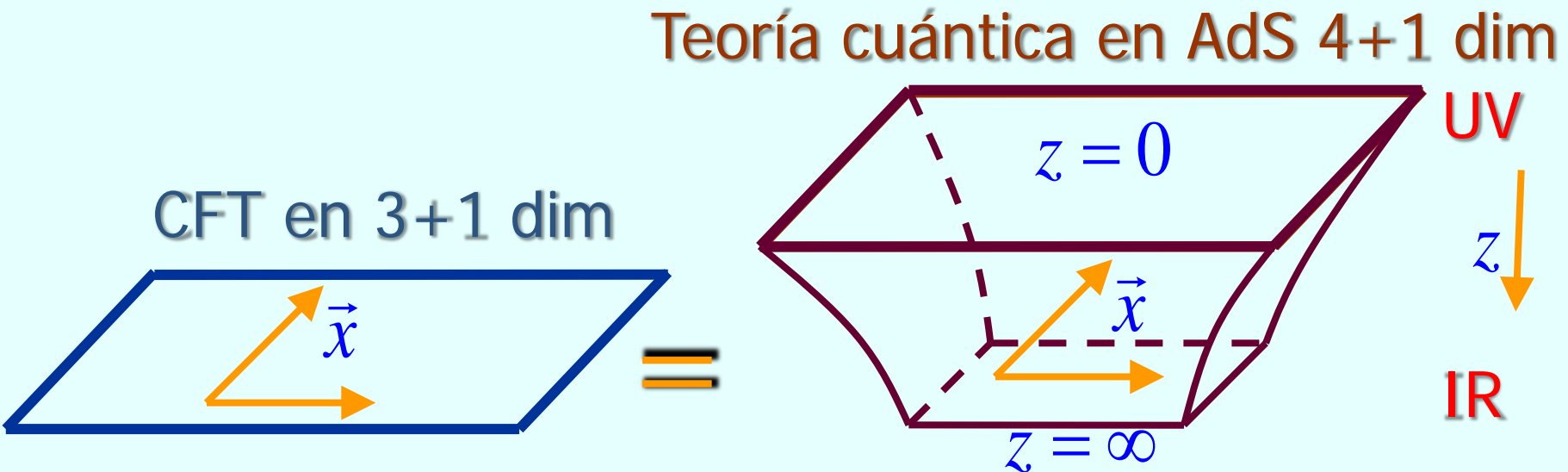
=



Operador $O(x^\mu) \longleftrightarrow$ Campo $\phi(x^\mu, z)$

(AMBOS objetos son campos Y operadores)

CFT: estado **vacío** $|0\rangle \longleftrightarrow$ espaciotiempo AdS **vacío**
 estados **excitados** $|\psi\rangle \longleftrightarrow \phi(x^\mu, z)$ excitado c/algún perfil
 (valor esperado de operador)



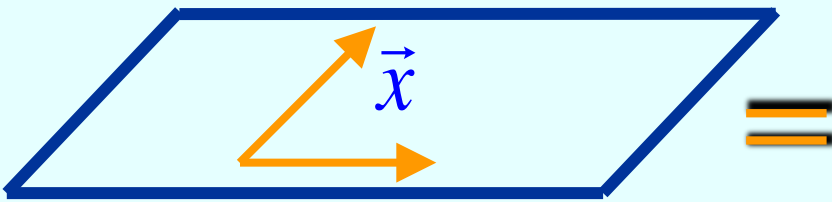
Operador $O(x^\mu) \longleftrightarrow$ Campo $\phi(x^\mu, z)$

(AMBOS objetos son campos Y operadores)

