

# UN VIAJE DE IDA Y VUELTA ENTRE PARTICULAS Y CUERDAS

Esperanza López Manzanares

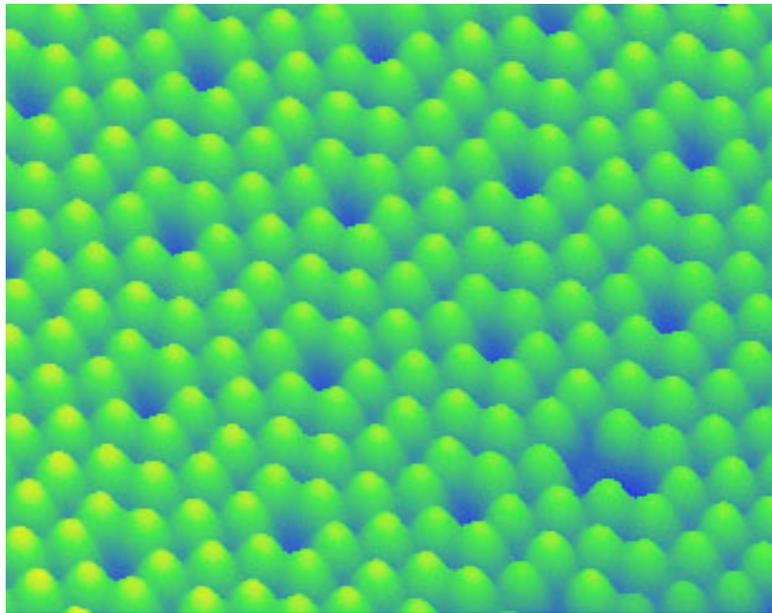


Instituto de  
Física  
Teórica  
UAM-CSIC

# EL CORAZON DE LA MATERIA: EL NUCLEO ATOMICO

---

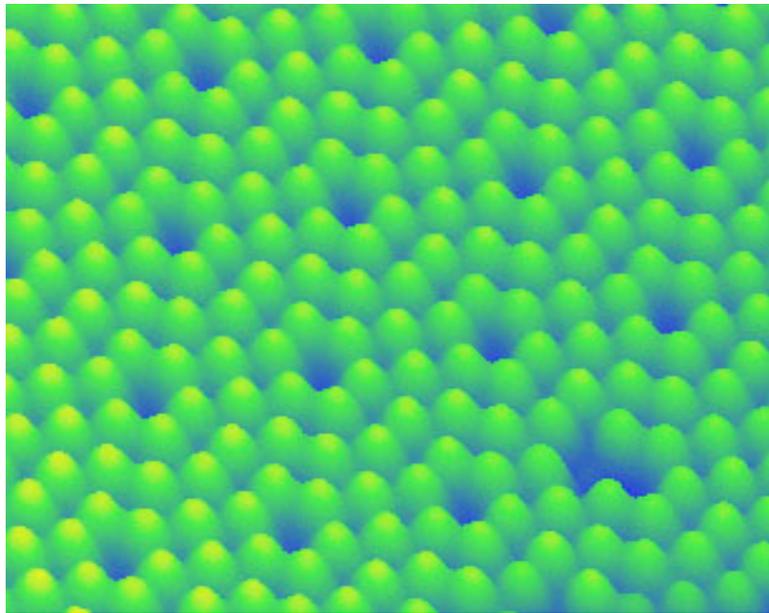
átomos en un cristal



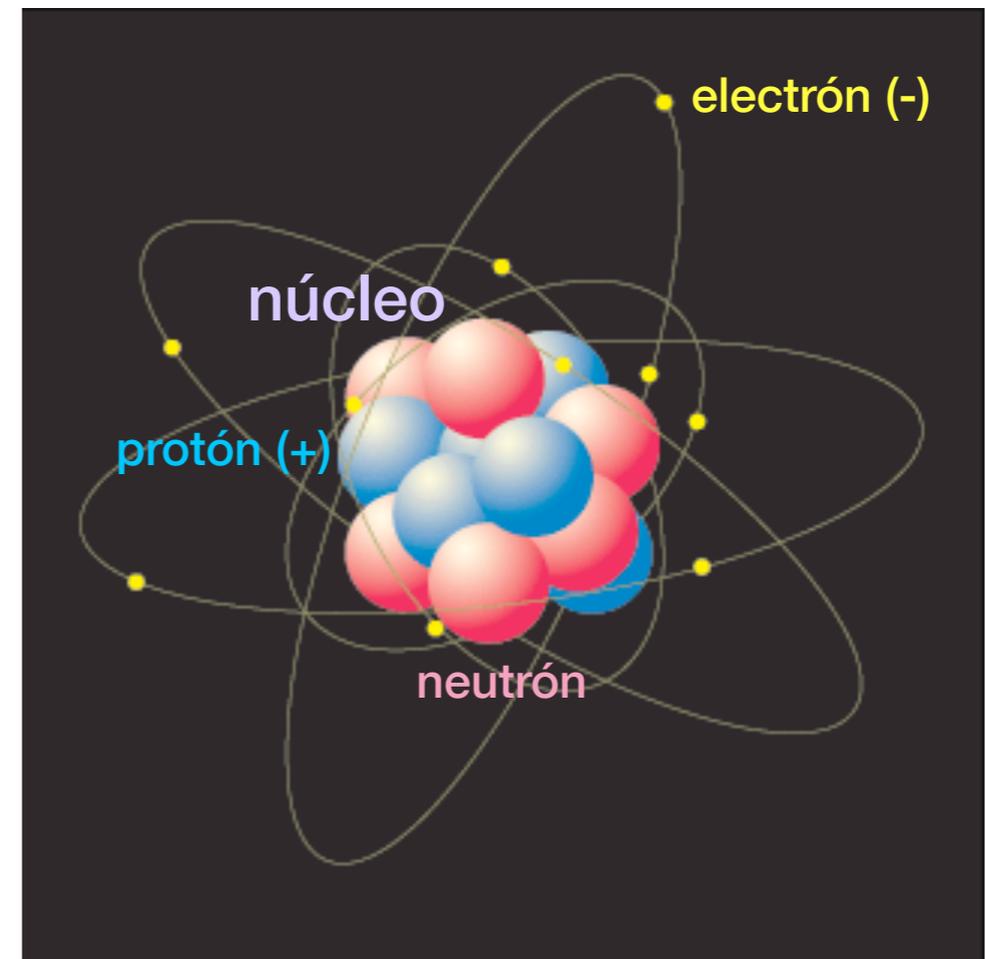
# EL CORAZON DE LA MATERIA: EL NUCLEO ATOMICO

---

átomos en un cristal



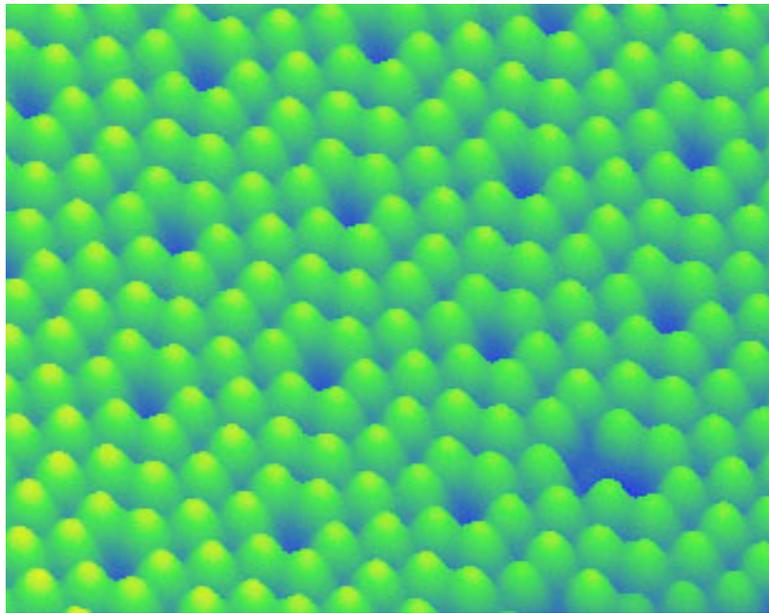
esquema  
de un átomo



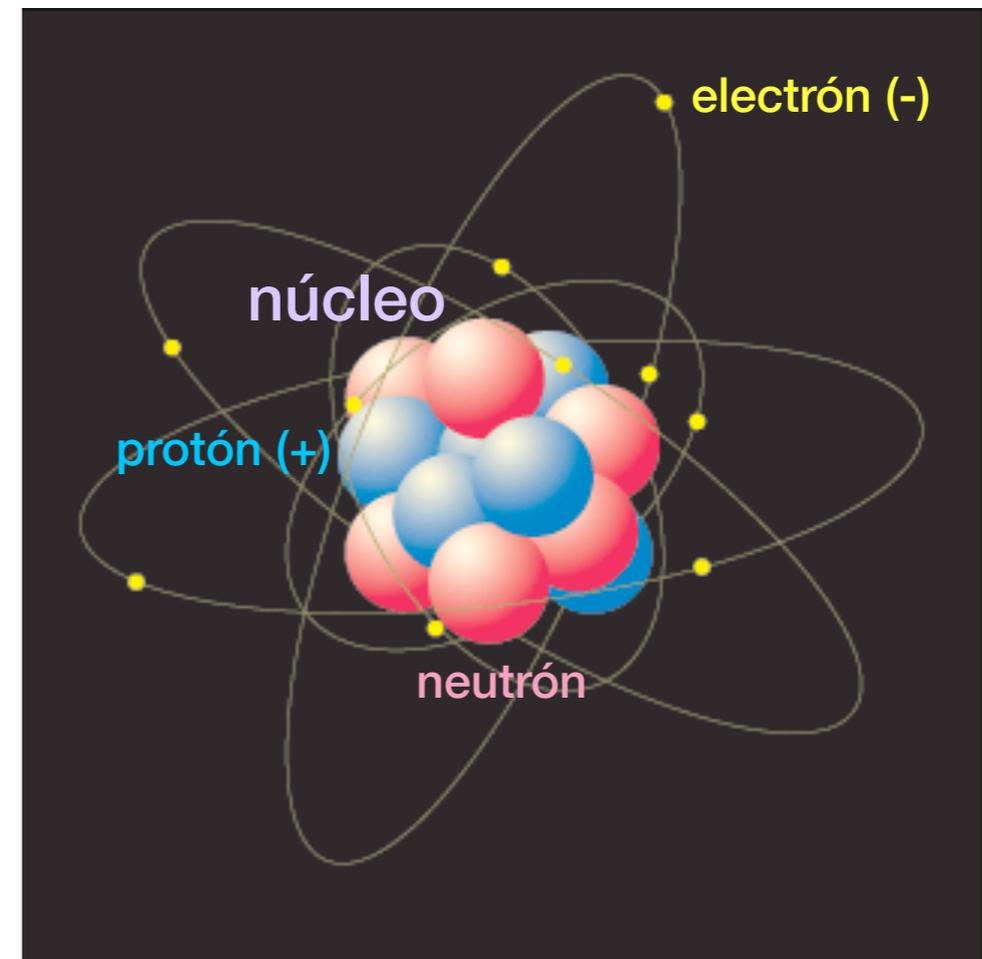
# EL CORAZON DE LA MATERIA: EL NUCLEO ATOMICO

---

átomos en un cristal



esquema  
de un átomo

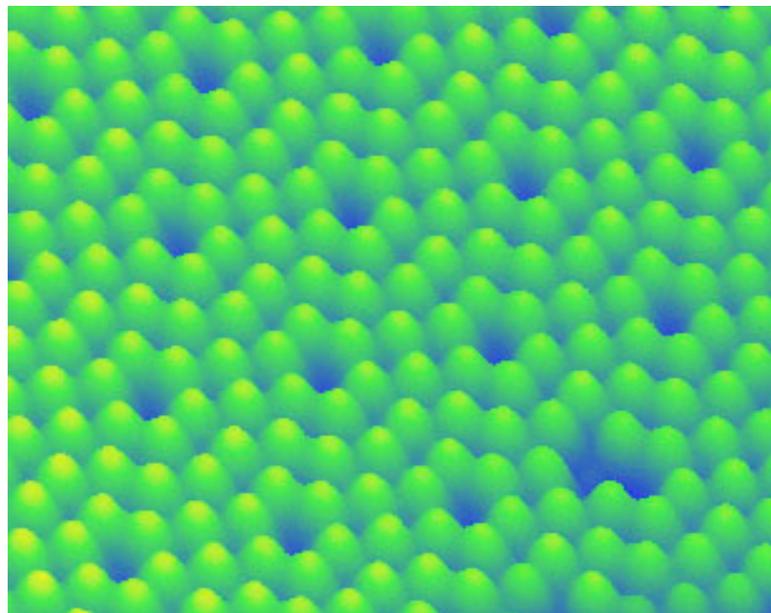


**las fuerzas nucleares** son mucho mayores  
que la fuerza entre electrón y núcleo ([electromagnetismo](#))

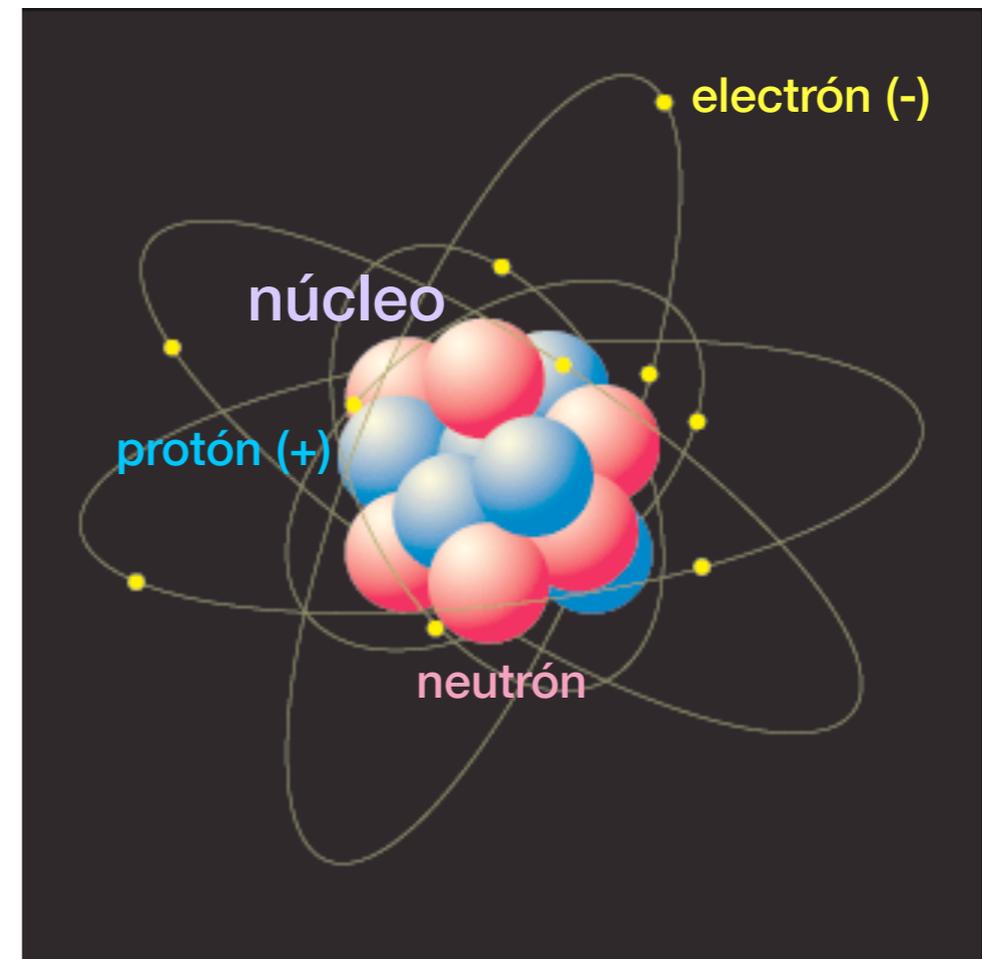
# EL CORAZON DE LA MATERIA: EL NUCLEO ATOMICO

---

átomos en un cristal



esquema  
de un átomo



**las fuerzas nucleares** son mucho mayores

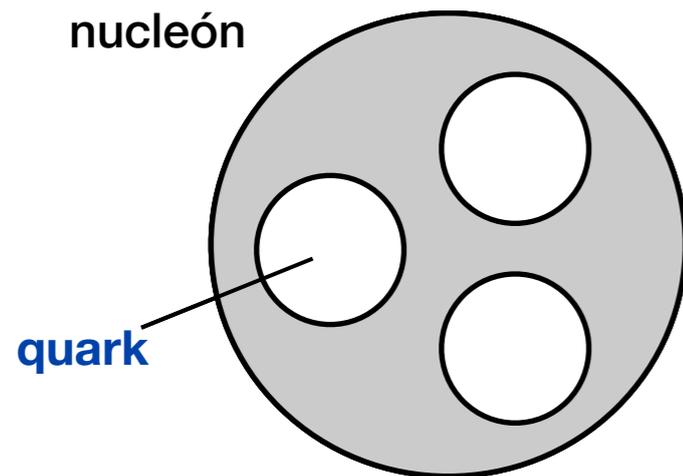
que la fuerza entre electrón y núcleo ([electromagnetismo](#))

la fuerza nuclear determina la variedad de elementos en la naturaleza

# DENTRO DEL NUCLEÓN: QUARKS Y GLUONES

---

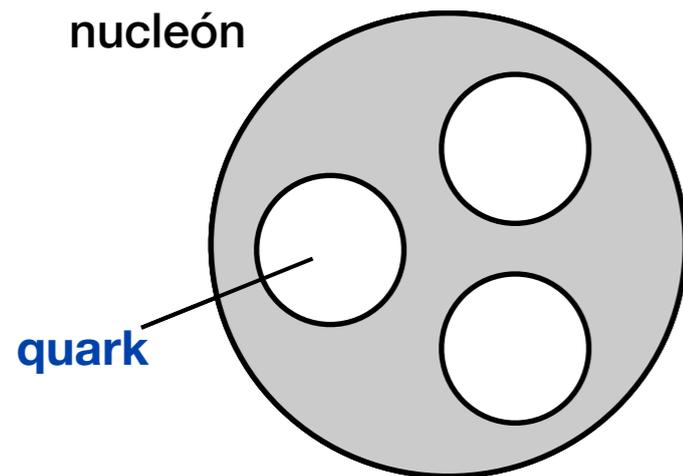
protón y neutrón no son partículas elementales



# DENTRO DEL NUCLEON: QUARKS Y GLUONES

---

protón y neutrón no son partículas elementales



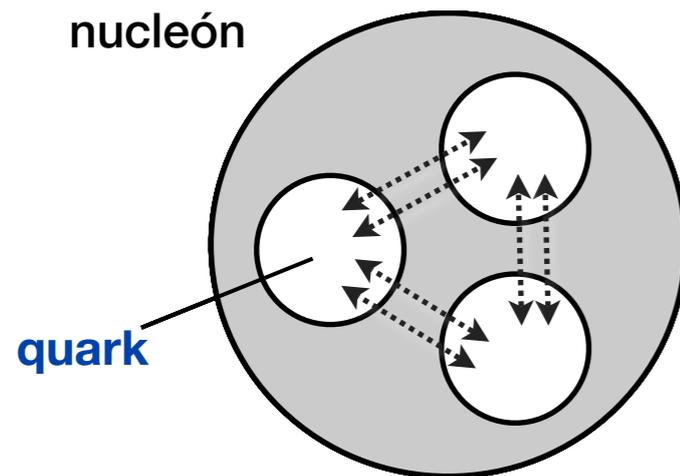
fuerzas nucleares mediadas por **gluones**

(em: fotones)

# DENTRO DEL NUCLEÓN: QUARKS Y GLUONES

---

protón y neutrón no son partículas elementales



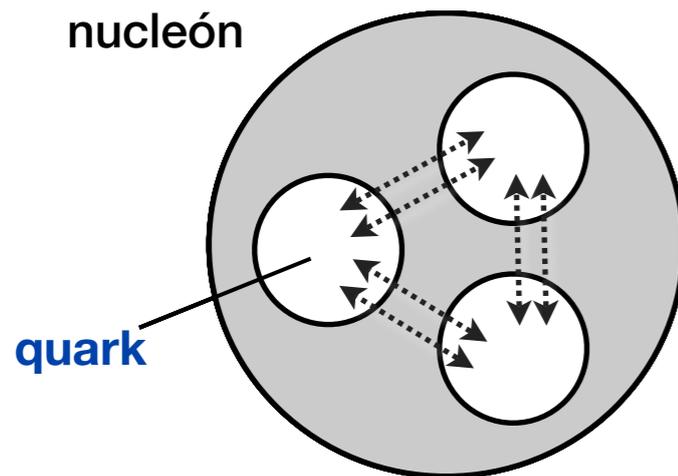
fuerzas nucleares mediadas por **gluones**

(em: fotones)

# DENTRO DEL NUCLEON: QUARKS Y GLUONES

---

protón y neutrón no son partículas elementales

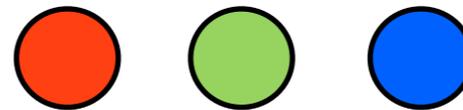


fuerzas nucleares mediadas por **gluones**

(em: fotones)

los gluones actúan sobre el "color" de los quarks

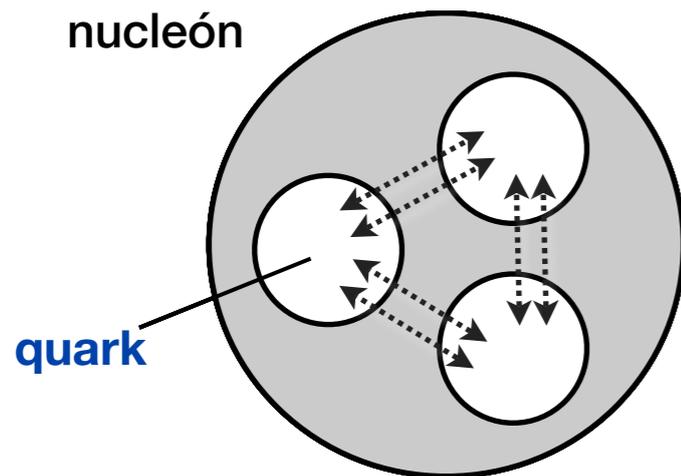
(em: carga eléctrica +,-)



**cromodinámica cuántica**

# DENTRO DEL NUCLEON: QUARKS Y GLUONES

protón y neutrón no son partículas elementales

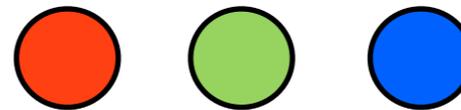


fuerzas nucleares mediadas por **gluones**

(em: fotones)

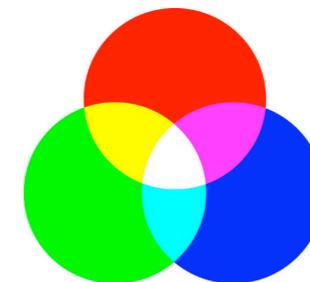
los gluones actúan sobre el "color" de los quarks

(em: carga eléctrica +,-)



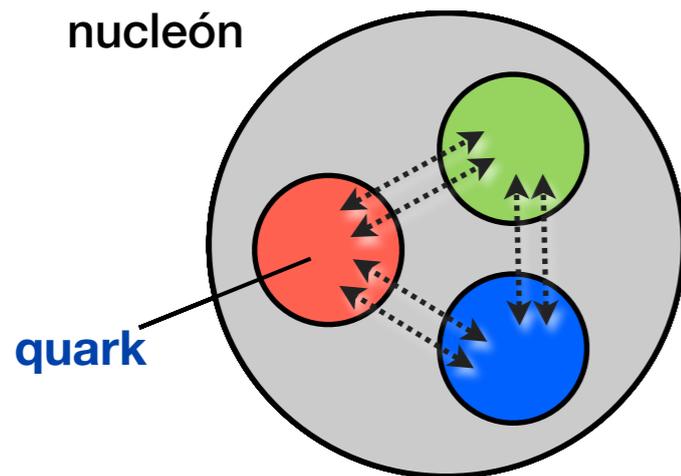
**cromodinámica cuántica**

**confinamiento** del color



# DENTRO DEL NUCLEON: QUARKS Y GLUONES

protón y neutrón no son partículas elementales



fuerzas nucleares mediadas por **gluones**

(em: fotones)

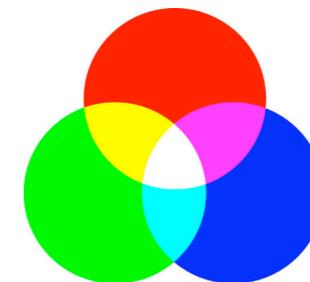
los gluones actúan sobre el "color" de los quarks

(em: carga eléctrica +,-)



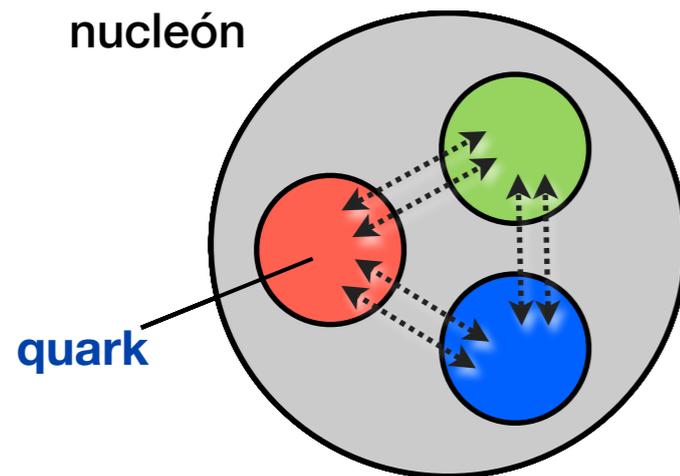
**cromodinámica cuántica**

**confinamiento** del color



# DENTRO DEL NUCLEON: QUARKS Y GLUONES

protón y neutrón no son partículas elementales

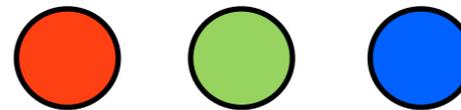


fuerzas nucleares mediadas por **gluones**

(em: fotones)

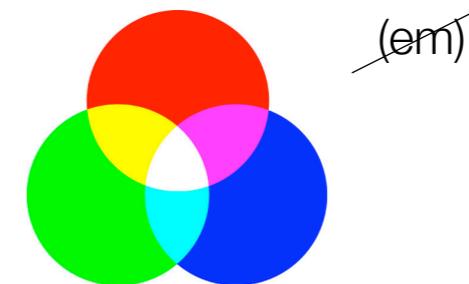
los gluones actúan sobre el "color" de los quarks

(em: carga eléctrica +,-)



**cromodinámica cuántica**

**confinamiento** del color

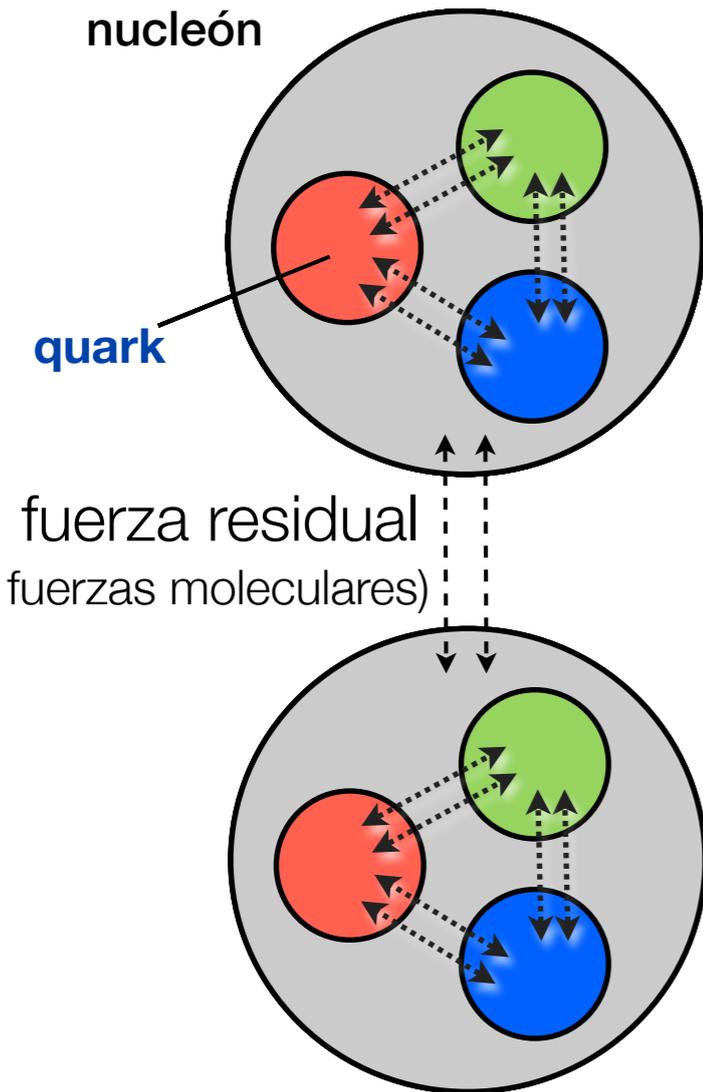


# DENTRO DEL NUCLEON: QUARKS Y GLUONES

protón y neutrón no son partículas elementales

nucleón

quark

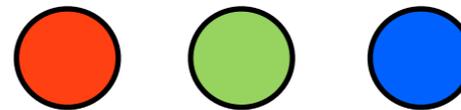


fuerzas nucleares mediadas por **gluones**

(em: fotones)

