

# Buracos negros

*J.E. Horvath*

IAG-USP São Paulo, Brasil



# Buracos negros no século 18 (!)

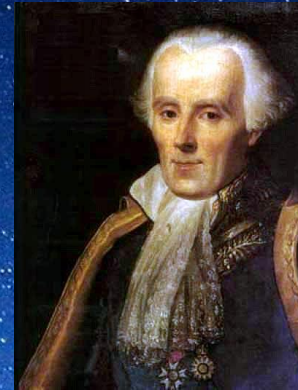
Independentemente P. Laplace e J. Michell desenvolvem a idéia de estrelas escuras baseados na existência da velocidade de escape newtoniana

$$v^2 = \frac{2GM}{R}$$

[ 35 ]

VII. *On the Means of discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in consequence of the Diminution of the Velocity of their Light, in case such a Diminution should be found to take place in any of them, and such other Data should be procured from Observations, as would be farther necessary for that Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.*

Read November 27, 1783.



Se fizermos  $v = c$  para um corpo de densidade constante, se o raio atingir  $R = \frac{2GM}{c^2}$  nem a luz poderá escapar. Laplace especula que poderiam existir um monte de “estrelas escuras” no universo com estas características

# O que é um buraco negro ?

Relativista-matemático : um espaço-tempo solução das equações de Einstein (?)

Físico teórico : uma singularidade coberta por um horizonte de eventos (?!)

Astrofísico : um sumidouro de gás produto final da evolução estelar ou do Universo primordial (!!!!)

**De forma muito geral, podemos dizer que um BH é um objeto que “entrou” no seu raio de Schwarzschild ! A matéria deixa de Ser relevante porque temos “gravitação pura”**

Já vimos a descrição de uma estrela relativística “normal”

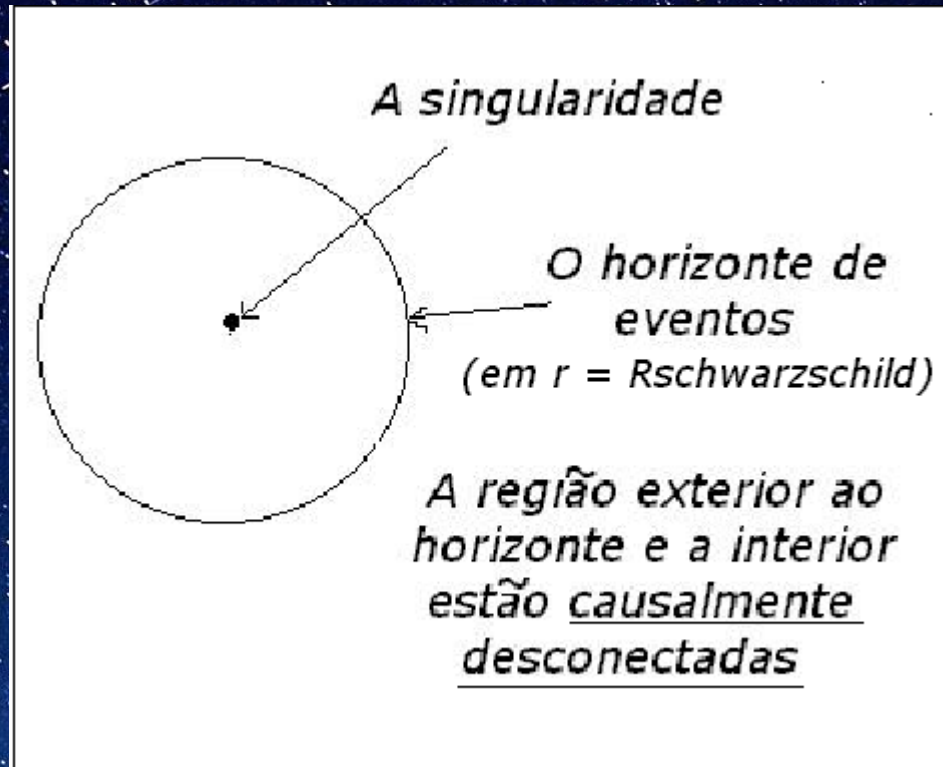
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

$$\frac{dP}{dr} = -(P + \rho) \frac{G(M + 4\pi r^2 \rho)}{r^2 \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)}$$