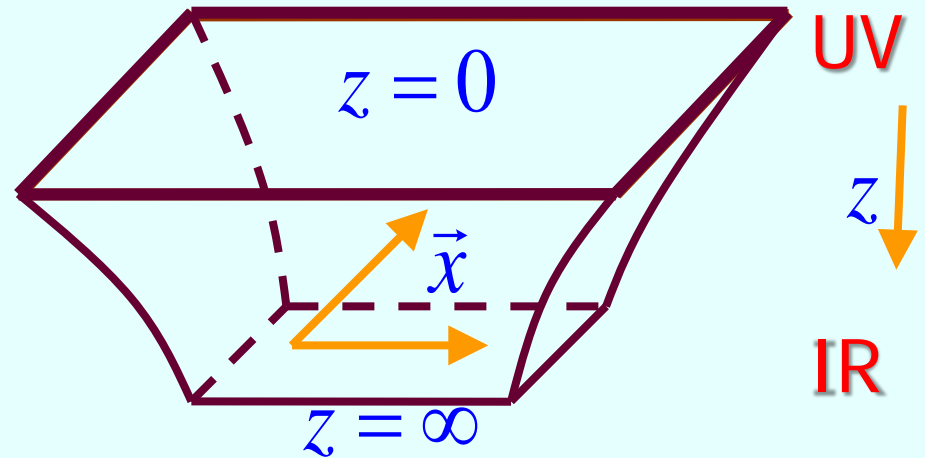
CFT: estado vacío $|0\rangle$ \longleftrightarrow **espaciotiempo AdS vacío**
estados excitados $|\psi\rangle$ \longleftrightarrow $\phi(x^\mu, z)$ excitado c/algún perfil
 En UV, todo estado $|\psi\rangle$ \longleftrightarrow Cerca de $z = 0$, todo estado se reduce a AdS vacío
 se parece al vacío $|0\rangle$ \longleftrightarrow se reduce a AdS vacío
 Costaría ∞ energía excitar los campos ahí (volumen ∞)

Teoría cuántica en AdS 4+1 dim

CFT en 3+1 dim



=



Operador $O(x^\mu)$ \longleftrightarrow **Campo** $\phi(x^\mu, z)$

QFT genérica = CFT + acción c/operadores "relevantes" $O(x^\mu)$

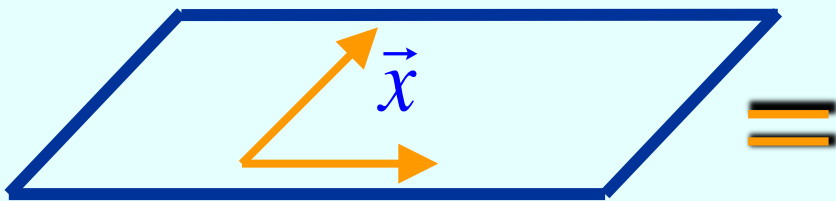
estado vacío $|0\rangle \longleftrightarrow$ NO AdS vacío

