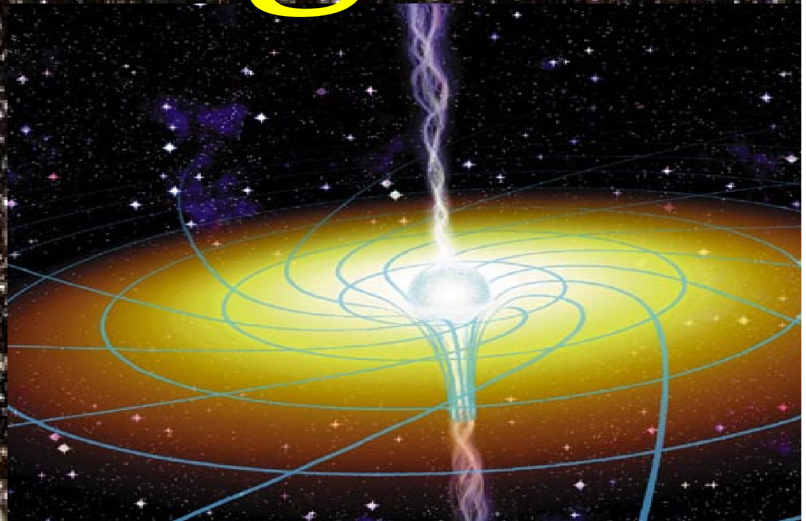
Buracos Negros

2. Aspectos Quânticos



Óscar Dias

Universidade de Barcelona
&
Centro de Física do Porto (Univ. Porto)

4ª EAG

Buracos Negros
são objectos termodinámicos

...e portanto emitem radiação térmica

Leis da Termodinâmica de Buracos Negros

Bardeen, Carter, Hawking, 1973

O que acontece se perturbarmos o BN?

Lei Zero: **Todas as partes do horizonte de eventos de um BN em equilíbrio têm a mesma gravidade superficial,** k_g

1ª Lei : $c^2 dM = \frac{k_g c^2}{8\pi G} dA + \Omega_+ dJ$ $\qquad (\ dU = TdS + PdV\ )$

2ª Lei : $dA \geq 0$ $\qquad (dS \geq 0)$

3ª Lei : $k_g > 0$, **impossível obter** $k_g = 0$ $\qquad$ (**impossível obter** $T = 0$)

Analogia parece indicar que BN tem: $\begin{cases} T \propto k_g \\ S \propto A \end{cases}$

Se BN tivesse $T \neq 0$ **então teria de RADIAR energia ...**

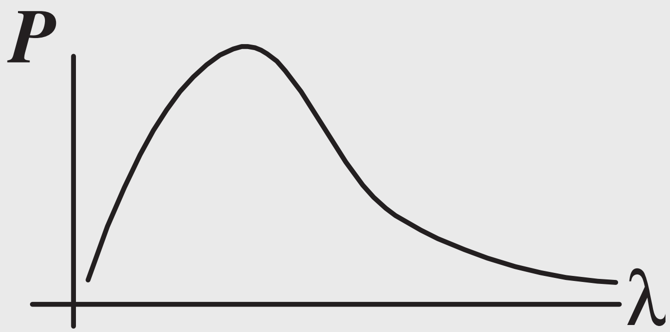
... MAS nada pode escapar de um BN !!

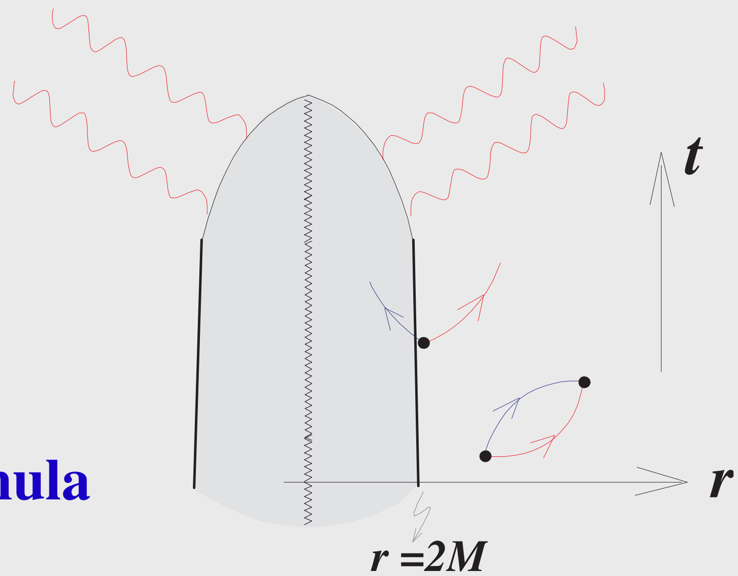
Evaporação Quântica de um BN (Hawking, 1971)

Matéria tratada quanticamente ⟶ BNs radiam

⟶ espectro de corpo negro correspondente à temperatura:

$$T = \frac{\hbar}{2\pi c k_B} k_g \quad \rightarrow \quad T_{\text{Schw}} = \frac{\hbar c^3}{8\pi G k_B} \frac{1}{M}$$





⟶ **4 constantes unificadas numa única formula**

$M \sim M_{sol} \;\rightarrow\; T_{sol} \sim 10^{-7}$ K

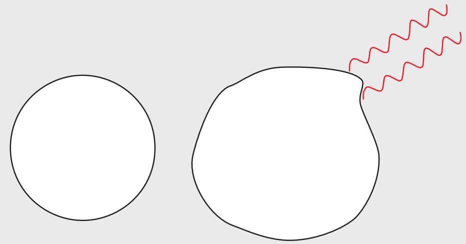
$M \sim M_{Terra} \;\rightarrow\; T_{Terra} \sim 0.1$ K

$M \sim 10^{18}$ Kg $\;\rightarrow\; T \sim 7000$ K ⟶ **Buracos Negros *Brancos* !**

Problemas e Paradoxos associados à Entropia do BN

$$S_{BH} = \frac{k_B c^3}{4\hbar G_N} A_h$$

(Bekenstein, 1971)



→ Problema: Identificação dos Microestados?

