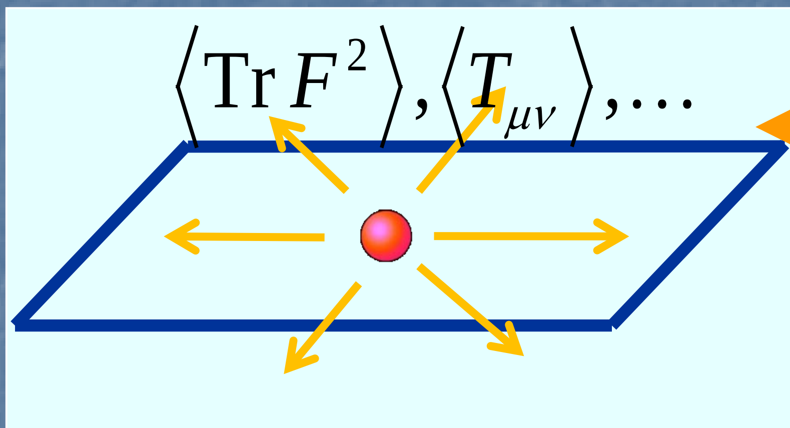
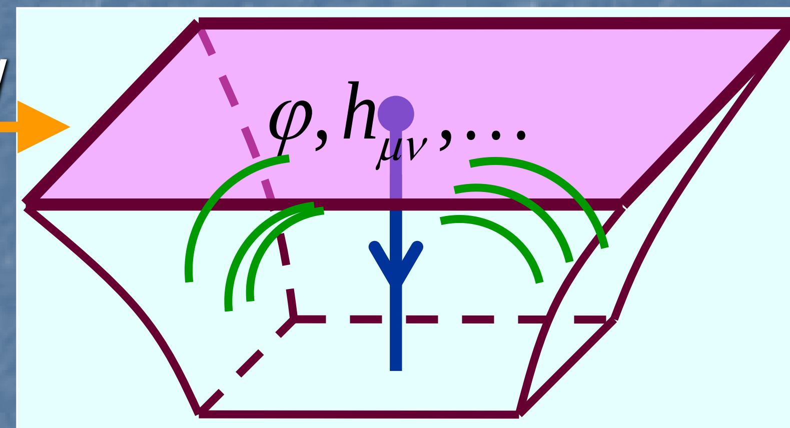
Quark



GKPW

=



Quark con masa $m = \infty$ = Cuerda c/extremo en $z = 0$

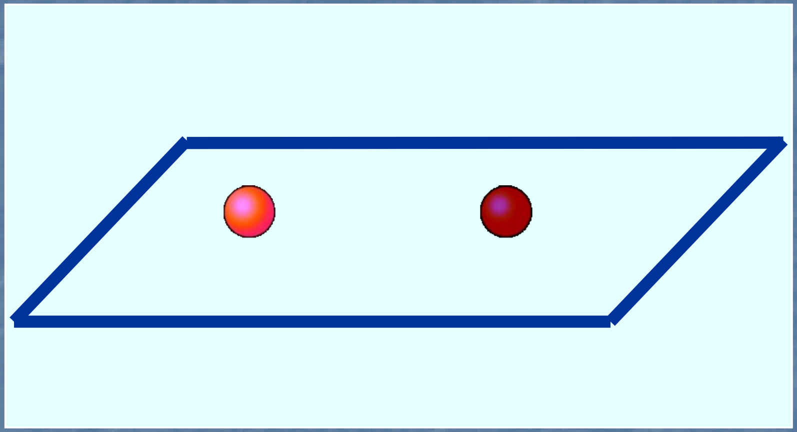
[Maldacena]

P.ej., $\left\langle \mathrm{Tr}\left[F^2(\vec{x}, t) + \ldots \right] \right\rangle_q = \dfrac{\sqrt{g_{YM}^2 N_c}}{32\pi^2 |\vec{x}|^4}$

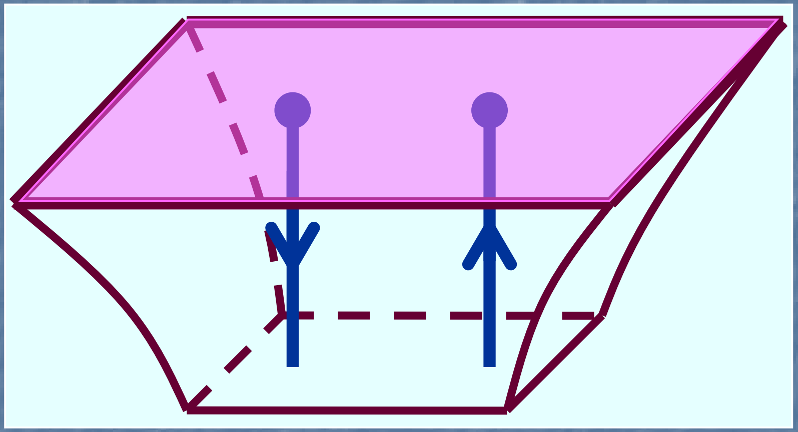
[Danielsson,Kruczenski,Keski-Vakkuri]

Perfil tipo Coulomb (como se espera por invariancia conforme) ✓

Quark y Antiquark

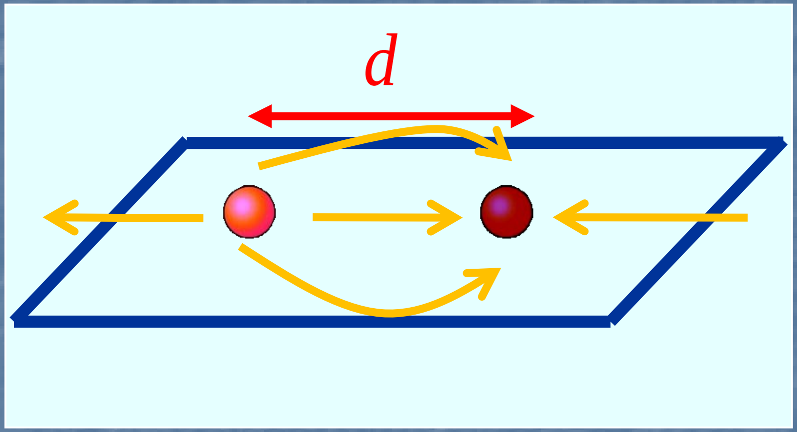


=

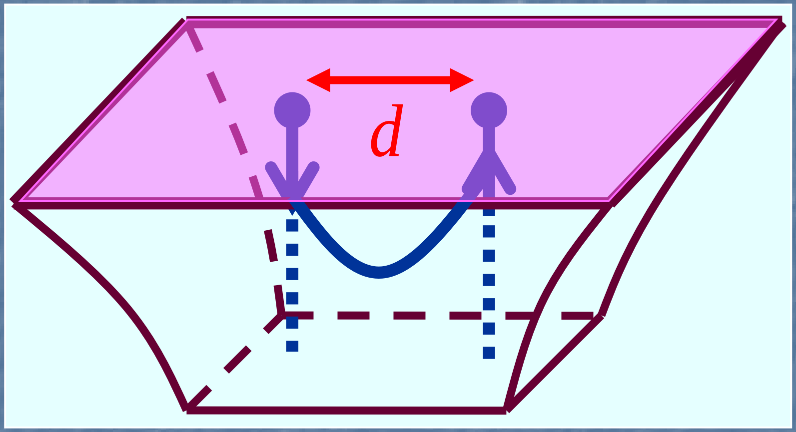


Quark y Antiquark superpuestos = 2 Cuerdas c/orientación opuesta

Quark-Antiquark



=

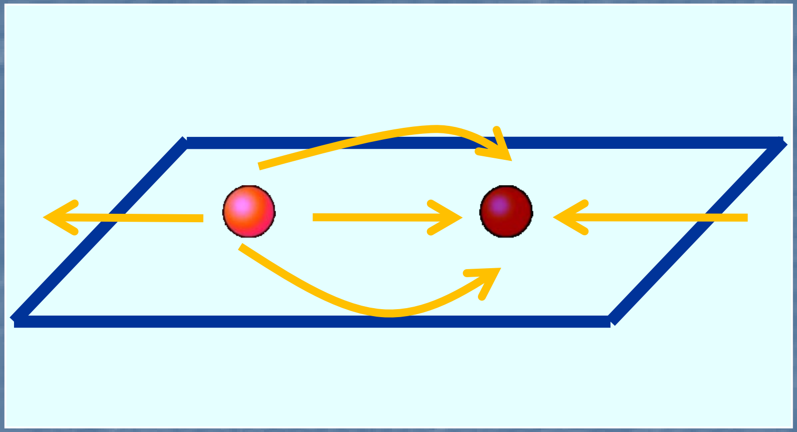


Quark-Antiquark = 1 Cuerda c/AMBOS extremos en $z = 0$

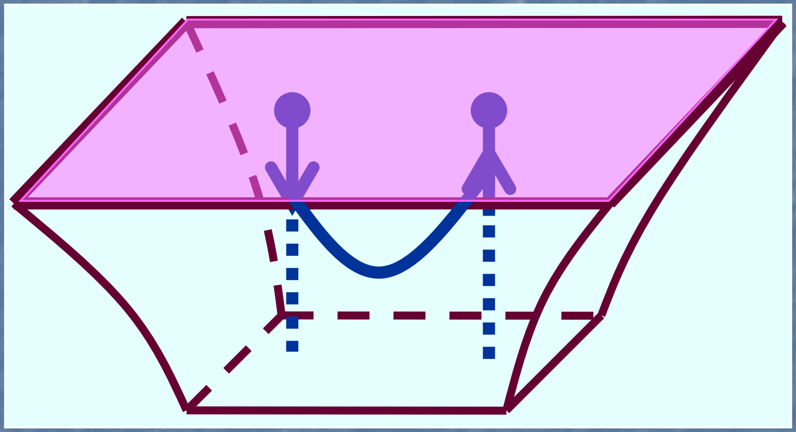
$$\left\langle \mathrm{Tr}\left[F^2(\vec{x},t)\right]\right\rangle_{q\bar{q}} \underset{|\vec{x}|\gg d}{=} \frac{15\Gamma(\frac{1}{4})^4\sqrt{g_{YM}^2 N_c}\, d^3}{8(2\pi)^5\left|\vec{x}\right|^7} \qquad \left(\text{cf. } \frac{d^2}{\left|\vec{x}\right|^6}\right) \quad ✓$$

[Callan,AG] [Klebanov,Maldacena,Thorn]

Quark-Antiquark



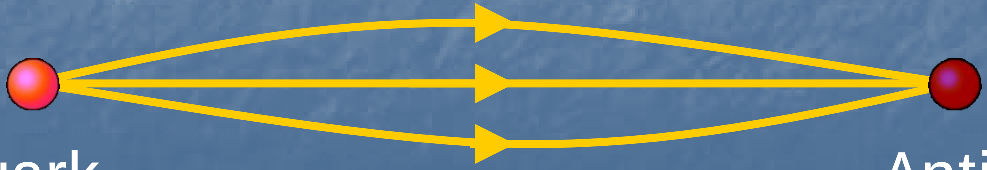
=



Quark-Antiquark $=$ 1 Cuerda c/AMBOS extremos en $z = 0$

Extremos $\leftrightarrow$ Quarks , Cuerda $\leftrightarrow$ Campo Gluónico (+etc.)

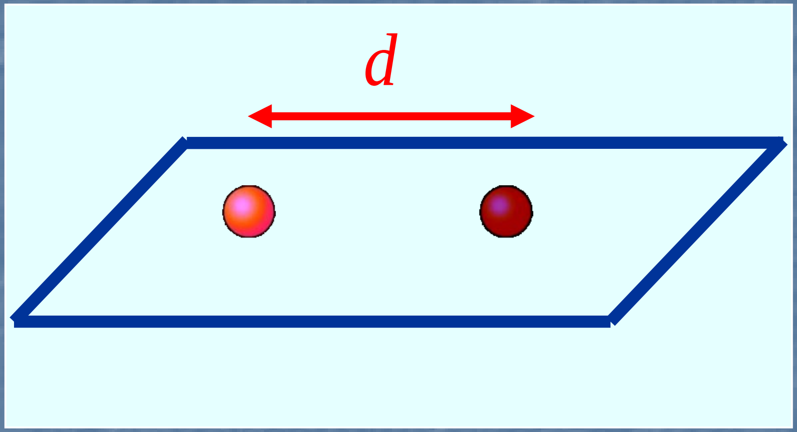
Es decir, ¡'cuerda de QCD' vive en 5 (+5) dimensiones!



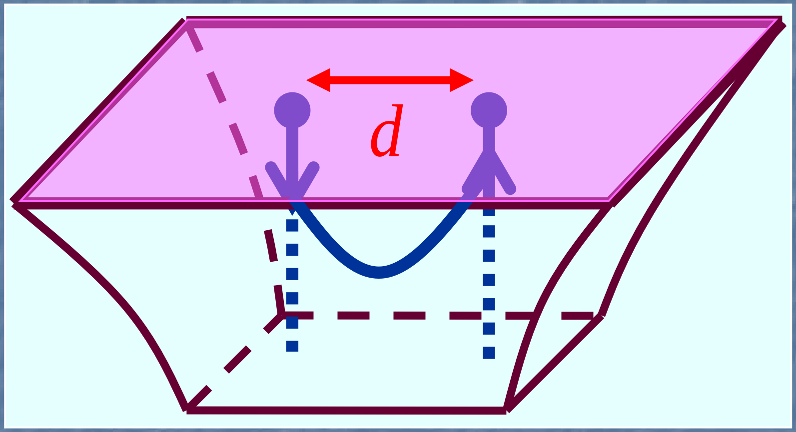
Quark

Antiquark

Potencial Quark-Antiquark



$=$



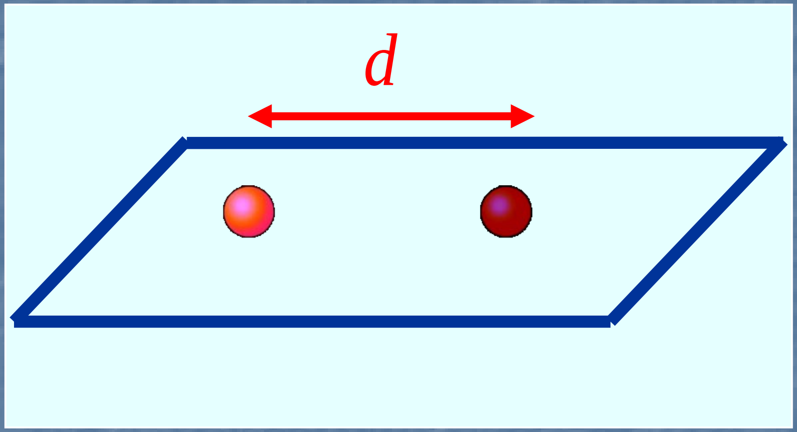
Quark-Antiquark $=$ 1 Cuerda c/AMBOS extremos en $z = 0$

La energía de ligado (cuerda en forma de U – 2 cuerdas verticales) conduce al **potencial quark-antiquark**

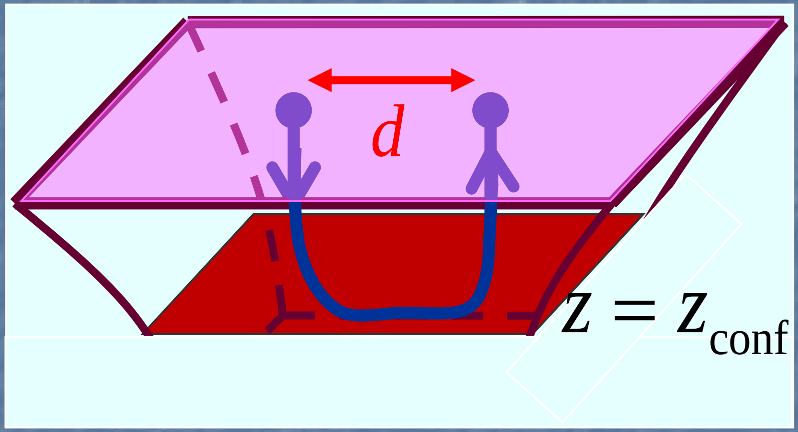
$$V_{q\bar{q}}(d) = -\frac{4\pi^2 \sqrt{g_{YM}^2 N_c}}{\Gamma(\frac{1}{4})^4 d}$$