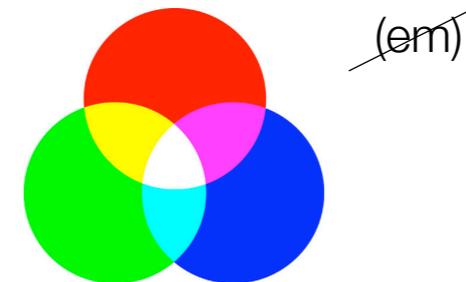
los gluones actúan sobre el “color” de los quarks

(em: carga eléctrica +,-)



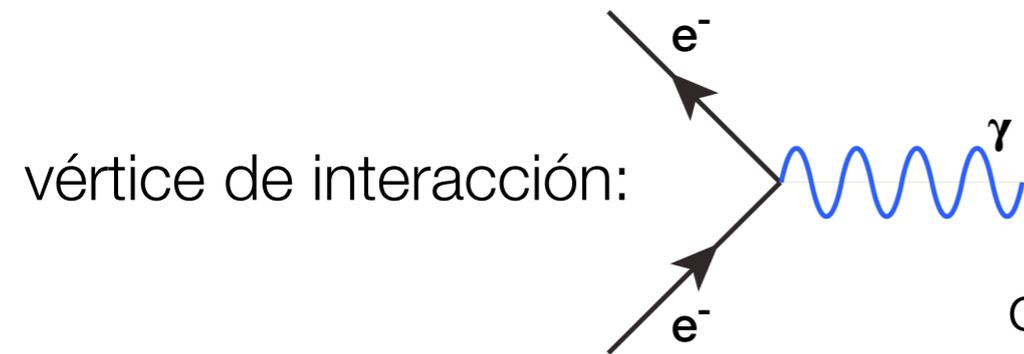
**cromodinámica cuántica**

**confinamiento** del color



# ELECTRODINAMICA: INTERACCION DEBIL

---

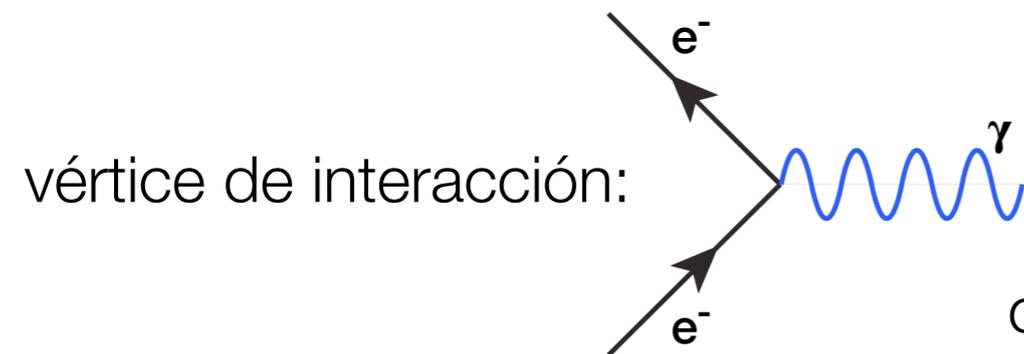


constante de acoplo:

$$\alpha = \frac{1}{137} \ll 1$$

# ELECTRODINAMICA: INTERACCION DEBIL

---



constante de acoplo:

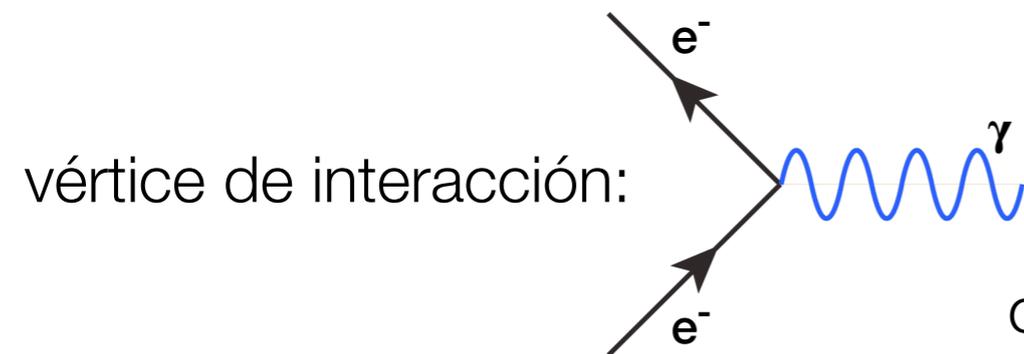
$$\alpha = \frac{1}{137} \ll 1$$

observables se pueden calcular como desviación controlada de  $\alpha = 0$

$$E = E_0 + \alpha E_1 + \alpha^2 E_2 + \dots$$

# ELECTRODINAMICA: INTERACCION DEBIL

---

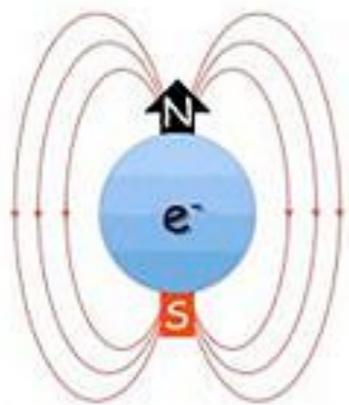


constante de acoplo:

$$\alpha = \frac{1}{137} \ll 1$$

observables se pueden calcular como desviación controlada de  $\alpha = 0$

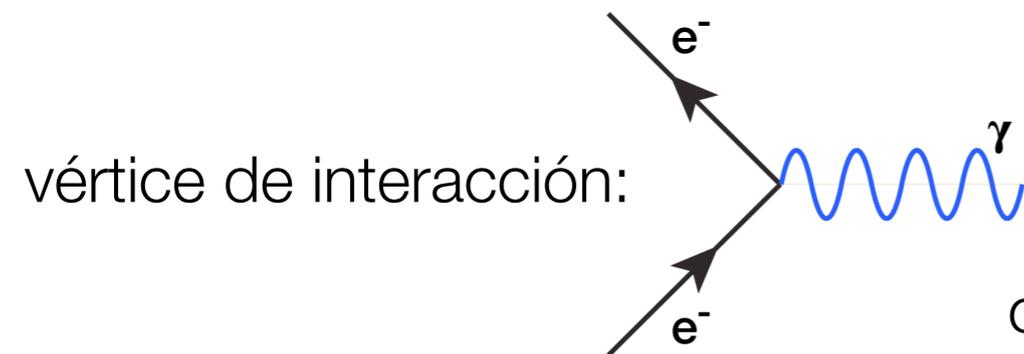
$$E = E_0 + \alpha E_1 + \alpha^2 E_2 + \dots$$



momento magnético del electrón

# ELECTRODINAMICA: INTERACCION DEBIL

---

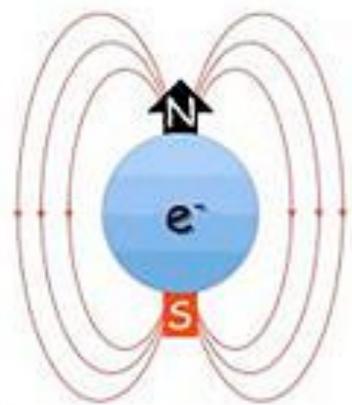


constante de acoplo:

$$\alpha = \frac{1}{137} \ll 1$$

observables se pueden calcular como desviación controlada de  $\alpha = 0$

$$E = E_0 + \alpha E_1 + \alpha^2 E_2 + \dots$$



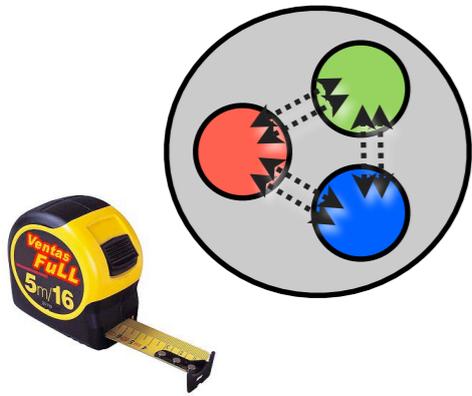
momento magnético del electrón

**predicción verificada  
con la mayor precisión  
de la historia de la física !**

# CROMODINAMICA: INTERACCION FUERTE

---

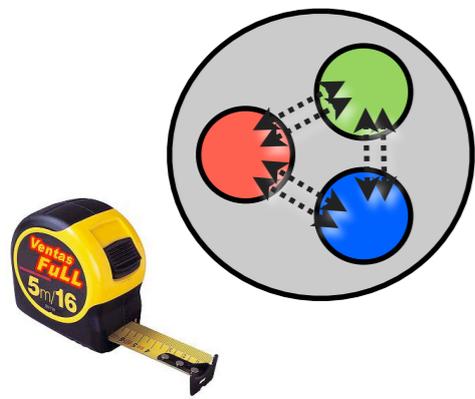
**quarks y gluones:**  $\alpha < 1$  , buena descripción a muy cortas distancias



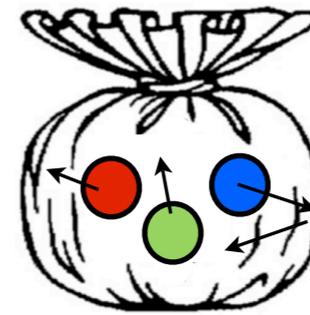
# CROMODINAMICA: INTERACCION FUERTE

---

**quarks y gluones:**  $\alpha < 1$  , buena descripción a muy cortas distancias

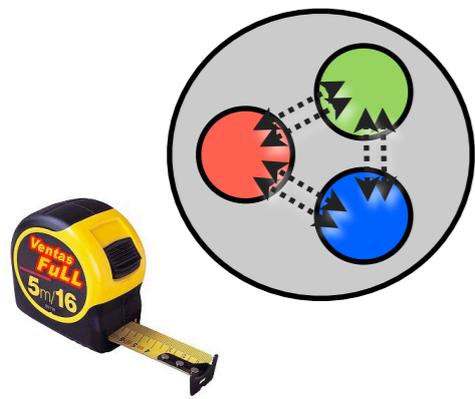


aproximación  $\alpha = 0$  :  
**bag model**

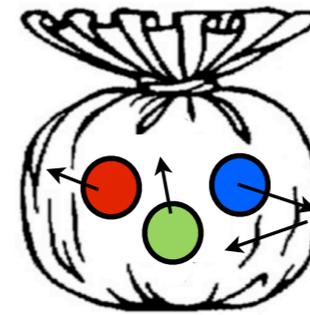


# CROMODINAMICA: INTERACCION FUERTE

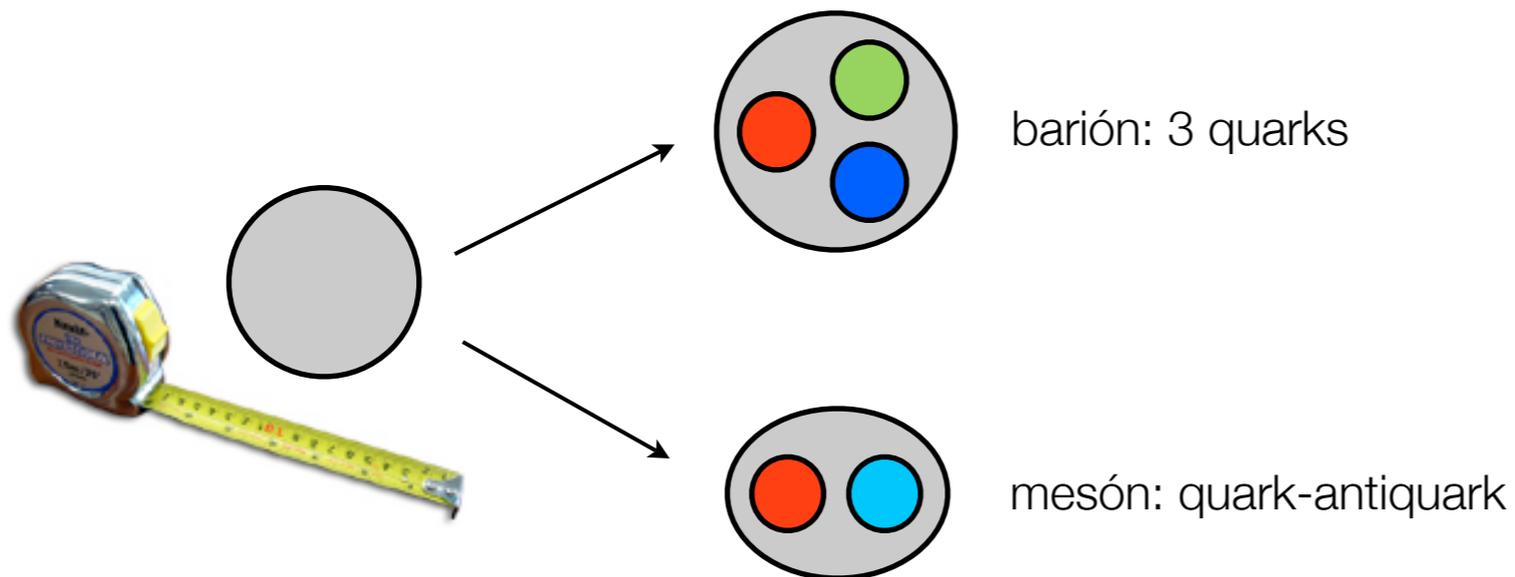
**quarks y gluones:**  $\alpha < 1$  , buena descripción a muy cortas distancias



aproximación  $\alpha = 0$  :  
**bag model**



cuando la distancia aumenta,  $\alpha > 1$  : **hadrones**

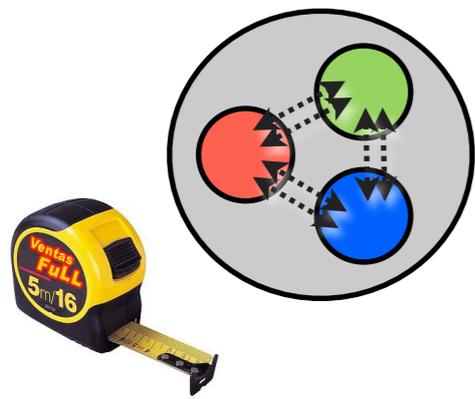


barión: 3 quarks

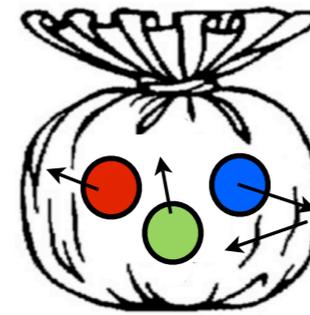
mesón: quark-antiquark

# CROMODINAMICA: INTERACCION FUERTE

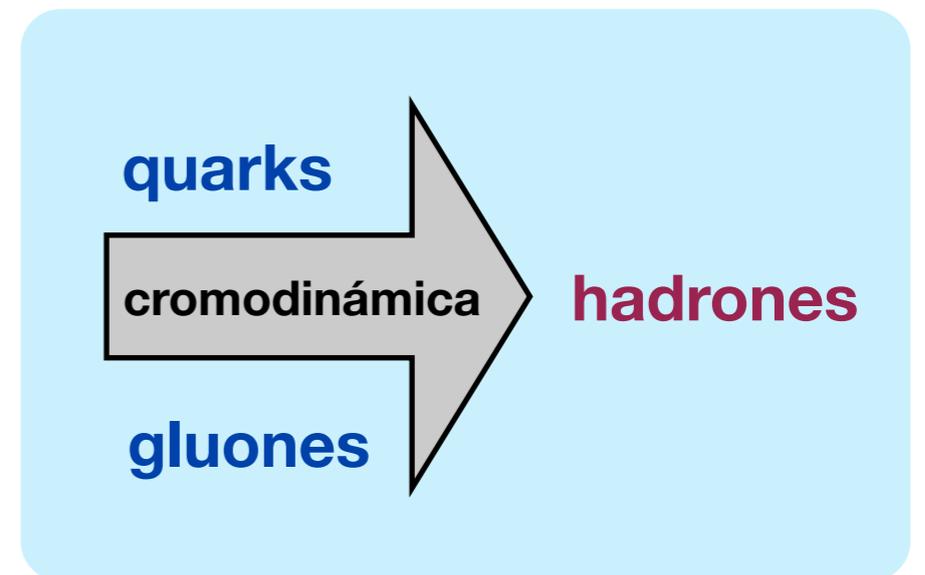
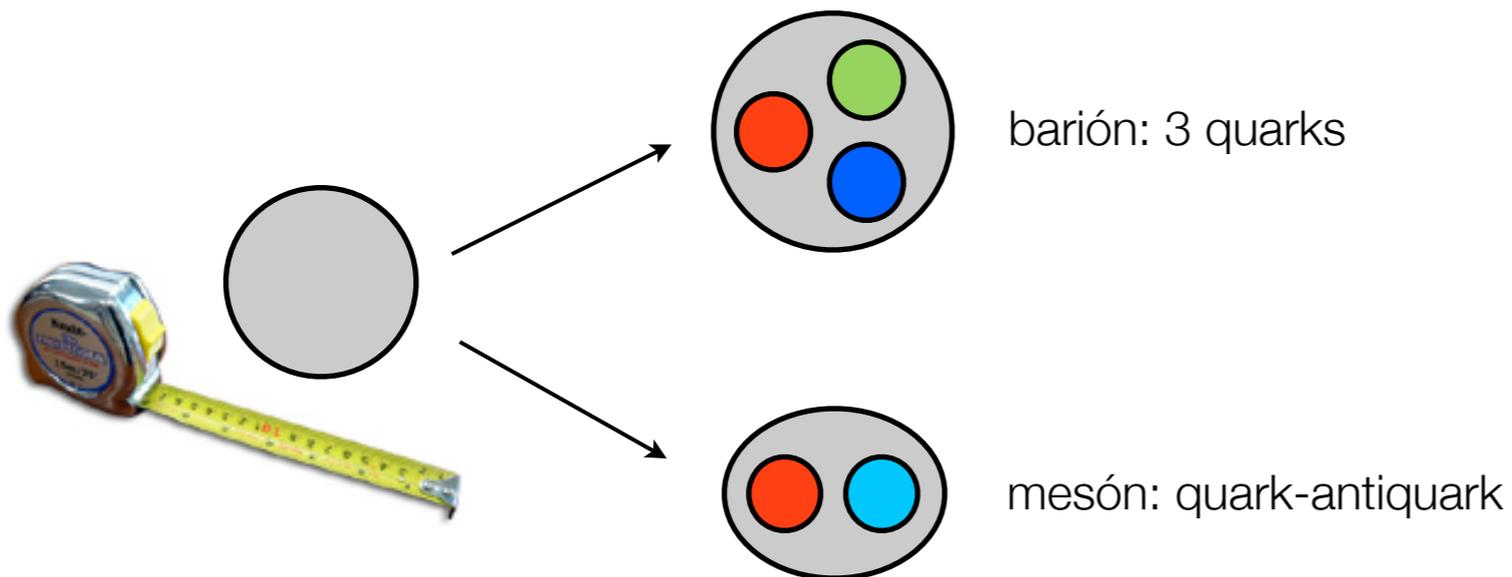
**quarks y gluones:**  $\alpha < 1$  , buena descripción a muy cortas distancias



aproximación  $\alpha = 0$  :  
**bag model**

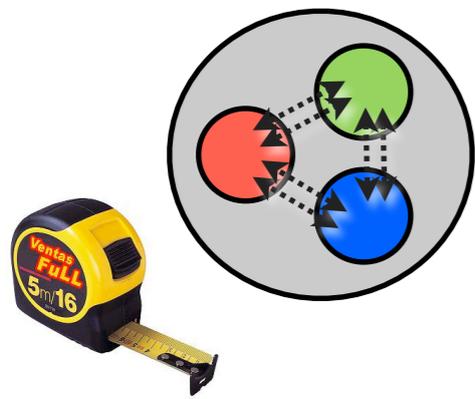


cuando la distancia aumenta,  $\alpha > 1$  : **hadrones**

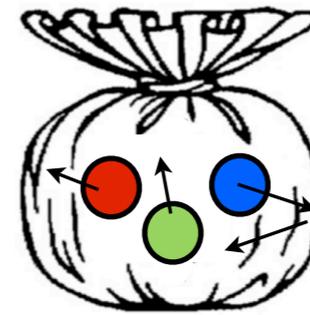


# CROMODINAMICA: INTERACCION FUERTE

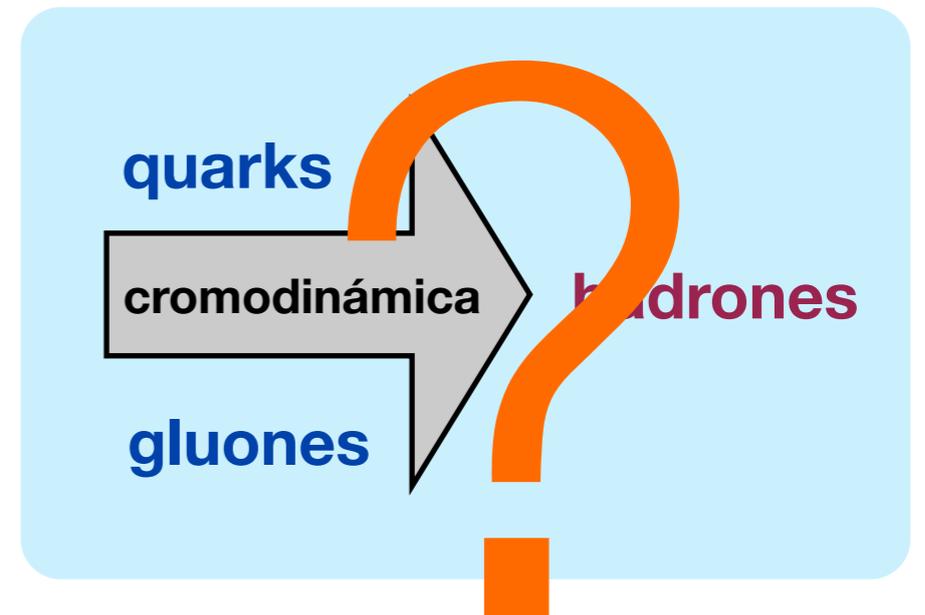
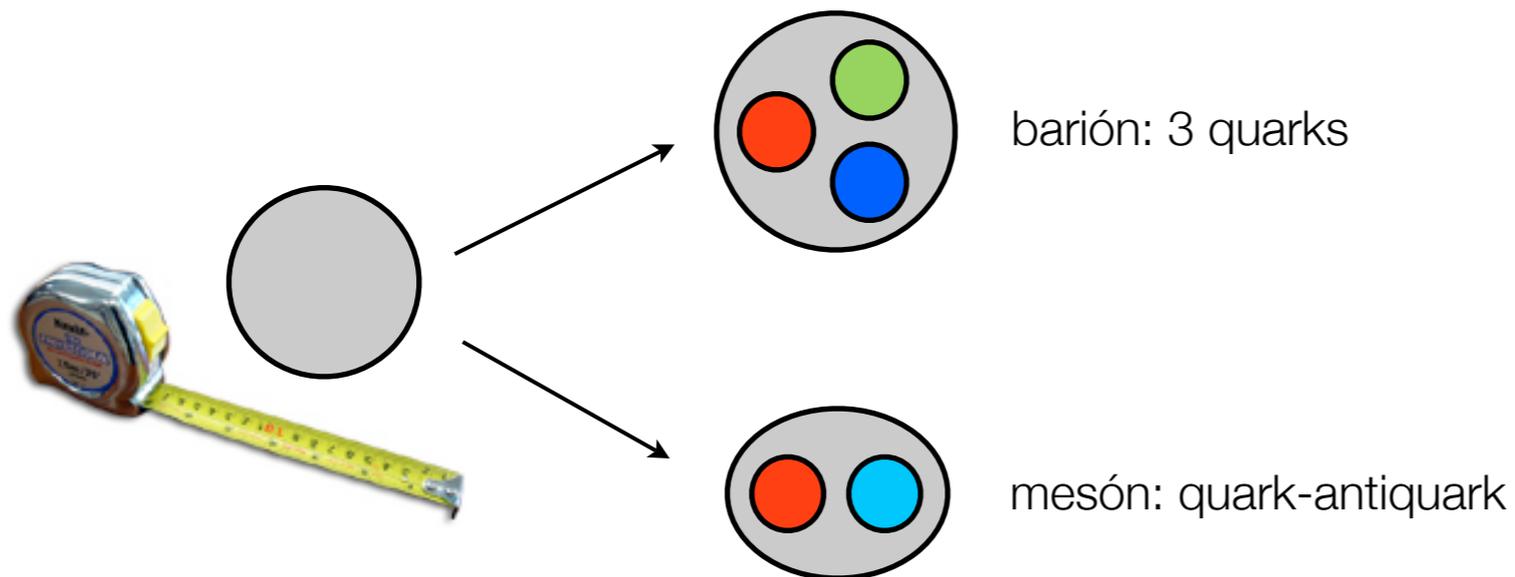
**quarks y gluones:**  $\alpha < 1$  , buena descripción a muy cortas distancias



aproximación  $\alpha = 0$  :  
**bag model**



cuando la distancia aumenta,  $\alpha > 1$  : **hadrones**



# QUE HACER?

---

teorías efectivas para hadrones

cálculos numéricos

**Hay alguna vía alternativa?**

# QUE HACER?

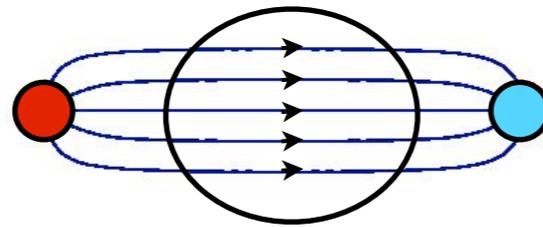
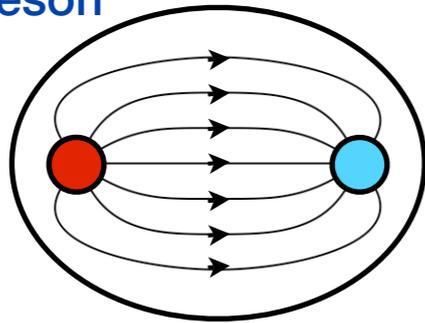
---

teorías efectivas para hadrones

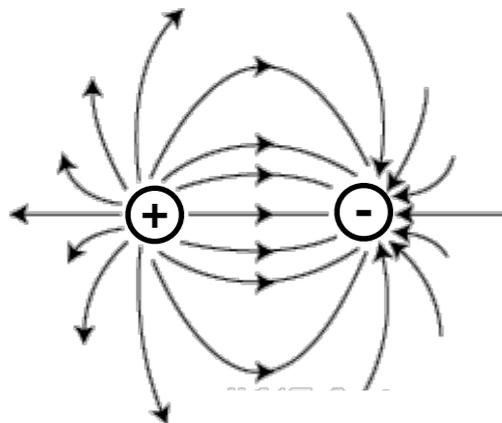
cálculos numéricos

**Hay alguna vía alternativa?**

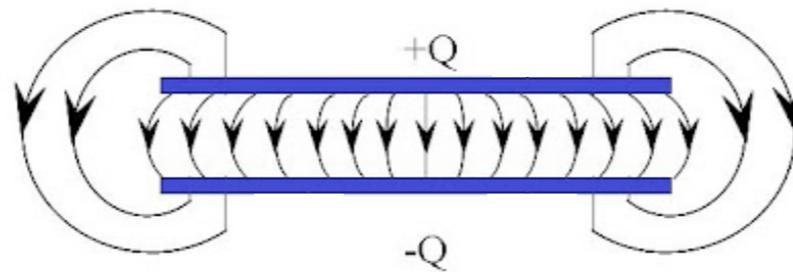
mesón



dipolo eléctrico



condensador



# QUE HACER?

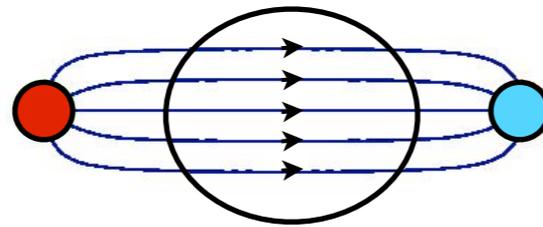
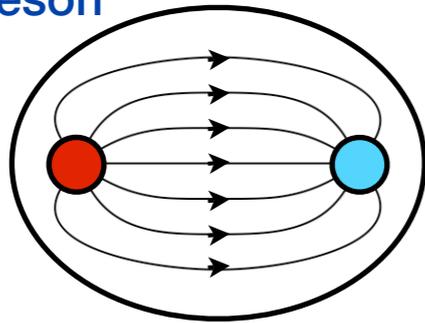
---

teorías efectivas para hadrones

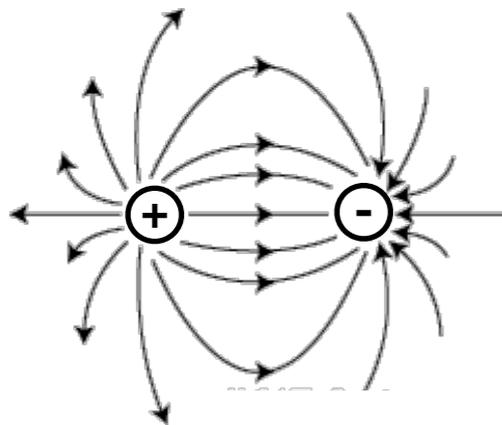
cálculos numéricos

Hay alguna vía alternativa?