Equilíbrio  
hidrostático

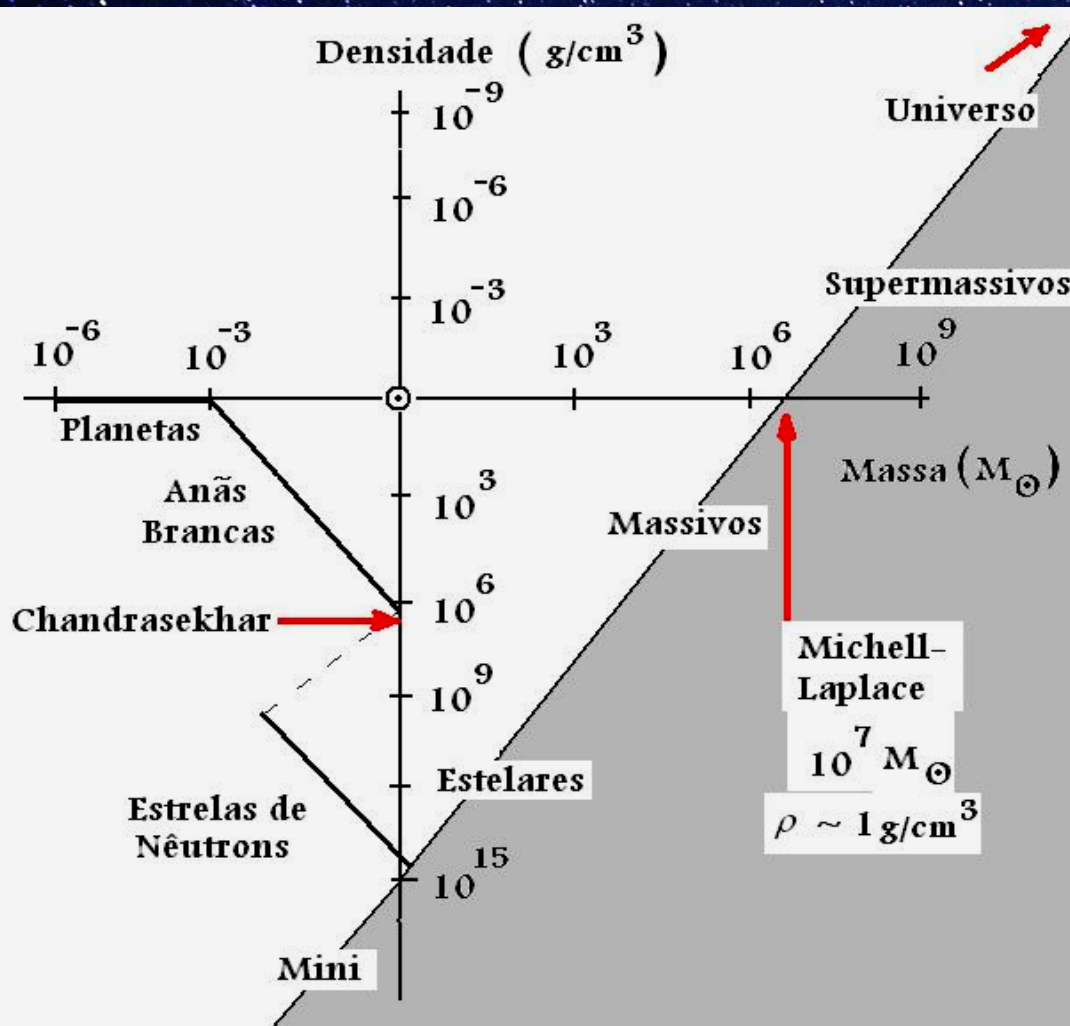


Quando  $R = \frac{2GM}{c^2}$  esta descrição é inválida (raio de Schwarzschild !).  
Fisicamente, isto pode acontecer quando a matéria “normal” fica incapaz  
de suportar sua própria atração gravitacional



O buraco negro responde a todas as três descrições anteriores !