[Rey,Yee; Maldacena] ✓

Potencial Quark-Antiquark



=



Quark-Antiquark $=$ 1 Cuerda c/AMBOS extremos en $z=0$

$$V_{q\bar{q}}^{T=0}(d) \propto d$$ [Witten; Sonnenschein et al.; ...] ✓

- En teorías con **confinamiento**, la geometría es distinta en el IR, y la cuerda NO logra descender arbitrariamente lejos de la frontera, dando lugar entonces al comportamiento lineal esperado

Diccionario AdS/CFT

SYM $\mathcal{N}=4$ $SU(N_c)$ = Cuerdas IIB en espaciotiempo
en 3+1 dim [Maldacena] **asintóticamente** $\mathbf{AdS_5 \times S^5}$

La geometría del lado derecho es **dinámica**:

El espaciotiempo AdS_5 puro corresponde al **vacío** de SYM

Excitaciones sobre AdS_5 corresponden a otros estados

Hasta ahora hemos considerado *pequeñas* excitaciones

Pero también es posible mostrar que SYM hace contacto con **excitaciones grandes de la geometría** (y/u otros campos del fondo)

Diccionario AdS/CFT

SYM $\mathcal{N}=4$ $SU(N_c)$ $=$ Cuerdas IIB en espaciotiempo en 3+1 dim [Maldacena] **asintóticamente** $\mathrm{AdS}_5 \times S^5$

La geometría del lado derecho es **dinámica**:

El espaciotiempo AdS_5 puro corresponde al **vacío** de SYM

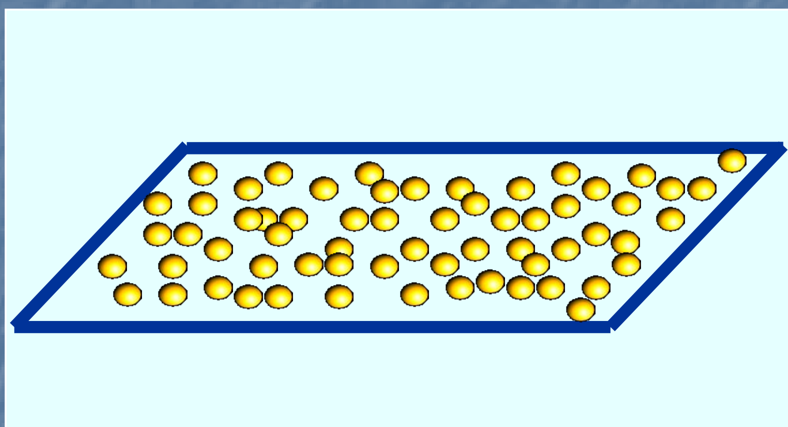
Excitaciones sobre AdS_5 corresponden a otros estados

P.ej., **agujero negro** en AdS_5 corresponde a ensamble con temperatura finita

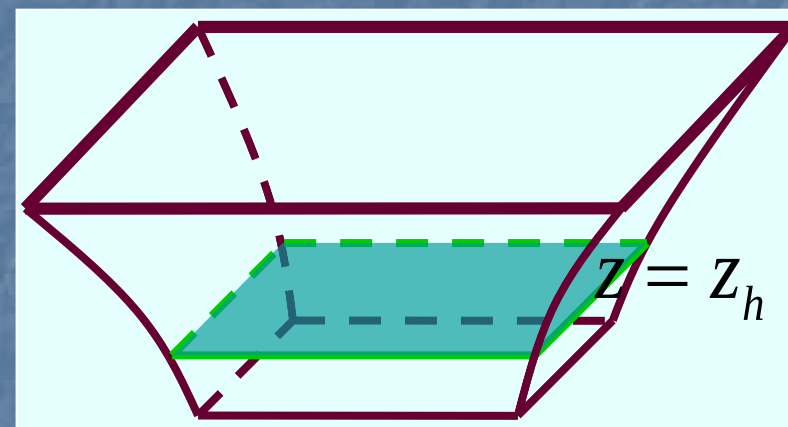
$$ds^2_{\mathrm{SchwAdS}} = \left(\frac{L}{z}\right)^2 \left[\left(-\left(1-\frac{z^4}{z_h^4}\right) dt^2 + d\vec{x}^2 \right) + \frac{dz^2}{\left(1-\frac{z^4}{z_h^4}\right)} \right]$$

Diccionario AdS/CFT

SYM $\mathcal{N}=4$ $SU(N_c)$ $=$ Cuerdas IIB en espaciotiempo
a T finita [Maldacena] $\mathrm{SchwAdS}_5(L,z_h)\times S^5(L)$



$=$

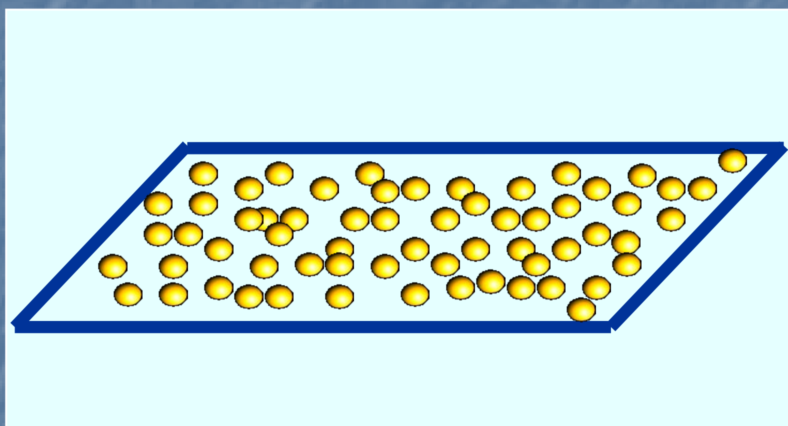


Plasma de gluones (+ escalares & fermiones) $=$ Agujero (brana) negro(a) en AdS

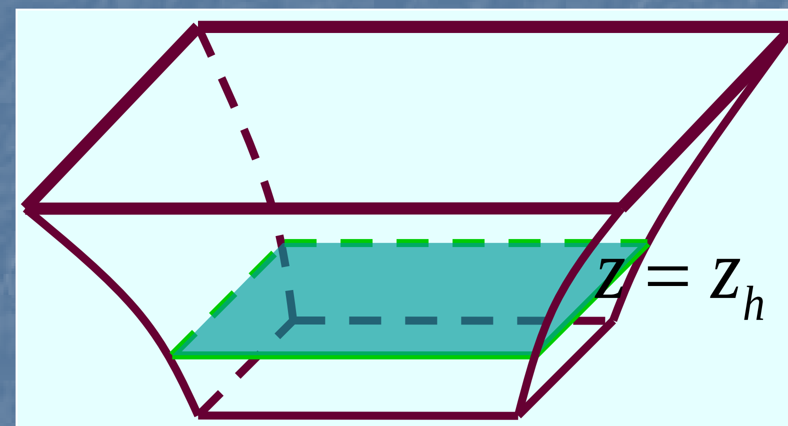
$$T = \frac{r_h}{\pi L^2} = \frac{1}{\pi z_h} = T_H$$ [Witten]

Diccionario AdS/CFT

SYM $\mathcal{N}=4$ $SU(N_c)$ = Cuerdas IIB en espaciotiempo
a T finita [Maldacena] $\mathrm{SchwAdS}_5(L,z_h)\times S^5(L)$



=



Plasma de gluones (+ escalares & fermiones) = Agujero (brana) negro(a) en AdS

Este plasma nos sirve como **modelo de juguete** para el **plasma de quarks y gluones** (QGP) que se obtiene más allá de la temperatura de desconfinamiento de QCD

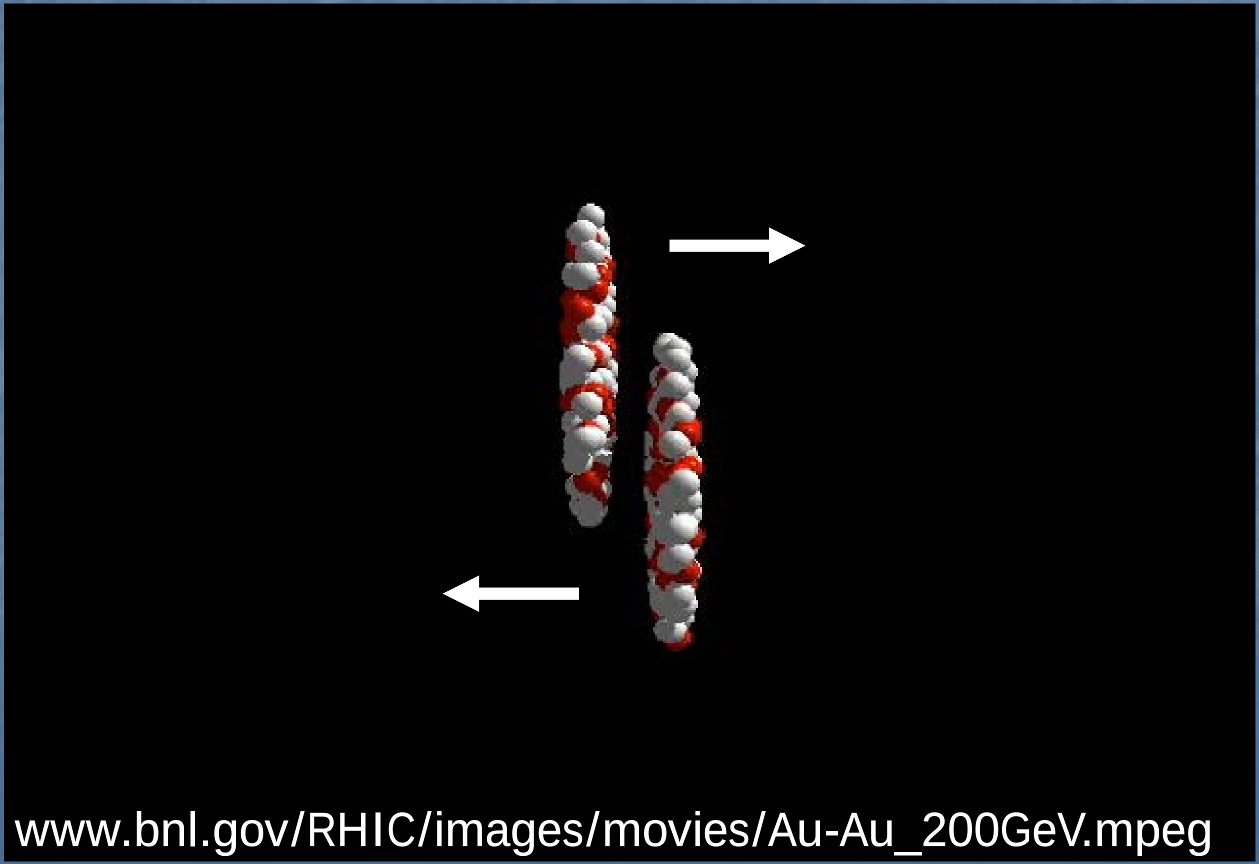
La temperatura necesaria es de **billones de grados** (cien mil veces más caliente que el núcleo del Sol)

Increíblemente, se ha logrado alcanzar en el acelerador de partículas estadounidense **RHIC** y en el europeo **LHC**

QGP en RHIC (y LHC)

Au+Au (400 nucleones)

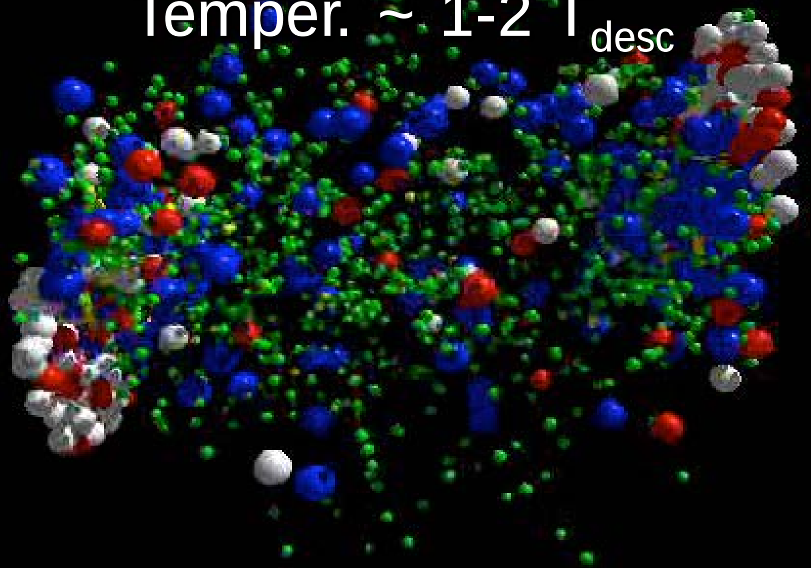
100 GeV/nucleón



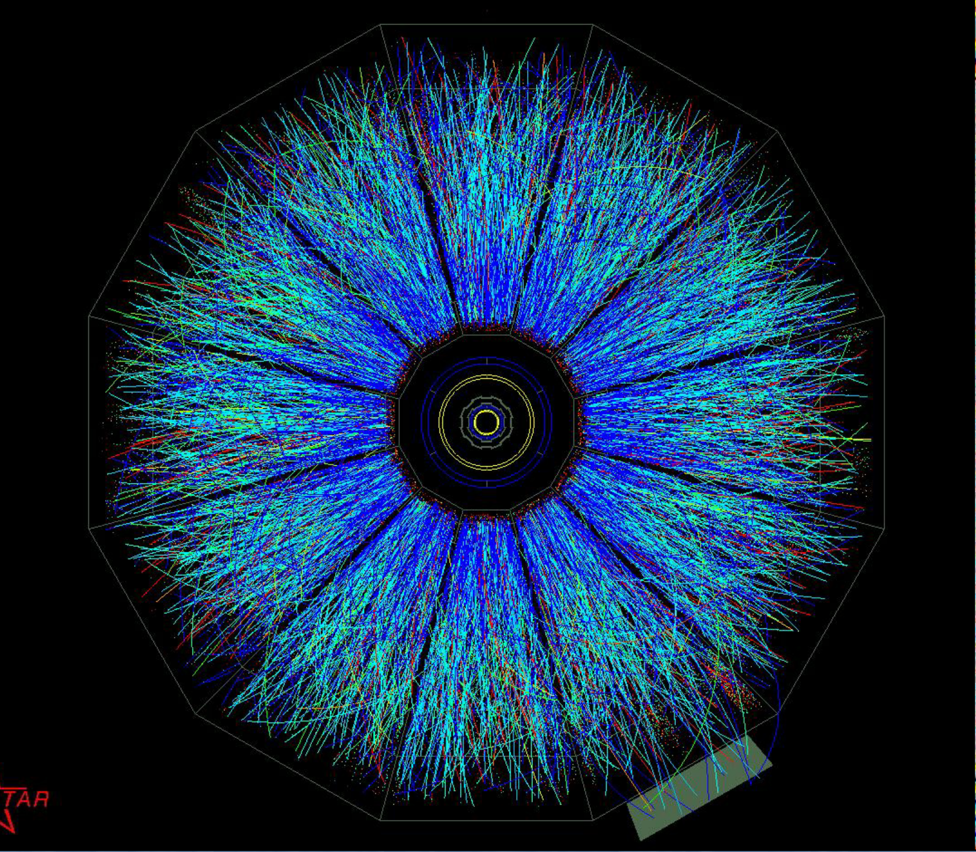
QGP en RHIC (y LHC)