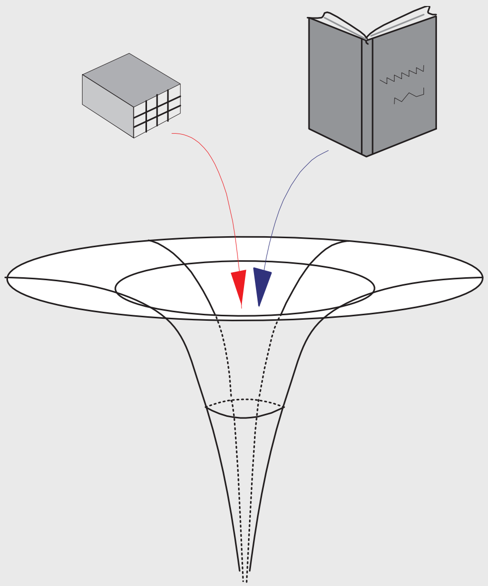
$$S = \ln \Omega \qquad \boxed{\Omega = ?}$$

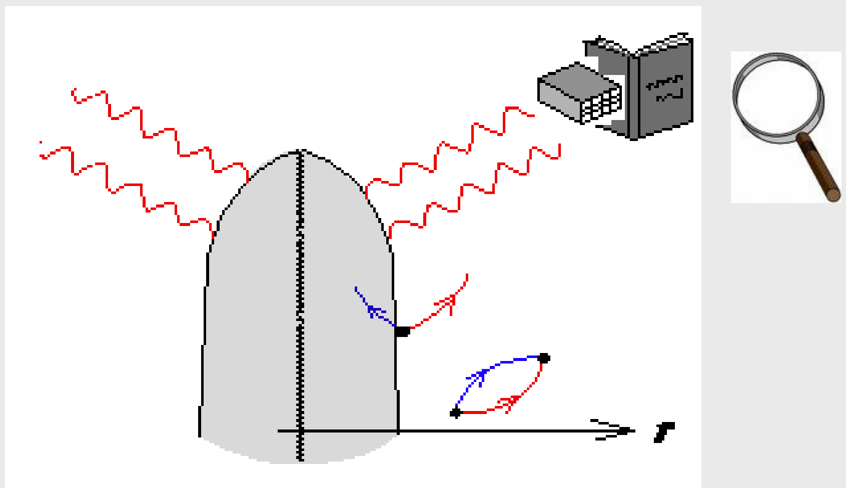
← BNs não têm Cabelo!

→ Paradoxo da Informação

BNs formam-se de diferentes maneiras ... mas todos se evaporam da mesma forma

MQ é uma teoria que preserva a informação (P. Unitariedade) e portanto a informação contida na radiação que sai não pode ser independente da informação absorvida por BN



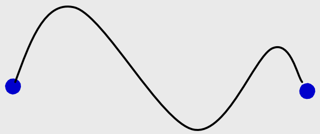


Informação absorvida é irrecuperável ?

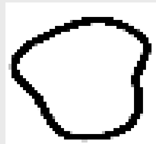
Buracos Negros em Teoria de Cordas

- **Teoria de Cordas: teoria de gravitação quântica (teoria quântica cordas relativistas)**
- **Cada partícula é identificada com modo de vibração de uma corda**

Corda aberta



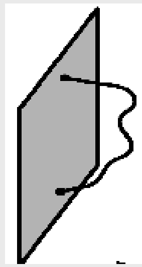
Corda fechada

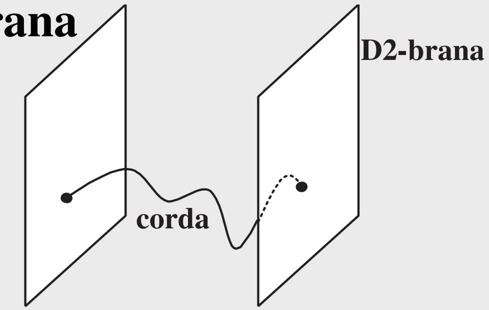


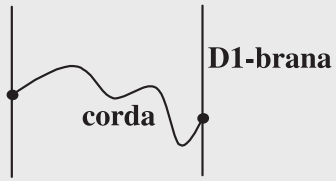
Comprimento típico da corda: ℓ_s

Por ex., condições fronteira de quantização fixam frequência de oscilação da corda, ie, energia da partícula

- **Extremos da corda podem estar ligados a D-brana**
- **D-brana é fonte de campo gauge (electromagnético): têm carga**

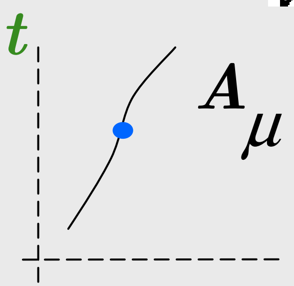




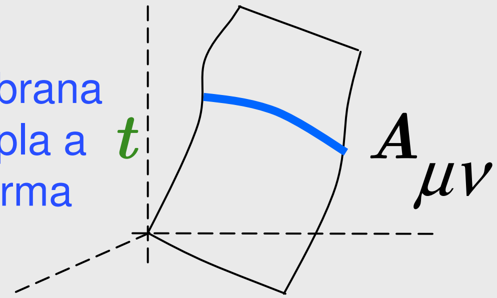


Campos de Gauge:

D0-brana acopla a 1-forma



D1-brana acopla a 2-forma



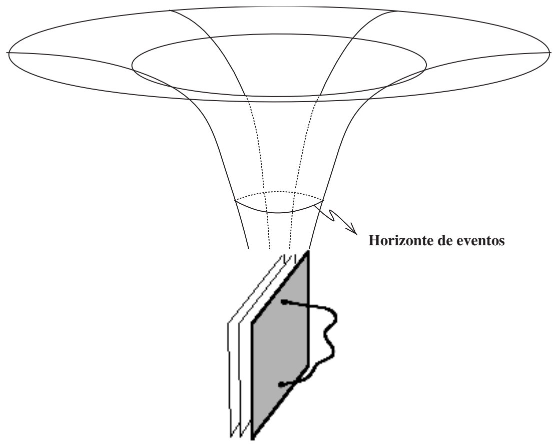
Dp-brana acopla a (p+1)-forma

- g_s :"Constante" de acoplamento da corda controla intensidade da interacção entre cordas

$$G_N \sim g_s^2 \qquad g_s \to 0 \quad \Rightarrow \quad G_N \to 0 \longrightarrow$$

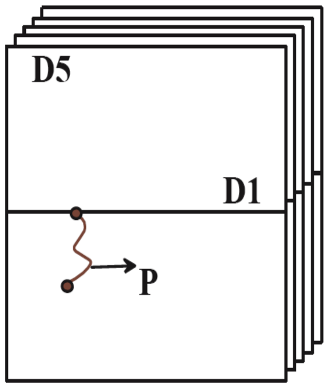
Ausência de interacção entre cordas e de interacção gravitacional

BNs em supergravidade:



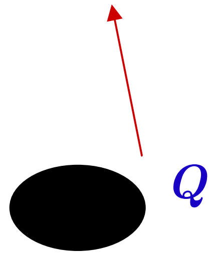
- **Constituíntes fundamentais de BNs:**
  Colecção de cordas e D-branas

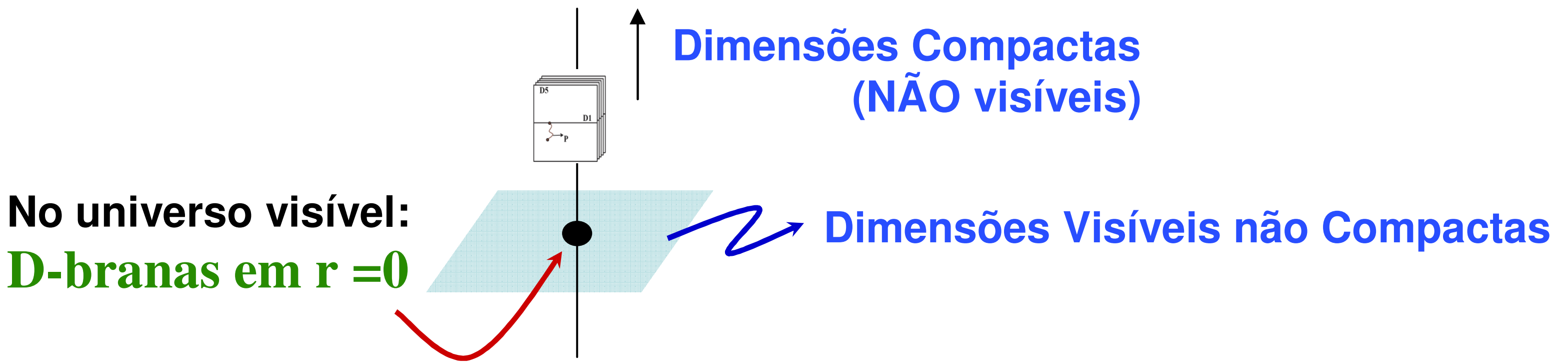
Nas dimensões extra temos colecção de D-branas enroladas.
Também temos momento transportado por cordas abertas que terminam nas D-branas



$Q5$ D5-branas
$Q1$ D1-branas
Momento quantizado P

- **Dada as cargas do BN, procuramos a colecção de branas que é fonte do mesmo tipo de carga**





Contagem de Entropia usando "Física Estatística"

$$S = \ln \Omega$$

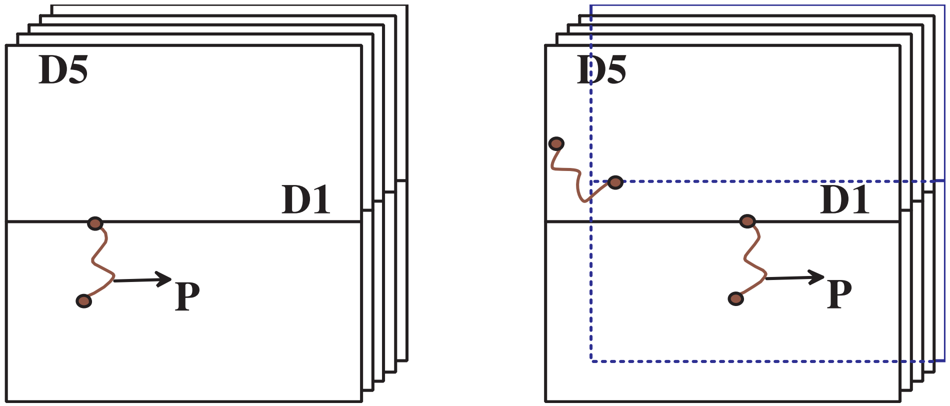
$$\Omega = ?$$

Objectivo: - Reproduzir a entropia macroscopica do BN através de uma contagem de microestados.