O diagrama de Carter que contém **todos** os possíveis BH do Universo (incluindo ele próprio...)



Já vimos que o raio de Schwarzschild

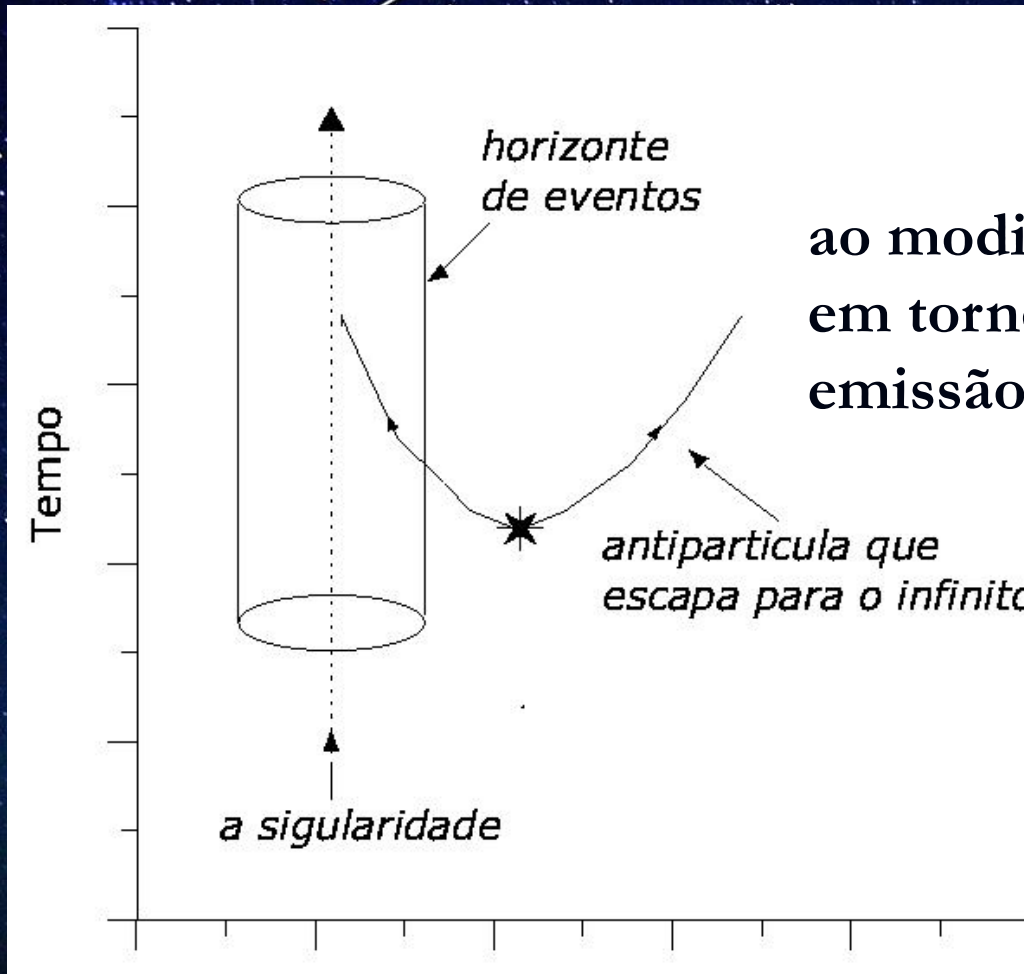
$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

Definindo uma densidade formal

$$\rho_{BN} = \frac{3M}{4\pi R_S^3} \propto \frac{1}{M^2}$$

chegamos à conclusão que os BH de grande massa são muito diluídos  $\rho \ll \rho_{\text{água}}$

# Desenvolvimentos importantes : a radiação de Hawking



ao modificar o espaço-tempo em torno dele, faz possível a emissão de partículas !!!