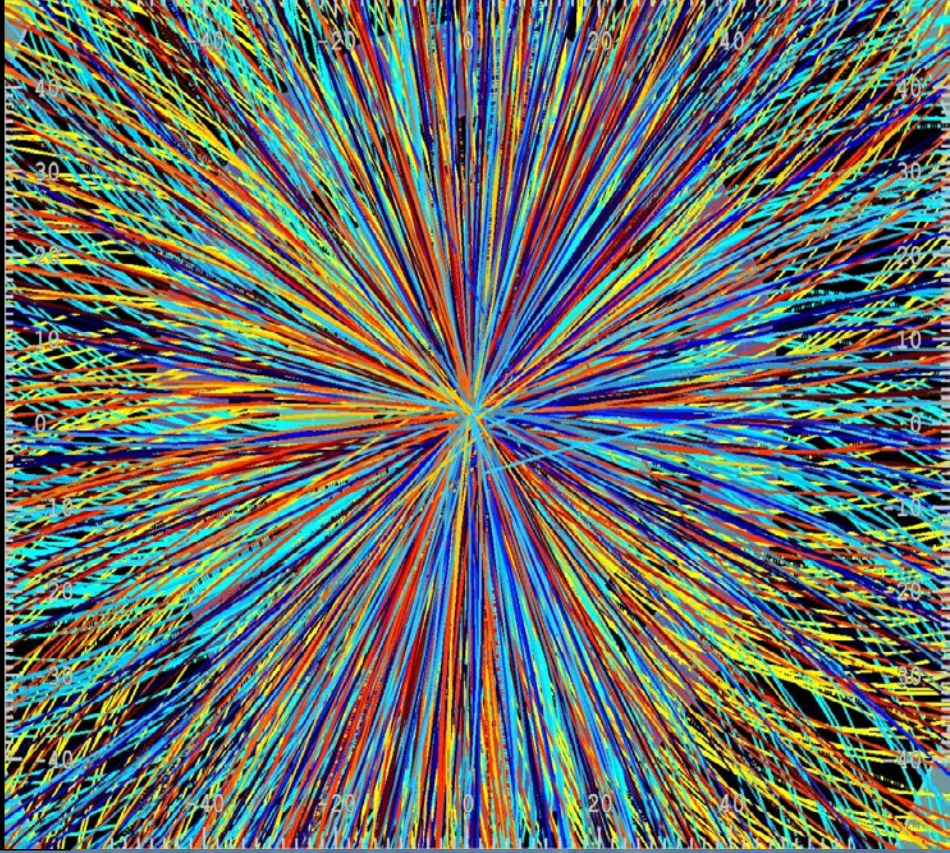
Au+Au (400 nucleones) 100 GeV/nucleón $\rightarrow$ QGP $\rightarrow$ ~5000 hadrones+etc. ~2 GeV/hadrón

Tamaño ~ 10^{-14} m
Duración ~ 10^{-22} s
Temper. ~ 1-2 T_{desc}



www.bnl.gov/RHIC/images/movies/Au-Au_200GeV.mpeg





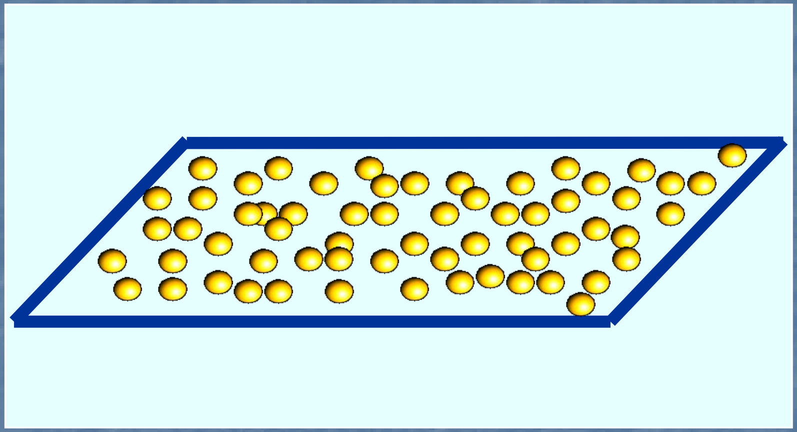
$\Rightarrow$ Plasma **fuertemente acoplado**

$$g_{YM}^2 \approx 3-10 \qquad g_{YM}^2/4\pi \approx 0.3-1$$

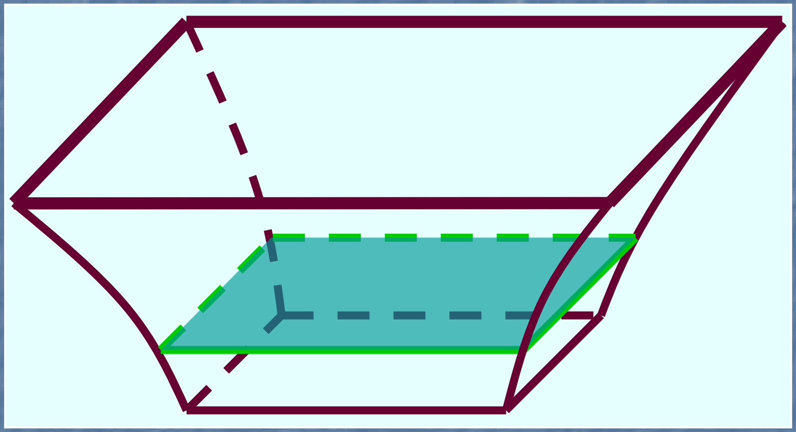
$$g_{YM}^2 N_c \approx 10-30 \qquad N_c = 3$$

Plasmas en AdS/CFT: $g_{YM}^2 N_c \gg 1 \qquad N_c \gg 1$

Aplicación: Entropía de Plasma



=

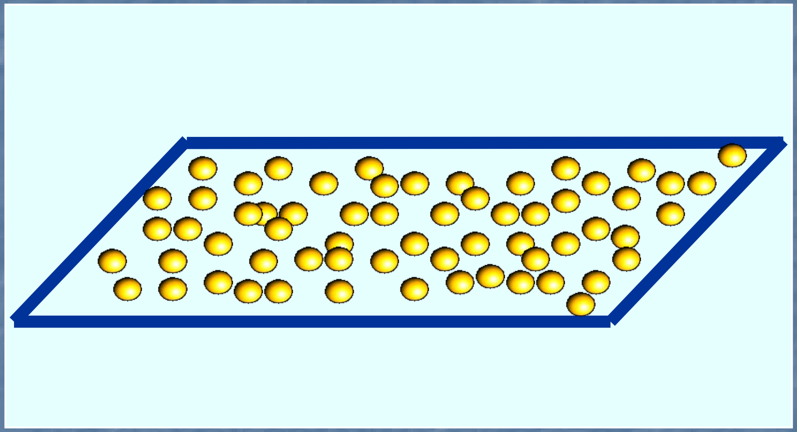


$$S_{\text{plasma}} = S_{\text{BH}} = \frac{A_H}{4G_N}$$

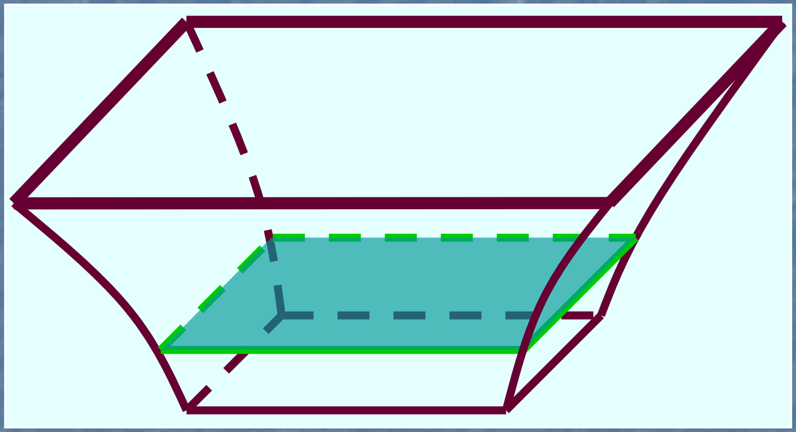
← área del horizonte

[Bekenstein,Hawking]

Aplicación: Entropía de Plasma



$=$



$$g_{YM}^2 N_c \ll 1 \quad \Rightarrow$$

$$S_{\text{plasma}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V$$

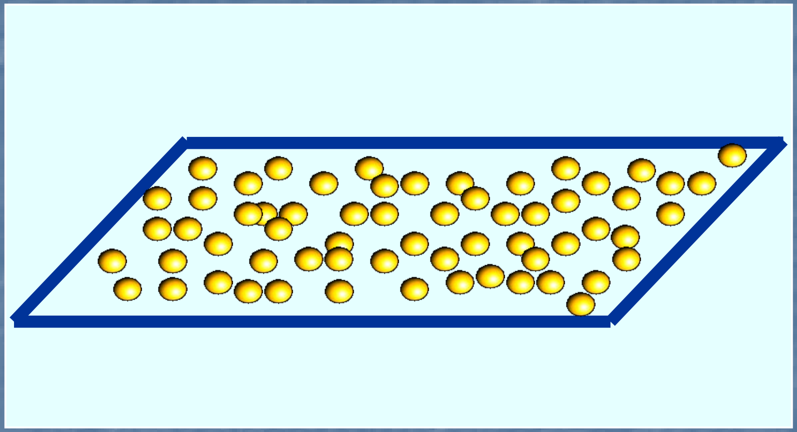
$$g_{YM}^2 N_c \gg 1 \quad \Rightarrow$$

$$S_{\text{BH}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(\frac{3}{4}\right)$$

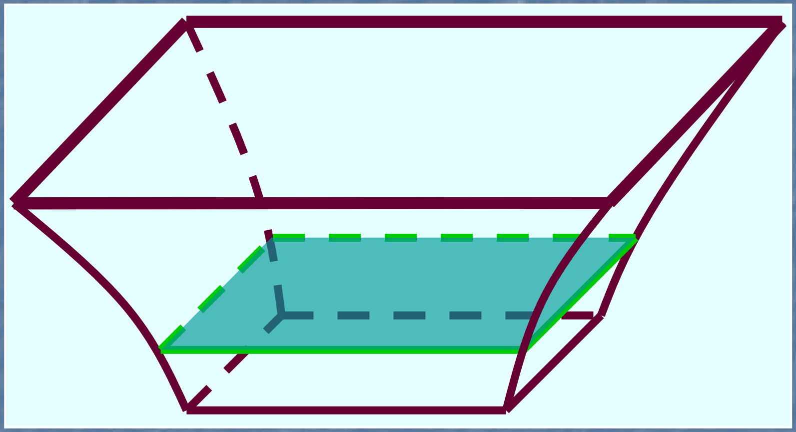
Predicción holográfica

[Gubser,Klebanov,Peet]

Aplicación: Entropía de Plasma



$=$



$$g_{YM}^2 N_c \ll 1 \quad \Rightarrow$$

$$S_{\text{plasma}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(1 - \frac{3 g_{YM}^2 N_c}{4\pi^2} + \cdots \right)$$

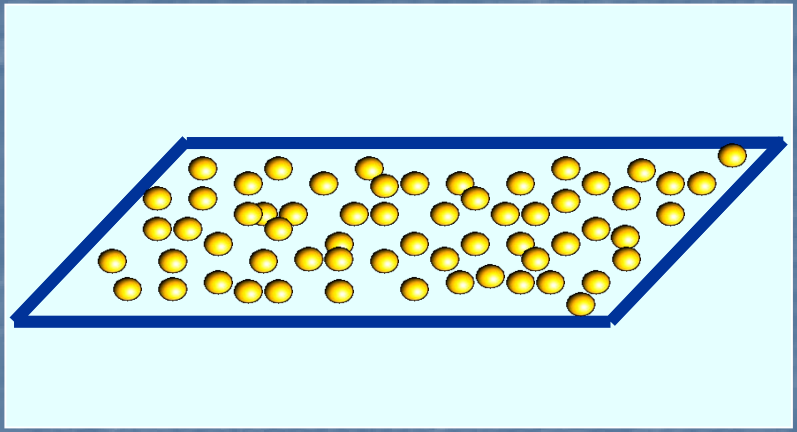
[Gubser,Klebanov,Peet;
Fotopoulos,Taylor]

$$g_{YM}^2 N_c \gg 1 \quad \Rightarrow$$

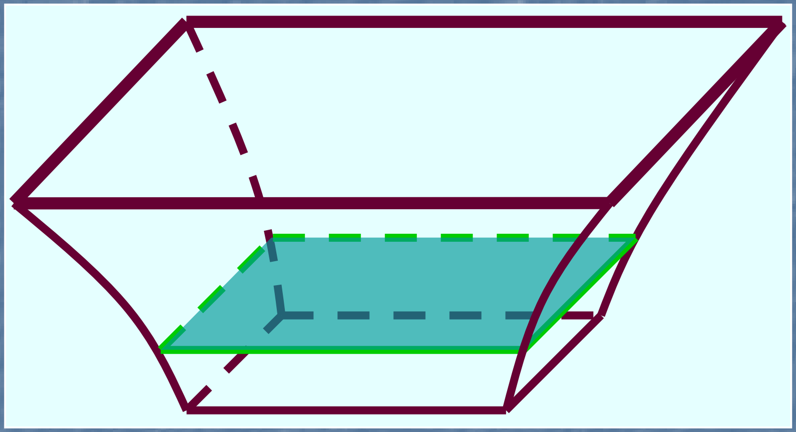
$$S_{\text{BH}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(\frac{3}{4} + \frac{45\zeta(3)}{64\sqrt{2}\left(g_{YM}^2 N_c\right)^{3/2}} + \cdots \right)$$

[Gubser,Klebanov,Peet;
Gubser,Klebanov,Tseytlin]

Aplicación: Entropía de Plasma



$=$



$$g_{YM}^2 N_c \ll 1 \quad \Rightarrow$$

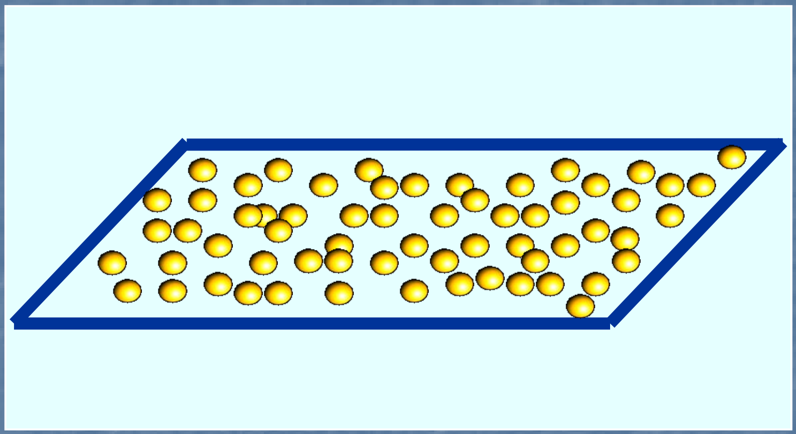
$$S_{\text{plasma}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(1 - \frac{3 g_{YM}^2 N_c}{4\pi^2} + \cdots \right)$$

$$g_{YM}^2 N_c \gg 1 \quad \Rightarrow$$

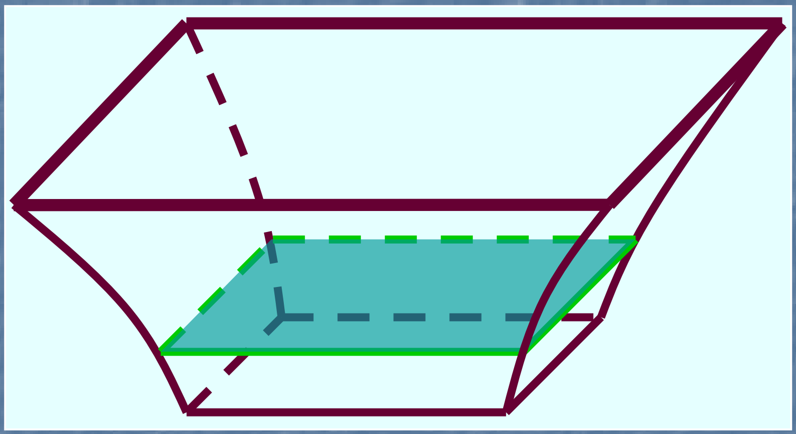
$$S_{\text{BH}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(\frac{3}{4} + \frac{45\zeta(3)}{64\sqrt{2}\left(g_{YM}^2 N_c\right)^{3/2}} + \cdots \right)$$

Este es un resultado de **primeros principios** en SYM $\mathcal{N} = 4$ **fuertemente acoplada** (interesante en sí mismo)...