- Como podemos construir o BN de várias maneiras diferentes?

• S_{mic} ?

Entropia MICroscópica = # de maneiras de fazer partição de momento na colecção D-branas



• S_{mac} ?

$$S_{BH} = \frac{k_B c^3}{4\hbar G_N} A_h$$

Verifica-se que: $S_{\text{mac}} = S_{\text{mic}}$

(Strominger, Vafa, 1996)
(Breckenridge, Myers, Peet, Vafa, 1996)

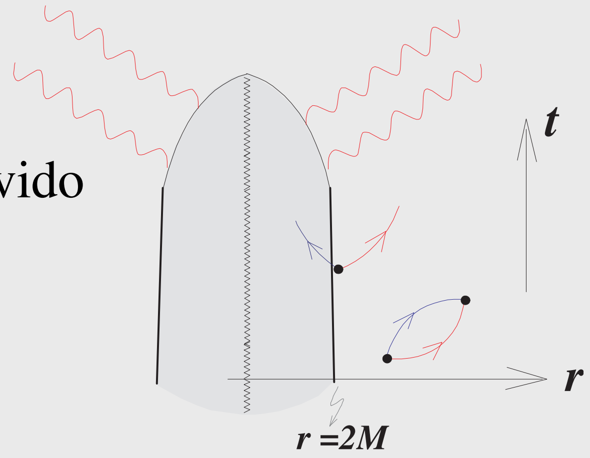
Descrição Microscópica da radiação de Hawking (e superradiância):

- **Descrição macroscópica de Radiação de Hawking (e superradiância):**

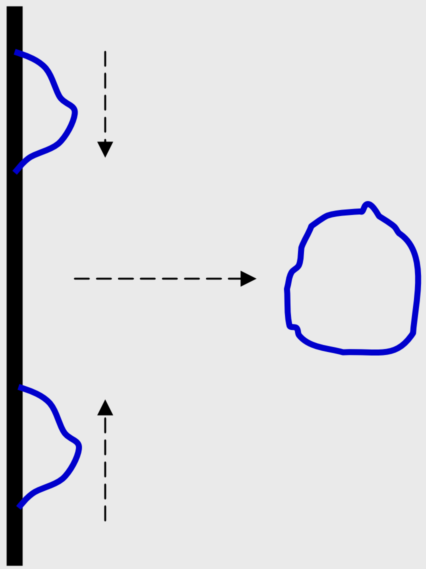
Equação de onda: $\Box\phi = 0$

Obter Secção eficaz $\boldsymbol{\sigma}$ sabendo fluxo incidente e absorvido

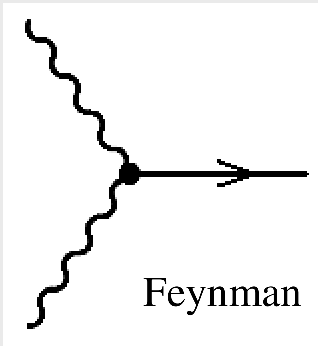
Obter Taxa de emissão Γ



- **Descrição microscópica de Radiação de Hawking (e superradiância):**



Duas cordas abertas colidem na branas
e emitem uma corda fechada para "exterior"



(Das, Mathur, Gubser, Klebanov, Maldacena, Callan, Tseytlin, Horowitz, Dias, Emparan, Maccarrone...)

Proposta de “Fuzzball” proposal:

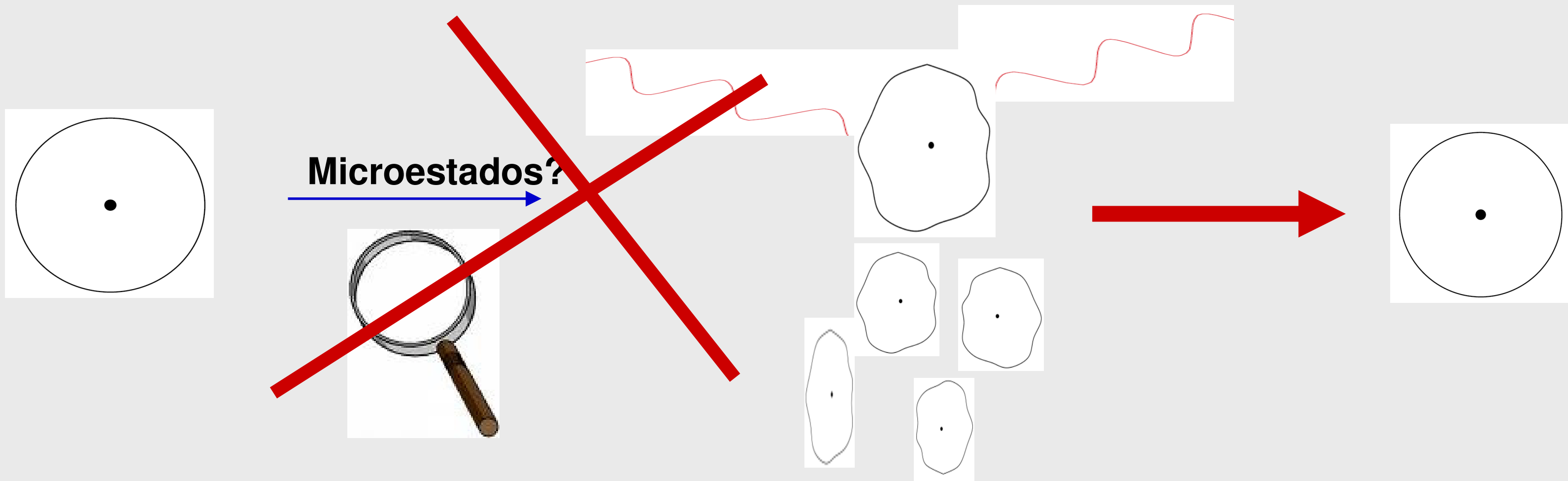
identificar as geometrias que descrevem os microestados do BN