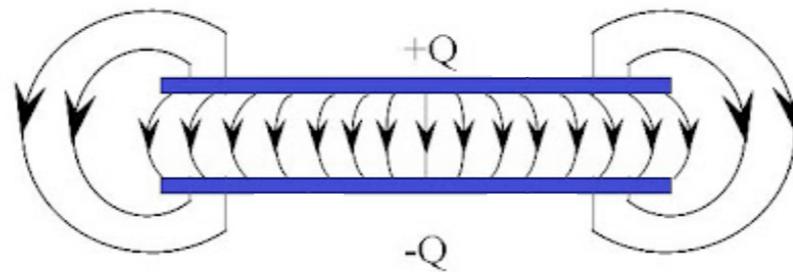
mesón



dipolo eléctrico



condensador



la fuerza entre placas es independiente de su separación

# QUE HACER?

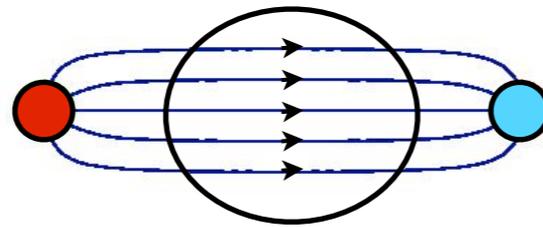
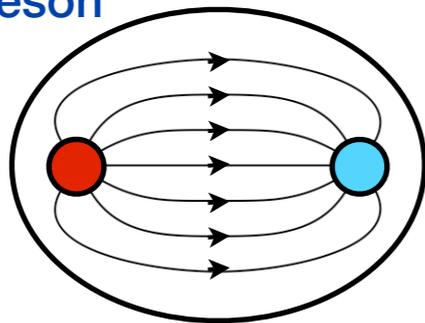
teorías efectivas para hadrones

cálculos numéricos

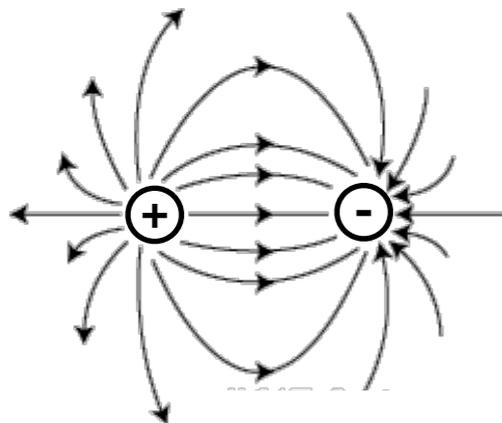
Hay alguna vía alternativa?

descripción efectiva en términos de una cuerda

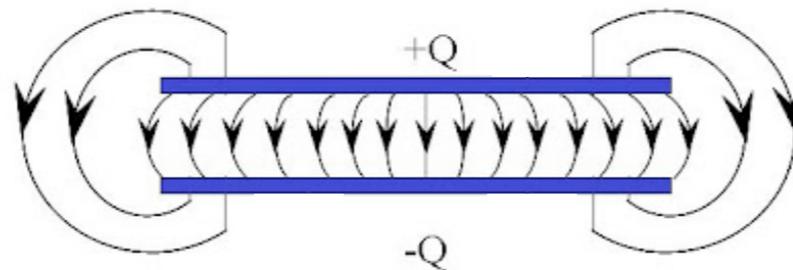
mesón



dipolo eléctrico



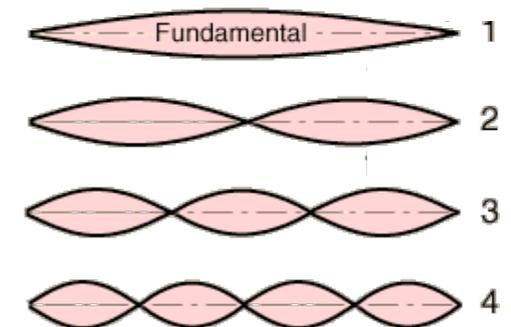
condensador



la fuerza entre placas es independiente de su separación

confinamiento

espectro de mesones



# EL CONCEPTO DE DUALIDAD

---

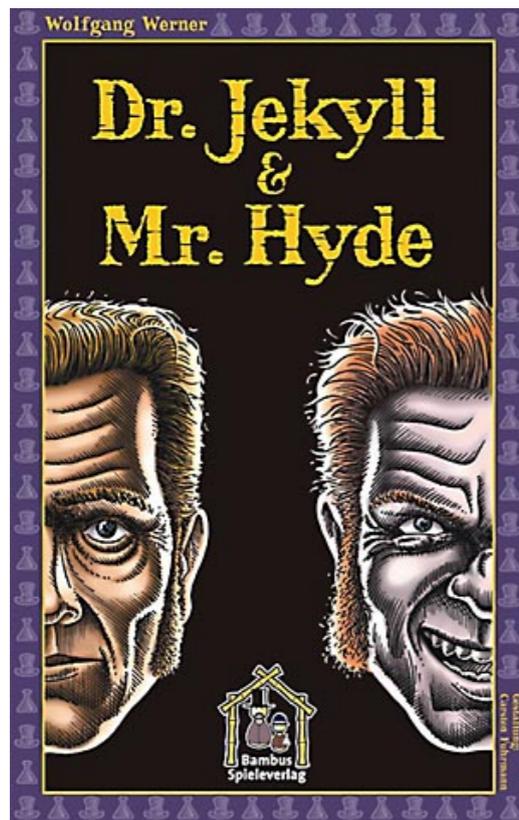
reunión de dos caracteres distintos en una misma persona o cosa

# EL CONCEPTO DE DUALIDAD

---

reunión de dos caracteres distintos en una misma persona o cosa

ejemplo 1:

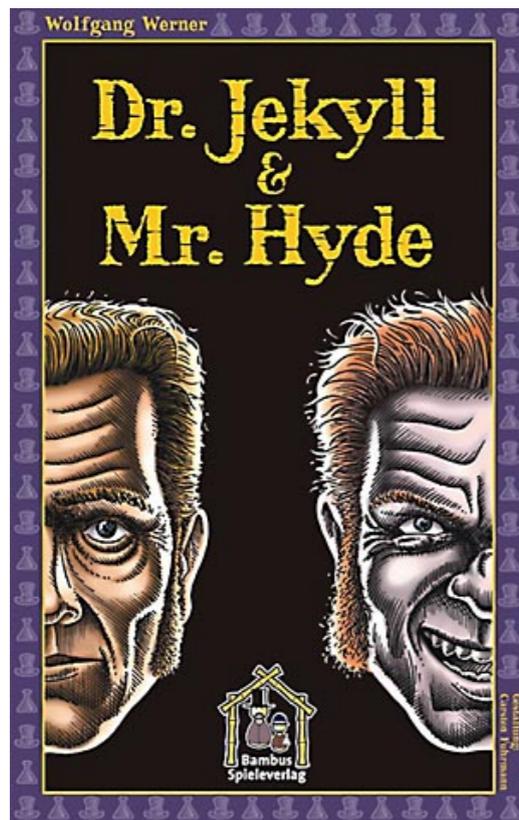


# EL CONCEPTO DE DUALIDAD

---

reunión de dos caracteres distintos en una misma persona o cosa

ejemplo 1:



ejemplo 2:

una misma realidad física admite dos descripciones

quarks y gluones - cuerda

cada una es apropiada en circunstancias diferentes

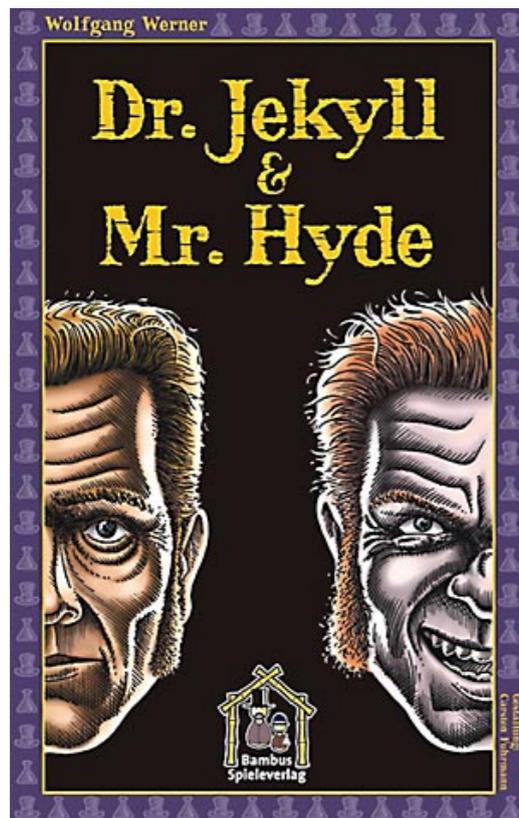
corta distancia - larga distancia

# EL CONCEPTO DE DUALIDAD

---

reunión de dos caracteres distintos en una misma persona o cosa

ejemplo 1:



ejemplo 2:

una misma realidad física admite dos descripciones

quarks y gluones - cuerda

cada una es apropiada en circunstancias diferentes

corta distancia - larga distancia

teoría efectiva

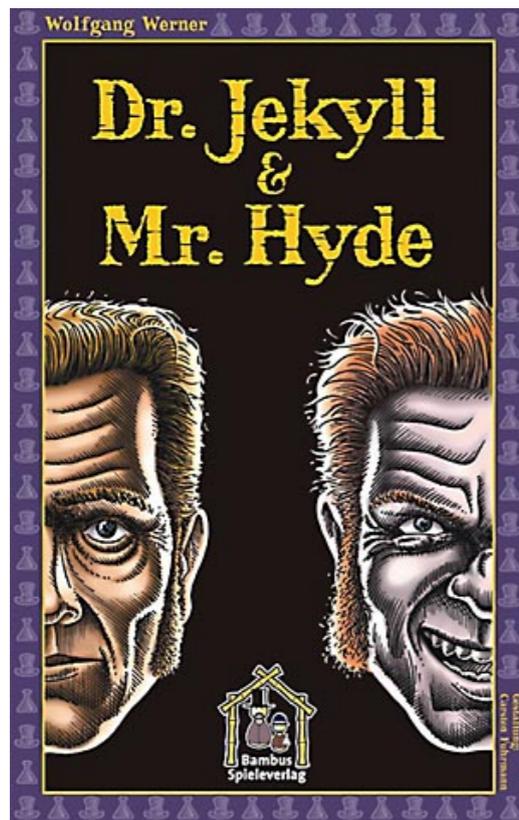
teoría dual

# EL CONCEPTO DE DUALIDAD

---

reunión de dos caracteres distintos en una misma persona o cosa

ejemplo 1:



ejemplo 2:

una misma realidad física admite dos descripciones

quarks y gluones - cuerda

cada una es apropiada en circunstancias diferentes

corta distancia - larga distancia

teoría efectiva

teoría dual

ambas descripciones son completas

# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

---

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

---

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

pilar de muchas teorías

# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

---

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

pilar de muchas teorías



# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

---

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

pilar de muchas teorías

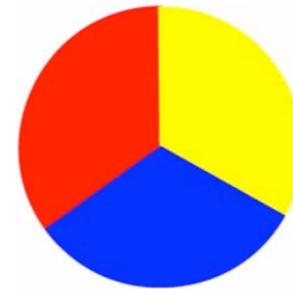


# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

---

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

pilar de muchas teorías



# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

---

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

pilar de muchas teorías



# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

---

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

pilar de muchas teorías

**dualidad**



**cuerda de QCD:** “cuerda fundamental”

# EN BUSCA DE LA CUERDA DUAL

**simetría:** invariancia bajo un grupo de transformaciones  
restringe/explica propiedades de sistemas dinámicos

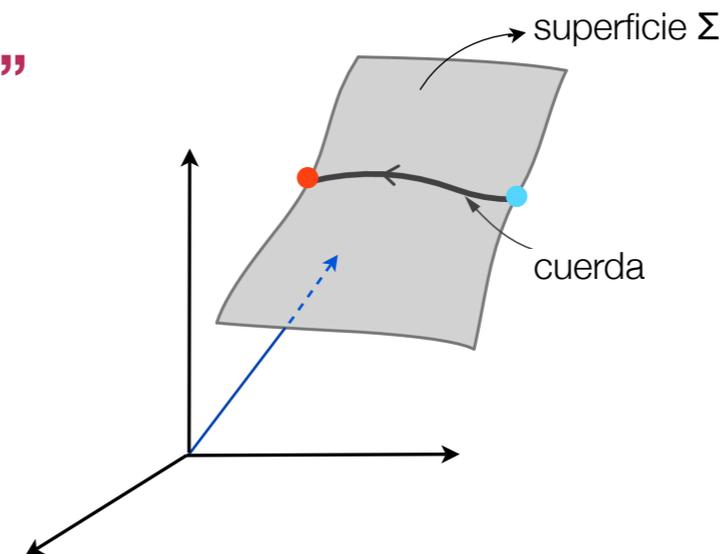
pilar de muchas teorías

**dualidad**



**cuerda de QCD: “cuerda fundamental”**

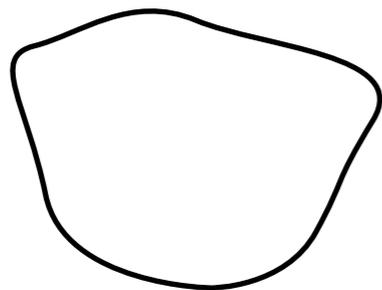
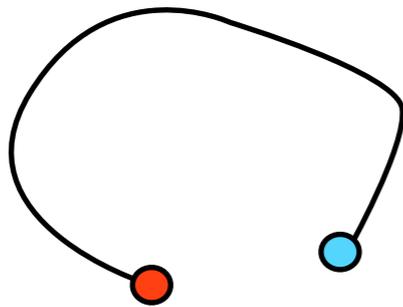
probabilidad de  $\Sigma \propto$  **área**



# PROBLEMAS Y NUEVAS OPORTUNIDADES

---

cuerda abierta

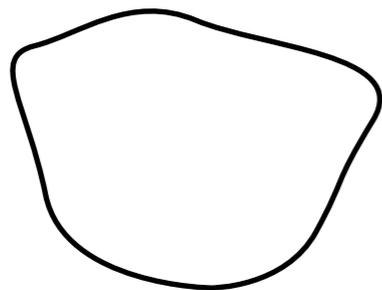
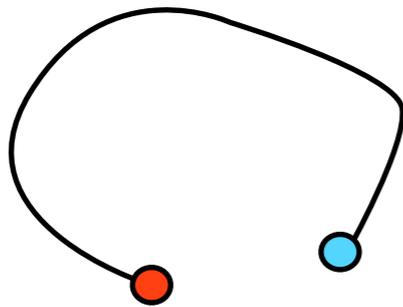


cuerda cerrada

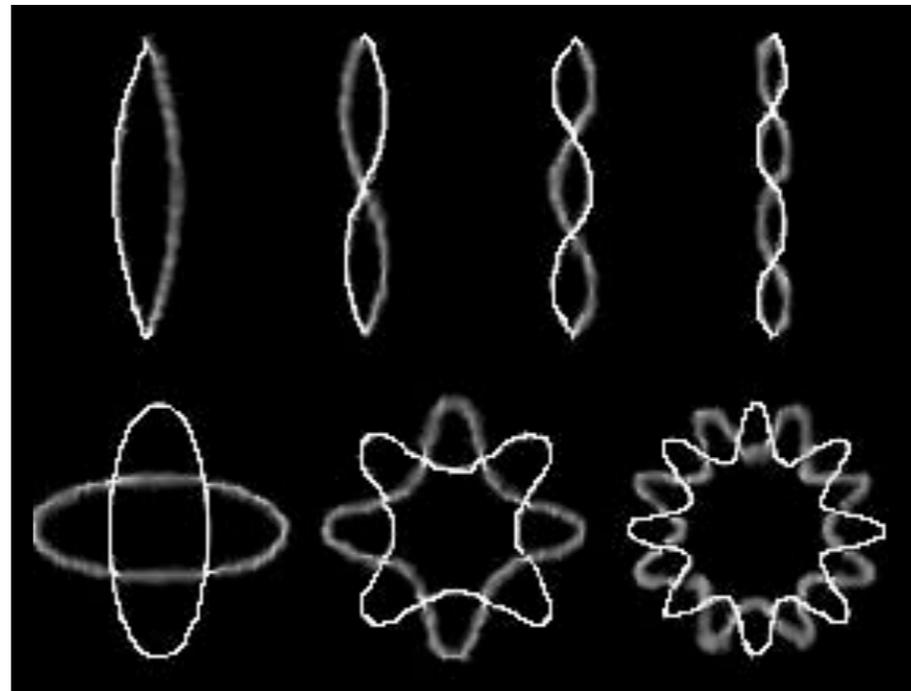
# PROBLEMAS Y NUEVAS OPORTUNIDADES

---

cuerda abierta



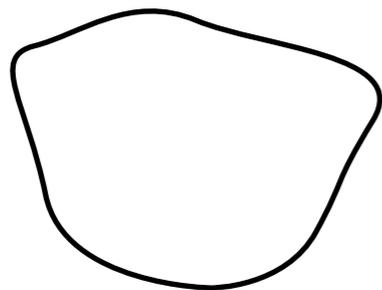
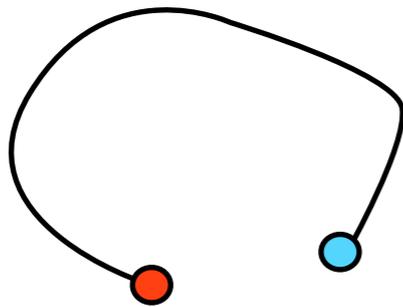
cuerda cerrada



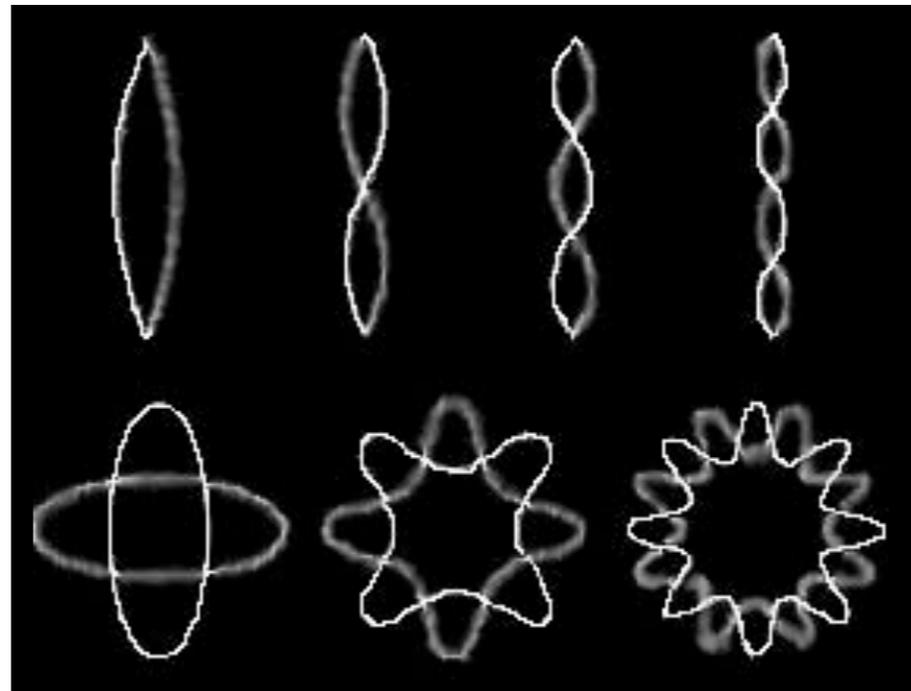
# PROBLEMAS Y NUEVAS OPORTUNIDADES

---

cuerda abierta



cuerda cerrada

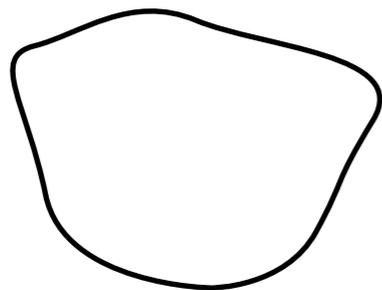
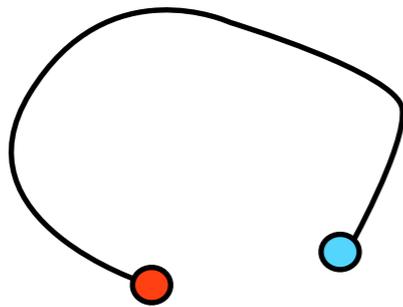


modo fundamental de la cuerda cerrada:

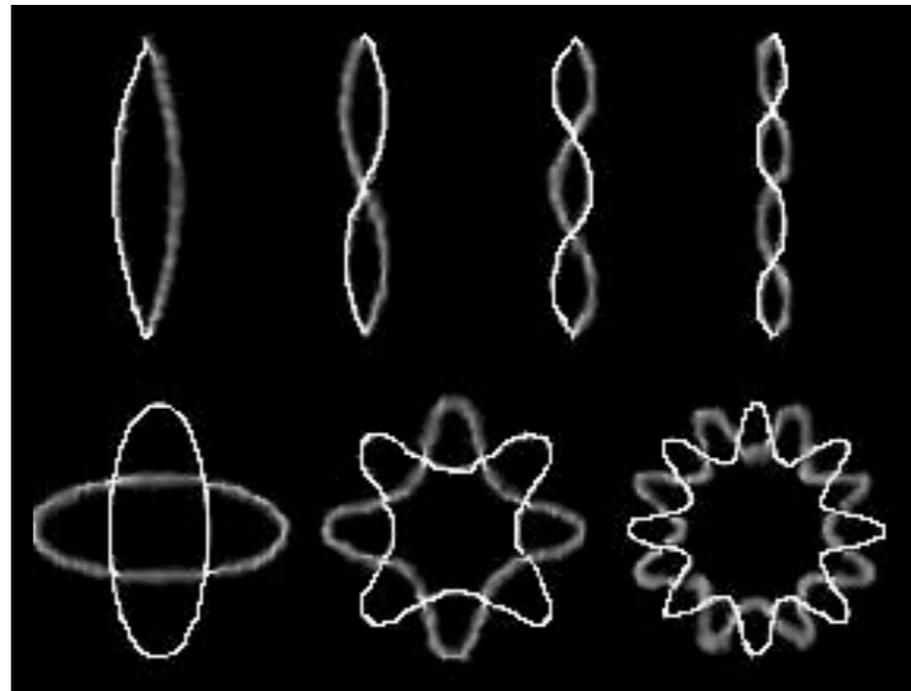
**masa  
cero**

# PROBLEMAS Y NUEVAS OPORTUNIDADES

cuerda abierta



cuerda cerrada



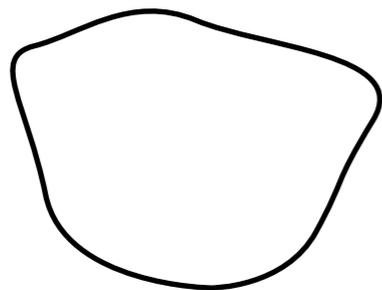
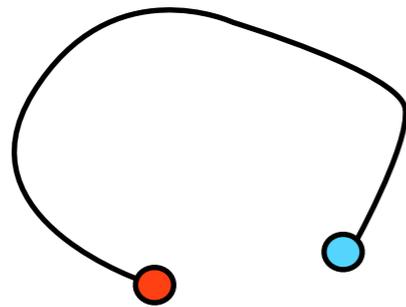
modo fundamental de la cuerda cerrada:

masa  
cero

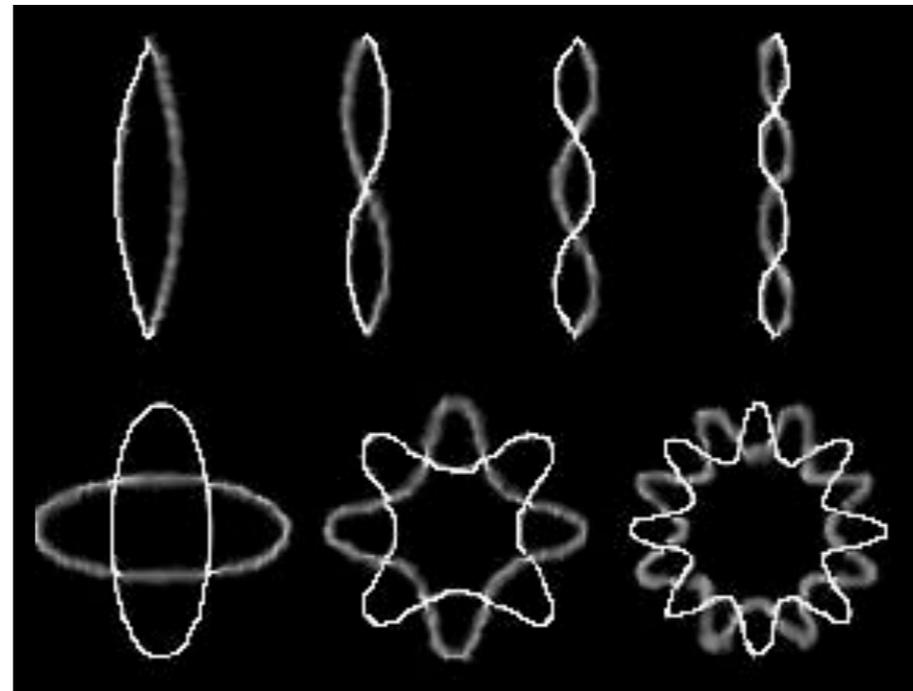


# PROBLEMAS Y NUEVAS OPORTUNIDADES

cuerda abierta



cuerda cerrada



modo fundamental de la cuerda cerrada:

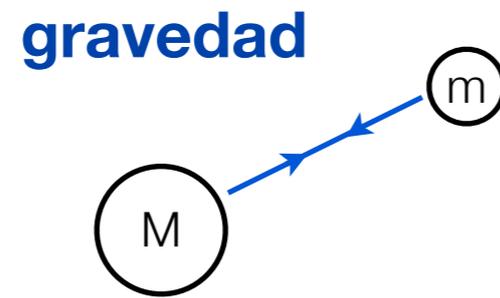
masa  
cero

~~QCD~~

gravedad

# RELATIVIDAD GENERAL

---

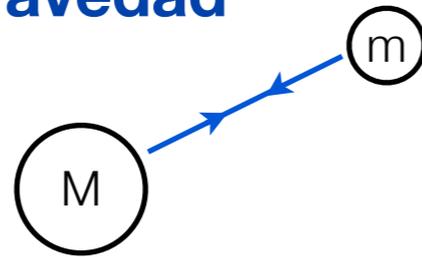


# RELATIVIDAD GENERAL

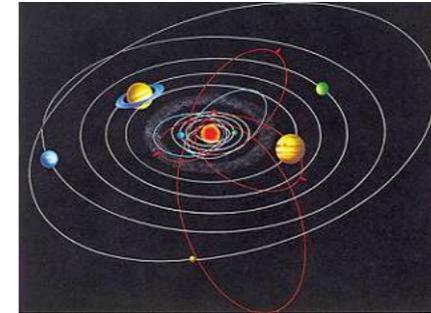
---



gravedad



órbitas de  
los planetas

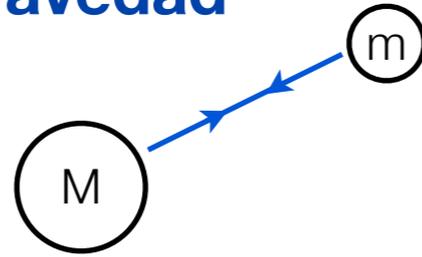


# RELATIVIDAD GENERAL

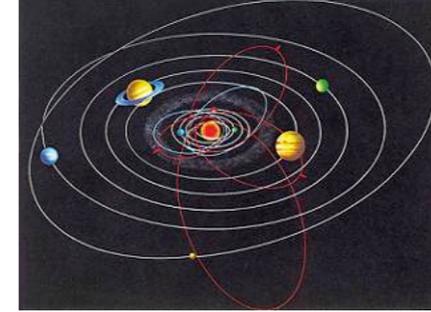
---



**gravedad**



órbitas de  
los planetas



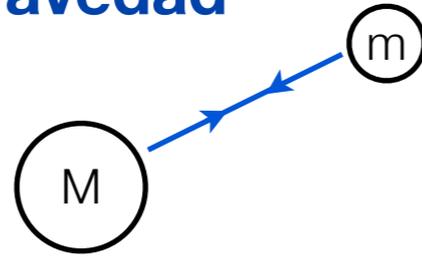
**velocidad de la luz**



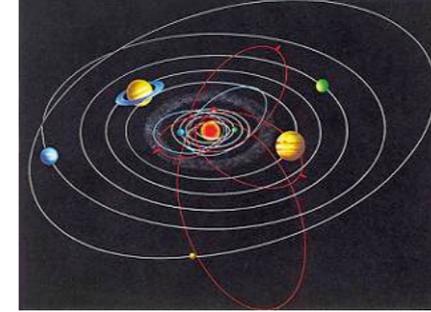
# RELATIVIDAD GENERAL



gravedad



órbitas de los planetas



velocidad de la luz



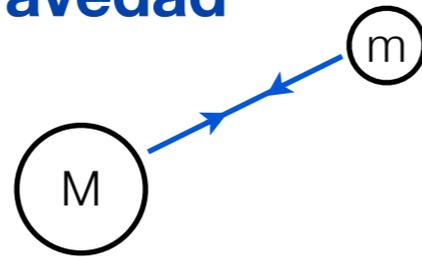
=



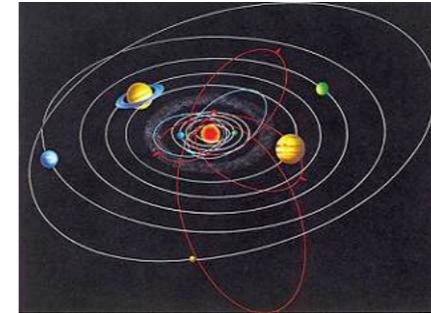
# RELATIVIDAD GENERAL



gravedad



órbitas de los planetas



velocidad de la luz



=

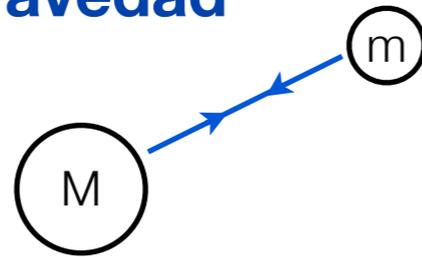


nueva concepción del espacio-tiempo y la gravedad

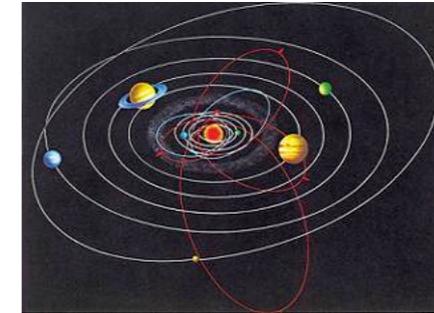
# RELATIVIDAD GENERAL



gravedad



órbitas de los planetas



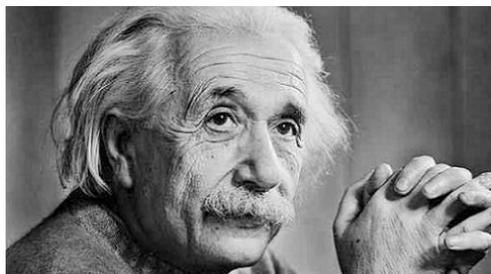
velocidad de la luz



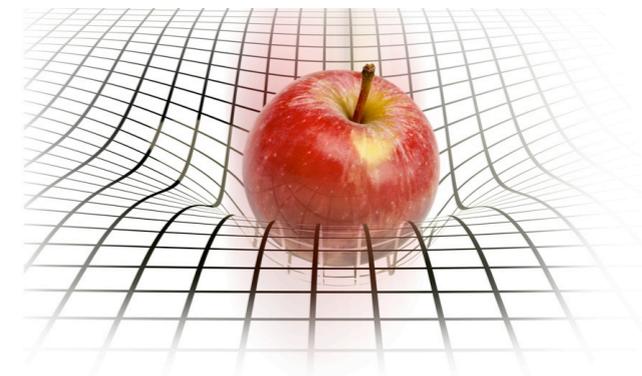
=



nueva concepción del espacio-tiempo y la gravedad



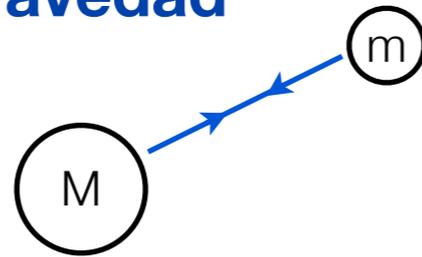
materia y energía actúan sobre el espacio-tiempo



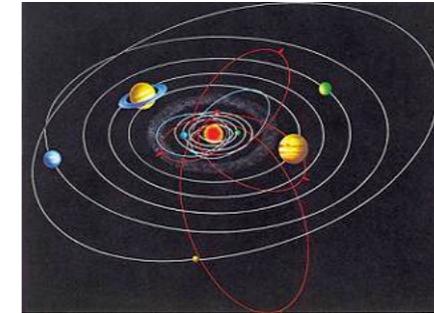
# RELATIVIDAD GENERAL



gravedad



órbitas de los planetas



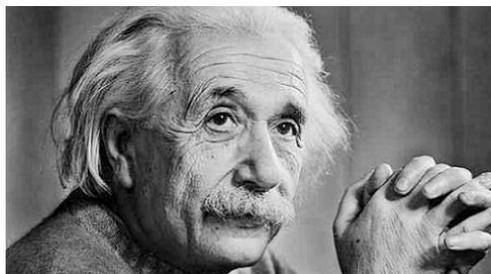
velocidad de la luz



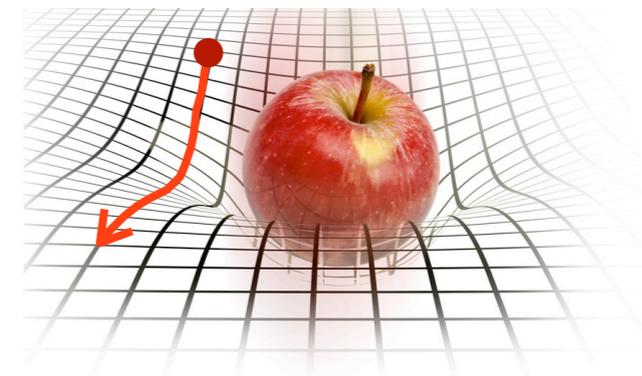
=



nueva concepción del espacio-tiempo y la gravedad

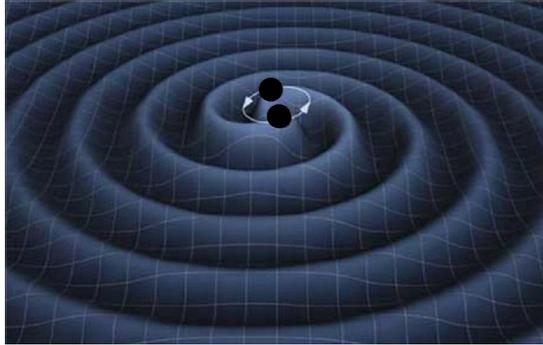


materia y energía actúan sobre el espacio-tiempo



# GRAVEDAD + CUANTICA: PROBLEMAS

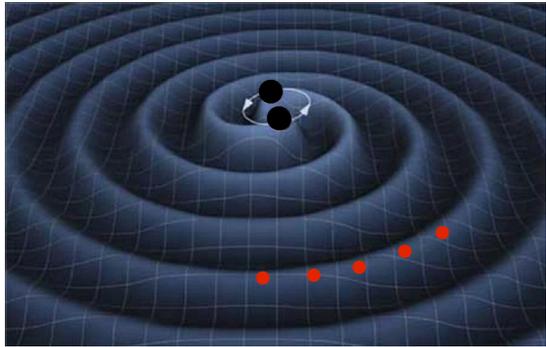
---



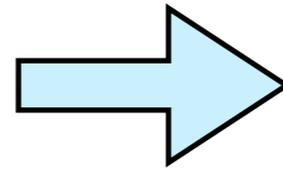
ondas gravitatorias

# GRAVEDAD + CUANTICA: PROBLEMAS

---

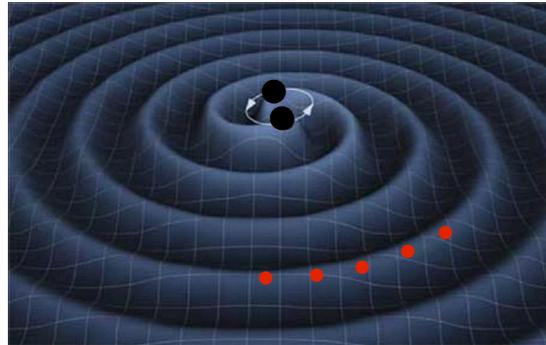


ondas gravitatorias + mecánica cuántica

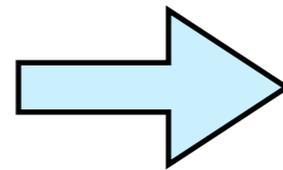


**gravitón**

# GRAVEDAD + CUANTICA: PROBLEMAS

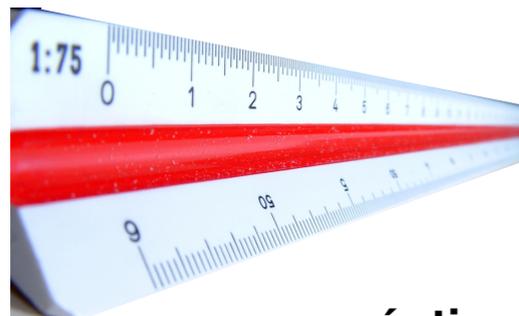


ondas gravitatorias + mecánica cuántica



**gravitón**

quarks y gluones (acoplo **débil**)



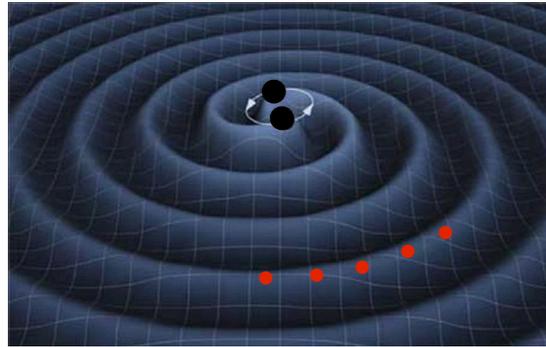
hadrones  
**(fuerte)**

big-bang  
agujeros negros **(fuerte)**

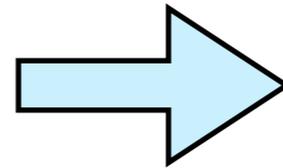


sistema solar  
**(débil)**

# GRAVEDAD + CUANTICA: PROBLEMAS

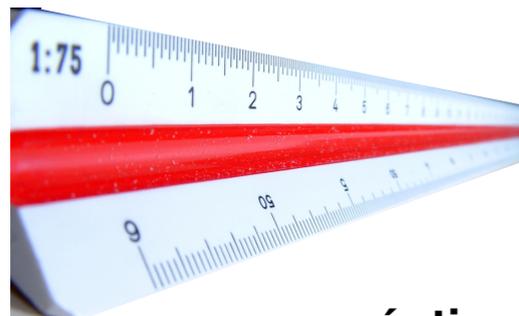


ondas gravitatorias + mecánica cuántica



**gravitón**

quarks y gluones (acoplo débil)



**cuántico**

hadrones  
(fuerte)

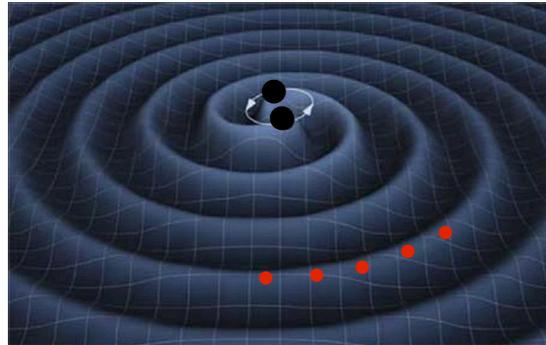
big-bang  
agujeros negros (divergente!)



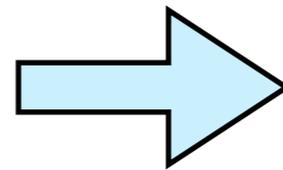
**clásico**

sistema solar  
(débil)

# GRAVEDAD + CUANTICA: PROBLEMAS



ondas gravitatorias + mecánica cuántica



**gravitón**

quarks y gluones (acoplo débil)



**cuántico**

hadrones  
(fuerte)

big-bang  
agujeros negros (divergente!)



**clásico**

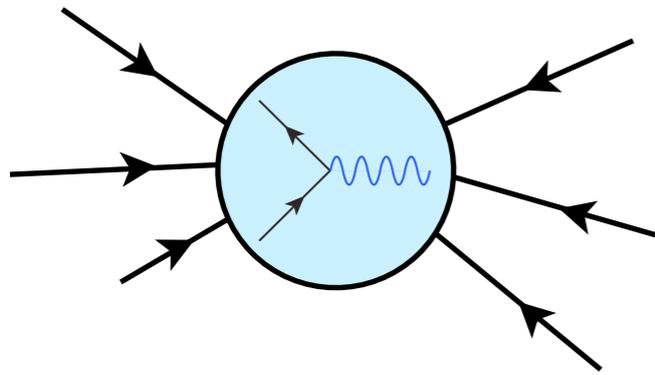
sistema solar  
(débil)

es relatividad general completa a nivel cuántico?

# TEORIA DE CUERDAS

---

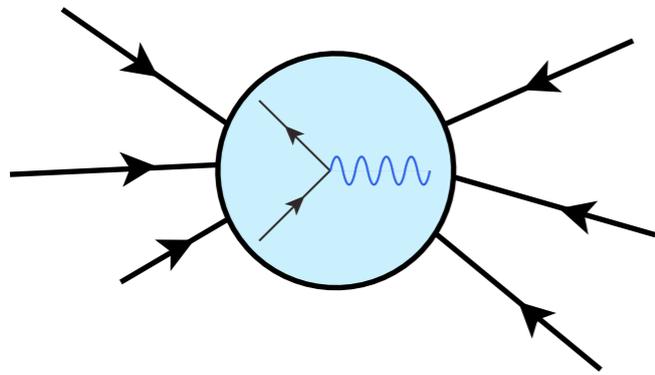
posibles problemas a cortas  
distancias



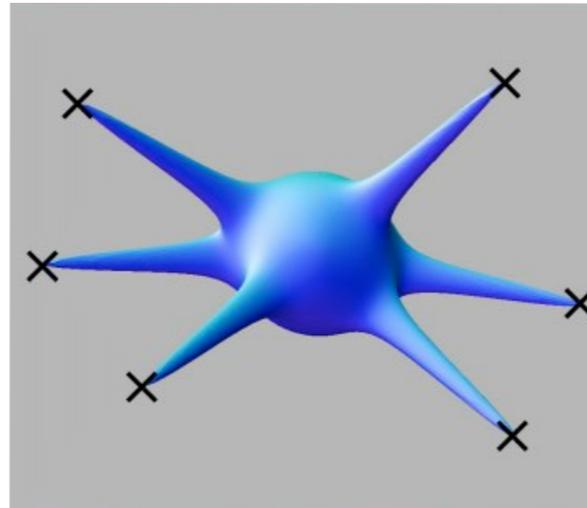
# TEORIA DE CUERDAS

---

posibles problemas a cortas  
distancias

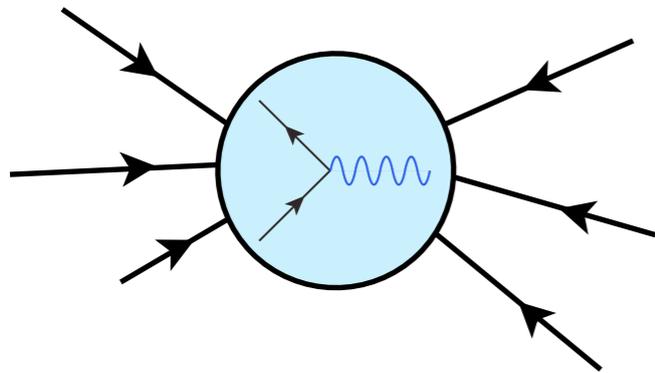


comportamiento suave a corta distancia

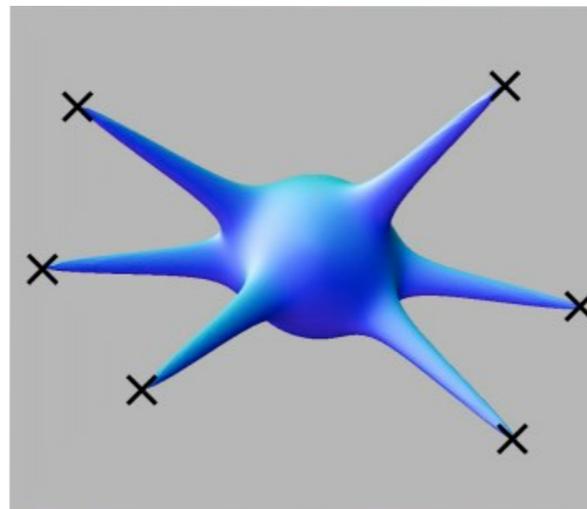


# TEORIA DE CUERDAS

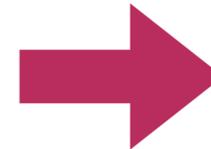
posibles problemas a cortas distancias



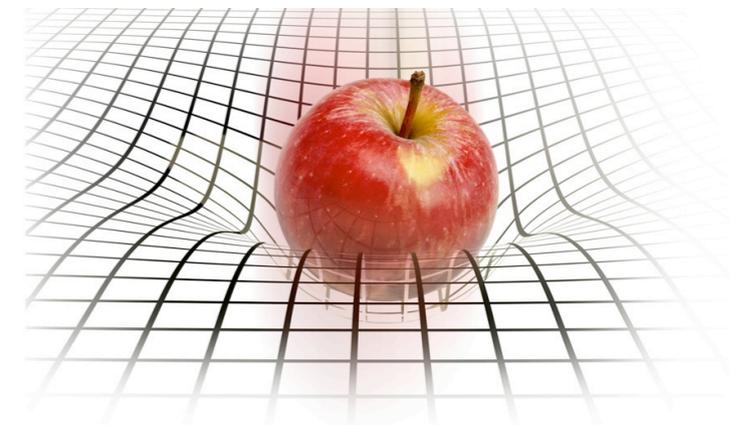
comportamiento suave a corta distancia



**cuerdas cerradas + mecánica cuántica**



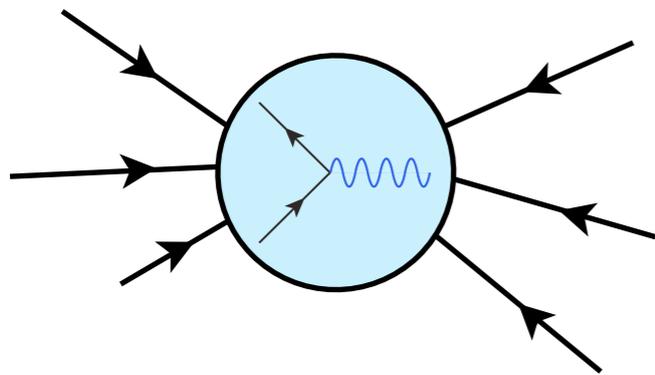
larga distancia:



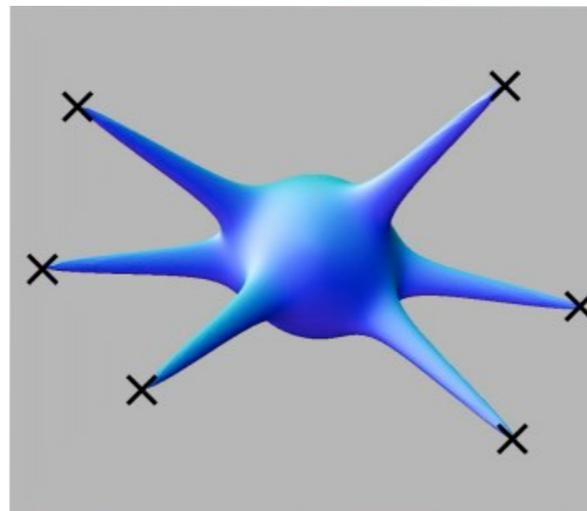
**relatividad general**

# TEORIA DE CUERDAS

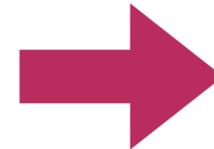
posibles problemas a cortas distancias



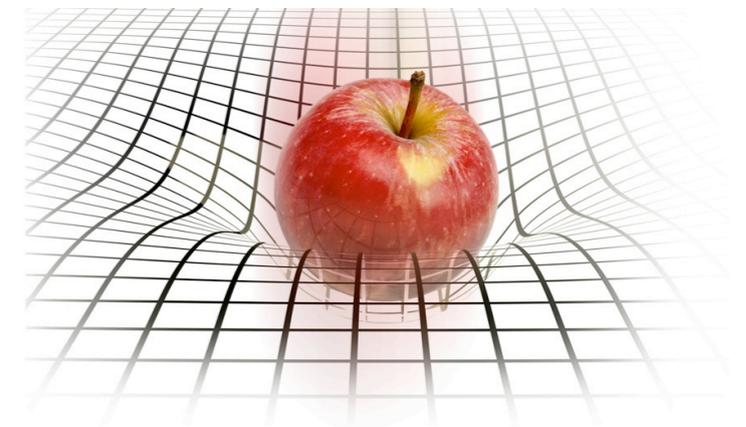
comportamiento suave a corta distancia



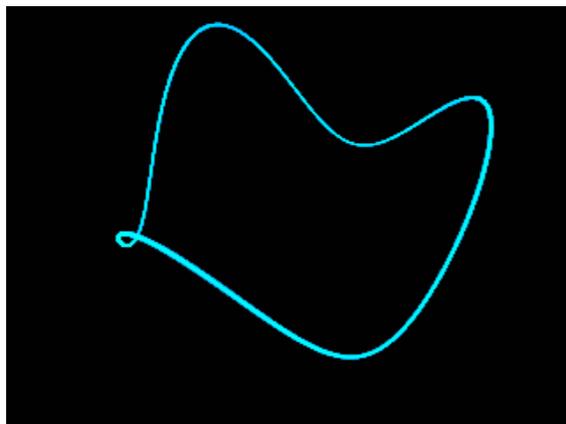
cuerdas cerradas + mecánica cuántica



larga distancia:

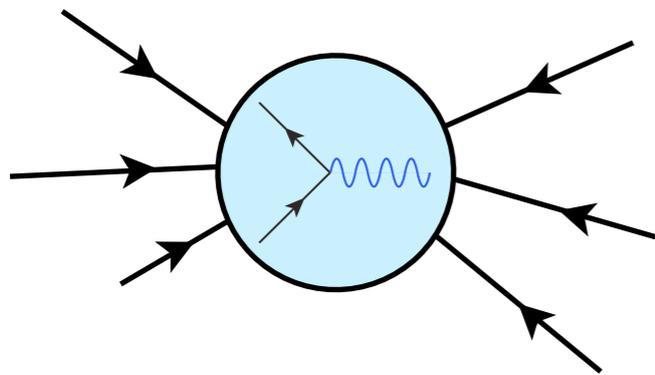


relatividad general

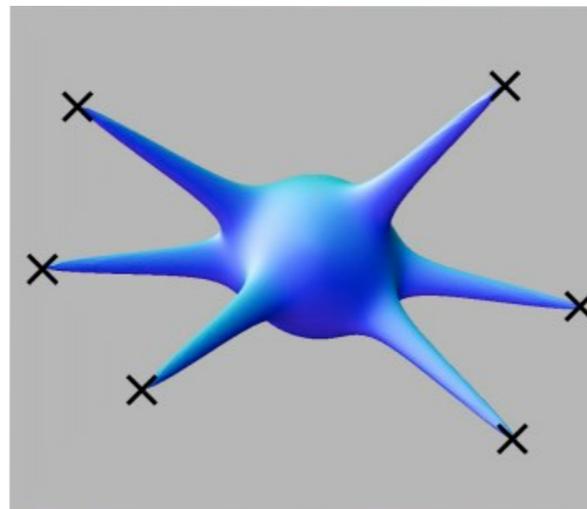


# TEORIA DE CUERDAS

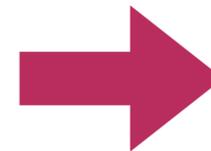
posibles problemas a cortas distancias



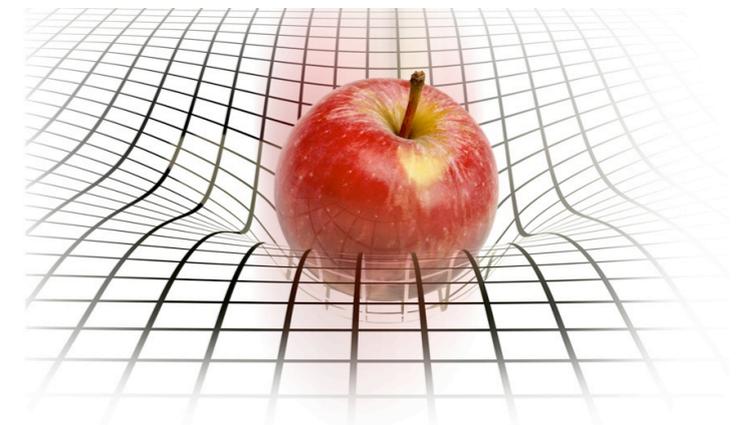
comportamiento suave a corta distancia



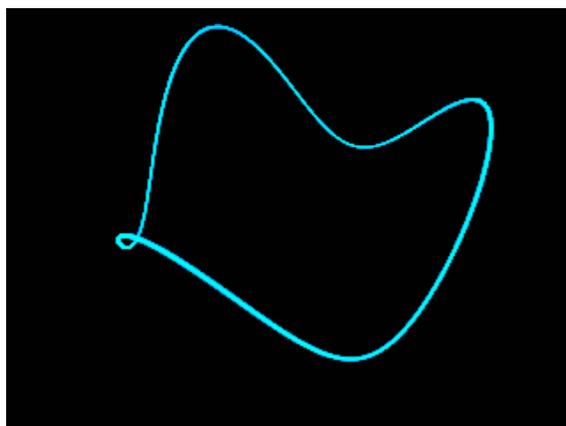
cuerdas cerradas + mecánica cuántica



larga distancia:



**relatividad general**



modo fundamental:  
**gravitón**

PRIMERA PARTE DEL VIAJE:

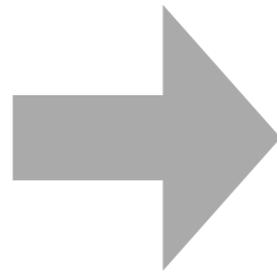
OK!