Cuidado!, a radiação de Hawking é fraquíssima e **inobservável** na prática...

- A radiação de Hawking implica que os buracos negros evaporam!

A radiação de Hawking é consequência do Princípio de Heisenberg, e está caracterizada pela temperatura

$$T_{Haw}(M) = \frac{M_{pl}^2}{8\pi M} \sim \frac{10^{-7} K}{(M/M_{\odot})}$$

$$\Delta x = r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Incerteza na posição do fóton emitido

$$T_H \approx \frac{\hbar c^3}{8\pi GM} = \frac{M_{pl}^2 c^2}{8\pi M}$$

$$\Delta p \approx \frac{\hbar}{\Delta x} = \frac{\hbar}{2r_s} = \frac{\hbar c^2}{4GM}$$

Heisenberg

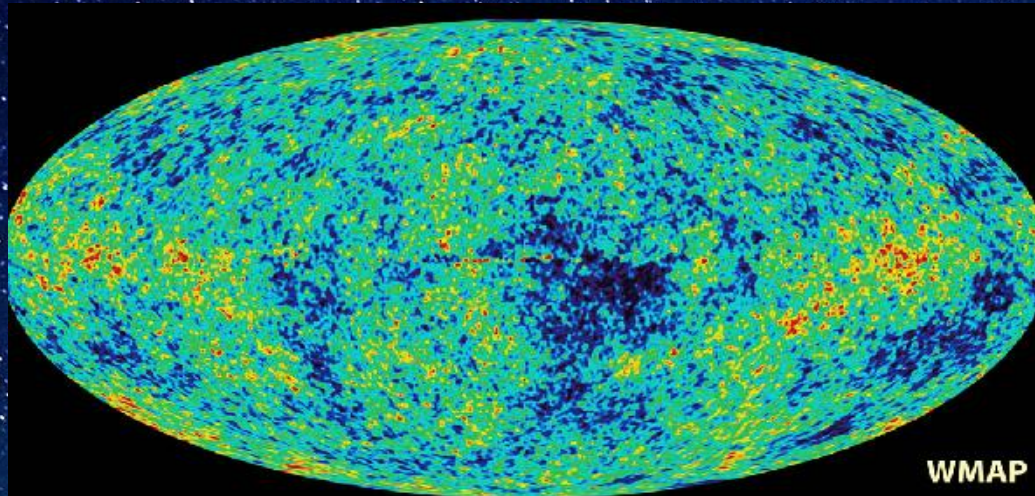
$$\Delta p c = \hbar c^3 / 4GM$$

Energia do fóton



- Para formar buracos negros deve haver
- flutuações primordiais com

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \geq \frac{1}{3}$$



$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx 10^{-5}$$

Pode ter havido processos que formaram PBH cuja amplitude está “escondida” no fundo de radiação cósmica (além de outras coisas esquisitas ...)

# As perguntas fundamentais dos PBHs...

## (Pesos ligeiros)

- Formam-se buracos negros no Universo primordial ?
- Como evoluem (engolem gas, evaporam etc.etc.) ?
- Podem tal vez contribuir para a matéria escura ?

# A evaporação dos buracos negros cosmológicos

$$\dot{E} = -4\pi R^2 T_{\text{Haw}}^4$$

$$R \propto M$$

$$T \propto 1/M$$

Stefan-Boltzmann (perda de energia)



equação diferencial para a massa do buraco.