- **Compreender a origem microscópica da entropia em termos de geométricos:**

  - *Identificar* as geometrias dos microestados do BN

  - *Não* queremos *apenas contar* ou descrever microestados na descrição D-brana

- Tentativas anteriores para encontrar os microestados:



Pequenas perturbações da metrica são dissipadas
sob forma de ondas gravitacionais para o infinito ou absorvidas por BN …
e o sistema estabiliza num BN estacionário de novo!

A Proposta de “Fuzzball”

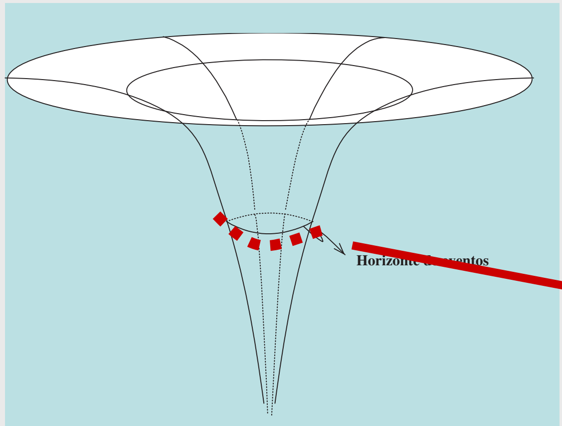
- Microestados não podem ter horizonte

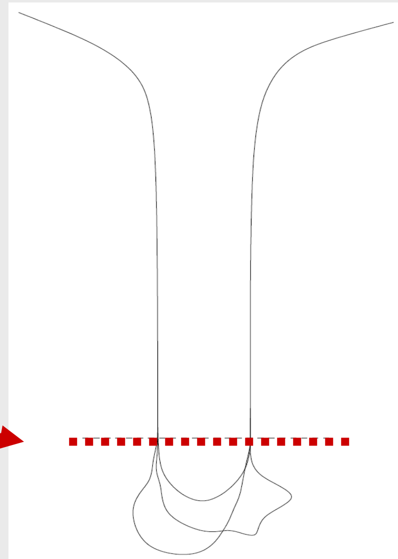
$$\Omega = e^{S} = e^{A_{\rm bh}}$$

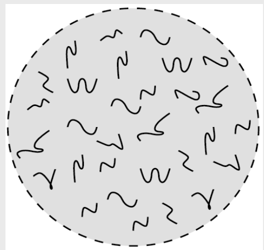
Geração de cascada exponencial de microestados

- Portanto, microestados devem ser geometrias suaves (não-singulares) e sem horizonte

- Horizonte macroscópico e a sua entropia emergem, depois de fazer uma “média” quântica sobre as micro-geometrias suaves, como uma fronteira ***efectiva*** que engloba a região interior onde os microestados diferem uns dos outros.





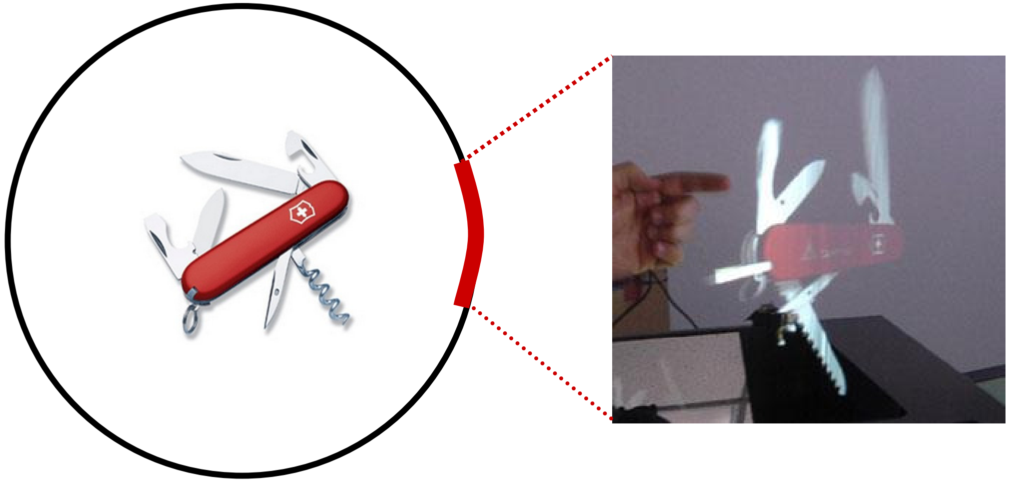


- Pode resolve o paradoxo da informação:

  Radiação emitida pela superfície do “fuzzball” pode transportar a informação previamente acretada e contida no “fuzzball”