---

PRIMERA PARTE DEL VIAJE:  
OK!

---

de las partículas



a las cuerdas

# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

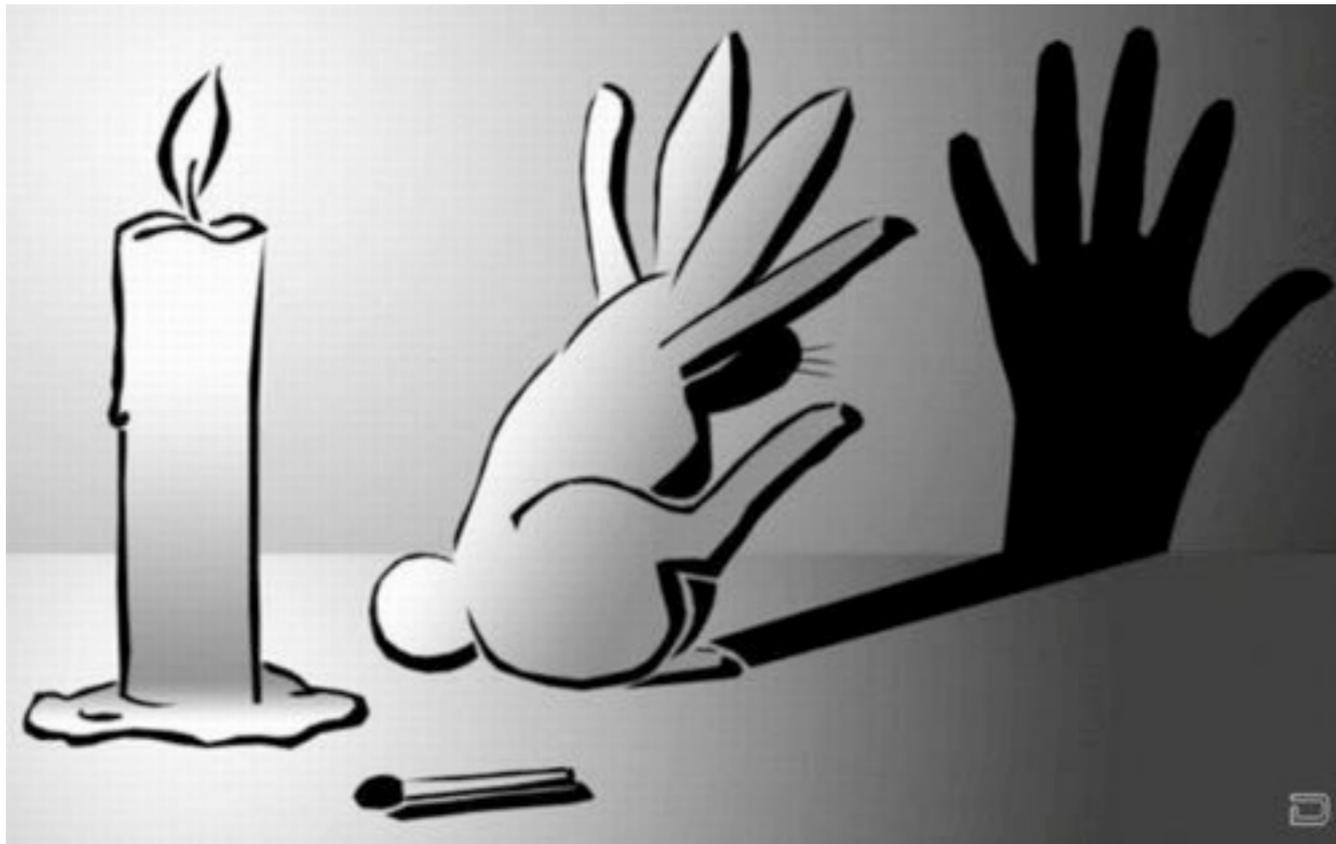
**y la cuerda de QCD?**

# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

**y la cuerda de QCD?**

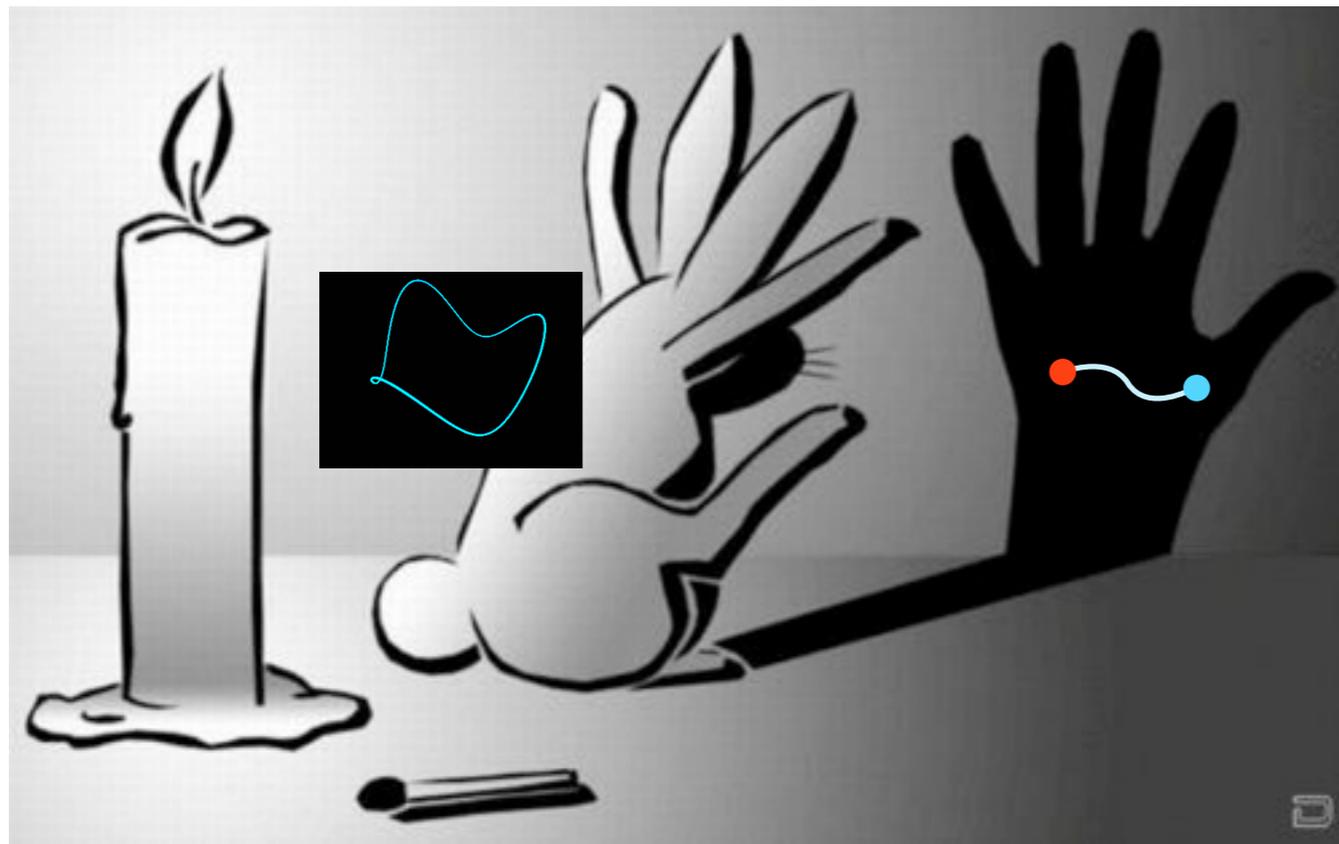


# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

y la cuerda de QCD?

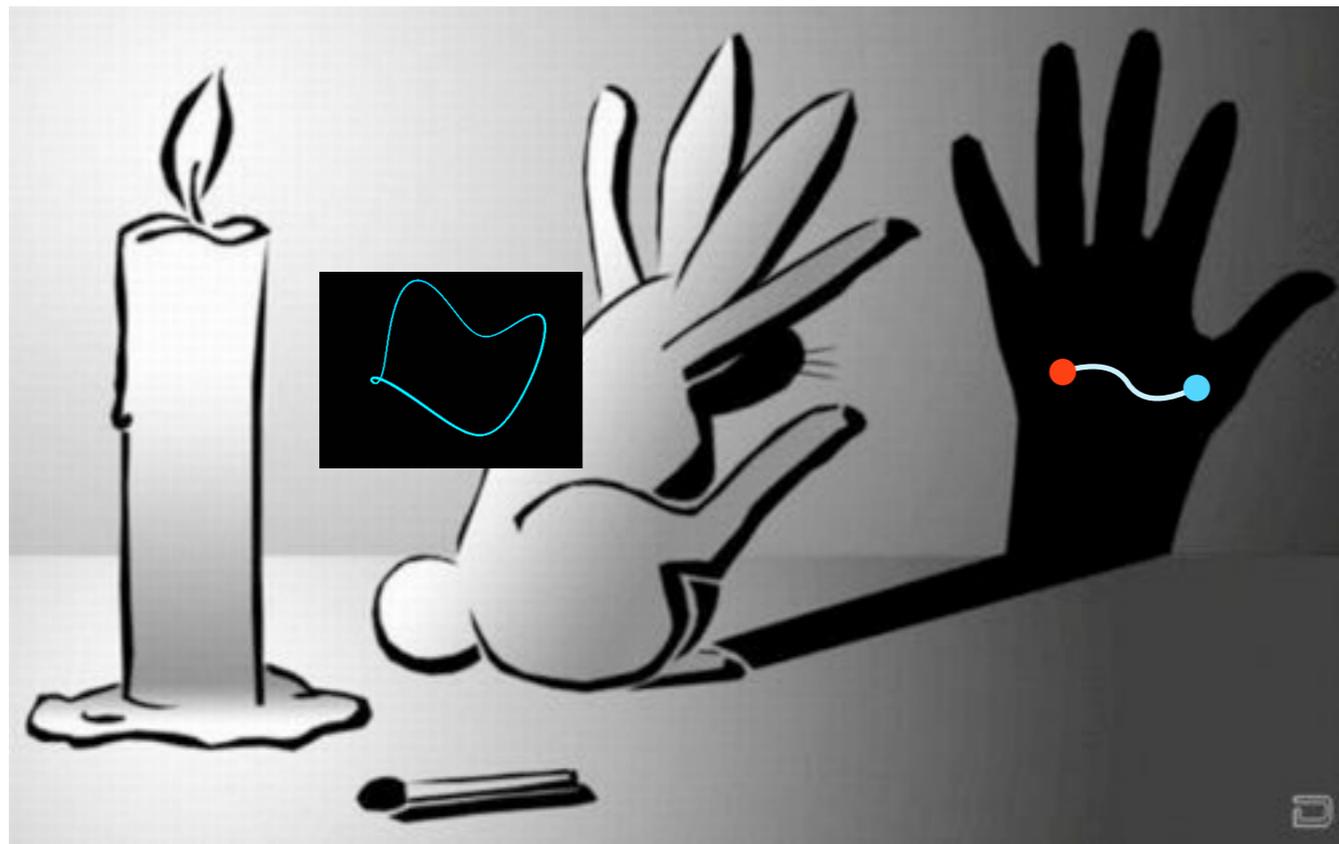


# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

**y la cuerda de QCD?**



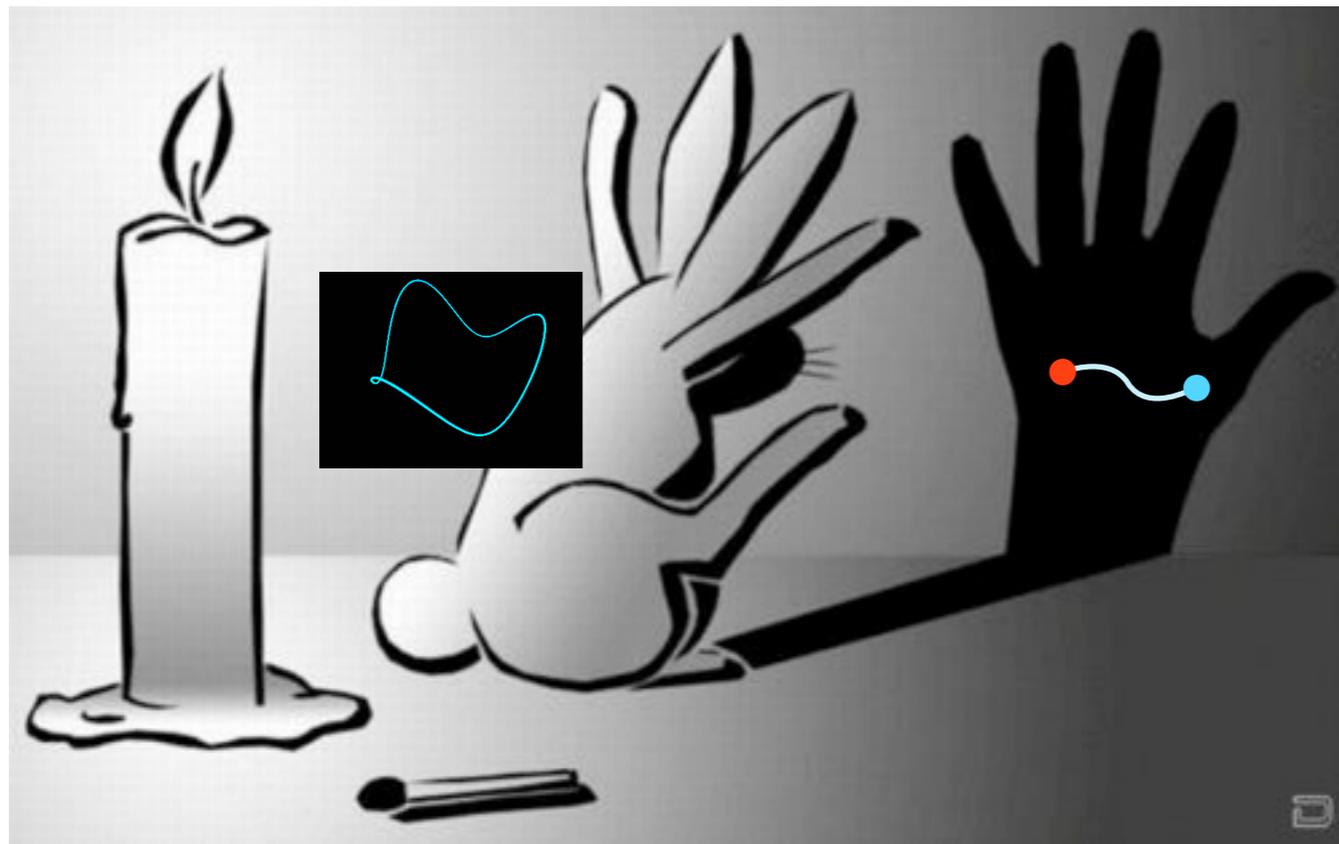
la cuerda dual describe gravedad, pero se propaga en un espacio-tiempo distinto

# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

**y la cuerda de QCD?**



la cuerda dual describe  
gravedad, pero se propaga  
en un espacio-tiempo distinto

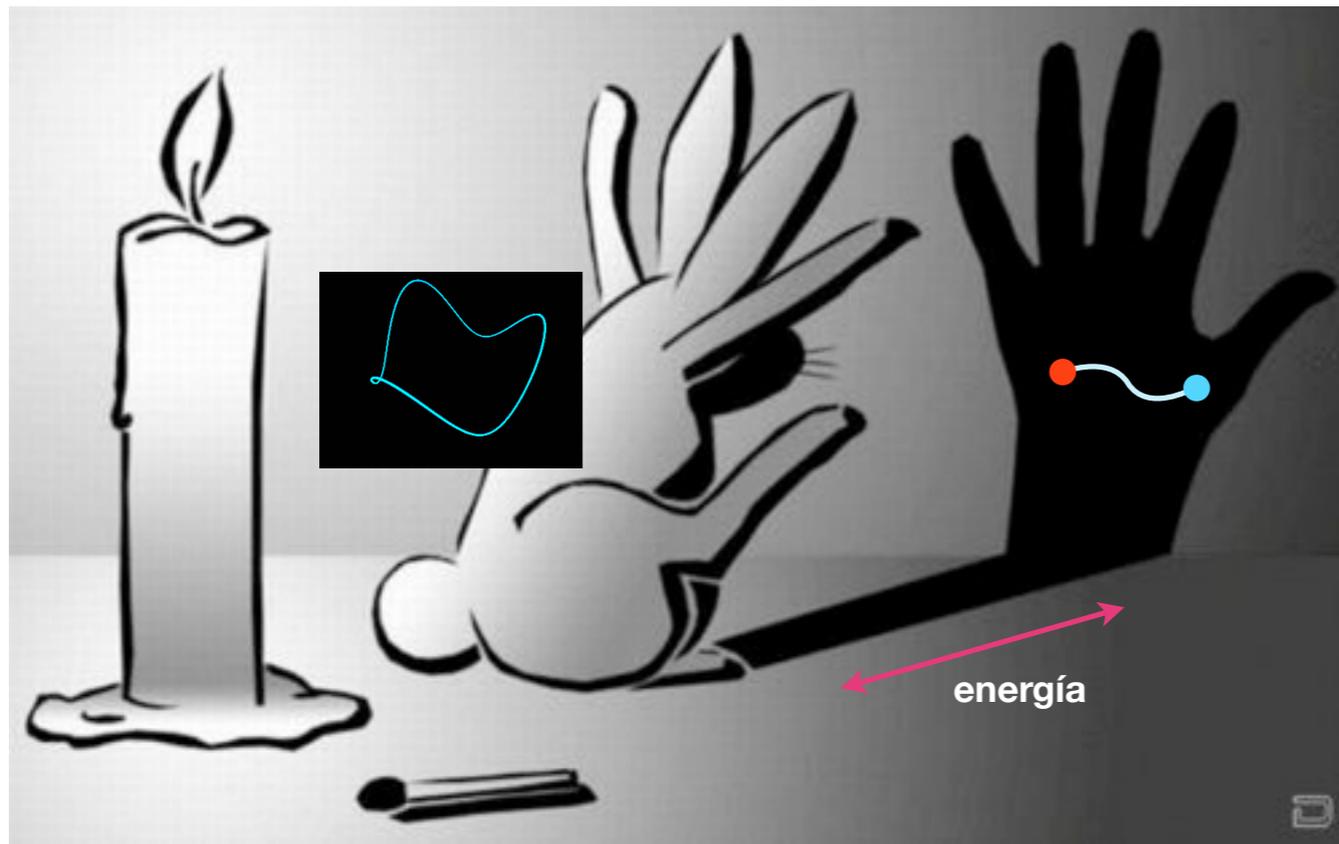
**de dimensión mayor**

# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

**y la cuerda de QCD?**



la cuerda dual describe gravedad, pero se propaga en un espacio-tiempo distinto

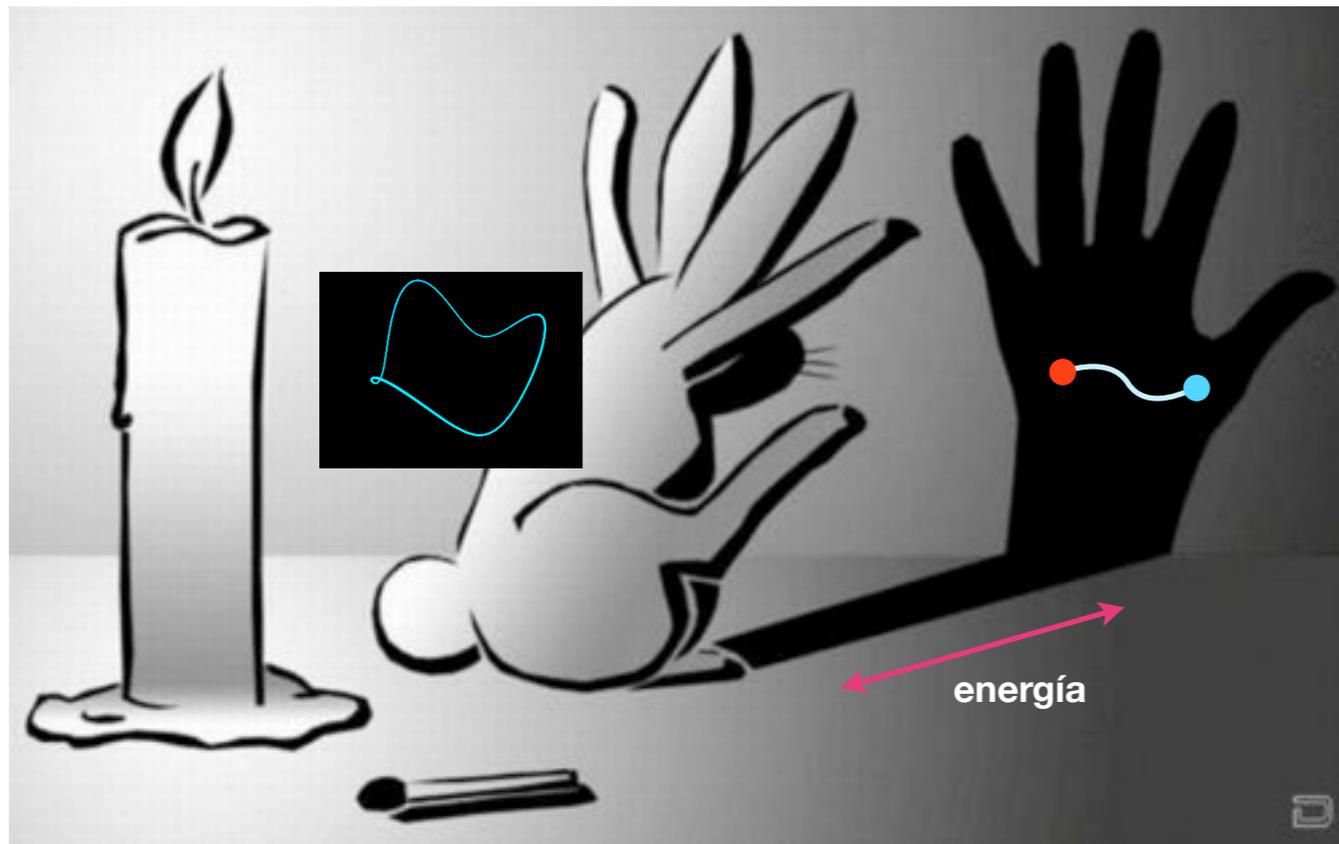
**de dimensión mayor**

# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

y la cuerda de QCD?



la cuerda **dual** describe gravedad, pero se propaga en un espacio-tiempo distinto

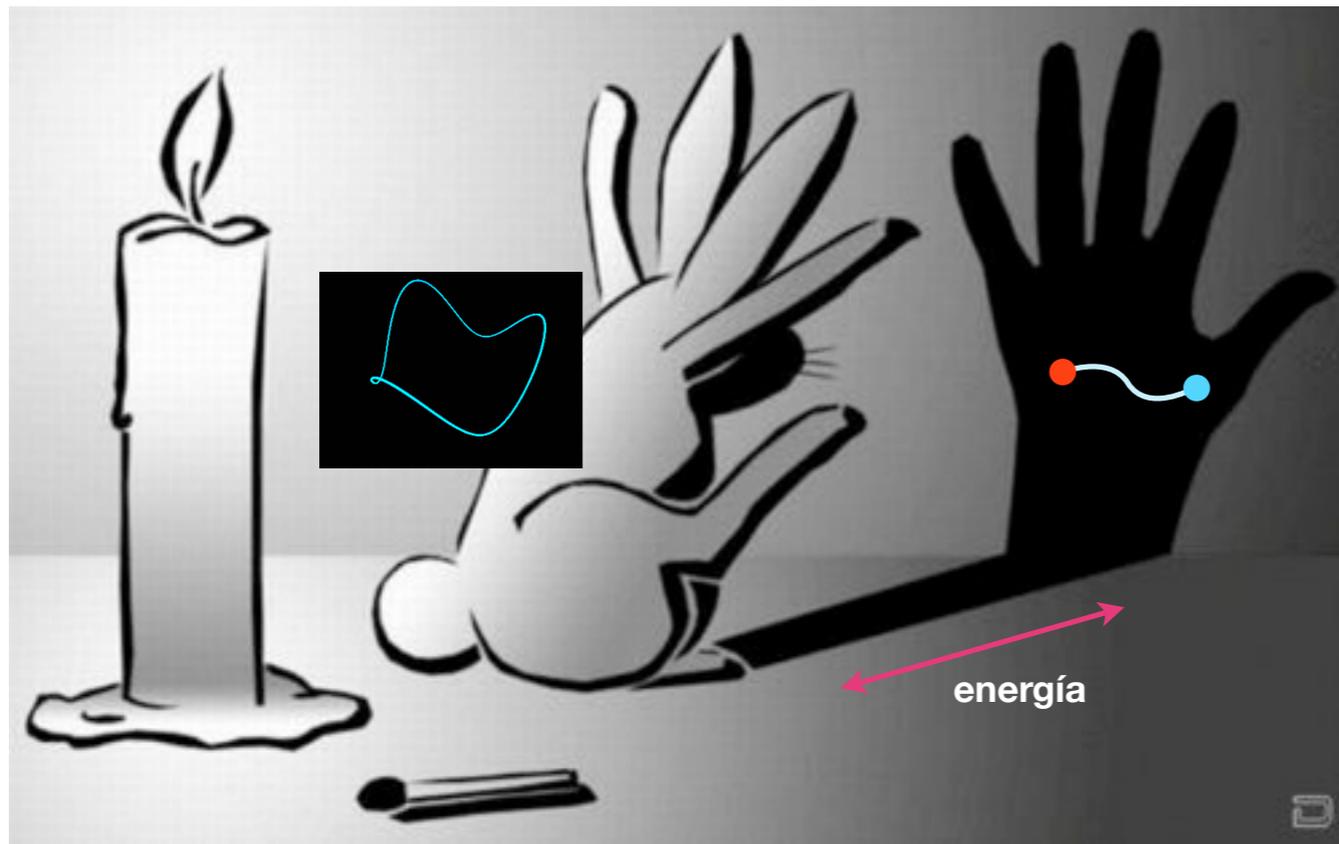
**de dimensión mayor**

# HOLOGRAFIA: UNA PRIMERA IMAGEN

---

cuerda fundamental: **teoría de gravedad**

y la cuerda de QCD?



la cuerda **dual** describe gravedad, pero se propaga en un espacio-tiempo distinto

**de dimensión mayor**

**holografía**

# HOLOGRAFIA: GEOMETRIA DUAL

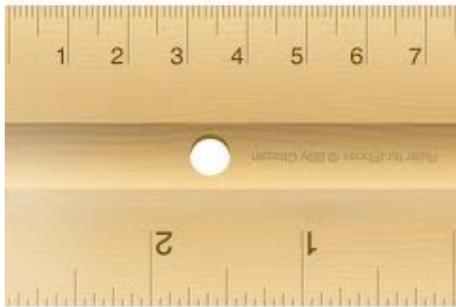
---

dimension adicional: **energía**

caso mas simple:

la física no depende de la escala

distancia  $\rightarrow \lambda$  distancia



# HOLOGRAFIA: GEOMETRIA DUAL

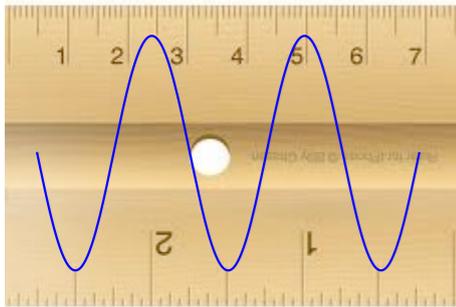
---

dimension adicional: **energía**

caso mas simple:

la física no depende de la escala

distancia  $\rightarrow \lambda$  distancia



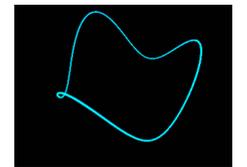
energía  $\rightarrow$  energía/ $\lambda$