Aplicación: Entropía de Plasma



=



$$g_{YM}^2 N_c \ll 1 \quad \Rightarrow$$

$$S_{\text{plasma}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(1 - \frac{3 g_{YM}^2 N_c}{4\pi^2} + \cdots \right)$$

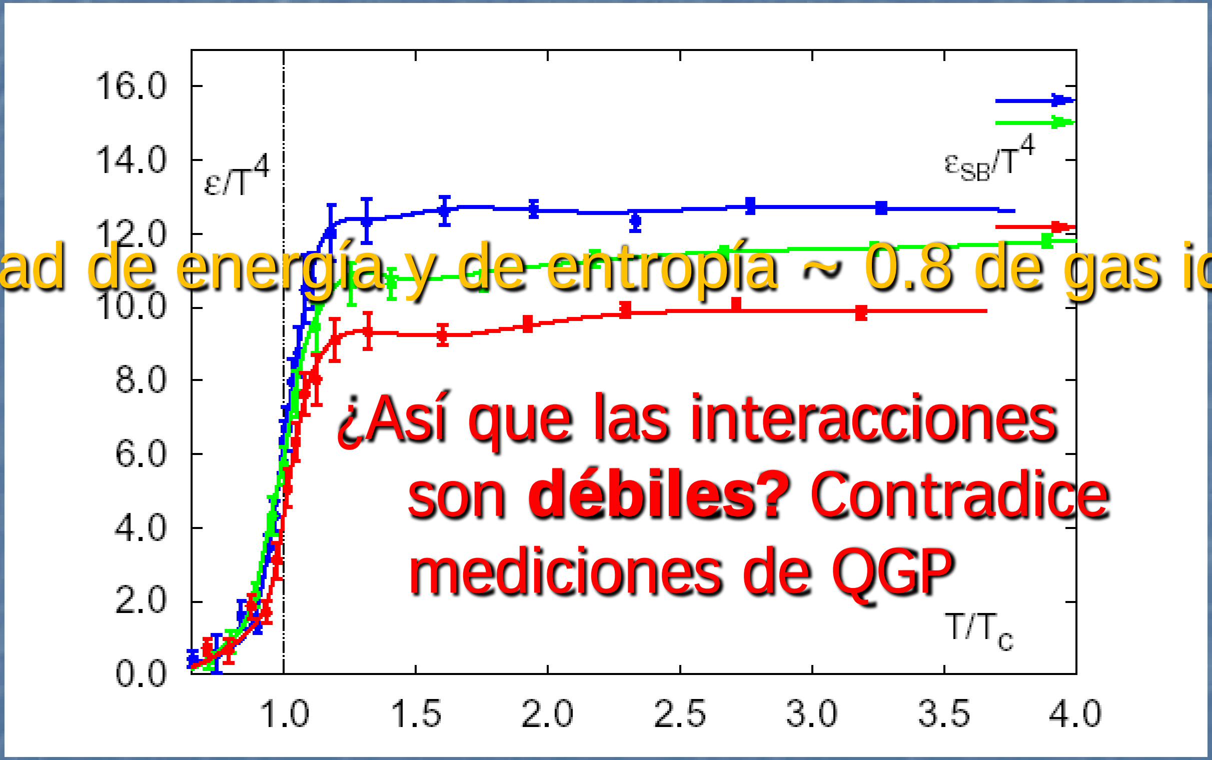
$$g_{YM}^2 N_c \gg 1 \quad \Rightarrow$$

$$S_{\text{BH}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(\frac{3}{4} + \frac{45\zeta(3)}{64\sqrt{2}\left(g_{YM}^2 N_c\right)^{3/2}} + \cdots \right)$$

... que además puede pensarse como un modelo de juguete para la entropía en QGP (disponible con QCD en retícula)

QGP con QCD en la Retícula

Cálculos numéricos dan desconfinamiento a $T_c \simeq 190\mathrm{MeV}$

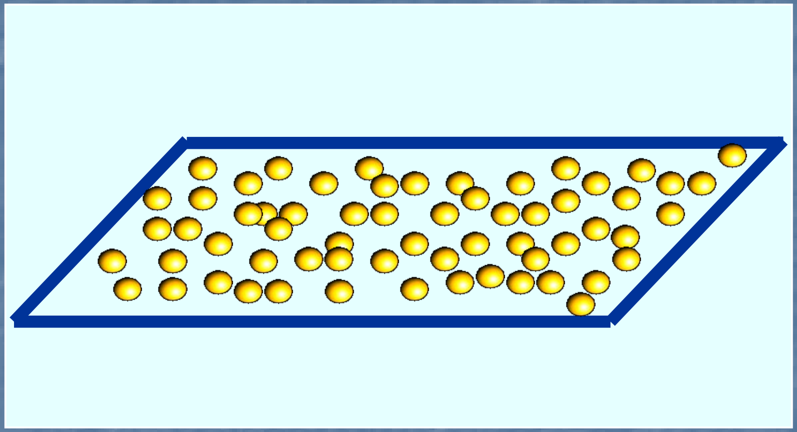


Densidad de energía y de entropía ~ 0.8 de gas ideal

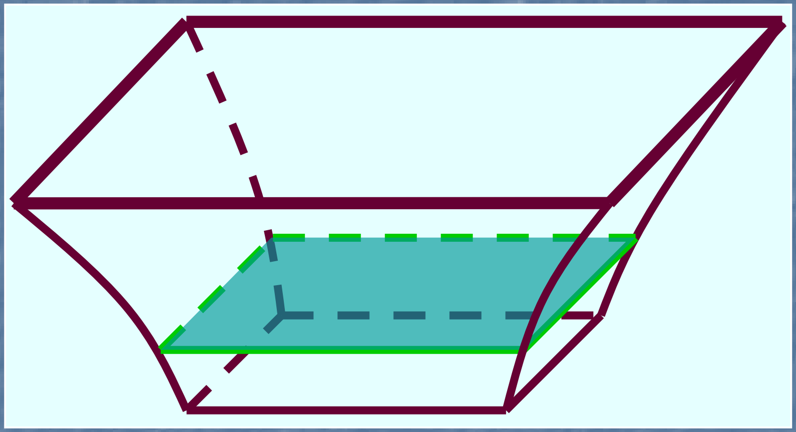
¿Así que las interacciones son **débiles?** Contradice mediciones de QGP

De: F. Karsch, hep-lat/0106019

Aplicación: Entropía de Plasma



$=$



$$g_{YM}^2 N_c \ll 1 \quad \Rightarrow$$

$$S_{\text{plasma}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(1 - \frac{3 g_{YM}^2 N_c}{4\pi^2} + \cdots \right)$$

$$g_{YM}^2 N_c \gg 1 \quad \Rightarrow$$

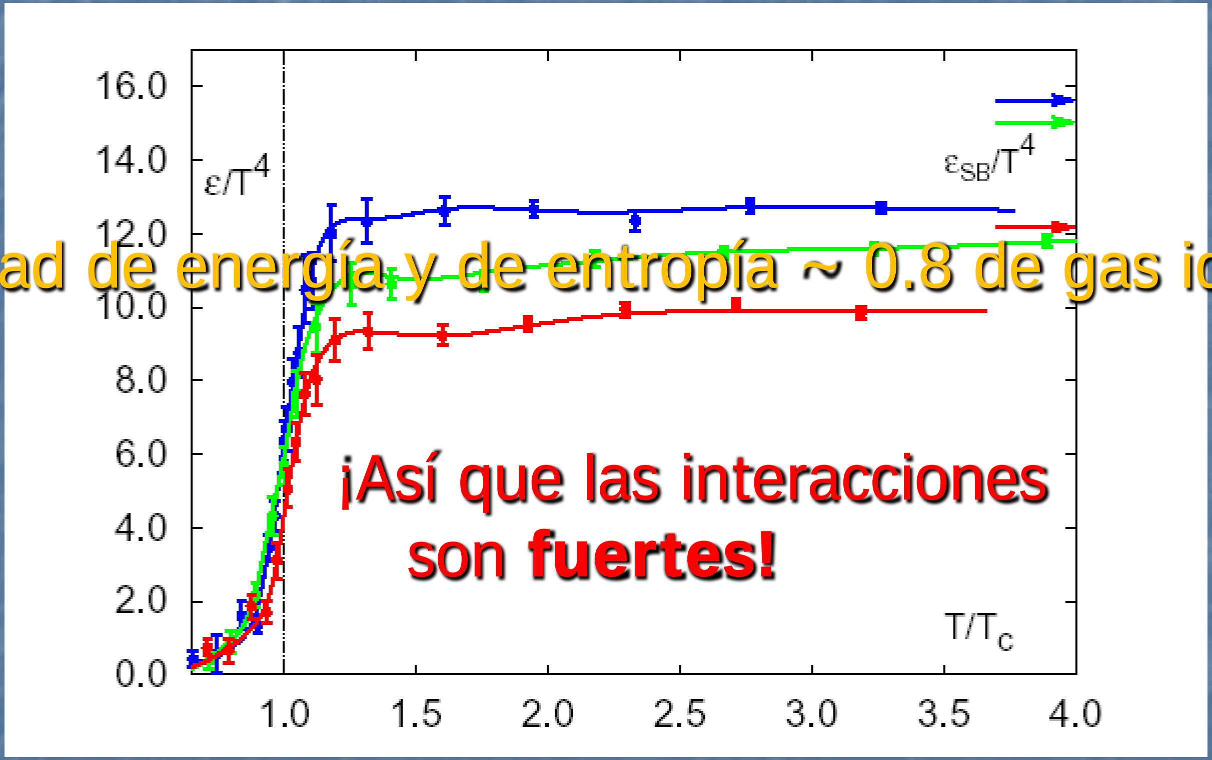
$$S_{\text{BH}} = \frac{2\pi^2}{3} N_c^2 T^3 V \left(\frac{3}{4} + \frac{45\zeta(3)}{64\sqrt{2}\left(g_{YM}^2 N_c\right)^{3/2}} + \cdots \right)$$

[Gubser,Klebanov,Peet]

$$\frac{S(g_{YM}^2 N_c = \infty)}{S(g_{YM}^2 N_c = 0)} = 0.75$$ ¡cercano a ~ 0.8 de QCD en la red!

QGP con QCD en la Retícula

Cálculos numéricos dan desconfinamiento a $T_c \simeq 190\,\mathrm{MeV}$

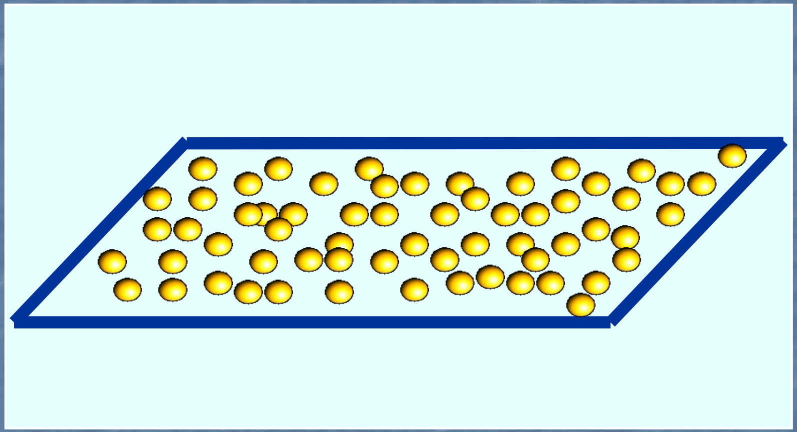


Densidad de energía y de entropía ~ 0.8 de gas ideal

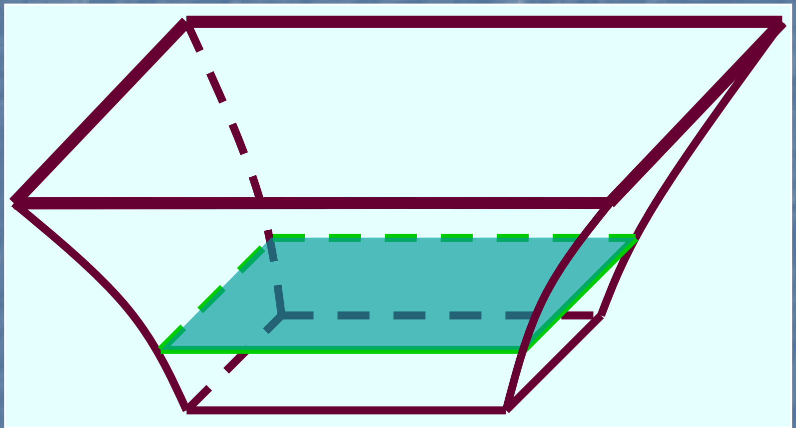
¡Así que las interacciones son **fuertes**!

De: F. Karsch, hep-lat/0106019

Aplicación: Viscosidad ('de corte')



$=$



$$\eta = \lim_{\omega\to 0} \frac{1}{2\omega}\int d^4x\, e^{i\omega t}\left\langle\left[T_{xy}(x), T_{xy}(0)\right]\right\rangle = \lim_{\omega\to 0}\frac{1}{16\pi G_N}\sigma_{h_{\mu\nu}}(\omega)$$

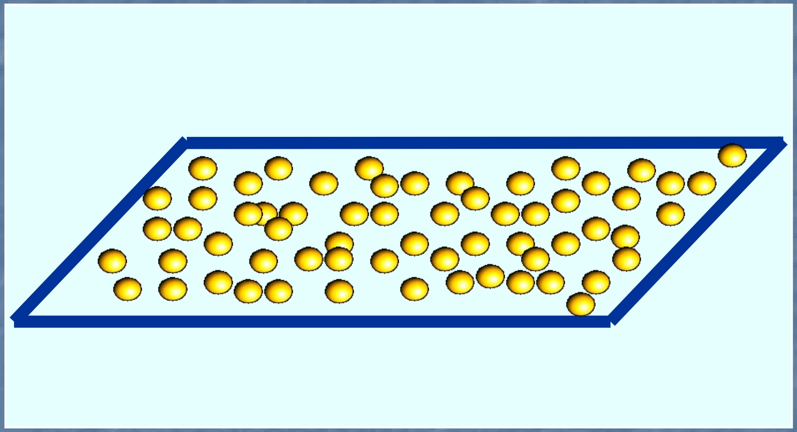
[Kubo]

[Callan; Gubser, Klebanov, Polyakov; Witten]

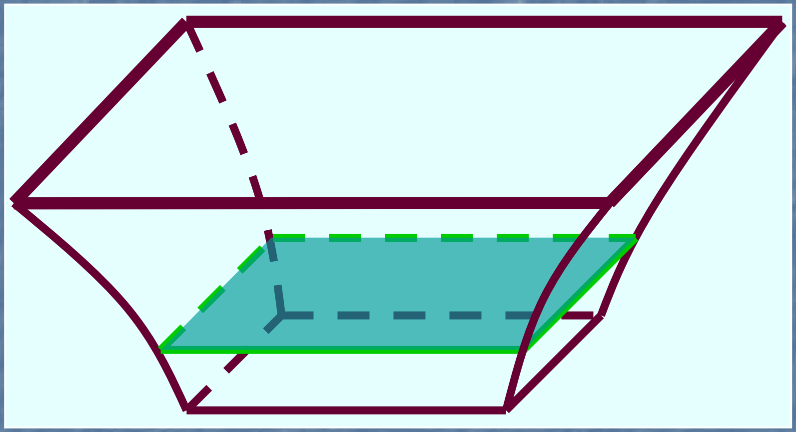
Correlador de 2 puntos del tensor de energía-momento

Sección eficaz de absorción de gravitones

Aplicación: Viscosidad ('de corte')



$=$



$$g_{YM}^2 N \ll 1 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\eta}{s} \sim \frac{\hbar / k_B}{(g_{YM}^2 N)^2 \log(1/g_{YM}^2 N)} \gg \frac{\hbar}{k_B}$$

[Arnold,Moore,Yaffe]

$$g_{YM}^2 N \gg 1 \quad \Rightarrow$$

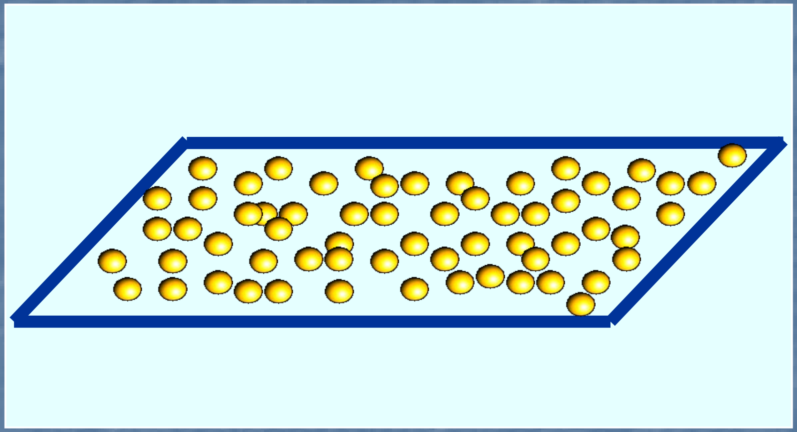
$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{k_B}\left(\frac{1}{4\pi} + \frac{135\zeta(3)}{64\sqrt{2}\pi(g_{YM}^2 N)^{3/2}} + \ldots\right) \ll \frac{\hbar}{k_B}$$

[Policastro,Son,Starinets;Buchel,Liu,Starinets]

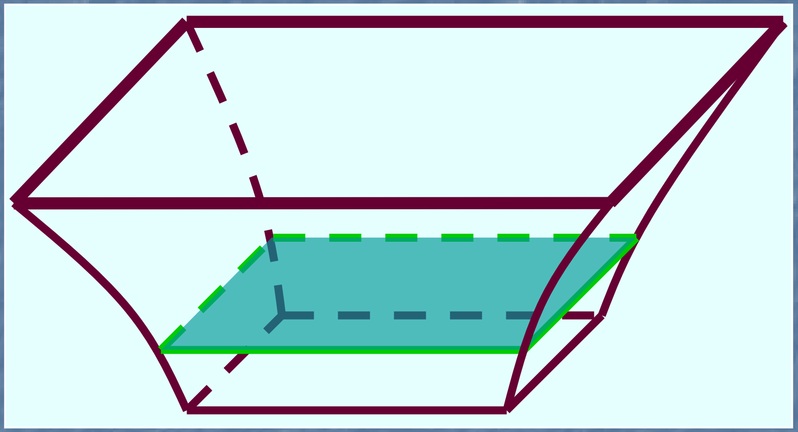
NO accesible con QCD en retícula

¿Comparar con experimento?