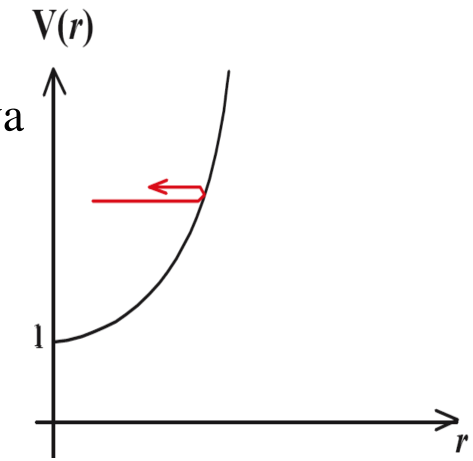
Príncipio Holográfico:

Idealmente, gostariamos de ter um solução de Einstein que descreve “bola” de espaço-tempo (BN) e conseguir descrever o sistema usando uma teoria, provavelmente não-gravitacional, **na fronteira**, que tem uma dimensão menos.



$$S_{BH} = \frac{k_B c^3}{4\hbar G_N} A_h$$

$$S_{BH} \sim \cancel{V}$$



Espaço-tempo Anti-de Sitter (AdS) com constante cosmológica negativa tem uma fronteira naturalmente incorporada:

funciona como uma “caixa esférica ”

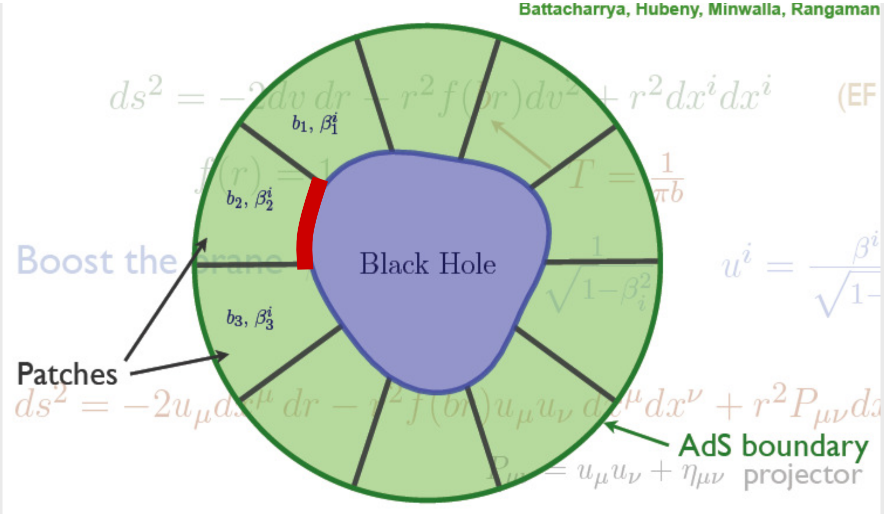
Realização do **Príncipio Holográfico:**

AdS / CFT

Gravidade / Teoria Quântica de Campo

Dualidade entre gravidade de Einstein e Equações da hidrodinámica

Buracos negros ⟷ **Fluídos**



Battacharya,Minwalla,
Hubney,Rangaman,2008

Solução 5d de gravidade de Einstein-AdS (constante cosmologica negativa)
“Boosted” brana-negra com temperatura constante $T = \frac{1}{\pi\, b}$ e “boost” β_i

$$ds^2 = -2\, u_\mu\, dx^\mu dr - r^2\, f(b\, r)\, u_\mu\, u_\nu\, dx^\mu dx^\nu + r^2\, P_{\mu\nu}\, dx^\mu dx^\nu$$

$f(r) = 1 - \frac{1}{r^4}$ $\quad u^v = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_i^2}}$ $\quad u^i = \frac{\beta_i}{\sqrt{1-\beta_i^2}}$ $\quad P^{\mu\nu} = u^\mu u^\nu + \eta^{\mu\nu}$

Agora, mesma metrica c/ T e boost variando suave/ c/ coords da fronteira: $b(x^\mu), \beta_i(x^\mu)$

$$ds^2 = -2\, u_\mu(x^\alpha)\, dx^\mu\, dr - r^2\, f\left(b(x^\alpha)\, r\right)\, u_\mu(x^\alpha)\, u_\nu(x^\alpha)\, dx^\mu\, dx^\nu + r^2\, P_{\mu\nu}(x^\alpha)\, dx^\mu\, dx^\nu$$

Genericamente, g(0) não é solução.

Mas se *b(xμ)* e *βi(xμ)* obedecerem a certas eqs então é solução!

Teoria de perturbação e uso das eqs de Einstein-AdS:

$$g = g^{(0)}(\beta_i, b) + \varepsilon\, g^{(1)}(\beta_i, b) + \varepsilon^2\, g^{(2)}(\beta_i, b) + \mathcal{O}\left(\varepsilon^3\right)$$

$$\beta_i = \beta_i^{(0)} + \varepsilon\, \beta_i^{(1)} + \mathcal{O}\left(\varepsilon^2\right), \qquad b = b^{(0)} + \varepsilon\, b^{(1)} + \mathcal{O}\left(\varepsilon^2\right)$$

Verifica-se ser possível encontrar uma solução gravitacional dual a uma configuração na fronteira quando a velocidade e temperatura na fronteira obedecem às equações:

$$\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$$

$$T^{\mu\nu} = \underbrace{(\pi T)^4 \left(\eta^{\mu\nu} + u^\mu u^\nu\right)}_{T^{\mu\nu}_{(0)}} \underbrace{-2(\pi T)^3 \sigma^{\mu\nu}}_{T^{\mu\nu}_{(1)}} + \mathcal{O}(\partial^2 u) + \cdots$$

Perfect fluid: $T^{\mu\nu}_{(0)}$ $\qquad$ $T^{\mu\nu}_{(1)}$:Shear viscosity: $\eta = \pi^3 T^3$