# HOLOGRAFIA: GEOMETRIA DUAL

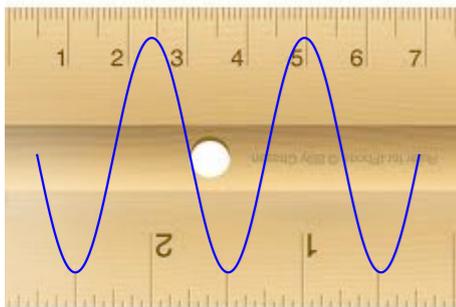
dimension adicional: **energía**

caso mas simple:  
la física no depende de la escala

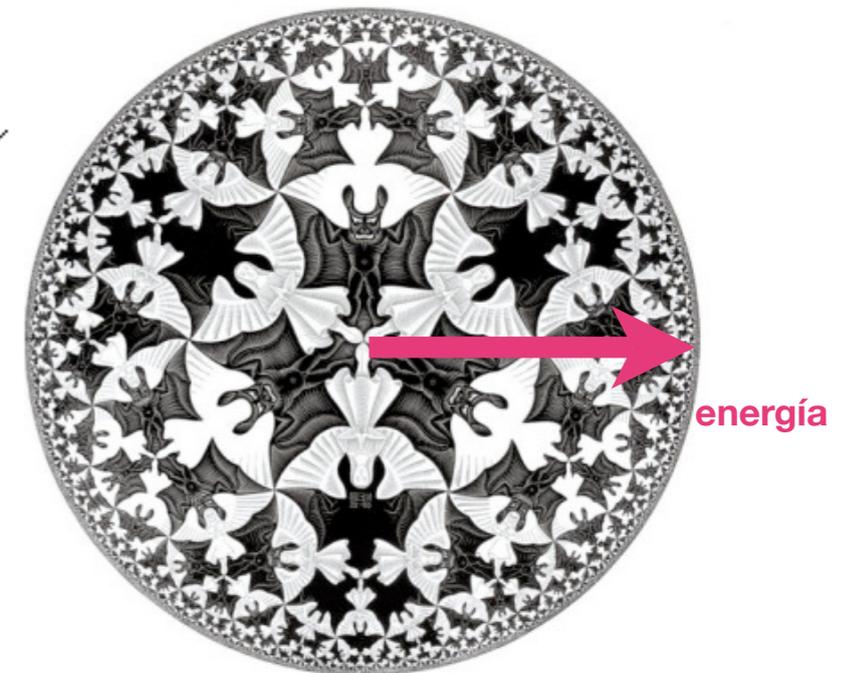
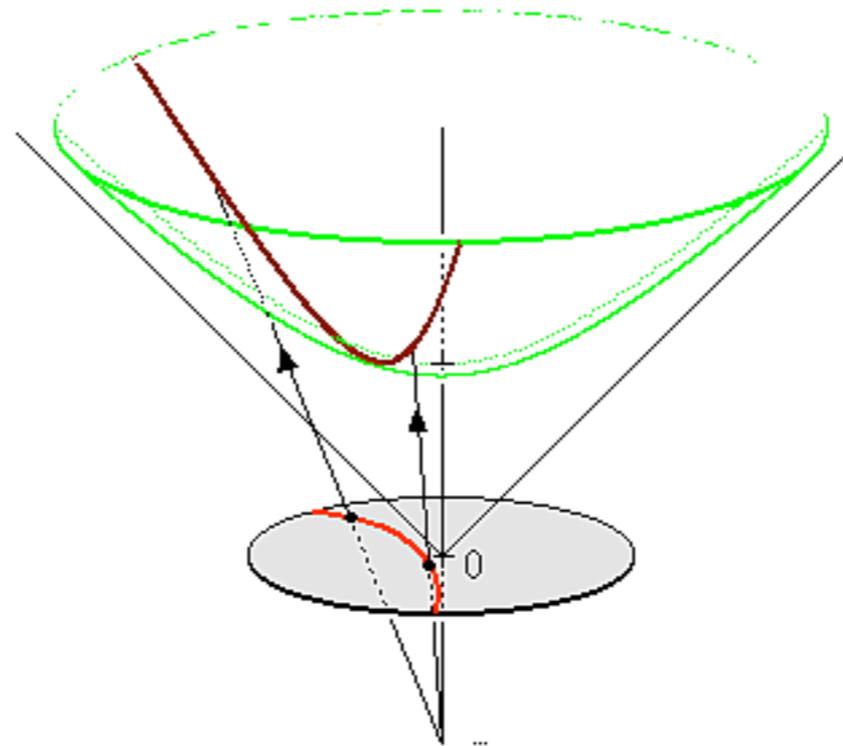
**hiperboloide (anti de Sitter)**



distancia  $\rightarrow \lambda$  distancia



energía  $\rightarrow$  energía/ $\lambda$



**espacio con curvatura**

# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

---

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

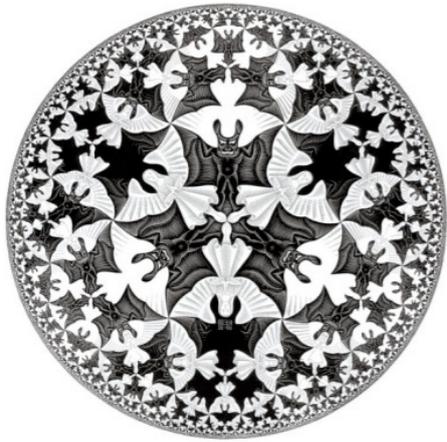
**es holografía útil?**

# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

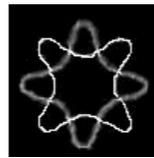
---

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**



**gravitón**



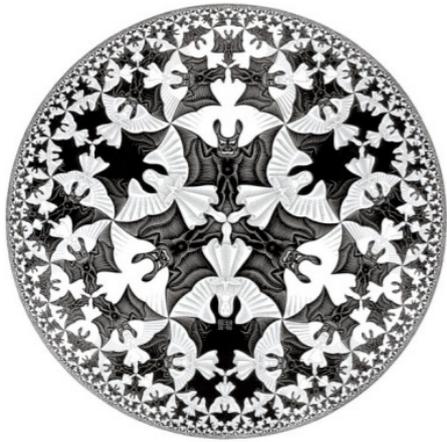
energía  $\propto$  **curvatura**

# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

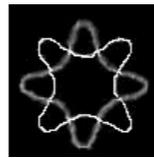
---

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**

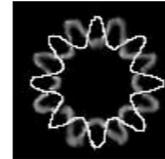


**gravitón**



energía  $\propto$  **curvatura**

**modos masivos**



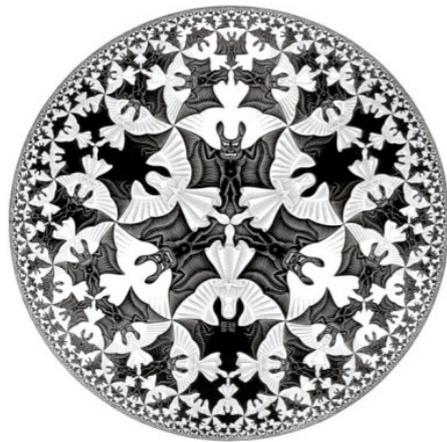
masa  $\propto$  **tensión de la cuerda**

# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

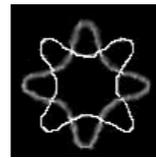
---

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**

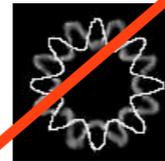


**gravitón**



energía  $\propto$  **curvatura**

**modos masivos**



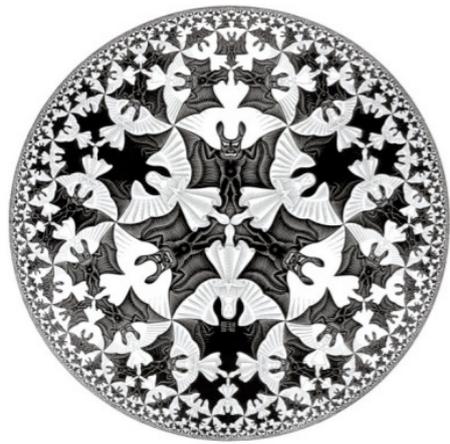
masa  $\propto$  **tensión de la cuerda**

$$\frac{\text{tensión}}{\text{curvatura}} \gg 1$$

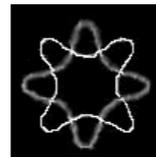
# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**

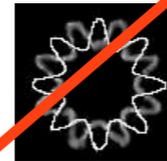


**gravitón**



energía  $\propto$  **curvatura**

**modos masivos**



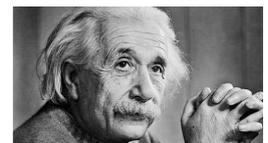
masa  $\propto$  **tensión de la cuerda**

$$\frac{\text{tensión}}{\text{curvatura}} \gg 1$$

teoría de cuerdas



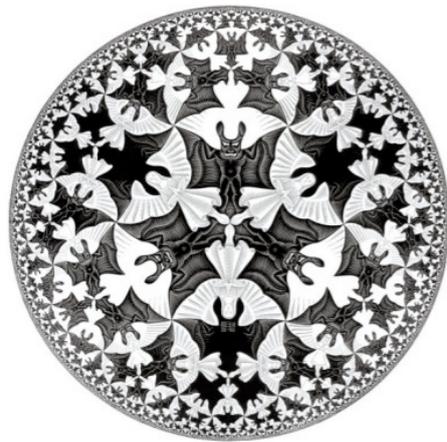
**relatividad general**



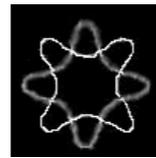
# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**

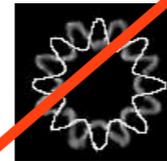


**gravitón**



energía  $\propto$  **curvatura**

**modos masivos**



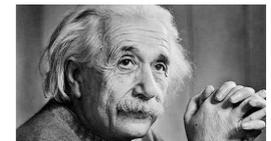
masa  $\propto$  **tensión de la cuerda**

$$\frac{\text{tensión}}{\text{curvatura}} \gg 1$$

teoría de cuerdas



**relatividad general**

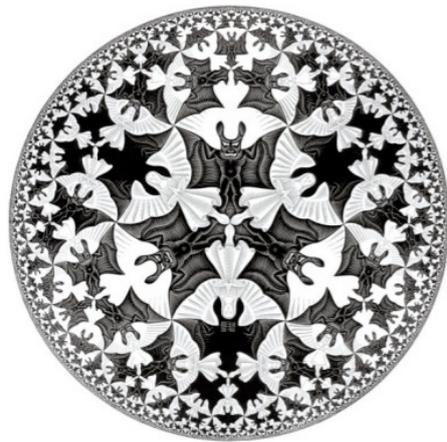


tiene este límite sentido para la "QCD" dual?

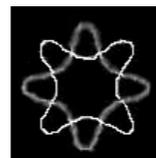
# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**

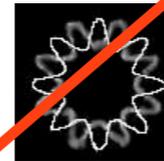


**gravitón**



energía  $\propto$  **curvatura**

**modos masivos**



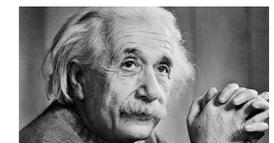
masa  $\propto$  **tensión de la cuerda**

$$\text{interacción}_{\text{"QCD"}} \propto \frac{\text{tensión}}{\text{curvatura}} \gg 1$$

teoría de cuerdas



**relatividad general**



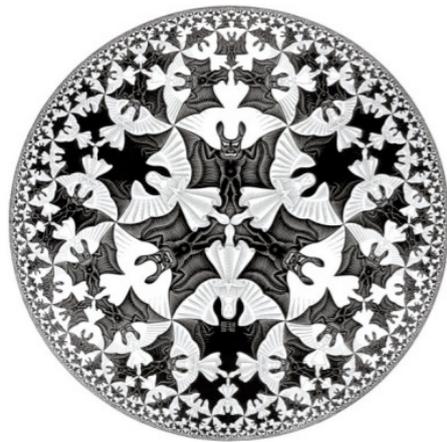
tiene este límite sentido para la "QCD" dual?



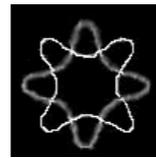
# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**

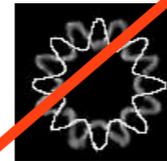


**gravitón**



energía  $\propto$  **curvatura**

**modos masivos**



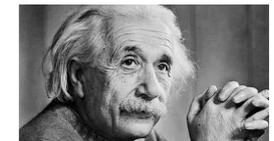
masa  $\propto$  **tensión de la cuerda**

$$\text{interacción}_{\text{"QCD"}} \propto \frac{\text{tensión}}{\text{curvatura}} \gg 1$$

teoría de cuerdas



**relatividad general**



tiene este límite sentido para la "QCD" dual?

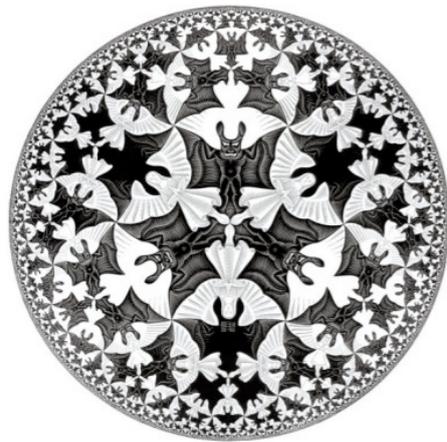


**acoplo fuerte**

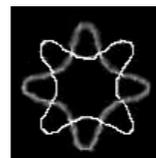
# HOLOGRAFIA: UNA SIMPLIFICACION CRUCIAL

difícil tratar cuerdas en un espacio curvo...

**es holografía útil?**

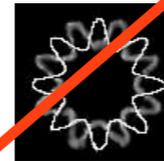


**gravitón**



energía  $\propto$  **curvatura**

**modos masivos**



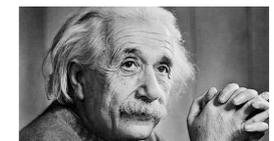
masa  $\propto$  **tensión de la cuerda**

**interacción**  
"QCD"  $\propto \frac{\text{tensión}}{\text{curvatura}} \gg 1$

teoría de cuerdas



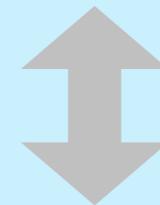
**relatividad general**



tiene este límite sentido para la "QCD" dual?



**acoplo fuerte**



# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

dos teorías fundamentales: QCD y gravedad (cuerdas)

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

dos teorías fundamentales: QCD y gravedad (cuerdas)

por su profundidad conceptual

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

dos teorías fundamentales: QCD y gravedad (cuerdas)

por su profundidad conceptual

por su utilidad

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

dos teorías fundamentales: QCD y gravedad (cuerdas)

por su profundidad conceptual

por su utilidad

gravedad  teorías gauge

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

dos teorías fundamentales: QCD y gravedad (cuerdas)

por su profundidad conceptual

por su utilidad

gravedad  teorías gauge

método único  
para estudiar acoplo fuerte

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

dos teorías fundamentales: QCD y gravedad (cuerdas)

por su profundidad conceptual

por su utilidad

gravedad → teorías gauge

teorías gauge → gravedad

método único  
para estudiar acoplo fuerte

# HOLOGRAFIA: UNA IDEA FASCINANTE

---

dualidad entre teorías distintas en espacios diferentes

dos teorías fundamentales: QCD y gravedad (cuerdas)

por su profundidad conceptual

por su utilidad

gravedad → teorías gauge

teorías gauge → gravedad

método único  
para estudiar acoplo fuerte

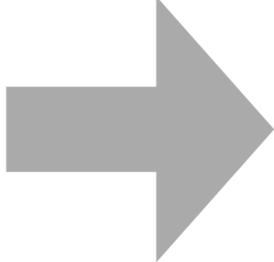
agujeros negros

SEGUNDA PARTE DEL VIAJE:  
OK!

---

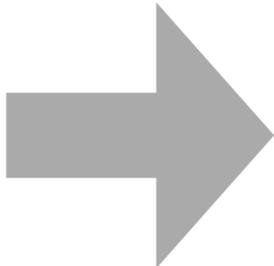
# SEGUNDA PARTE DEL VIAJE: OK!