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{A}{M^2}$$

Integrando obtemos a massa inicial do buraco negro que esta evaporando precisamente hoje

$$M_{\text{Hawking}} = 5 \times 10^{14} \text{g}$$

- Sobrevivem os PBHs se produzidos?: evolução mais completa da massa

Quando o ambiente externo ao buraco negro contém radiação energética, estas partículas serão absorvidas com seção de choque semiclássica

$$\sigma_{rg} = \frac{27\pi}{4} R_g^2$$

Por exemplo, na era dominada pela radiação, o fluxo externo é

$F_{\text{rad}}(t) = c\rho_{\text{rad}}(t) \propto T_{\text{rad}}^4$ , e a massa evolui segundo

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{A}{M^2} + BM^2 T_{\text{rad}}^4(t)$$

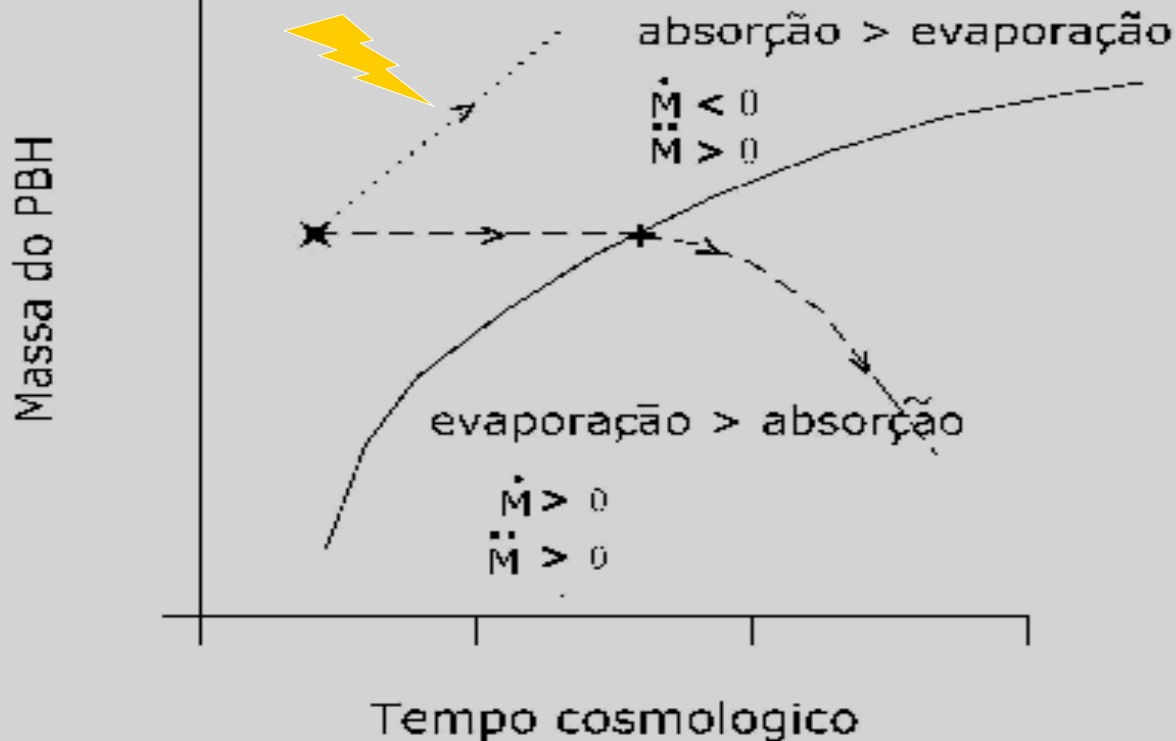
O equilíbrio dos buracos negros com a radiação ambiente atinge-se quando

$$\dot{M} = 0$$

que define a *massa crítica*

$$M_c(t) \sim \frac{10^{26} \text{ g}}{T_{\text{rad}}(t)/T_0}$$

**Crescimento explosivo devido  
pela falta de “combustível” externo!**



# Importante

Hoje há forte evidência da presença de buracos negros estelares e supermassivos, e intenso estudo dos PBH.

Os buracos negros são tão reais para os astrônomos quanto as estrelas ordinárias ...

Inúmeros problemas na astrofísica dos buracos negros precisam ser resolvidos, mas podem ser estudados baseados em observações factíveis

(próxima aula)

I have a question !