NO invariante bajo reescalamientos

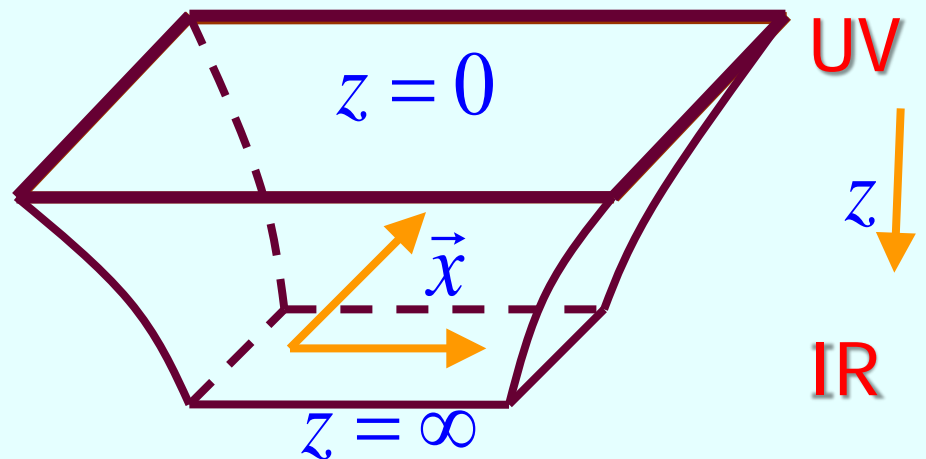
En UV, QFT se reduce a CFT

$$I = I_{\text{CFT}} + \int d^4x \lambda O(x)$$

QFT en 3+1 dim



Teoría cuántica en 4+1 dim



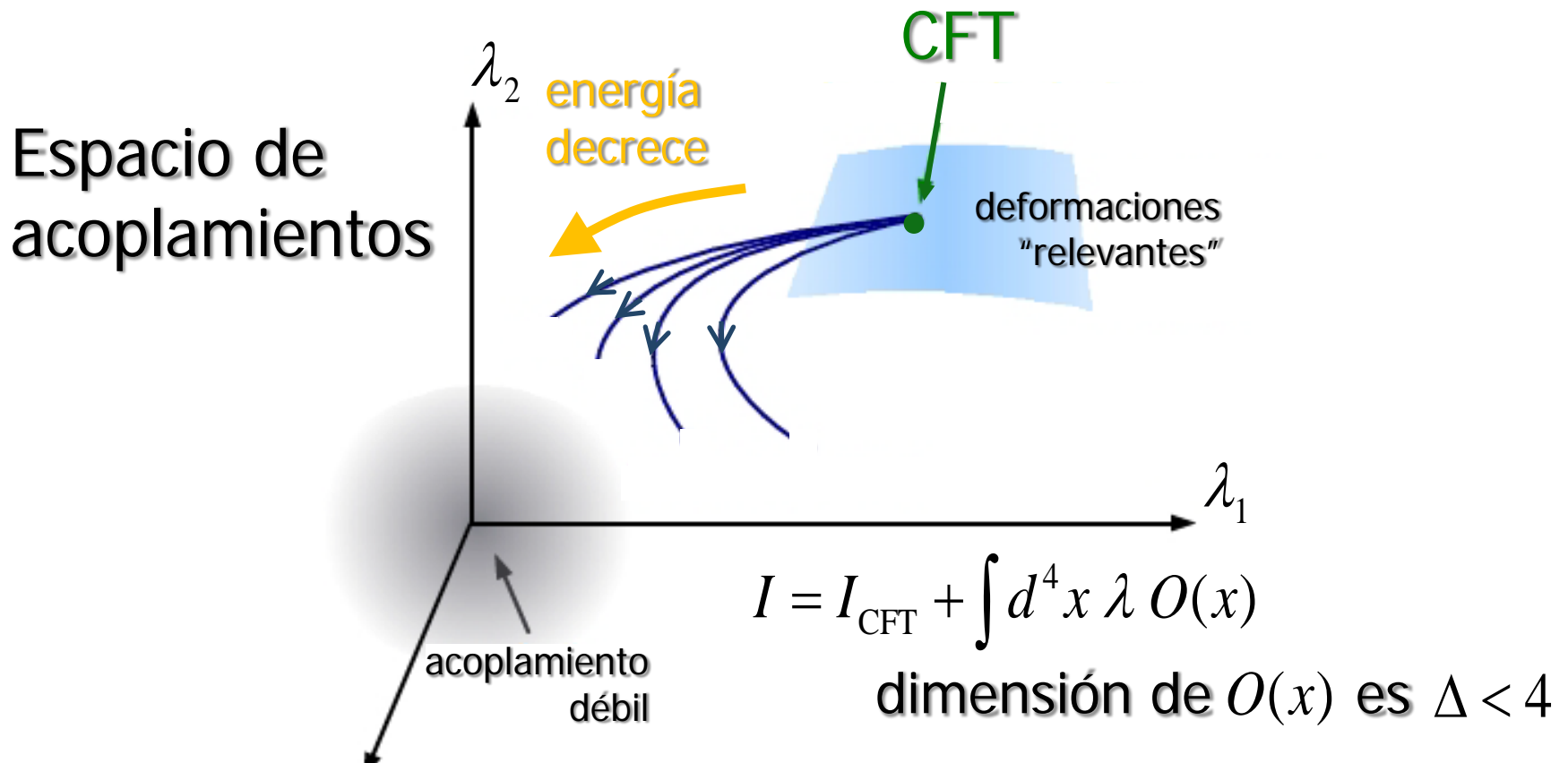
Operador $O(x^\mu) \longleftrightarrow$ Campo $\phi(x^\mu, z)$

QFT genérica = CFT + acción c/operadores "relevantes" $O(x^\mu)$

estado vacío $|0\rangle \longleftrightarrow$ NO AdS vacío

NO invariante bajo reescalamientos

En UV, QFT se reduce a CFT



QFT genérica = CFT + acción c/operadores "relevantes" $O(x^\mu)$

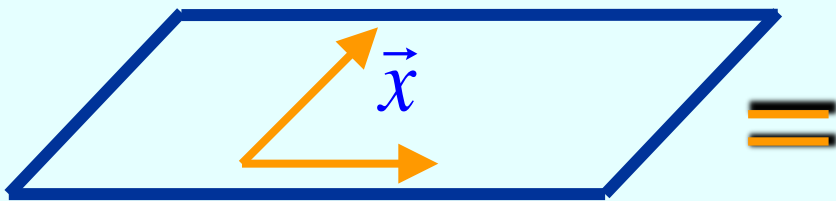
estado vacío $|0\rangle \longleftrightarrow$ NO AdS vacío