Aplicación: Viscosidad (‘de corte’)



$=$



$$g_{YM}^2 N \ll 1 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{\eta}{s} \sim \frac{\hbar / k_B}{(g_{YM}^2 N)^2 \log(1/g_{YM}^2 N)} \gg \frac{\hbar}{k_B}$$

[Arnold,Moore,Yaffe]

$$g_{YM}^2 N \gg 1 \quad \Rightarrow$$

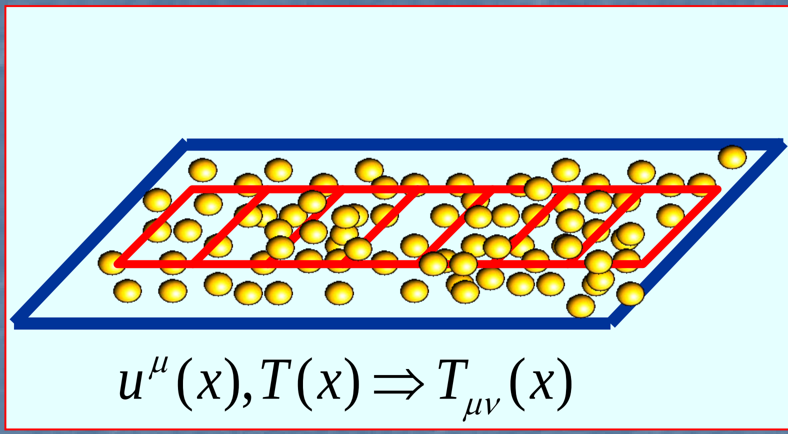
$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{k_B}\left(\frac{1}{4\pi} + \frac{135\zeta(3)}{64\sqrt{2}\pi(g_{YM}^2 N)^{3/2}} + \dots\right) \ll \frac{\hbar}{k_B}$$

[Policastro,Son,Starinets;Buchel,Liu,Starinets]

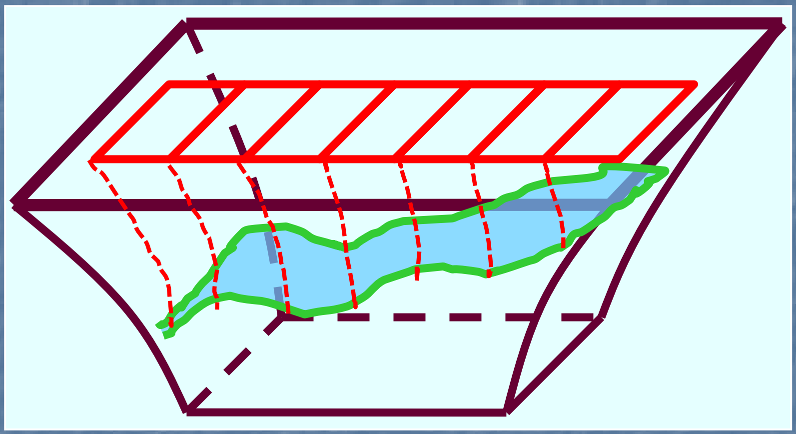
Universal: igual en todos los ejemplos holográficos ~0.08

¡¡Y cercano a valor ~0.1-0.2 estimado en RHIC y LHC!!

Correspondencia Fluidos/Gravedad



$=$



Descripción hidrodinámica

$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$$
$$(\mu, \nu = 0, \ldots, 3)$$

$\longleftrightarrow$

Agujero negro no uniforme

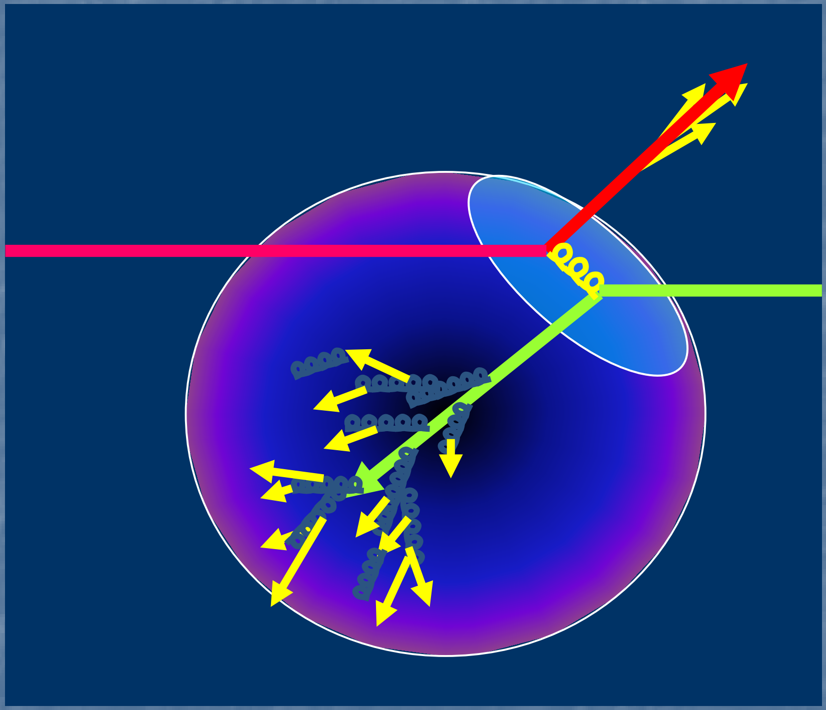
$$R_{mn} - \tfrac{1}{2} R g_{mn} = -\Lambda g_{mn}$$
$$(m, n = 0, \ldots, 3, r)$$

[Bhattacharyya,Hubeny,Minwalla,Rangamani]

¡¡Navier-Stokes=Einstein!!

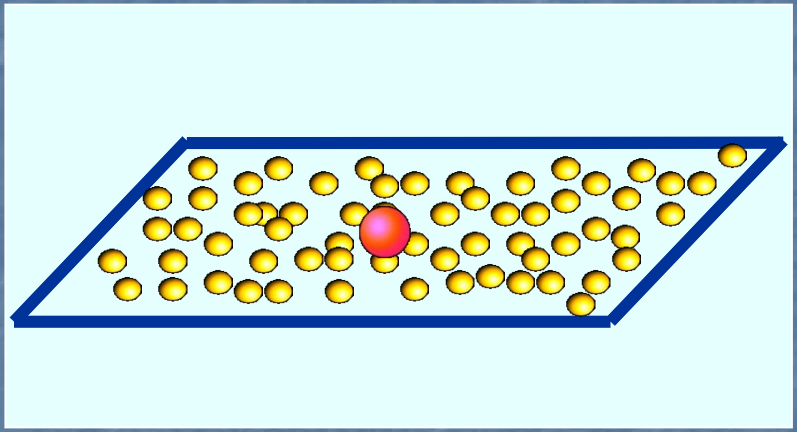
Aplicación: Pérdida de Energía

En RHIC/LHC se observa **pérdida significativa de energía** de quarks que atraviesan el medio ("supresión de jets")

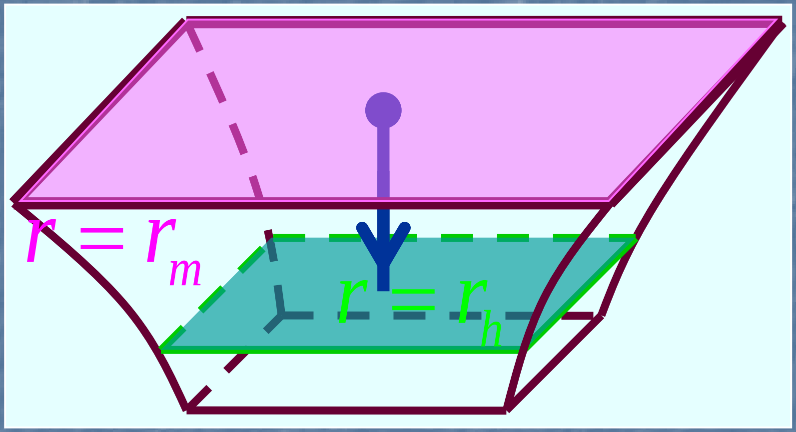


¿Cuánta energía pierde el quark?
¿A dónde se va esta energía?

Aplicación: Pérdida de Energía

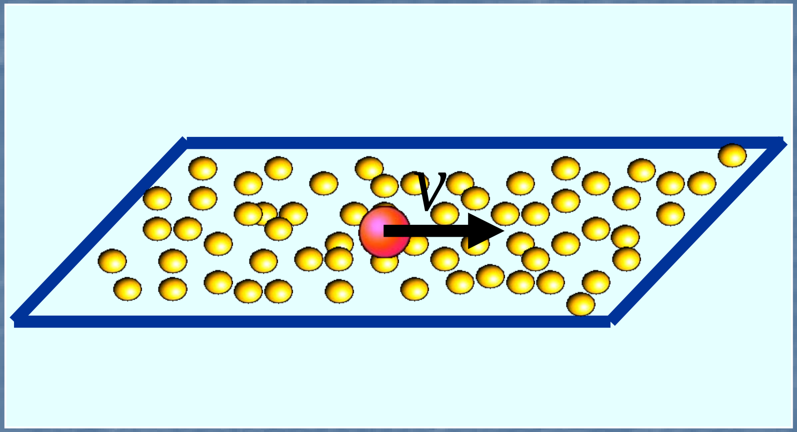


$=$

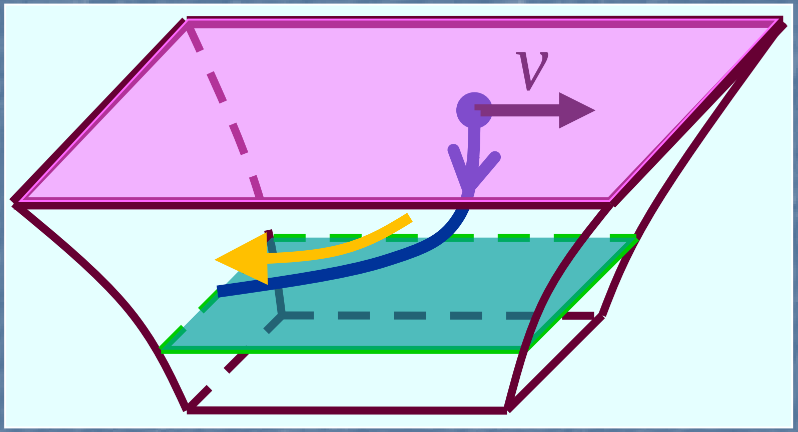


Quark pesado en plasma de SYM ($m \gg T$) $=$ Cuerda vertical en Schw-AdS desde $r = r_m$ a $r = r_h \ll r_m$

Aplicación: Pérdida de Energía



=



Para quark en movimiento, la cuerda cuelga detrás del extremo, y actúa como un sumidero de energía,

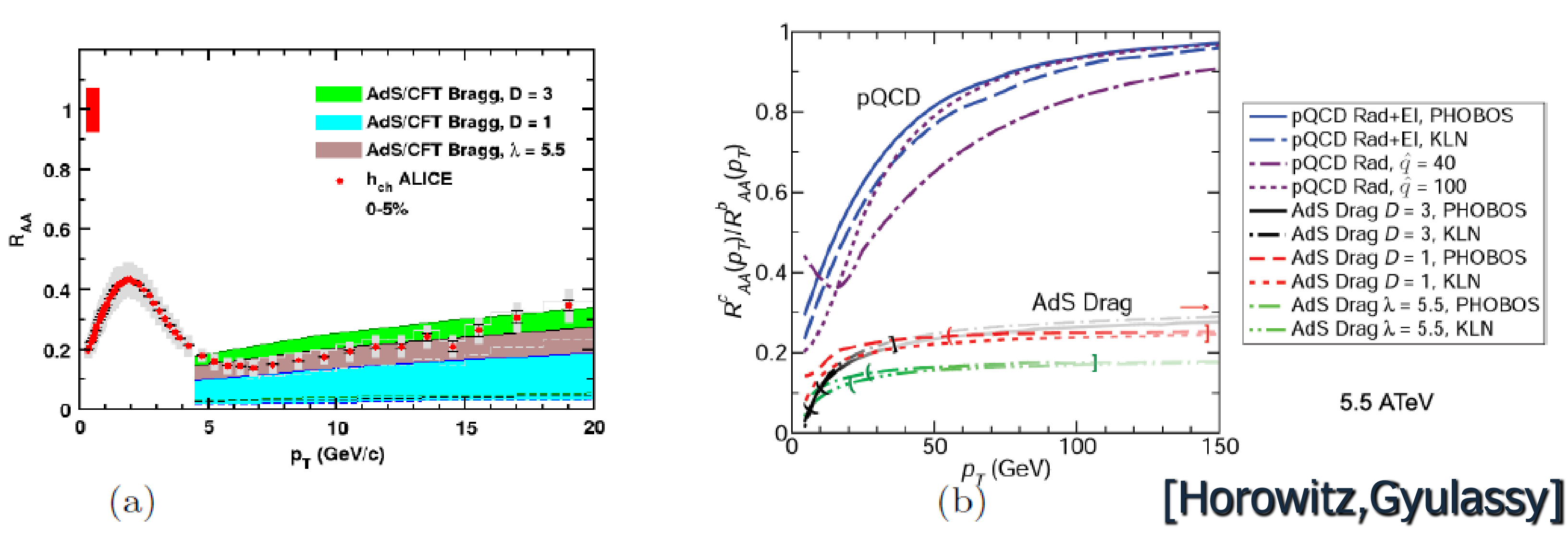
i.e., el quark tiene una 'cola', ¡que es la responsable de **fuerza de arrastre** esperada!