---

**de las cuerdas**  **a las partículas**

# SEGUNDA PARTE DEL VIAJE: OK!

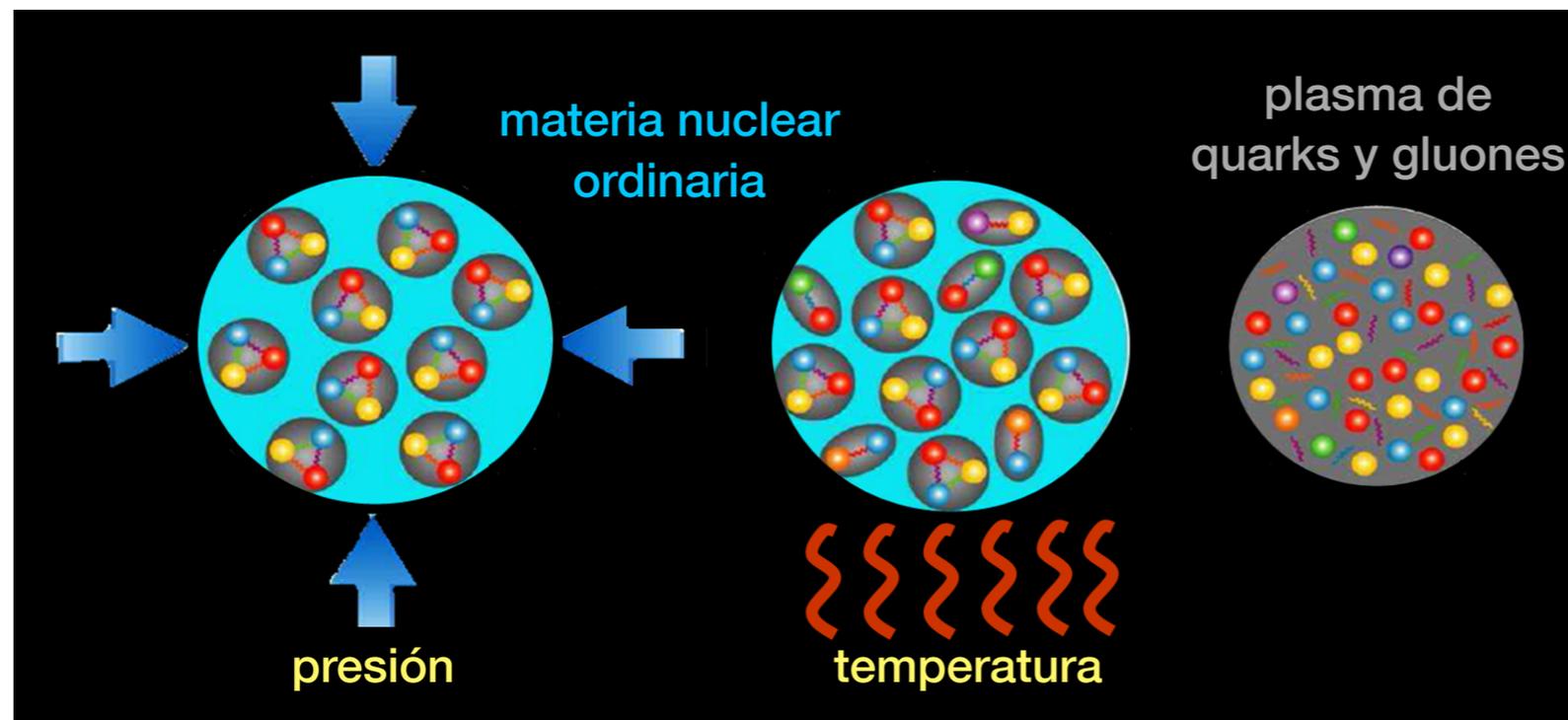
---

**de las cuerdas**  **a las partículas**

para finalizar, un ejemplo

# PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

nuevo estado de la materia a alta temperatura y densidad



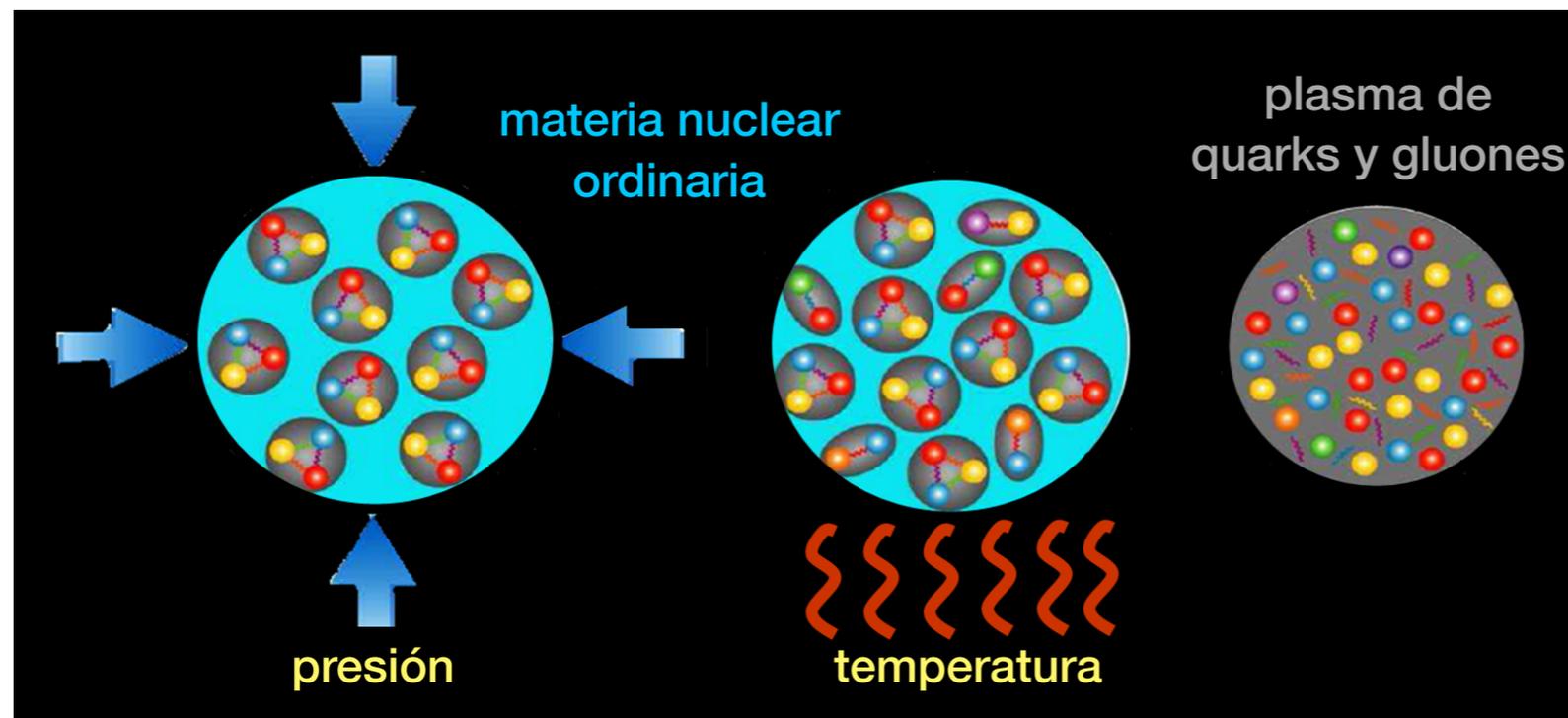
se rompe confinamiento



“sopa” de quarks y gluones

# PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

nuevo estado de la materia a alta temperatura y densidad



se rompe confinamiento



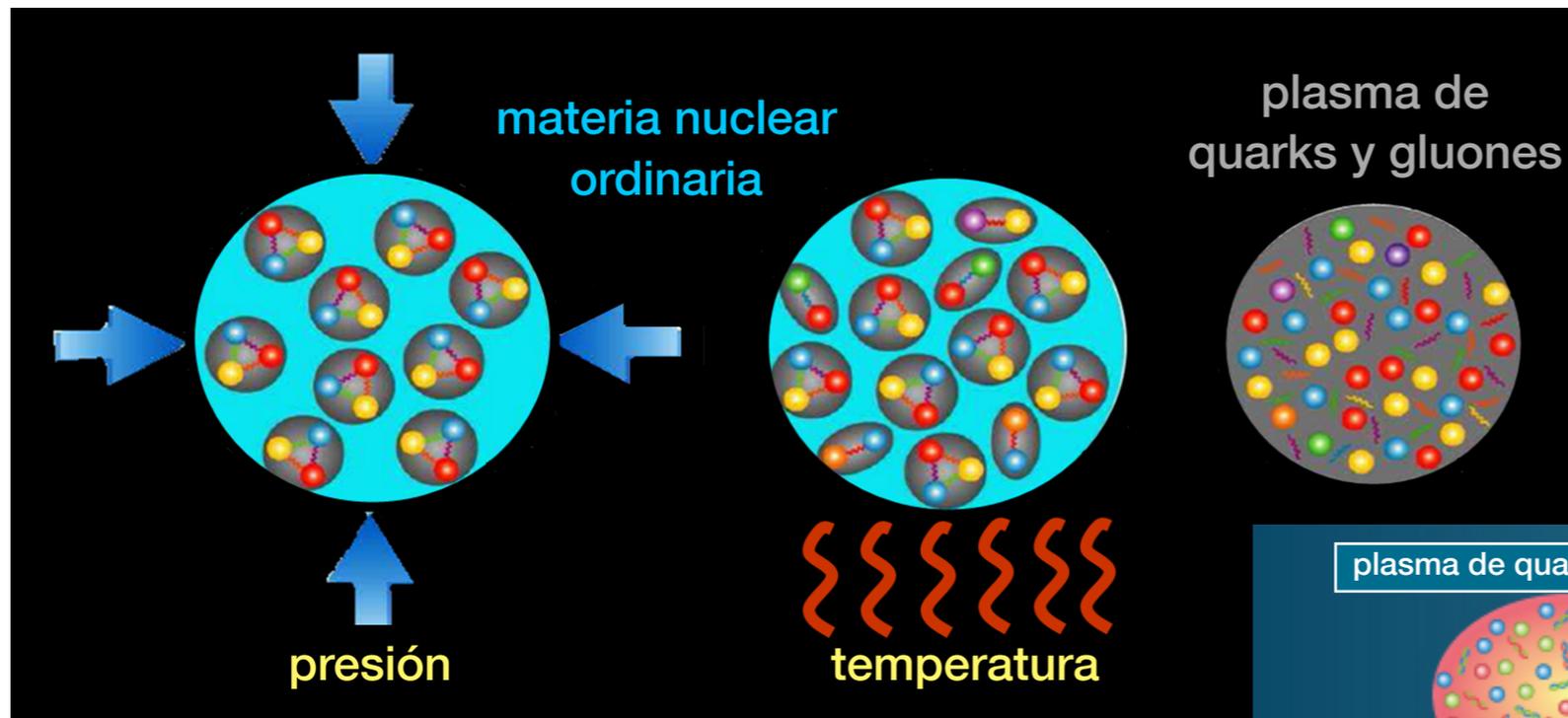
“sopa” de quarks y gluones

dominó los primeros instantes  
de la evolución del universo

t ~ microsegundos

# PLASMA DE QUARKS Y GLUONES

nuevo estado de la materia a alta temperatura y densidad



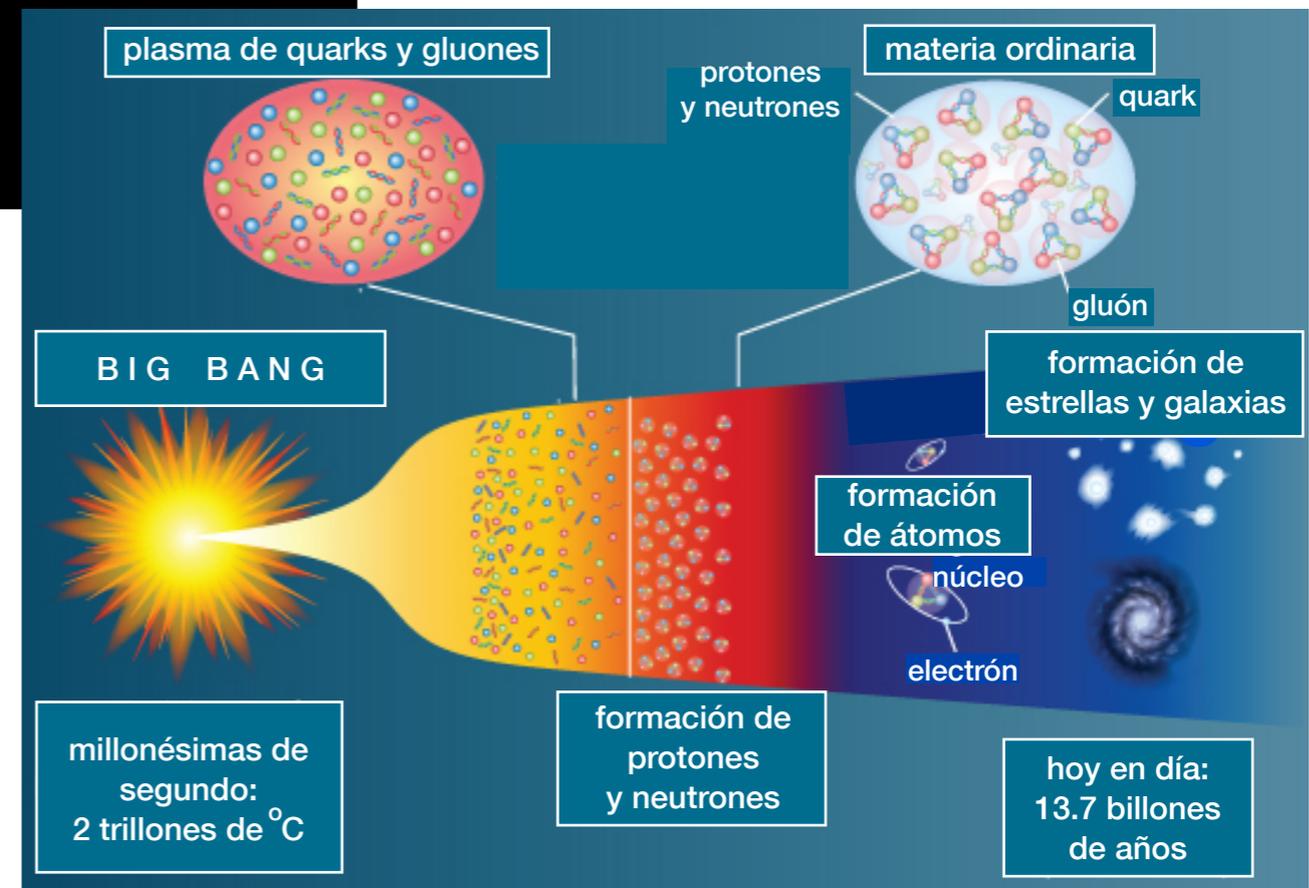
se rompe confinamiento



“sopa” de quarks y gluones

dominó los primeros instantes de la evolución del universo

t ~ microsegundos



# RHIC y LHC

---

plasma de quarks y gluones producido en colisiones de partículas

# RHIC y LHC

---

plasma de quarks y gluones producido en colisiones de partículas

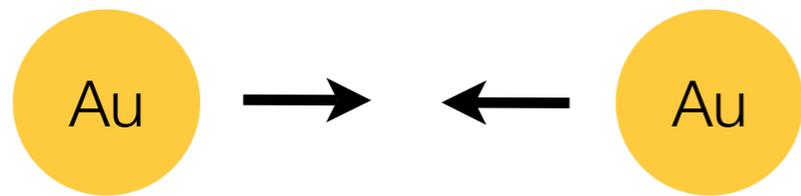
Brookhaven National Laboratory, EEUU



# RHIC y LHC

---

plasma de quarks y gluones producido en colisiones de partículas

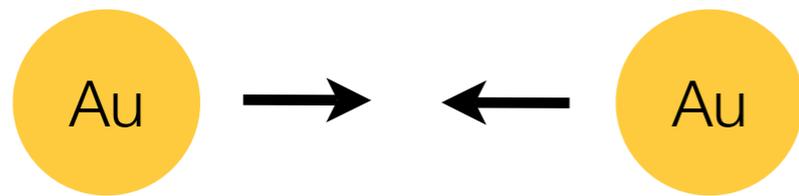


Brookhaven National Laboratory, EEUU



# RHIC y LHC

plasma de quarks y gluones producido en colisiones de partículas



Brookhaven National Laboratory, EEUU

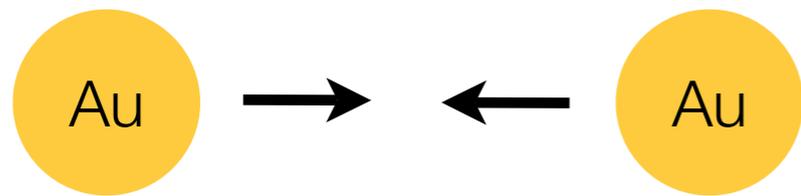


CERN, Suiza

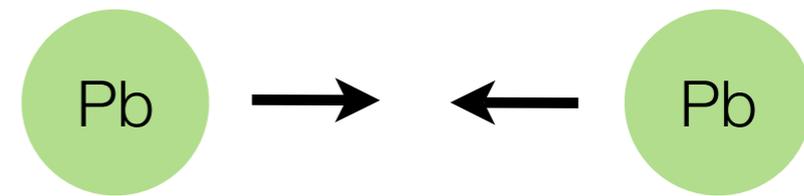


# RHIC y LHC

plasma de quarks y gluones producido en colisiones de partículas



Brookhaven National Laboratory, EEUU



CERN, Suiza



# UN LIQUIDO CASI “PERFECTO”

---

plasma de quarks y gluones generado en colisiones:



# UN LIQUIDO CASI “PERFECTO”

---

plasma de quarks y gluones generado en colisiones:



# UN LIQUIDO CASI “PERFECTO”

---

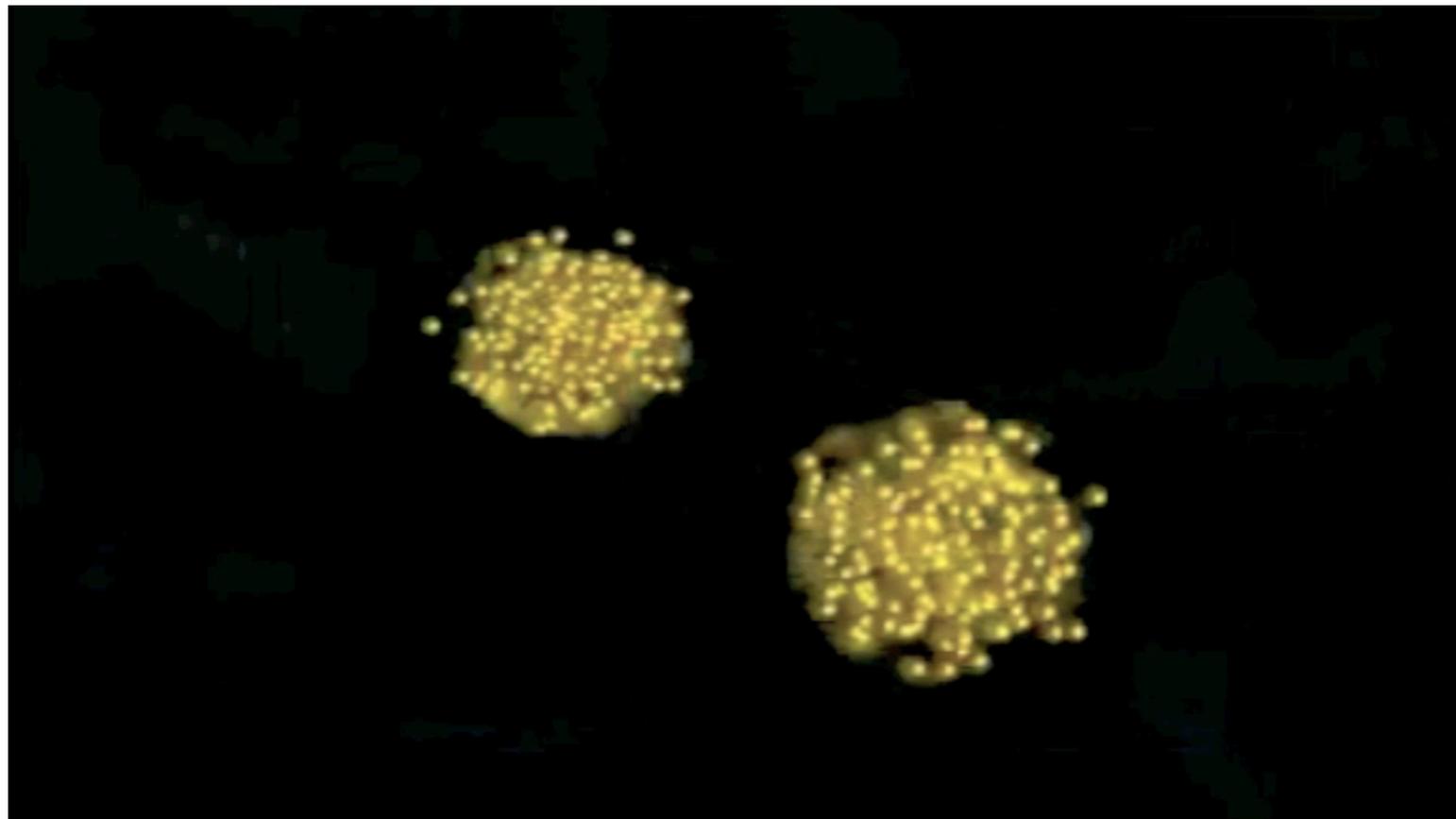
plasma de quarks y gluones generado en colisiones:



# UN LIQUIDO CASI “PERFECTO”

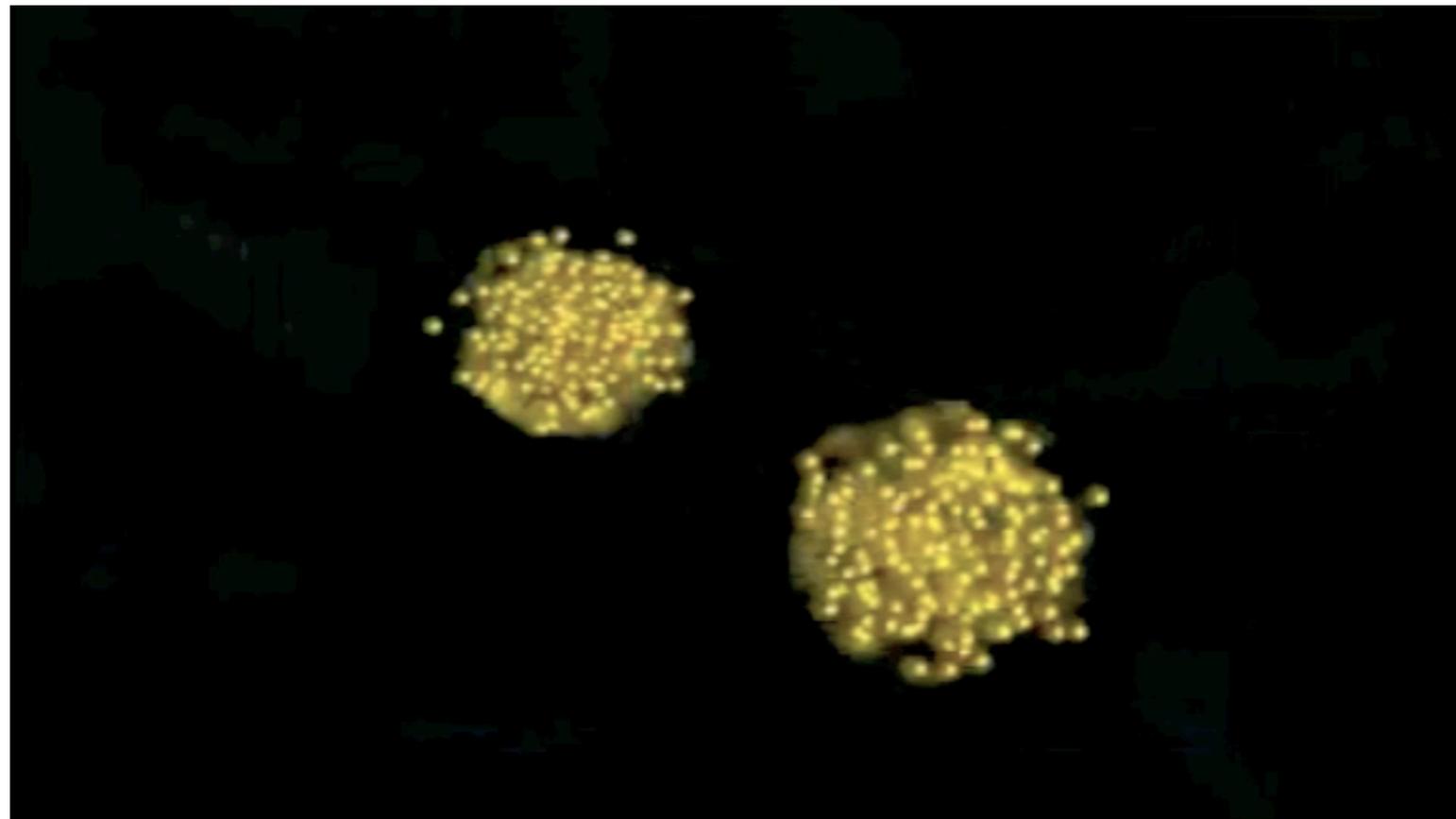
---

plasma de quarks y gluones generado en colisiones:



# UN LIQUIDO CASI "PERFECTO"

plasma de quarks y gluones generado en colisiones:

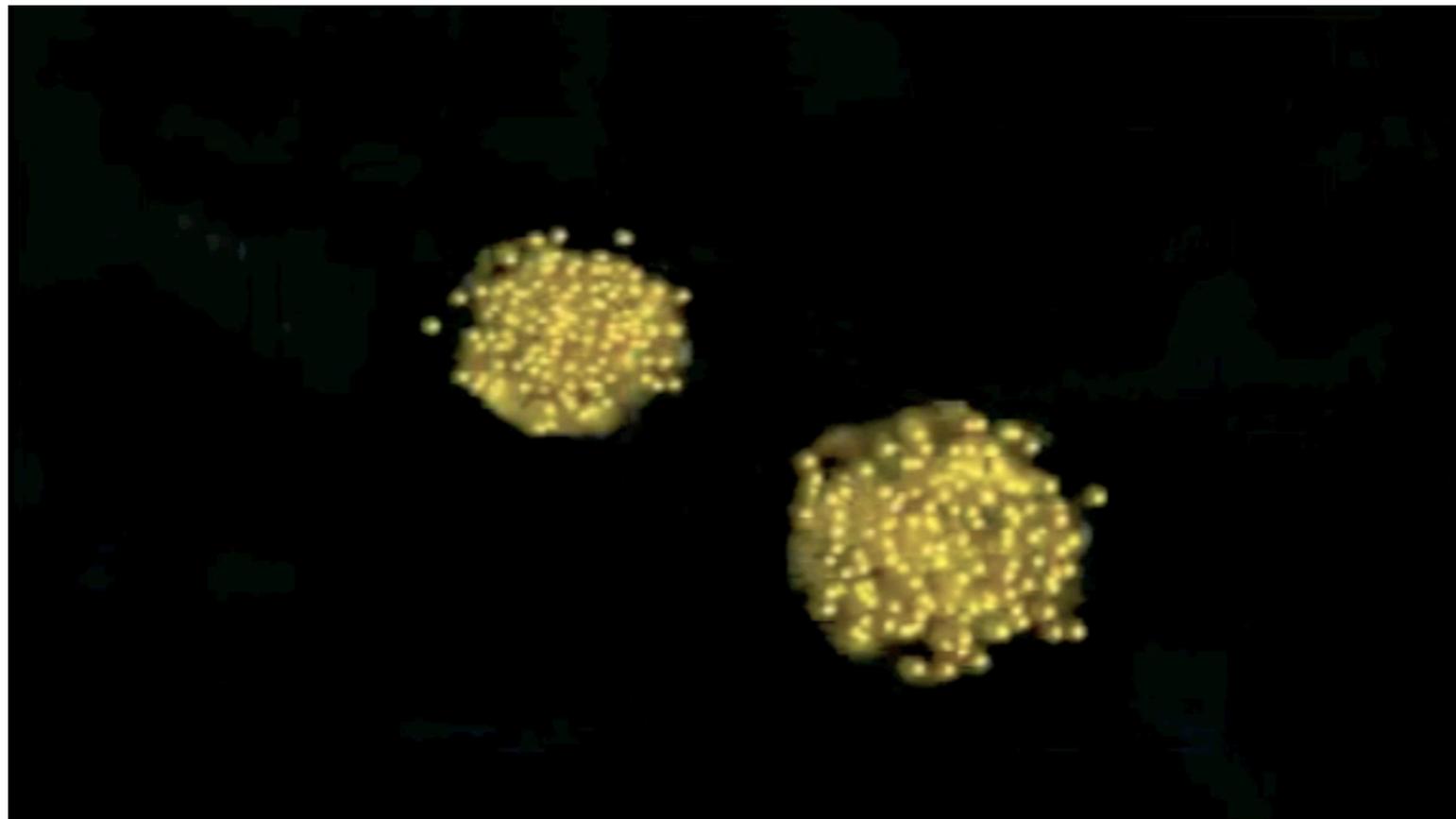


viscosidad

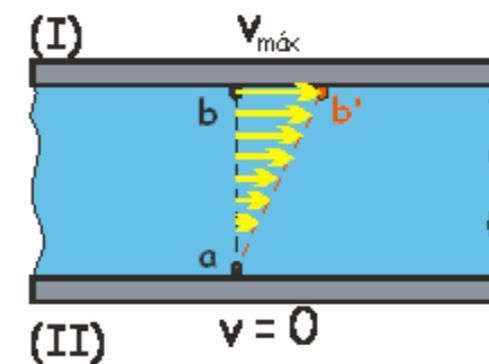


# UN LIQUIDO CASI "PERFECTO"

plasma de quarks y gluones generado en colisiones:

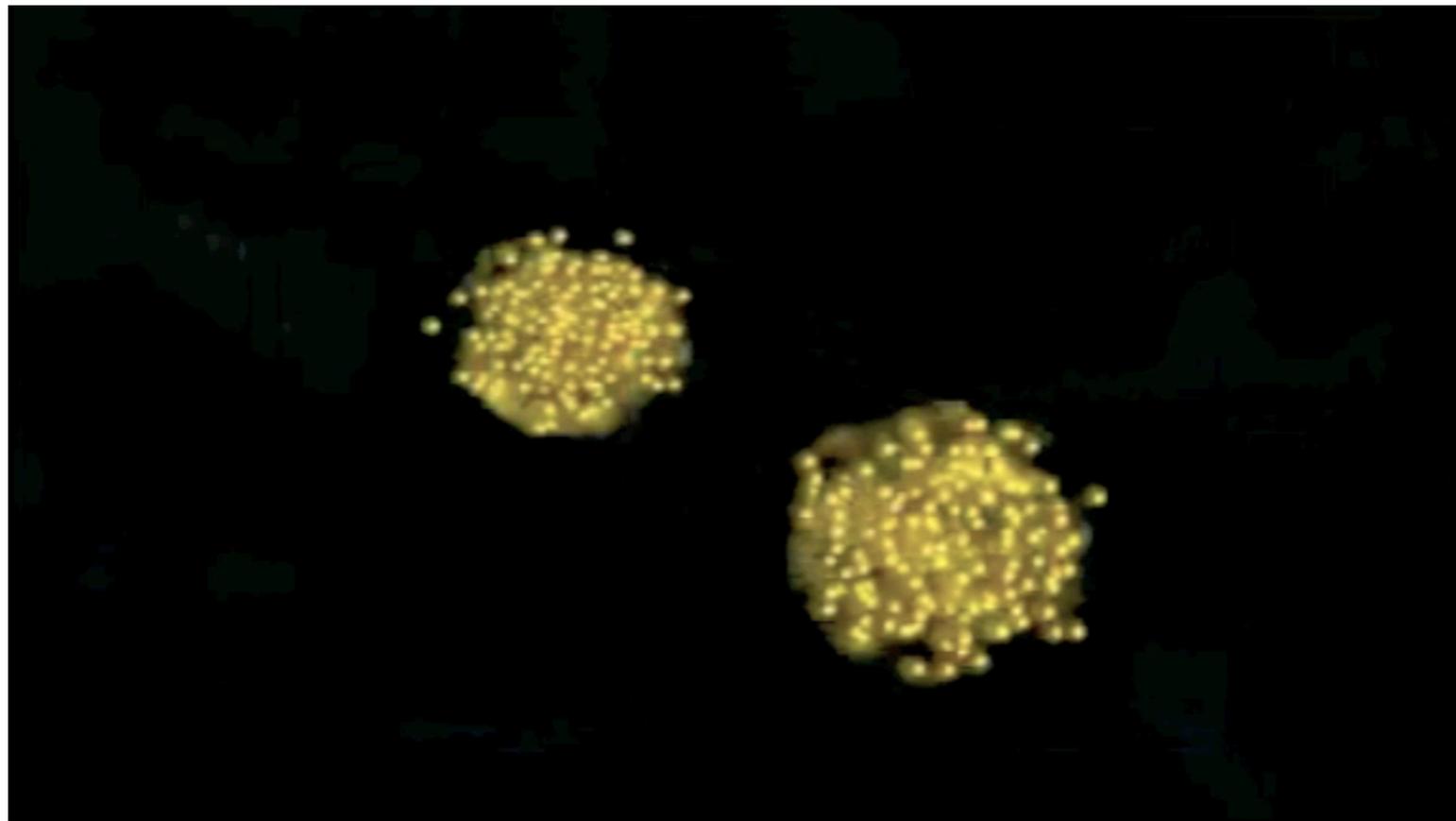


viscosidad



# UN LIQUIDO CASI "PERFECTO"

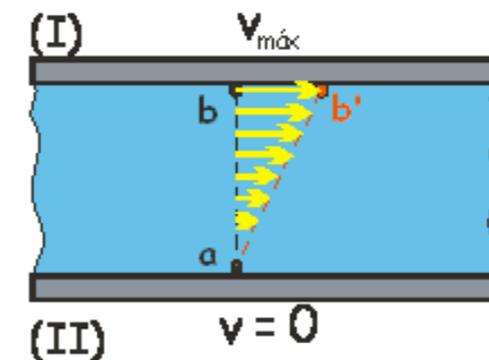
plasma de quarks y gluones generado en colisiones:



el fluido con menor viscosidad conocido



viscosidad



# COMO DERIVARLO DE QCD?

---

métodos numéricos

# COMO DERIVARLO DE QCD?

---

~~métodos numéricos~~

# COMO DERIVARLO DE QCD?

---

~~métodos numéricos~~

holografía

# COMO DERIVARLO DE QCD?

---

~~métodos numéricos~~

holografía

la teoría dual a gravedad en



no es QCD

# COMO DERIVARLO DE QCD?

---

~~métodos numéricos~~

holografía

la teoría dual a gravedad en

es invariante de escala



no es QCD

# COMO DERIVARLO DE QCD?

---

~~métodos numéricos~~

holografía

la teoría dual a gravedad en



no es QCD

es invariante de escala

diferente contenido  
de materia

# COMO DERIVARLO DE QCD?

~~métodos numéricos~~

holografía

la teoría dual a gravedad en

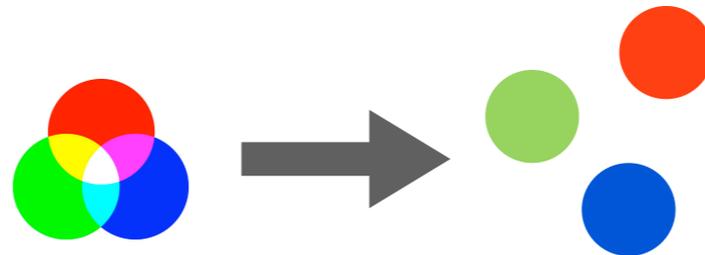


no es QCD

es invariante de escala

diferente contenido de materia

no confina



# COMO DERIVARLO DE QCD?

~~métodos numéricos~~

holografía

la teoría dual a gravedad en



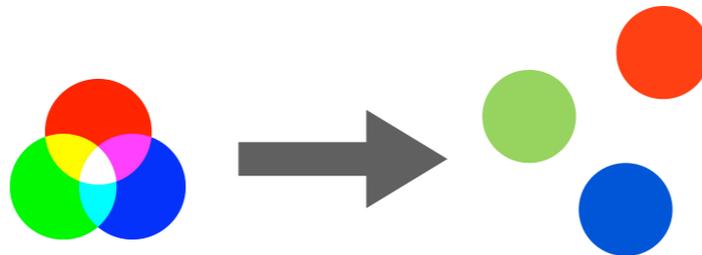
no es QCD

es invariante de escala

diferente contenido de materia

no confina

mal candidato para la materia ordinaria



# COMO DERIVARLO DE QCD?

~~métodos numéricos~~

holografía

la teoría dual a gravedad en



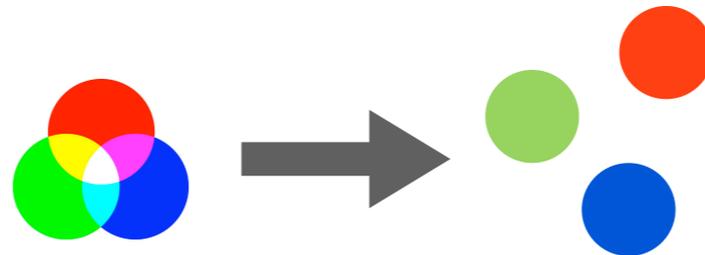
no es QCD

es invariante de escala

diferente contenido  
de materia

no confina

mal candidato para  
la materia ordinaria



modelo cualitativo del  
plasma de quarks y gluones

# COMO DERIVARLO DE QCD?

~~métodos numéricos~~

holografía

la teoría dual a gravedad en

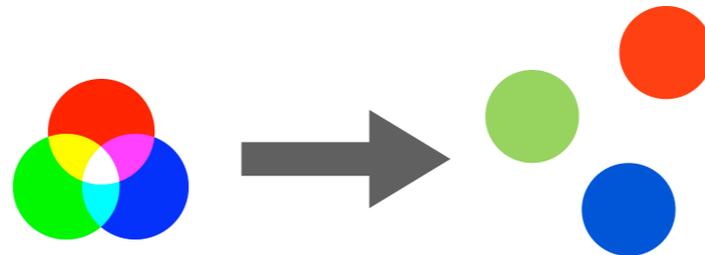


no es QCD

es invariante de escala

diferente contenido  
de materia

no confina



mal candidato para  
la materia ordinaria

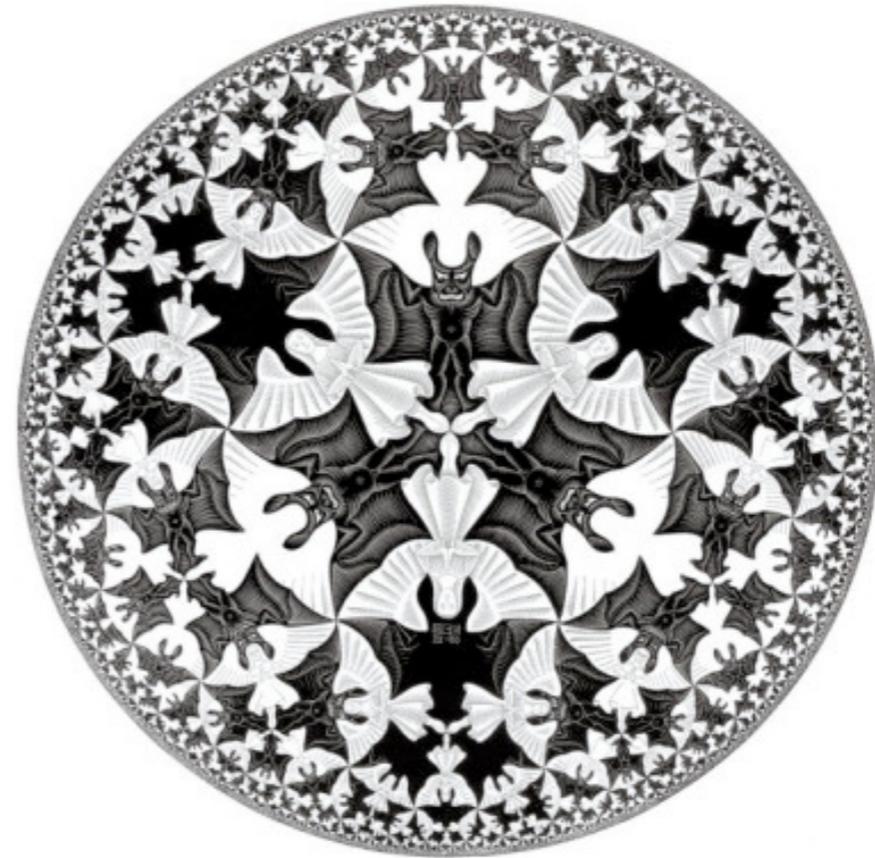
modelo cualitativo del  
plasma de quarks y gluones



# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

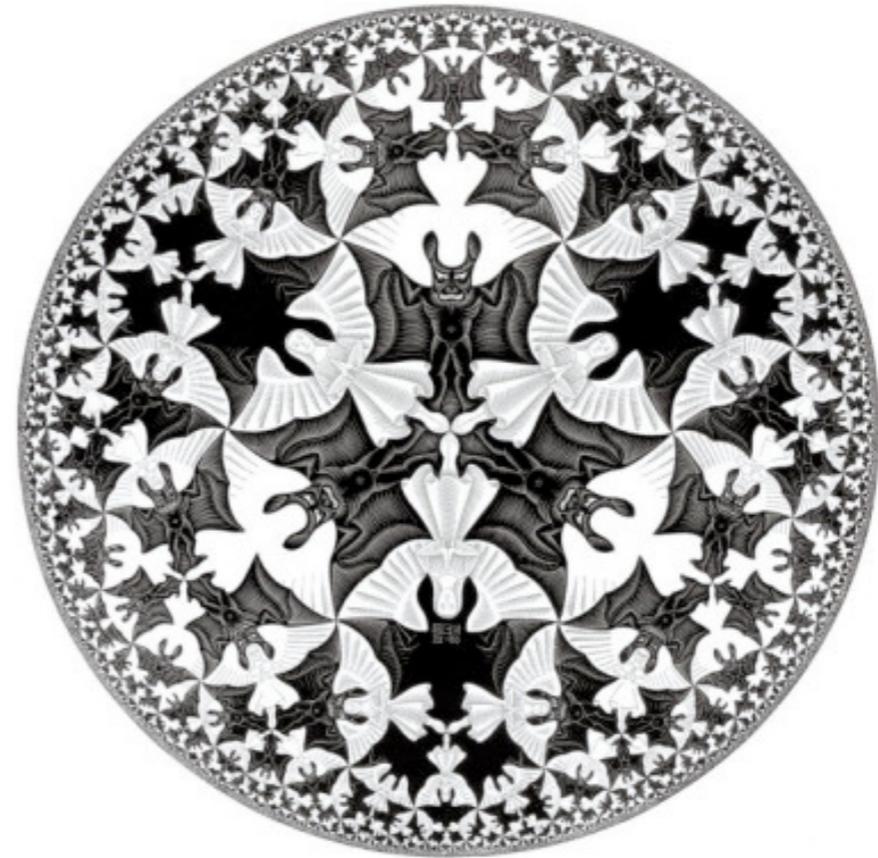
“QCD” dual a temperatura cero



# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

“QCD” dual a temperatura ~~cero~~ ?