NO invariante bajo reescalamientos

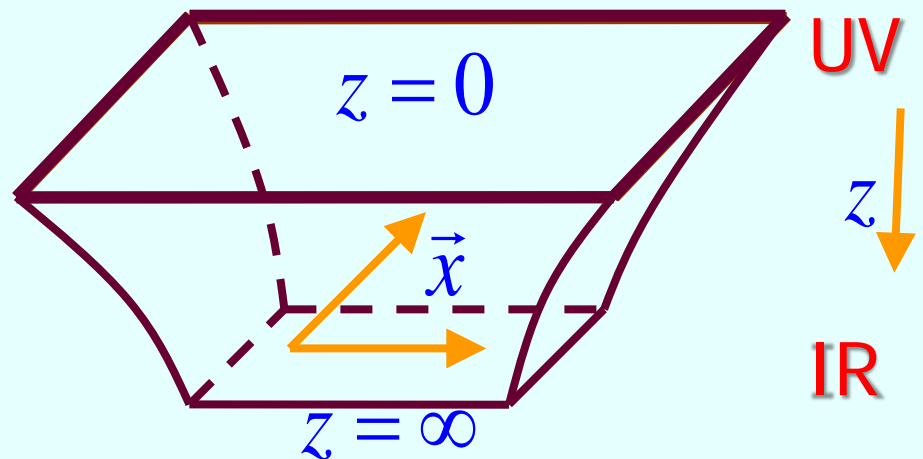
En UV, QFT se reduce a CFT \longleftrightarrow Cerca de $z = 0$, geometría se reduce a AdS vacío

$$I = I_{\text{CFT}} + \int d^4x \lambda O(x)$$

QFT en 3+1 dim



Teoría cuántica en 4+1 dim



Operador $O(x^\mu) \longleftrightarrow$ Campo $\phi(x^\mu, z)$

QFT genérica = CFT + acción c/operadores "relevantes" $O(x^\mu)$

estado vacío $|0\rangle \longleftrightarrow$ NO AdS vacío

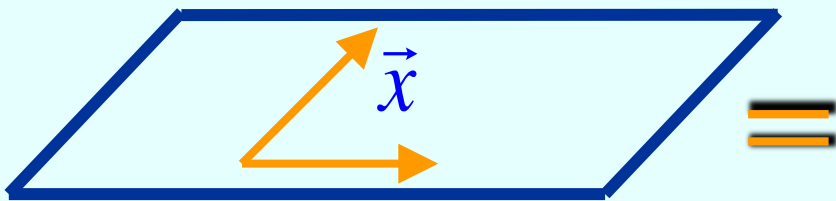
Diferencia con caso previo está en cuán rápido $\phi(x^\mu, z) \rightarrow 0$

Cambiar ESTADO cuesta energía FINITA (decremento rápido)

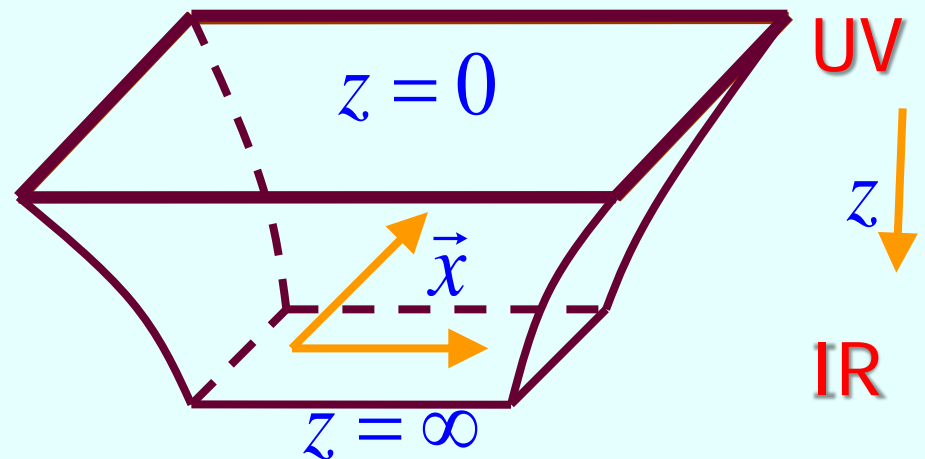
Cambiar TEORÍA cuesta energía INFINITA (cambia cond. borde)

$$I = I_{\text{CFT}} + \int d^4x \lambda O(x)$$

QFT en 3+1 dim



Teoría cuántica en no-AdS 4+1



Operador $O(x^\mu) \longleftrightarrow$ Campo $\phi(x^\mu, z)$