Tasa de Pérdida de Energía:

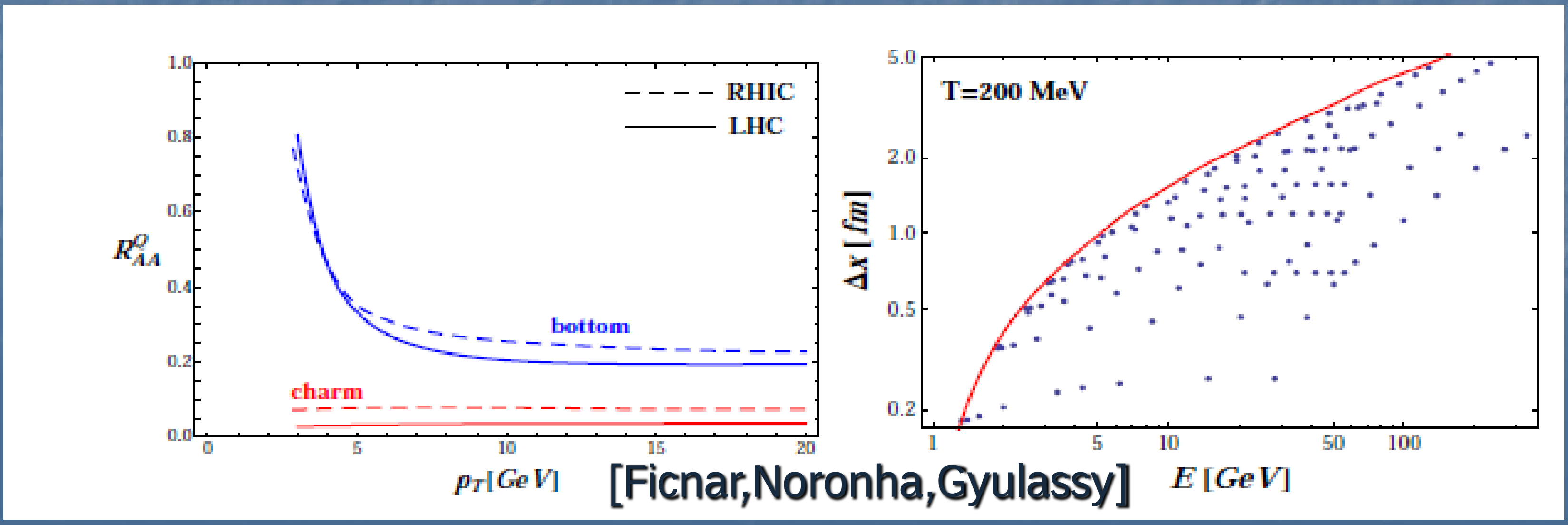
$$\frac{dE}{dx} = -\frac{\pi}{2}\sqrt{\lambda}T^2 \frac{v}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{dp_x}{dt}$$

[Herzog,Karch,Kovtun,Kozcaz,Yaffe; Gubser; Casalderrey-Solana,Teaney]

Los números otra vez dan resultados aproximadamente en el rango esperado y dan pie a **modelos fenomenológicos**, como p.ej.,



[Horowitz,Gyulassy]

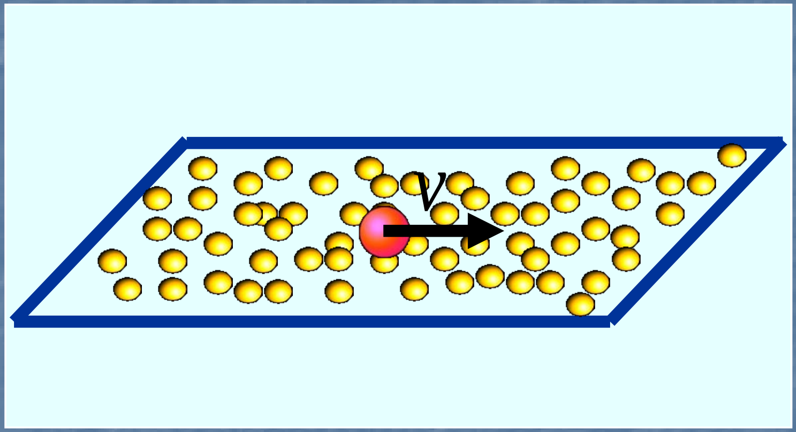


[Ficnar,Noronha,Gyulassy]

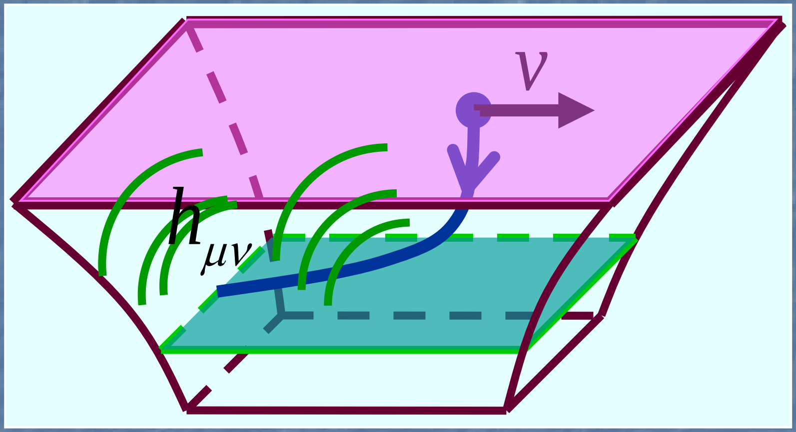
NOTA: las comparaciones de este tipo contra datos experimentales NO ponen a prueba a la correspondencia holográfica por sí sola, sino **en combinación con las suposiciones específicas del modelo fenomenológico**

La novedad importante es que gracias a la holografía ahora tenemos cierta **intuición para el régimen de acoplamiento fuerte**

Aplicación: Pérdida de Energía



=



Es posible determinar perfil de energía disipada a partir de

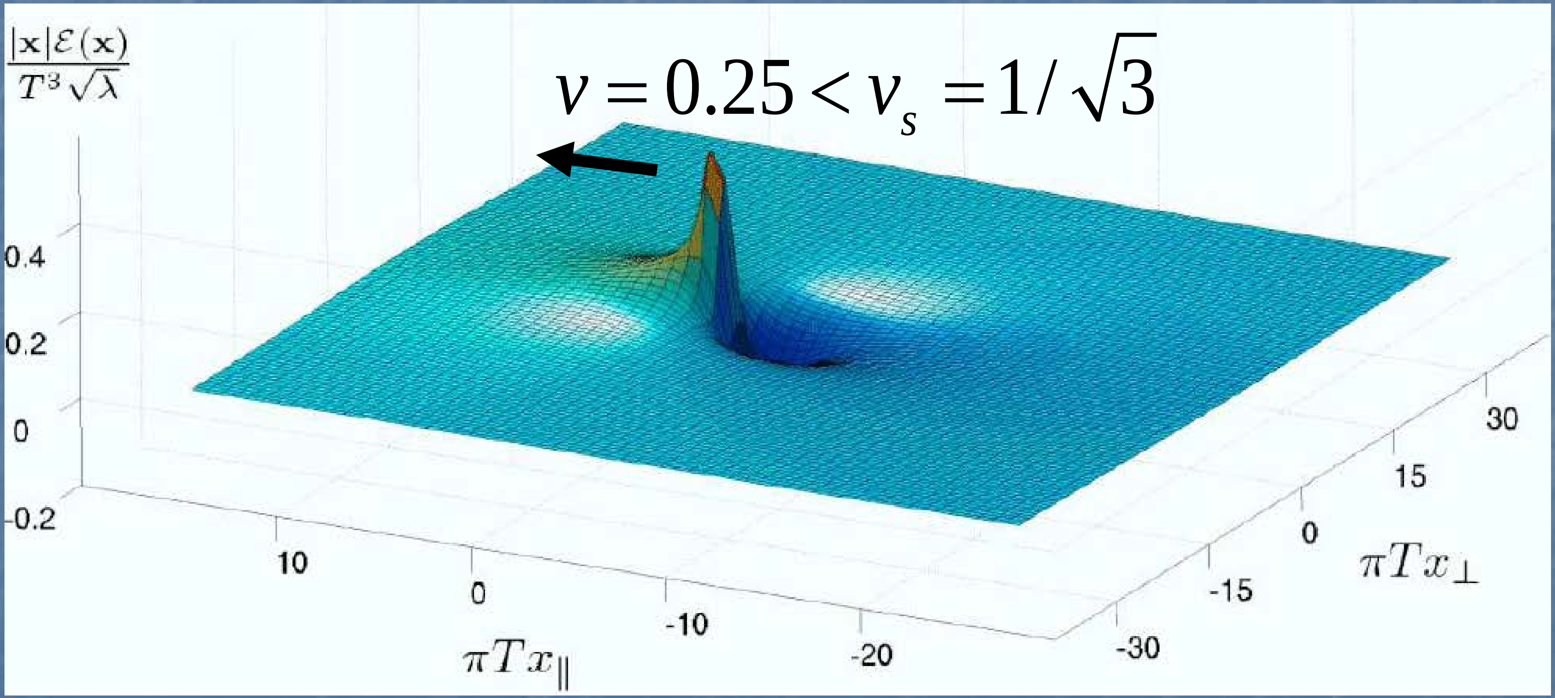
$$\left\langle T_{\mu\nu}(x) \right\rangle_{\mathrm{q},v} \quad \leftrightarrow \quad h_{\mu\nu}(x, r=\infty)$$

[Friess,Gubser,Michalogiorgakis; Friess,Gubser,Michalogiorgakis,Pufu; Yarom; Gubser,Pufu; Gubser,Pufu,Yarom; Chesler,Yaffe; Noronha,Torrieri,Gyulassy; Betz,Gyulassy,Noronha,Torrieri; etc.]

Aplicación: Pérdida de Energía

Densidad de energía en estela generada por quark

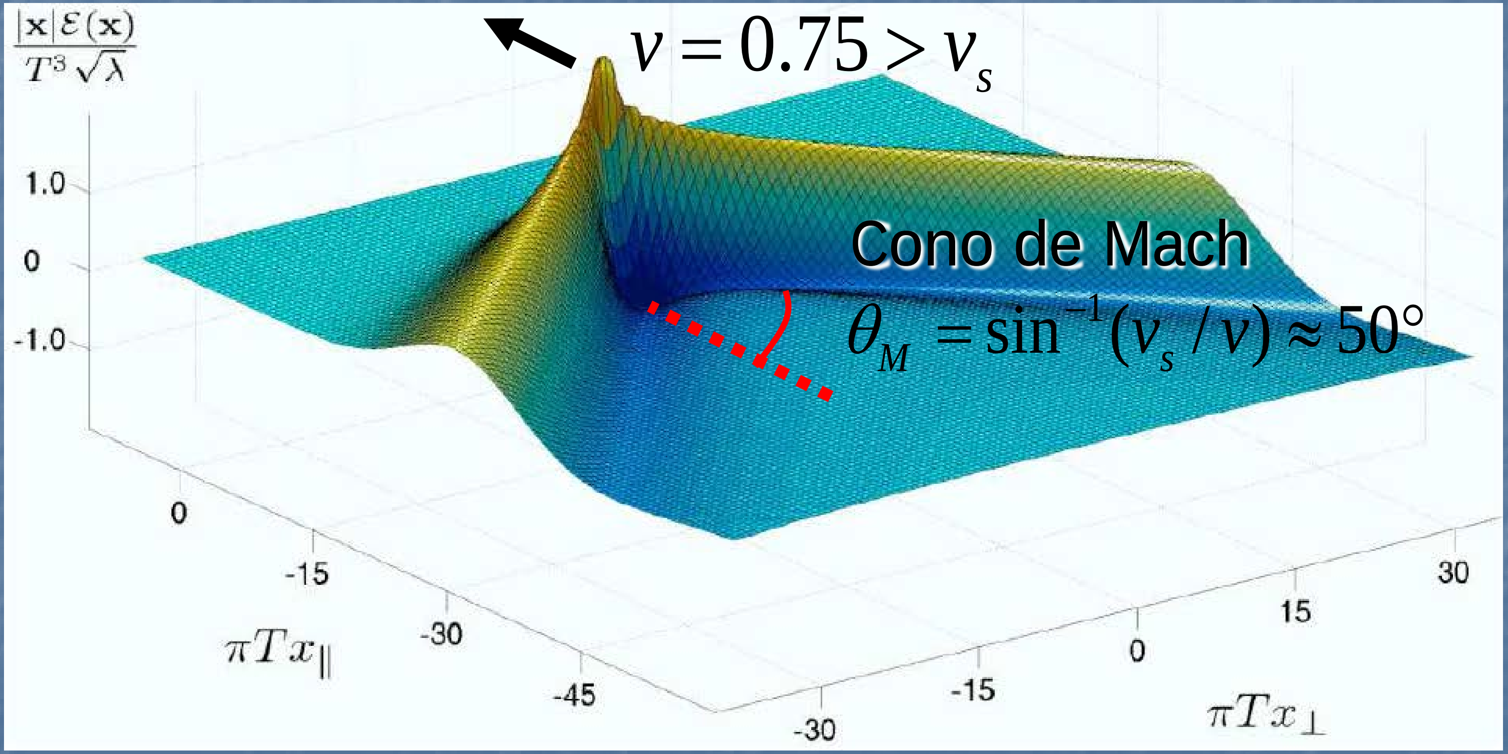
[Gubser,Pufu,Yarom; Chesler,Yaffe]



De: Chesler,Yaffe, arXiv:0706.0368

Aplicación: Pérdida de Energía

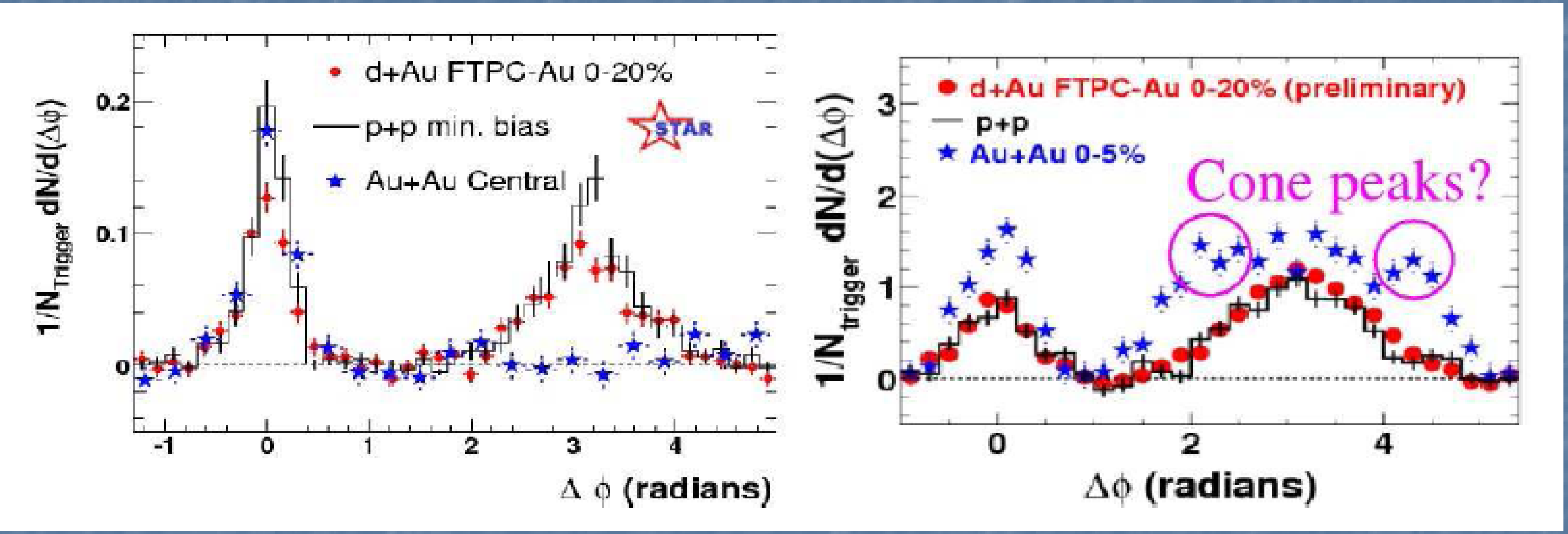
Densidad de energía en estela generada por quark



De: Chesler,Yaffe, arXiv:0706.0368

Aplicación: Pérdida de Energía

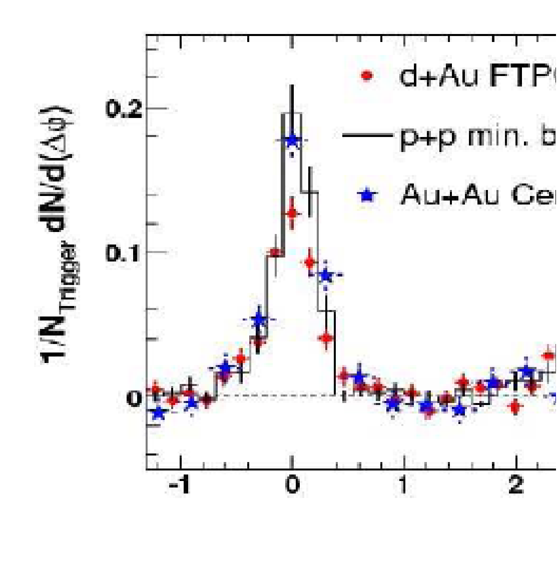
Esto también se ha aplicado a modelos fenomenológicos