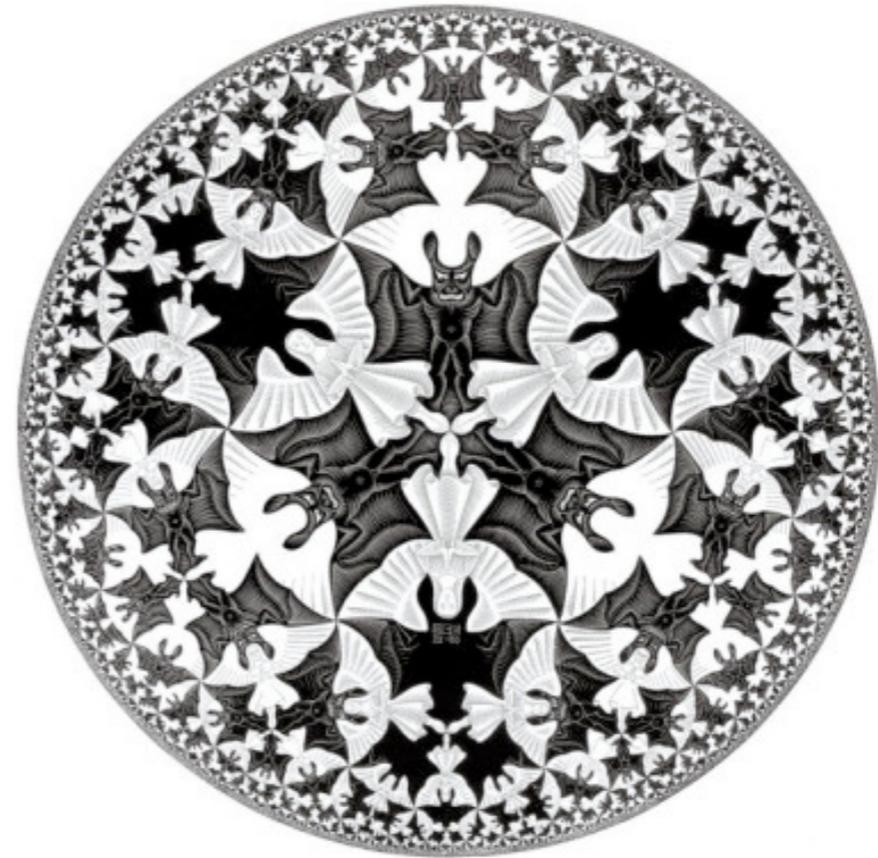


# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

“QCD” dual a temperatura ~~cero~~ ?

**agujero negro**

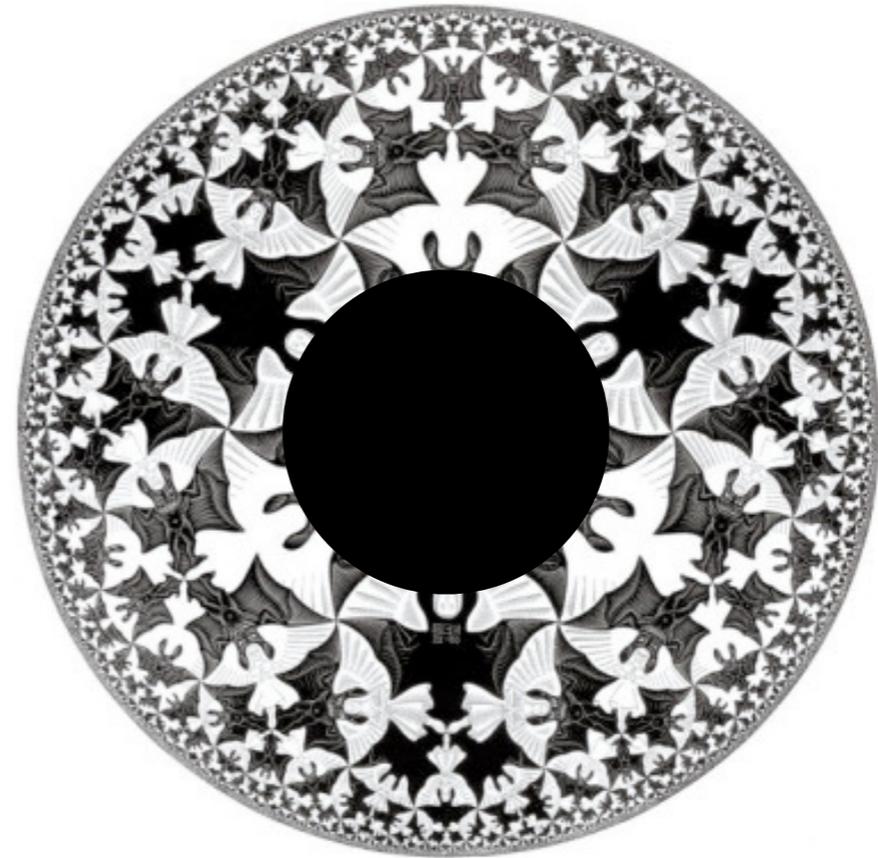


# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

“QCD” dual a temperatura ~~cero~~ ?

**agujero negro**



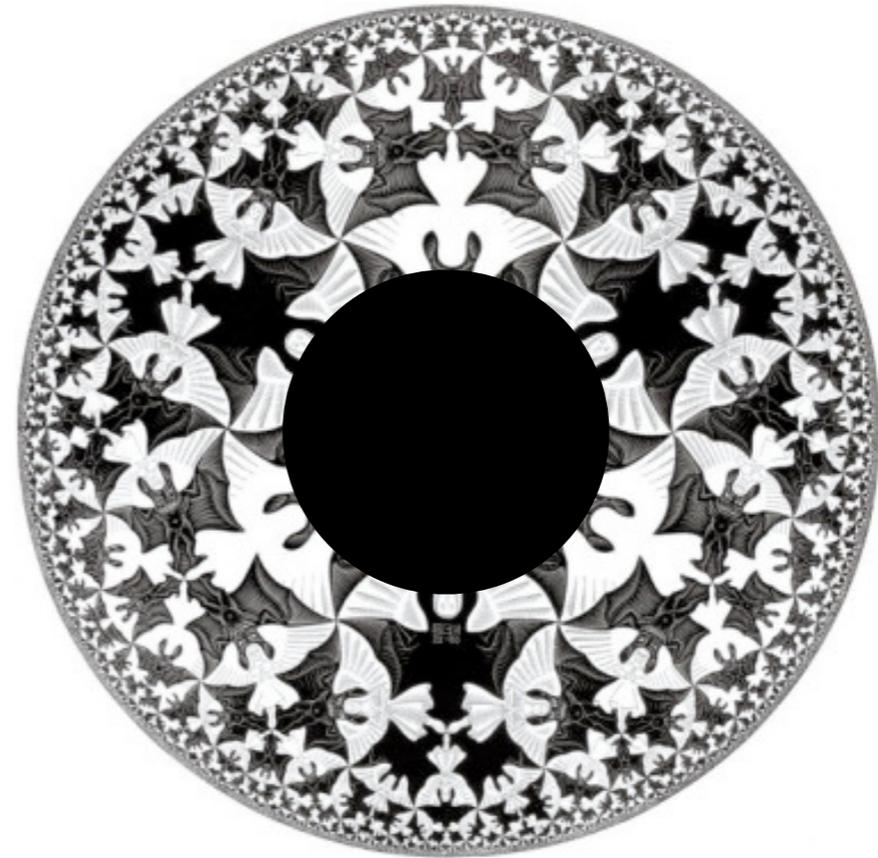
# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

“QCD” dual a temperatura ~~cero~~ ?

**agujero negro**

radia como un cuerpo caliente



# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

“QCD” dual a temperatura ~~cero~~ ?

**agujero negro**

radia como un cuerpo caliente



# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

“QCD” dual a temperatura ~~cero~~ ?

**agujero negro**

radia como un cuerpo caliente

**temperatura**



# HOLOGRAFIA + TEMPERATURA

---

“QCD” dual a temperatura ~~cero~~ ?

**agujero negro**

radia como un cuerpo caliente

**temperatura**



**plasma dual**

**holografía**

**agujero negro**

# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

---



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

---

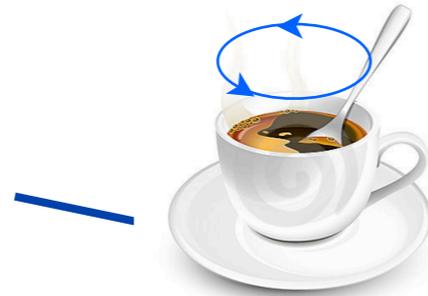
acción que destruye el  
estado de equilibrio



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

---

acción que destruye el estado de equilibrio



la perturbación se redistribuye



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

---

acción que destruye el estado de equilibrio



se recupera el equilibrio



la perturbación se redistribuye



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

acción que destruye el estado de equilibrio



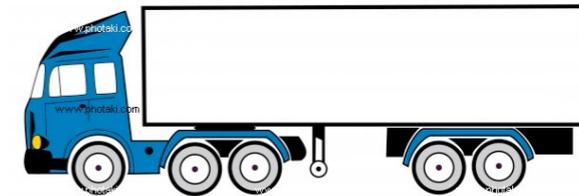
la perturbación se redistribuye



se recupera el equilibrio



**coeficientes de transporte**



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

acción que destruye el estado de equilibrio



se recupera el equilibrio



la perturbación se redistribuye



coeficientes de transporte



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

acción que destruye el estado de equilibrio



se recupera el equilibrio



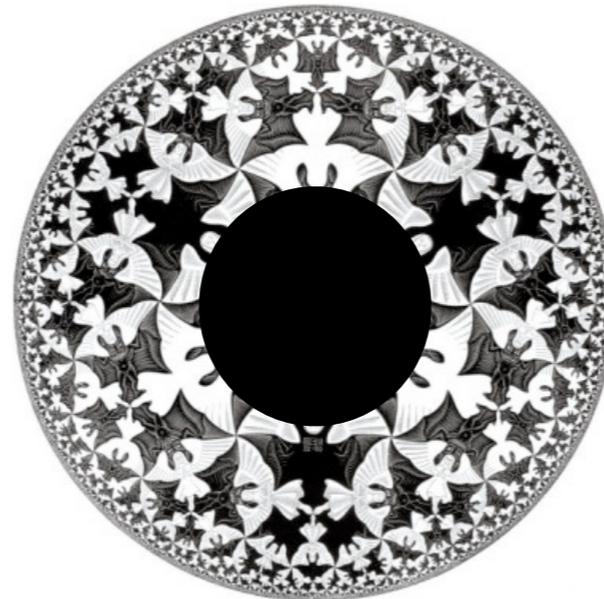
la perturbación se redistribuye



coeficientes de transporte



descripción holográfica



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

acción que destruye el estado de equilibrio



se recupera el equilibrio

la perturbación se redistribuye

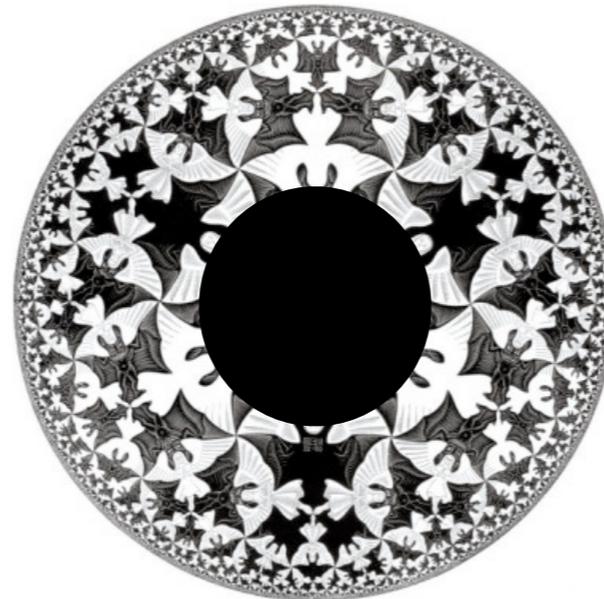


coeficientes de transporte



**descripción holográfica**

acción sobre el agujero negro



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

acción que destruye el estado de equilibrio



se recupera el equilibrio



la perturbación se redistribuye

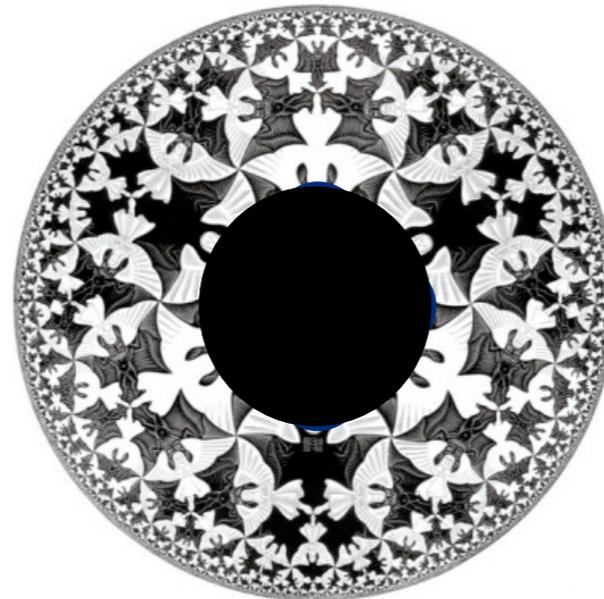


coeficientes de transporte



descripción holográfica

acción sobre el agujero negro



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

acción que destruye el estado de equilibrio



se recupera el equilibrio

la perturbación se redistribuye



coeficientes de transporte

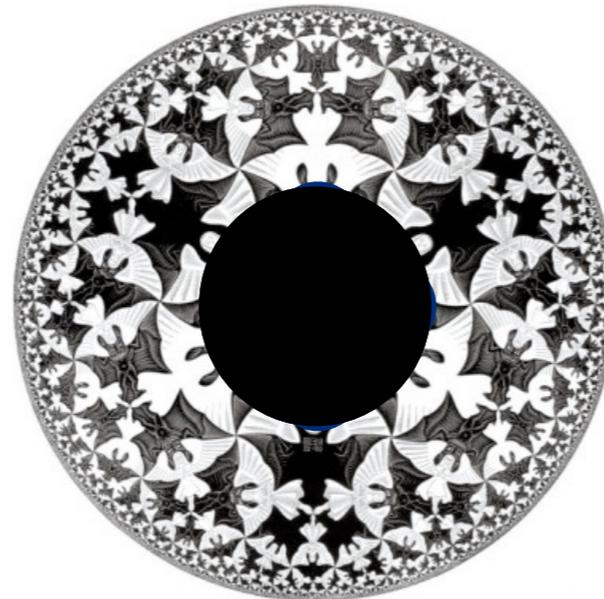


## descripción holográfica

acción sobre el agujero negro



absorbe la perturbación y recupera el equilibrio



# CALCULO DE LA VISCOSIDAD

acción que destruye el estado de equilibrio  
se recupera el equilibrio



la perturbación se redistribuye



coeficientes de transporte

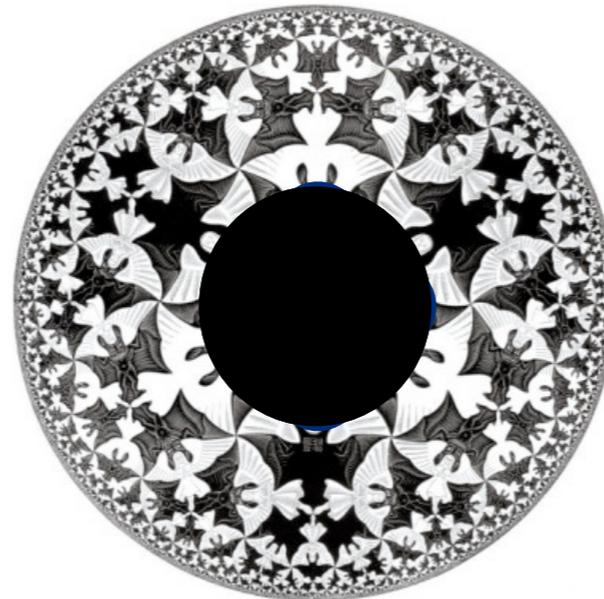


## descripción holográfica

acción sobre el agujero negro



absorbe la perturbación y recupera el equilibrio



$$\text{viscosidad} = 1/4\pi$$
$$1/4\pi < \text{visc}_{\text{ex}} < 2/4\pi$$

# RESUMIENDO...

---

**Holografía** se conoce también como **correspondencia AdS/CFT**

# RESUMIENDO...

---

**Holografía** se conoce también como **correspondencia AdS/CFT**

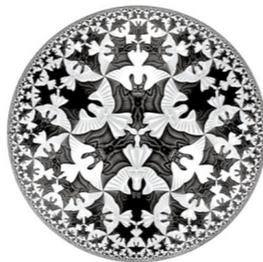


Anti-de Sitter

# RESUMIENDO...

---

**Holografía** se conoce también como **correspondencia AdS/CFT**



Anti-de Sitter

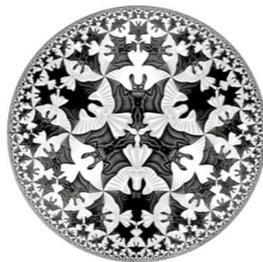
invariancia de escala

“QCD dual”: super Yang-Mills

# RESUMIENDO...

---

**Holografía** se conoce también como **correspondencia AdS/CFT**



Anti-de Sitter

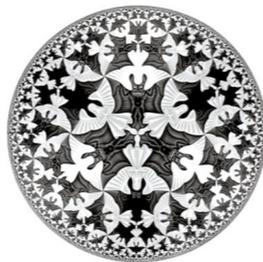
invariancia de escala

“QCD dual”: super Yang-Mills

**J. Maldacena**, 1997

# RESUMIENDO...

Holografía se conoce también como **correspondencia AdS/CFT**

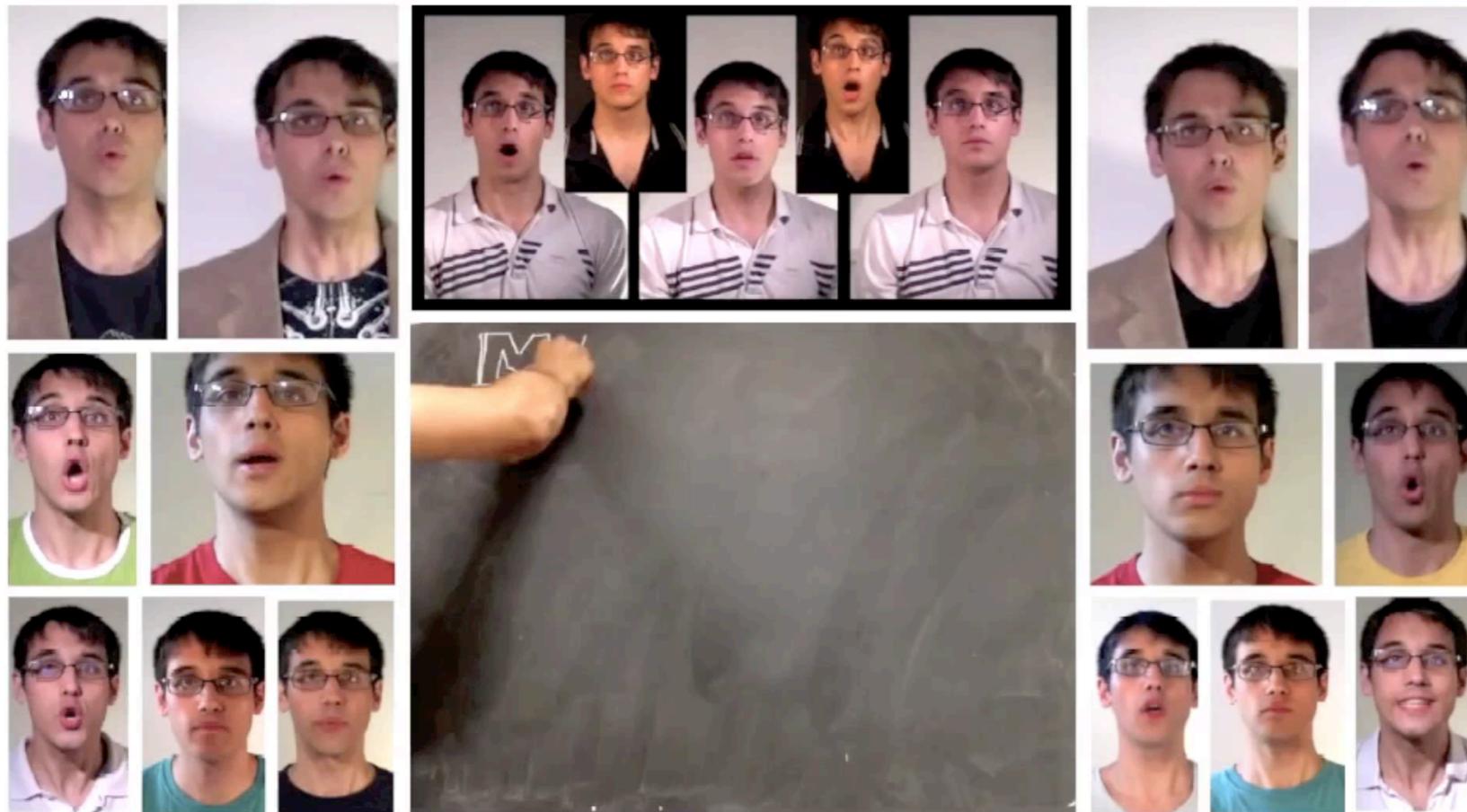


Anti-de Sitter

invariancia de escala

“QCD dual”: super Yang-Mills

**J. Maldacena**, 1997



# RESUMIENDO...

Holografía se conoce también como **correspondencia AdS/CFT**

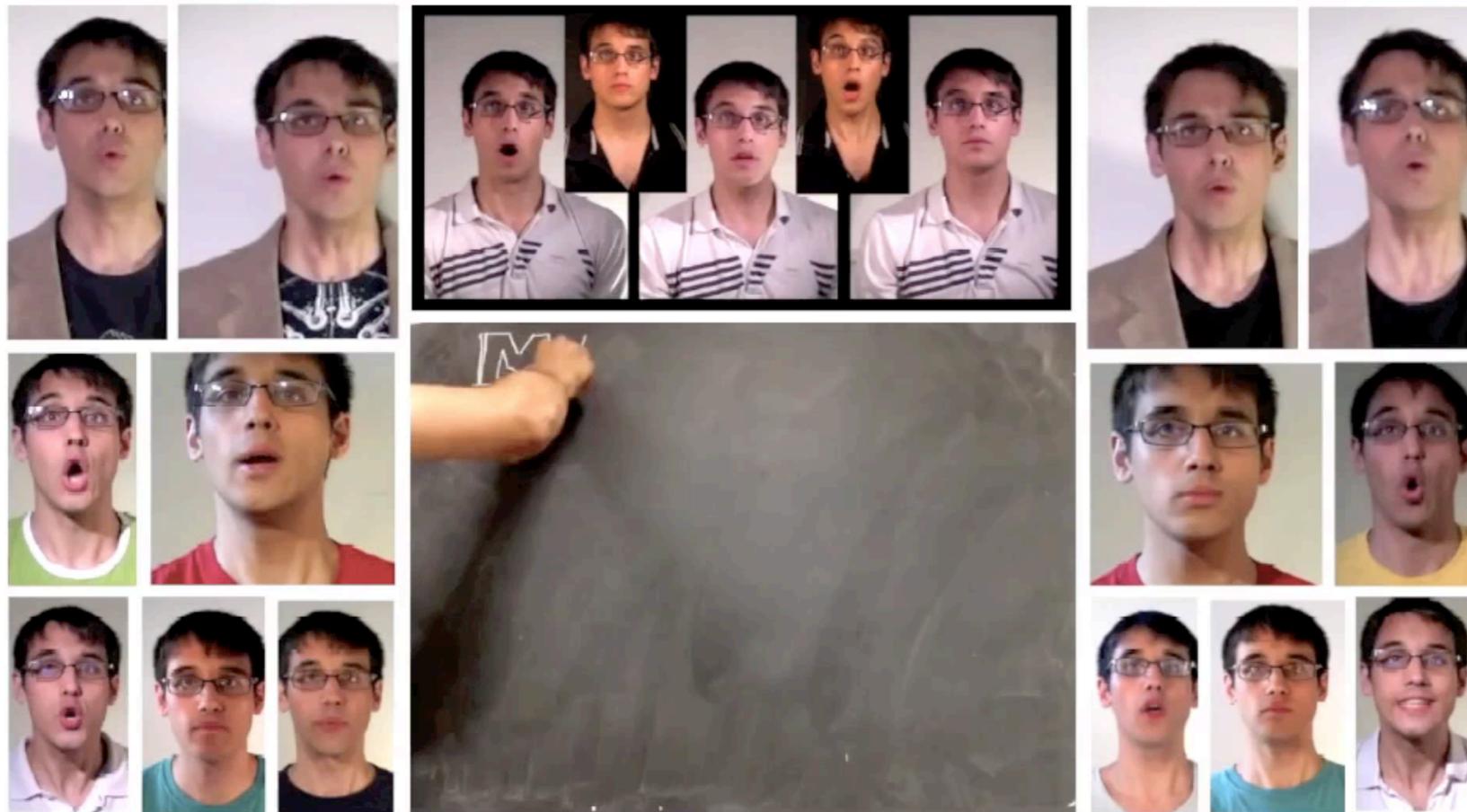


Anti-de Sitter

invariancia de escala

“QCD dual”: super Yang-Mills

**J. Maldacena**, 1997



Maldacena: super Yang-Mills y cuerdas son duales por la holografía AdS/CFT

moléculas y átomos, luz y energía,  
tiempo y espacio y materia  
todos derivan de una teoría unificada

“ciencia a capella”, Tim Blaist

# RESUMIENDO...

Holografía se conoce también como **correspondencia AdS/CFT**



Anti-de Sitter

invariancia de escala

“QCD dual”: super Yang-Mills

**J. Maldacena**, 1997



Maldacena: super Yang-Mills y cuerdas son duales por la holografía AdS/CFT

moléculas y átomos, luz y energía,  
tiempo y espacio y materia  
todos derivan de una teoría unificada

“ciencia a capella”, Tim Blaist