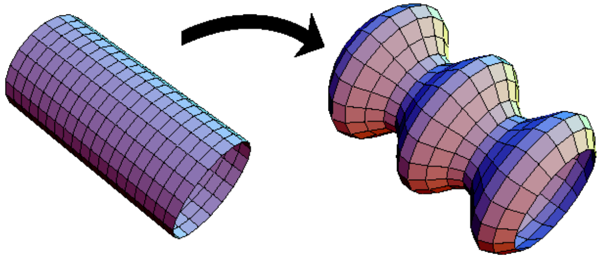
→ **Equações da Hidrodinámica !**

→ **Gravidade de Einstein-AdS é dual a Mecânica dos Fluidos !**

Aplicações a seguir…

Cordas Negras em *d*>4

$$ds^2 = ds^2_{\text{Schw}} + dz^2$$



(Cardoso, Dias, 2006)

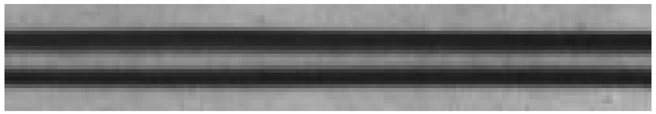
(Caldarelli, Dias, Emparan, Klemm, 2008)

Tubos de fluidos são instáveis (Rayleigh-Plateau) → **Cordas Negras também** (Gregory-Laflamme)

- **Instabilidade de Rayleigh-Plateau num Tubo de fluído :**

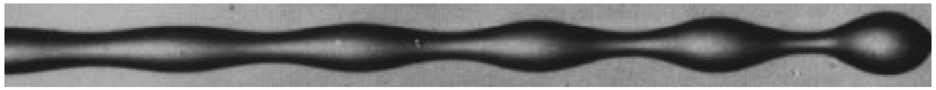
L

R_0



Se $L / R_0 > 1$

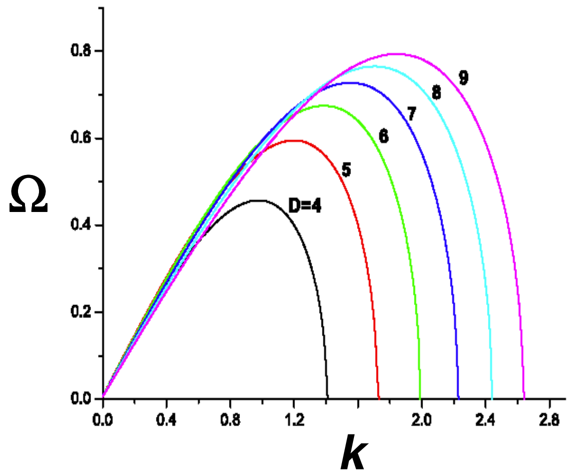
Plateau (1849)



Para um dado volume, fluídos preferem a configuração com menos área (menos E potential de tensão superficial)

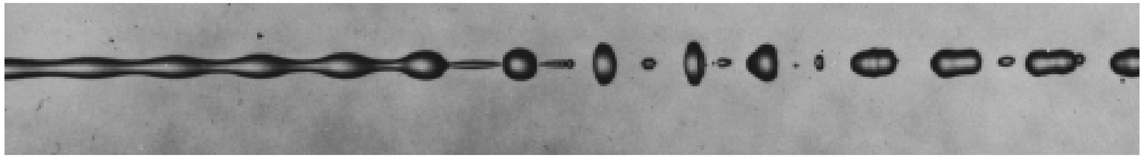
- Relação de dispersão:

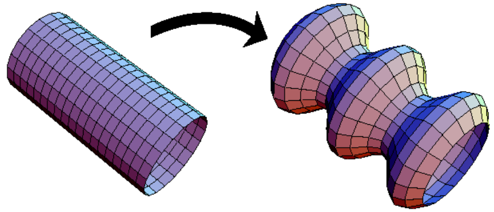
Rayleigh (1878)



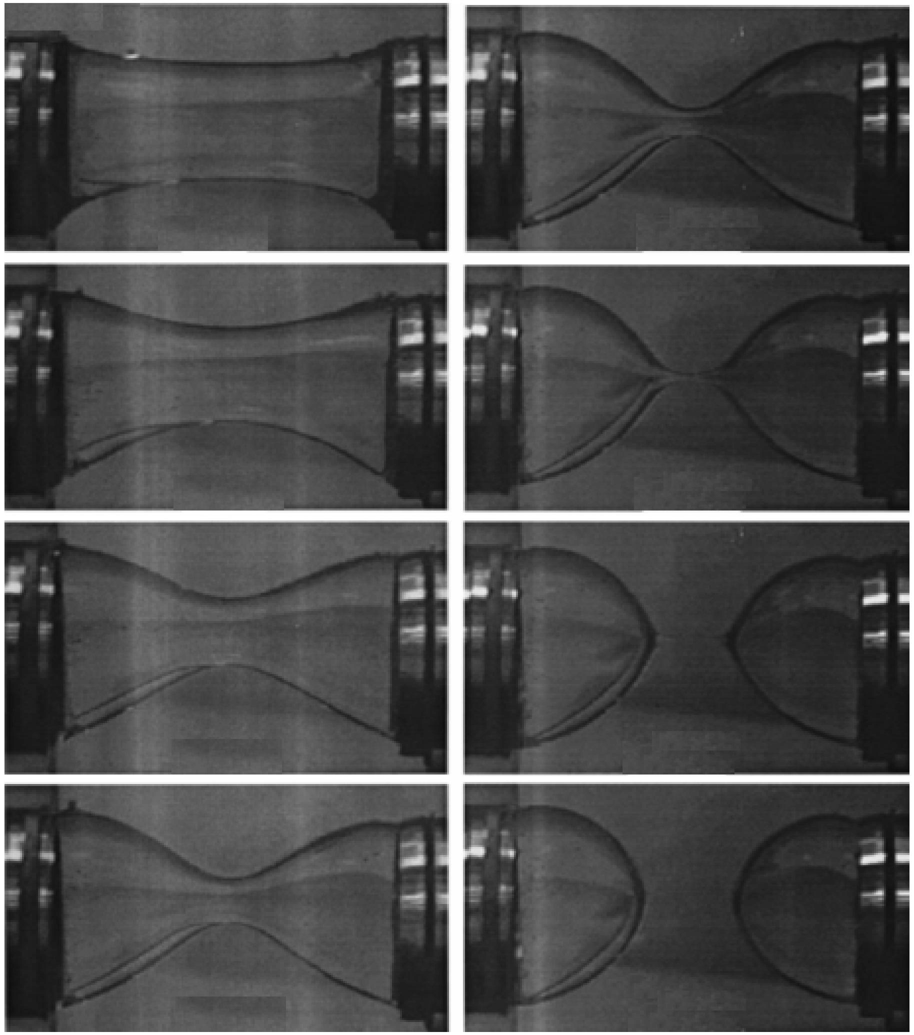
Evolução no tempo da instabilidade de Rayleigh-Plateau