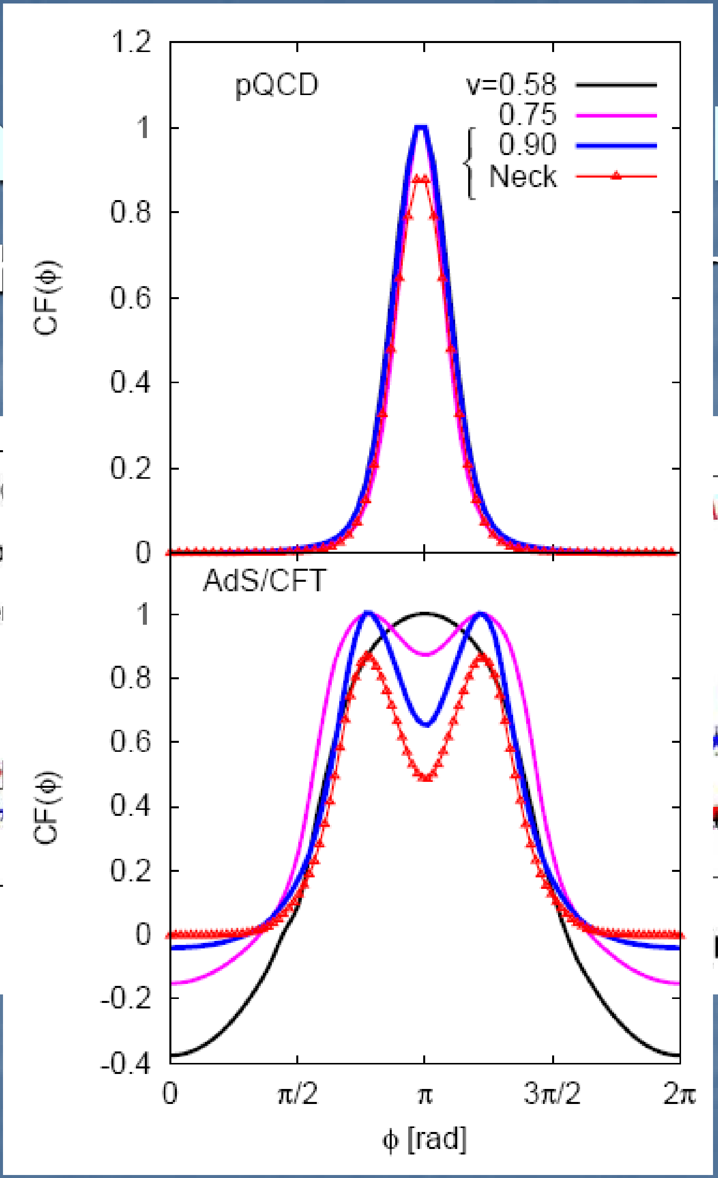


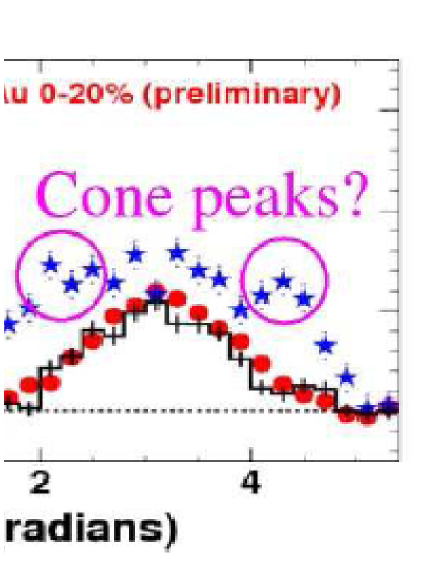
De: Betz,Gyulassy,Noronha,Torrieri arXiv:0807.4526

Aplicación … Energía

Esto también se … omenológicos

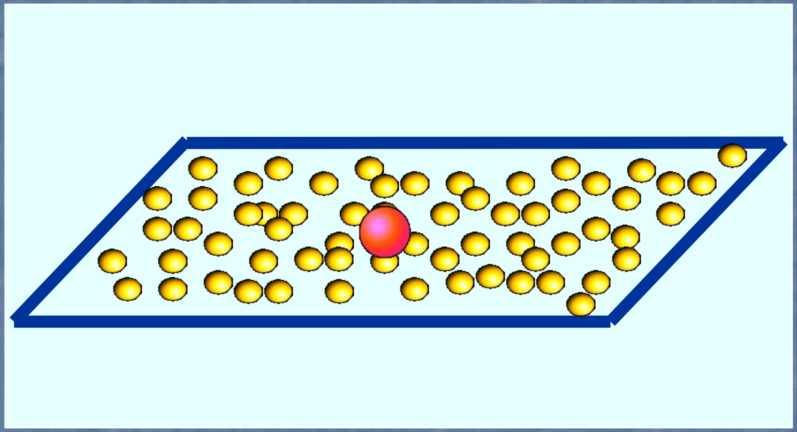




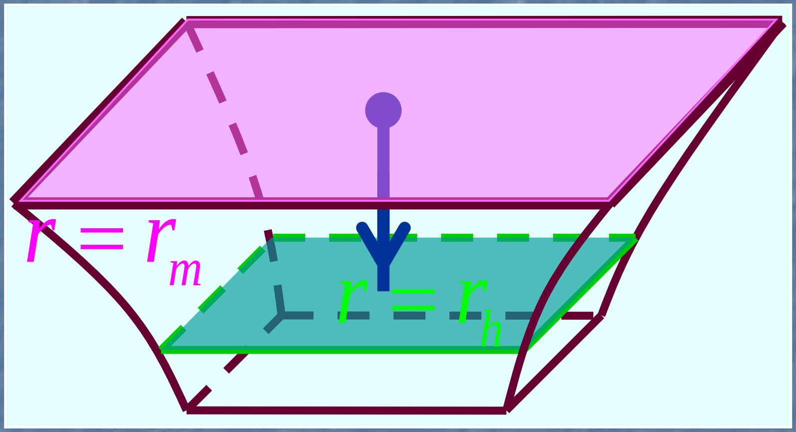


De: Betz,Gyulassy,Noronha,Torrieri arXiv:0807.4526

Aplicación: Movimiento Browniano



$=$

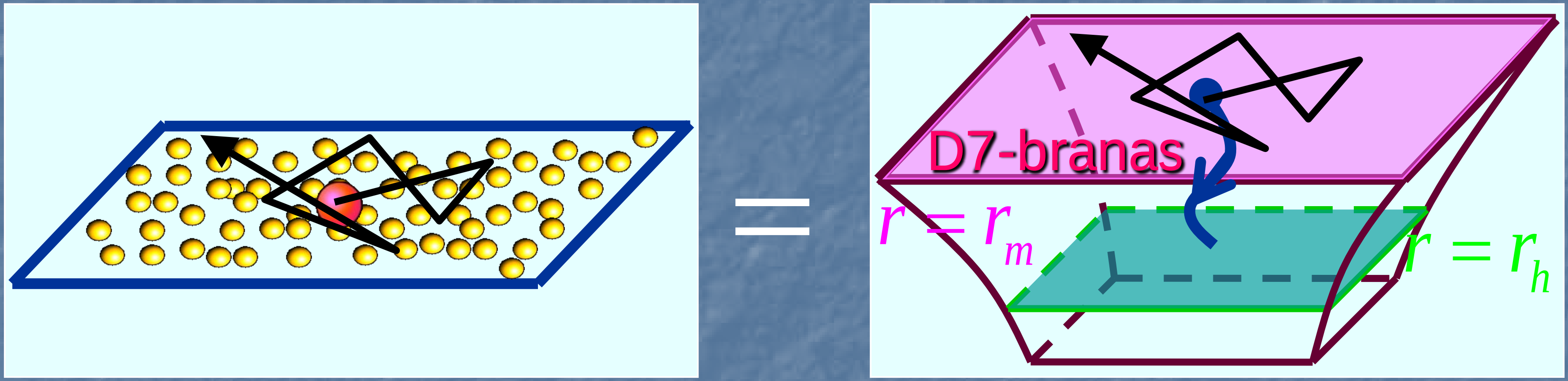


Quark en plasma de SYM plasma ($m \gg T$) $=$ Cuerda vertical en Schw-AdS desde $r = r_m$ a $r = r_h \ll r_m$

Esperamos que el quark experimente movimiento Browniano...

¿Pero quién hace fluctuar al extremo de la cuerda?

Aplicación: Movimiento Browniano

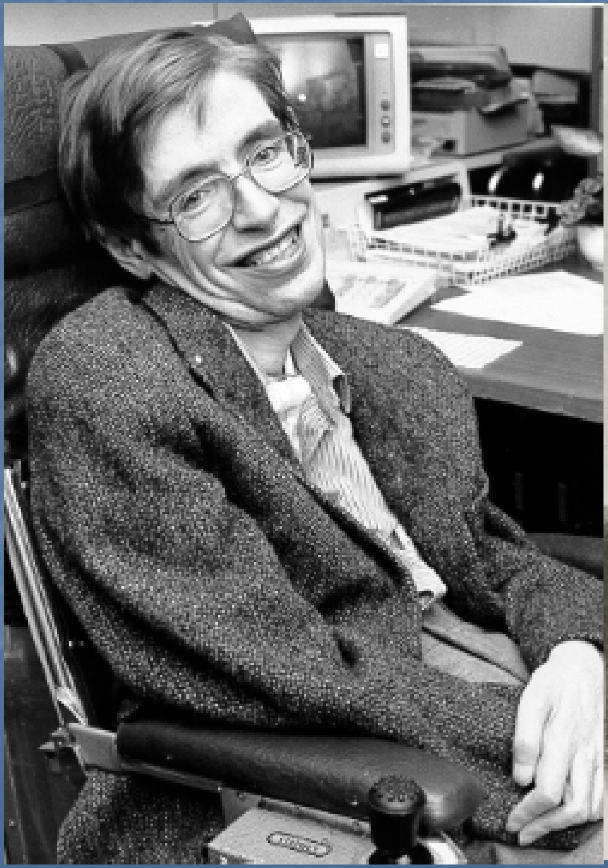


¡La **radiación de Hawking** emitida por el agujero negro (sobre el cuerpo de la cuerda)!

[de Boer,Hubeny,Rangamani,Shigemori; Son,Teaney]

En la correspondencia norma/gravedad,

¡¡Hawking = Brown!!



Muchas Otras QGP-Aplicaciones...

- Apantallamiento [Liu,Rajagopal,Wiedemann; Chernicoff,García,AG; Peeters,Sonnenschein,Zamaklar; etc.]
- Velocidad límite [Argyres,Edalati,Vázquez-Poritz; Gubser; Casalderrey,Teaney; Mateos,Myers,Thomson; Ejaz et al.;etc.]
- Pérdida de energía de partones ligeros [Chesler,Jensen,Karch,Yaffe; Gubser,Gulotta,Pufu,Rocha; Arnold,Vaman, etc.]
- Plasma en expansión [Janik,Peschanski; Shuryak,Sin,Zahed; Nastase; Nakamura,Sin; Friess,Gubser,Michalogiorgiakis,Pufu; etc.]
- Plasma anisotrópico [Mateos,Trancanelli; etc.]
- Termalización [Balasubramanian et al.; Chesler,Teaney; etc.]
- Radiación Cherenkov de mesones [Casalderrey,Mateos; etc.]
- Etc.

Se han explorado aplicaciones similares a sistemas fuertemente acoplados de **materia condensada y física atómica**

[Son; Balasubramanian,McGreevy; Kachru,Liu,Mulligan; Gubser; Hartnoll,Herzog,Horowitz; Hartnoll,Polchinski,Silverstein,Tong; Sachdev; Huijse,Sachdev; Faulkner,Iqbal,Liu,McGreevy,Vegh; Denef,Hartnoll,Sachdev; Horowitz,Way; Jensen,Kachru,Karch,Polchinski,Silverstein; Faulkner,Polchinski; Huijse,Sachdev,Swingle; Hartnoll,Tavanfar; Hartnoll,Hofman,Vegh; Horowitz,Santos; etc.]

En años recientes se ha hecho también contacto con (y uso de) el área de **información cuántica**, particularmente a través de la noción de **entrelazamiento** ...

Entrelazamiento

2 o más objetos alejados pueden tener un comportamiento coordinado, en el sentido de que su indecisión cuántica es compartida:

[Einstein,Podolsky,Rosen]

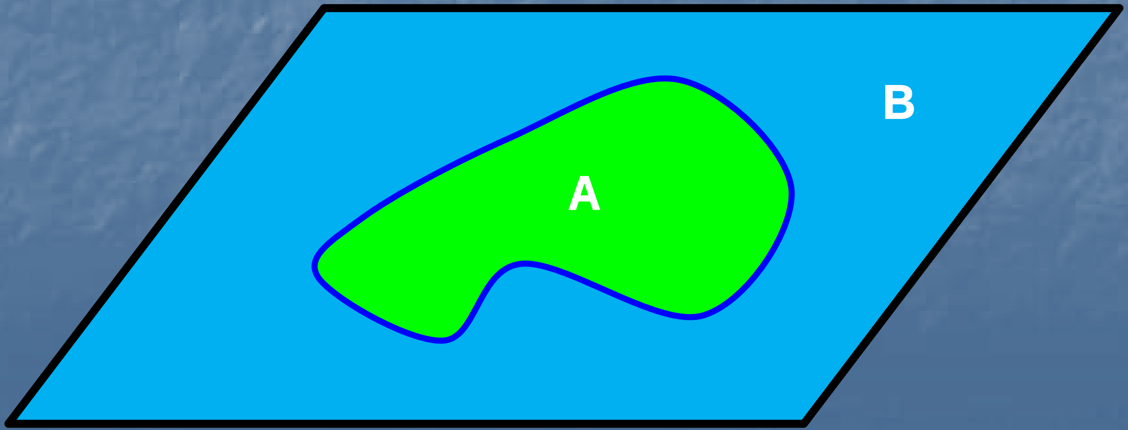
No entrelazado $$|\psi\rangle = \left(|\uparrow\rangle_I + |\downarrow\rangle_I\right) \otimes \left(|\uparrow\rangle_D + |\downarrow\rangle_D\right)$$

Entrelazado $$|\psi\rangle = |\uparrow\rangle_I \otimes |\downarrow\rangle_D + |\downarrow\rangle_I \otimes |\uparrow\rangle_D$$

Entropía de Entrelazamiento

- Dividir al sistema cuántico en 2 subsistemas A y B
- Dado un estado, tomar traza sobre grados de libertad de B
- Grados de libertad de A se describen entonces con una matriz de densidad ρ_A
- Calcular la correspondiente **entropía de von Neumann**

$$S_{EE}(A) = -\mathrm{Tr}\left(\rho_A \ln \rho_A\right)$$



Entropía de Entrelazamiento

- Dividir al sistema cuántico en 2 subsistemas A y B
- Dado un estado, tomar traza sobre grados de libertad de B
- Grados de libertad de A se describen entonces con una matriz de densidad ρ_A
- Calcular la correspondiente **entropía de von Neumann**

$$S_{EE}(A) = -\mathrm{Tr}\left(\rho_A \ln \rho_A\right)$$

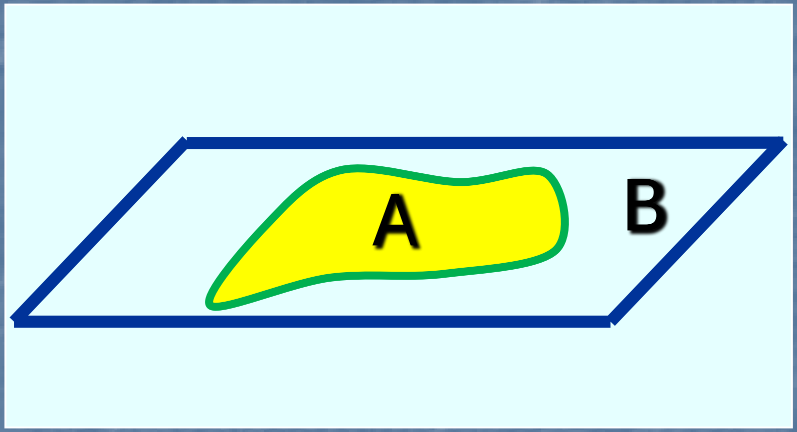
P.ej.,

$$|\psi'\rangle = \frac{1}{2}\Big(|\uparrow\uparrow\rangle + |\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle\Big)$$

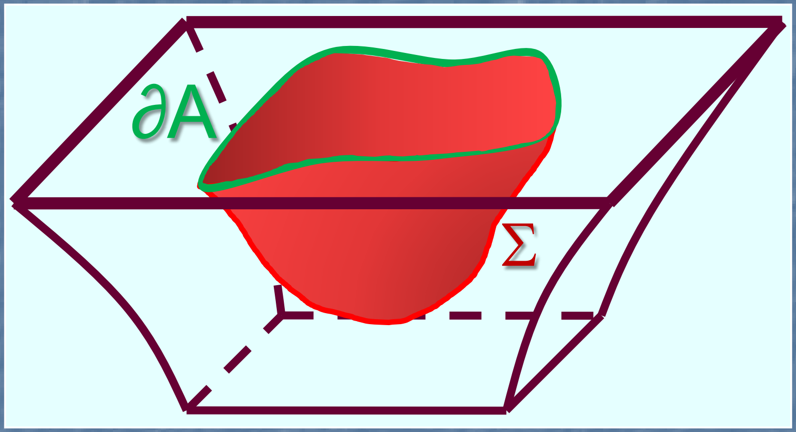
$$= \frac{1}{2}\Big(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle\Big) \otimes \Big(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle\Big) \quad \Longrightarrow \quad S_{EE} = 0$$

$$|\psi''\rangle = \frac{1}{2}\Big(|\uparrow\uparrow\rangle + |\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle - |\downarrow\downarrow\rangle\Big) \quad \Longrightarrow \quad S_{EE} = \log 2$$

Aplicación 3: Entrelazamiento



=

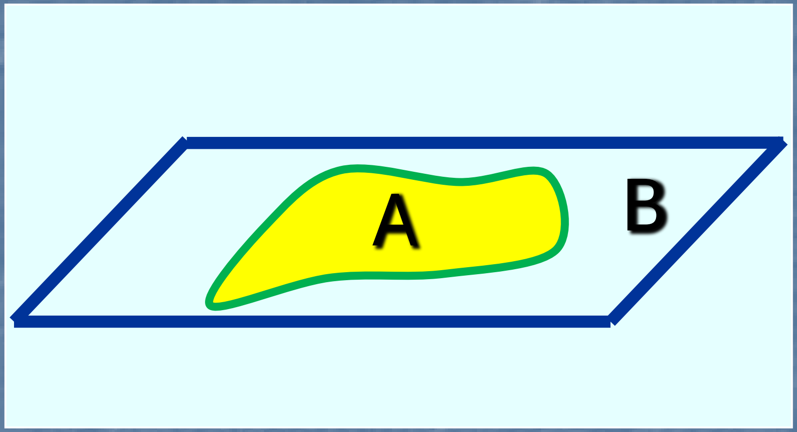


$$S_{EE}(A) = \underset{\partial A = \partial\Sigma}{\mathrm{ext}} \frac{\mathrm{Area}_\Sigma}{4G_N}$$

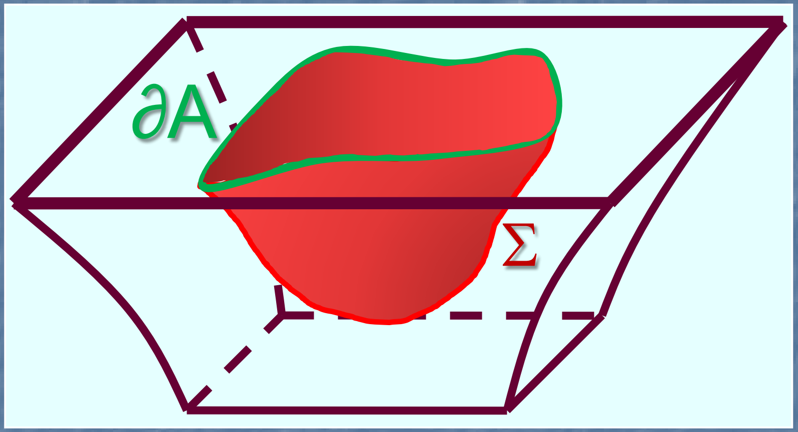
[Ryu,Takayanagi; Hubeny,Rangamani,Takayanagi; Lewkowycz,Maldacena]

Entrelazamiento: propiedad inherentemente **cuántica** ⟷ Área: propiedad **clásica**

Aplicación 3: Entrelazamiento



=



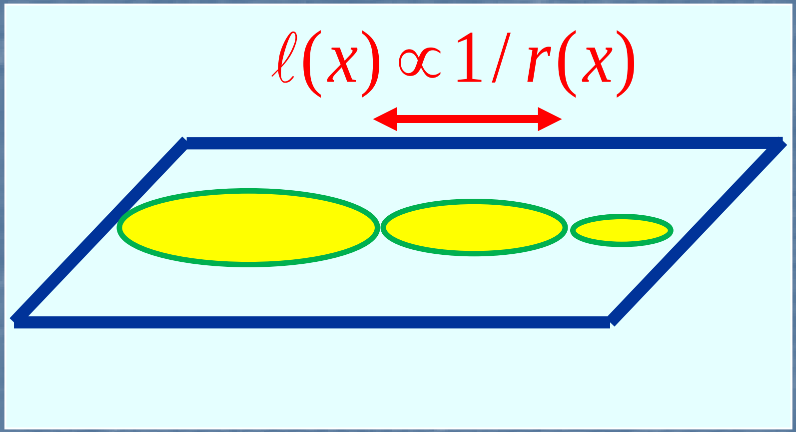
$$S_{EE}(A) = \underset{\partial A = \partial\Sigma}{\mathrm{ext}} \frac{\mathrm{Area}_{\Sigma}}{4G_N}$$

[Ryu,Takayanagi; Hubeny,Rangamani,Takayanagi; Lewkowycz,Maldacena]

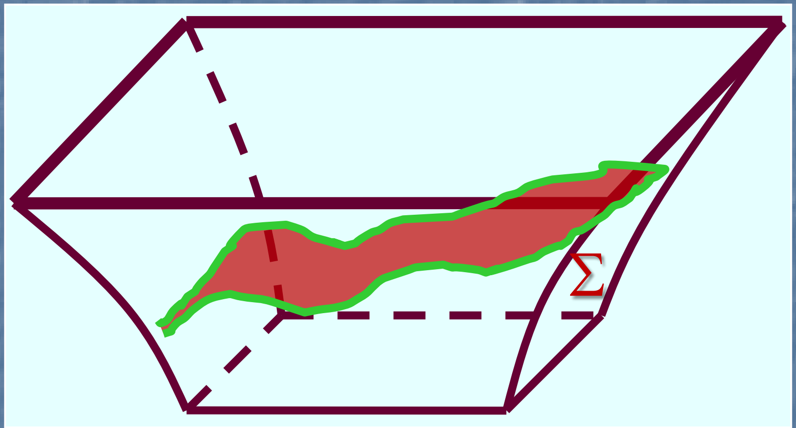
Conduce a resultados (¡en teorías de campos fuertemente acopladas!) que son consistentes con un número infinito de propiedades esperadas (ley de área, subaditividad fuerte, entropía térmica, contacto con anomalías, etc.)

[Headrick,Takayanagi; Hayden,Headrick,Maloney; Hung,Myers,Smolkin; Casini,Huerta,Myers; Holzhey,Larsen,Wilczek; Myers,Sinha; Calabrese,Cardy; etc.]

Aplicación 4: Geometría Emergente



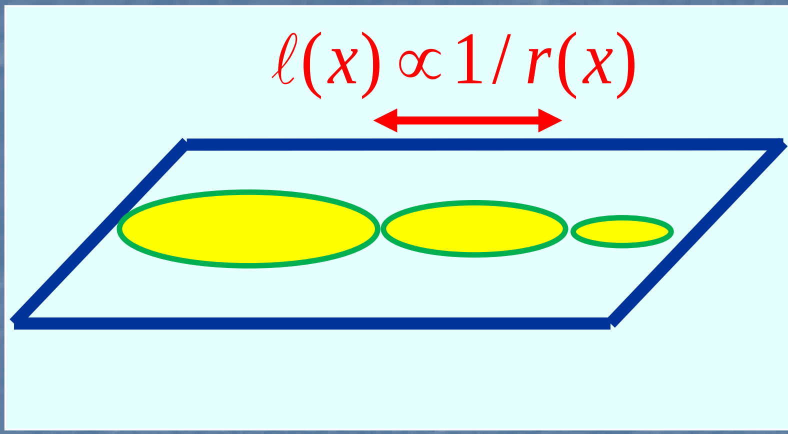
$=$



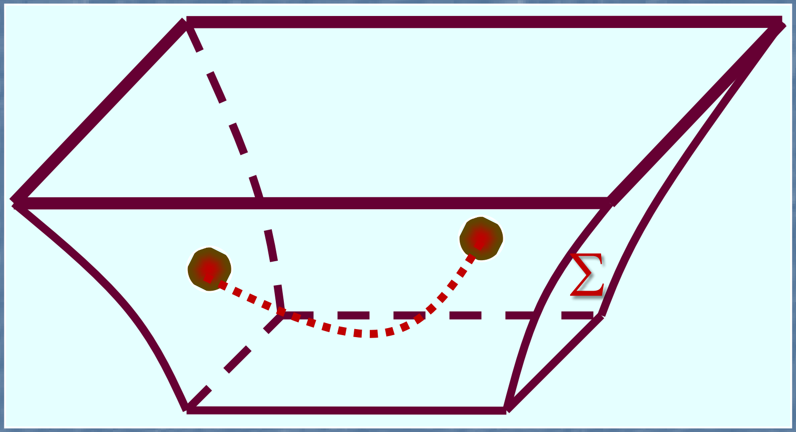
$$\int dx \frac{dS_{EE}(\ell)}{d\ell}\bigg|_{\ell=\ell(x)} = \frac{\mathrm{Area}_{\Sigma}}{4G_N}$$

[Balasubramanian,Chowdhury,Czech,de Boer, Heller; Bianchi,Myers; Myers,Rao,Sugishita; Czech,Dong,Sully;Headrick,Myers,Wien]

Aplicación 4: Geometría Emergente



$$=$$

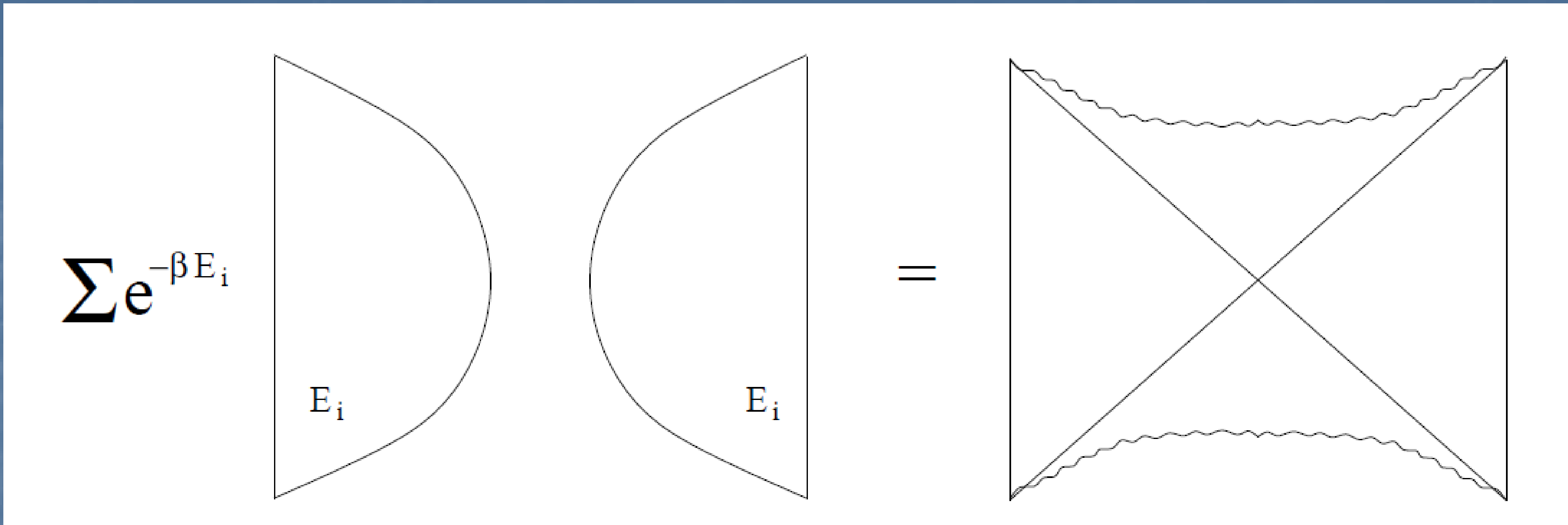


$$\int dx \, \frac{dS_{EE}(\ell)}{d\ell}\bigg|_{\ell=\ell(x)} = \frac{\text{Area}_{\Sigma}}{4G_N}$$

[Balasubramanian,Chowdhury,Czech,de Boer, Heller; Bianchi,Myers; Myers,Rao,Sugishita; Czech,Dong,Sully;Headrick,Myers,Wien]

¡Permite DEFINIR noción de **puntos** y **distancia** en geometría a partir de entrelazamiento en teoría de campos (con interpretación en teoría de información cuántica)!

[Czech,Lamprou; Czech,Hayden,Swingle]



- Existen varios otros indicios interesantes de que el **entrelazamiento** juega un papel crucial en el contexto de la gravedad cuántica: es el ‘pegamento’ entre regiones que de otro modo serían disjuntas

  [Van Raamsdonk; Maldacena,Susskind; Maldacena; Czech,Karczmarek,Nogueira,VanRaamsdonk; etc.]

- E incluso hay una propuesta que afirma que la correspondencia ES justamente una descripción del entrelazamiento a distintas escalas (~MERA) [Swingle; Czech; etc.]

Resumen de AdS/CFT

SYM $\mathcal{N}=4$ $SU(N_c)$ = T. de Cuerdas IIB en $\mathrm{aAdS}_5 \times \mathrm{S}^5$

- Hemos echado un vistazo a esta asombrosa correspondencia, al **diccionario** que la implementa, y a algunas de las principales líneas de **evidencia** que la apoyan
- Independientemente de cualquier otra cosa, SYM es una teoría plenamente cuántica, y hemos mostrado que incluye a la gravedad, es decir, ¡¡que es una **teoría de gravedad cuántica**!!
- En esta teoría, tenemos un **espaciotiempo plenamente dinámico** (solo queda fijo en la frontera, pero eso tiene justificación dinámica: fluctuaciones de estructura asintótica costarían energía infinita)

Resumen de AdS/CFT

SYM $\mathcal{N}=4$ $SU(N_c)$ = T. de Cuerdas IIB en $\mathrm{aAdS}_5 \times \mathrm{S}^5$

- La teoría de norma incluye a mucho más que solo la gravedad, y más incluso que SUGRA: incorpora a todos los **modos masivos de las cuerdas** IIB, y se puede mostrar que también incluye a los correspondientes objetos no perturbativos, ¡como **D-branas**!

Conclusiones

1) La **correspondencia holográfica** establece una muy sorprendente **equivalencia** entre teorías no gravitacionales y teorías de cuerdas y/o gravedad. ¡Es **en sí misma un muy interesante objeto de estudio**!
2) Esta correspondencia ya ha resultado **útil** como herramienta para entender aspectos del comportamiento de algunas **teorías fuertemente acopladas** (tipo QCD, BSM, superconductores, etc.)
3) La correspondencia define una **teoría de gravedad cuántica completa** (para fondos con ciertas asintopias), y constituye la **mejor definición no perturbativa que tenemos para la teoría de cuerdas**
4) Existen varias **limitaciones**: no tenemos todavía el diccionario completo de esta equivalencia, ni podemos hacer cuentas directamente en los sistemas reales
5) **¡Falta mucho por entender y hacer!**