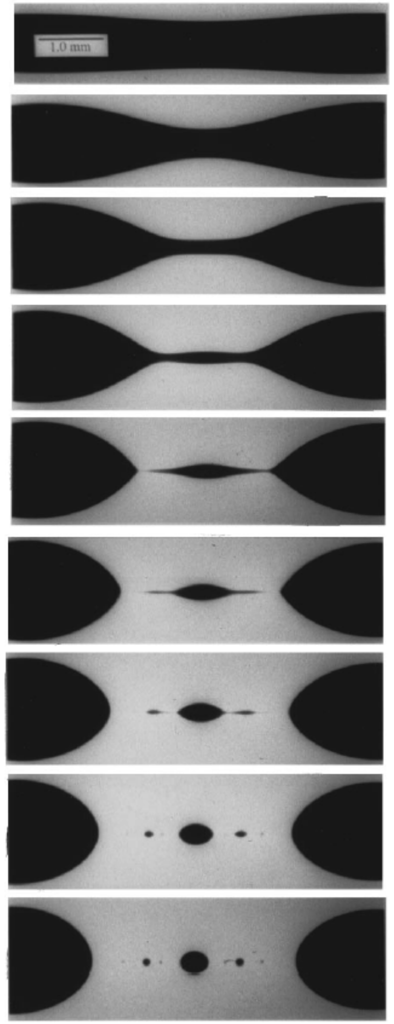
- **Jacto:**

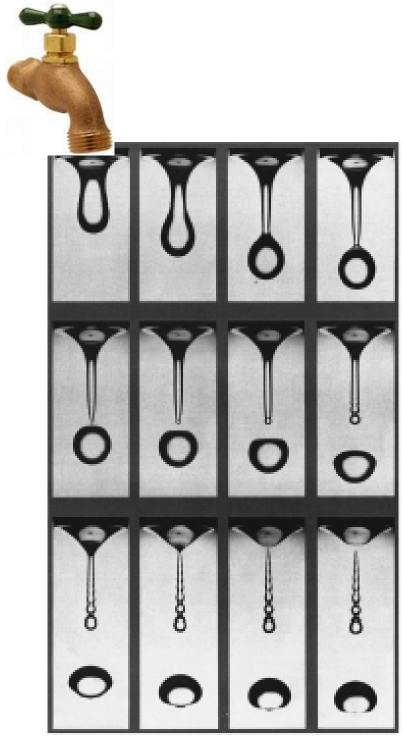




- **Ponte Líquida:**

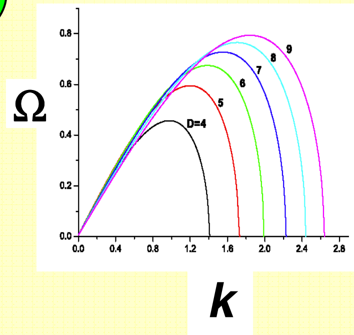






Fluidos:

Relação Dispersão



Evolução no tempo

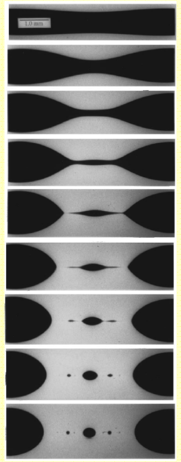
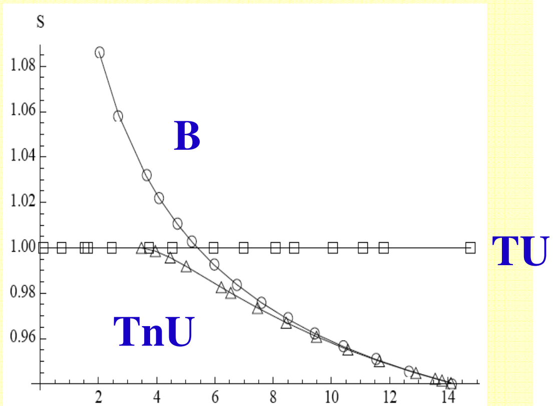


Diagrama de fase S(E) com todas soluções



Gravidade: