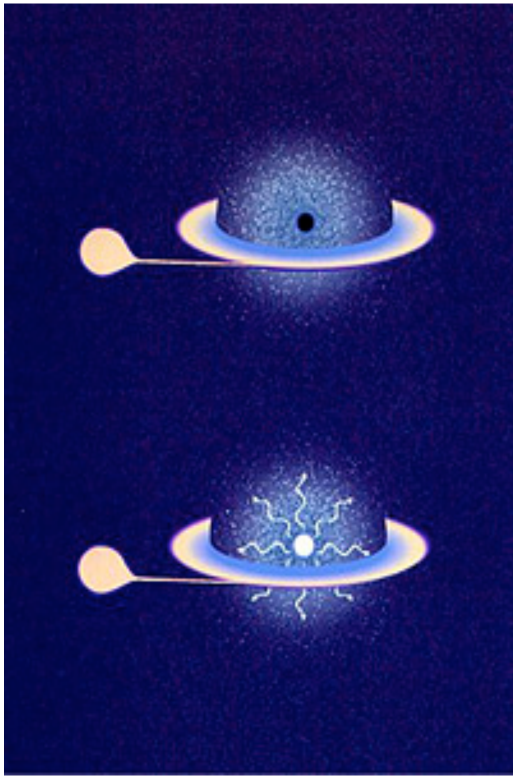
INSTITUTO DE FÍSICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Pós-Graduação
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Disciplina: Tópicos de Física Contemporânea
Professor: Alexandre C. Tort
Aluno: José Luiz dos Santos **Matrícula**: 109005341

TEMA:

Buracos Negros Estelares

Mas o que é um buraco negro?



corpo celes
da veloci
é maior que o
da de da
luz no vá

Origem do nome buraco negro

John Archibald Wheeler
(1911-2008)

Albert Einstein, Hideki Yukawa, John Wheeler, Homi Bhabha

"... Em um certo instante de sua exposição, na qual argumentava sobre a possibilidade de o centro de tais objetos ser um 'objeto colapsado completamente pela gravidade', alguém da plateia sugeriu um nome mais compacto : 'How about black hole?' Como procurara desesperadamente por um nome compacto para descrever aquela situação física, Wheeler aceitou-o e passou a adotá-lo oficialmente, no dia 29 de dezembro de 1967, na conferência realizada na Sociedade ΣΧΦΒ K (Sigma X Phi Beta Kappa), ..." [1]

Assim, o físico teórico norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008) cunhou o nome buraco negro.

O efeito da força da gravidade!

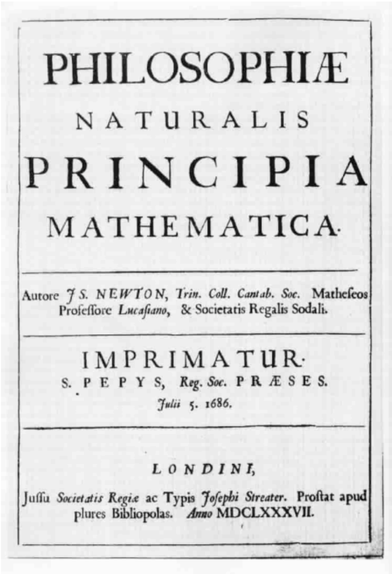
Como seria um jogo de vôlei sem o efeito da gravidade?

O José Newton da música do Raul Seixas tem razão ao a firmar que “*se subiu tem que descer* “?

Voltemos um pouco no tempo...

Qualquer objeto que seja jogado para cima sempre voltará para a Terra?

Em 1687, O físico inglês Isaac Newton (1642-1727) apresentou ao mundo uma teoria explicando os movimentos dos corpos, onde incluía a interação à distância: a "***Lei da Gravitação Universal***".

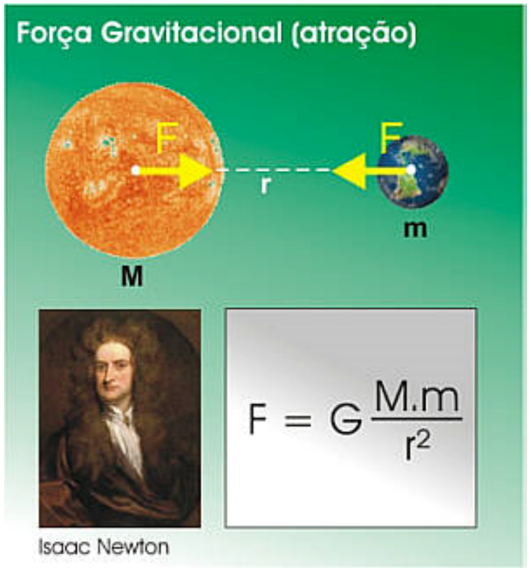


PHILOSOPHIÆ NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR. S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES. Julii 5. 1686.

LONDINI, Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.



Continuando...

Aplicando-se a conservação da energia à Lei da Gravitação Universal, obtém-se a expressão de uma velocidade tal que, se o corpo for arremessado para cima com o valor previsto por ela, ele não retornará mais. Essa velocidade é denominada de velocidade de escape (v_{esc}).

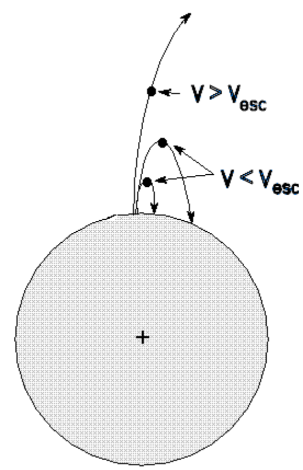
$$v_{esc}^2 = \frac{2GM}{R} \therefore v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

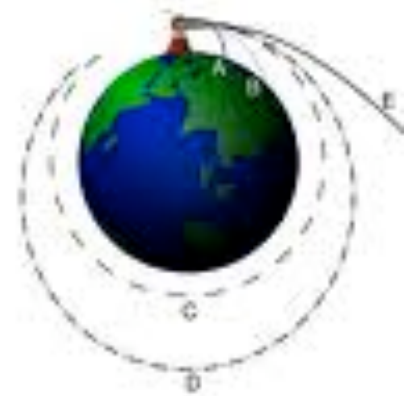
O quadrado da velocidade de escape é diretamente proporcional à massa (M) do corpo celeste e inversamente proporcional ao raio médio (R) do mesmo, conforme expressão acima.

Por exemplo:

Na Terra, v_{esc} = 40.000 km/h ou 11 km/s, ou seja, se arremessarmos um corpo, aqui na Terra, com uma velocidade de 11 km/s, esse corpo não retornará mais!!!!!

José Newton tem razão???





Concluindo: há sempre um valor de velocidade para vencer a atração gravitacional de qualquer corpo celeste, dependendo de sua massa M e seu raio R, segundo Newton.

Então...

Ao analisarmos e expressão que fornece a velocidade de escape,

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Podemos imaginar um corpo celeste com massa muito grande e raio muito pequeno, ou seja, densidade muito alta, a velocidade de escape tende a um valor muito alto, mas ainda assim existirá esse valor (v_{esc}).

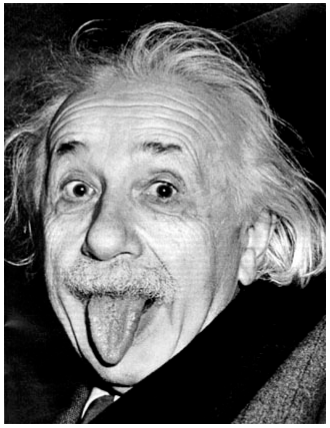
Por exemplo:

Se a Terra tivesse o tamanho correspondente ao da figura ao lado (R_T = 1 cm) sem alterar a sua massa, qualquer objeto que tivesse uma velocidade de escape de $v_{esc} = 3{,}0 \times 10^8$ m/s, escaparia da atração gravitacional da Terra.

Só restando uma aparato tecnológico que pudesse realizar esse feito: **acelerar até se obter essa velocidade!**

E para por aí?

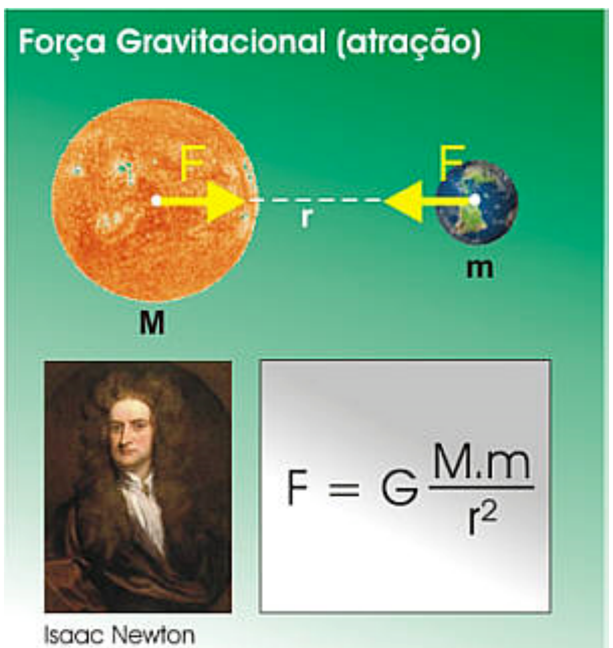
Em 1905, o físico teórico alemão, Albert Einstein (1879-1955), apresentou uma teoria na qual dentre outras consequências, limitava o valor máximo para a velocidade de qualquer coisa.
Esse limite é o valor da velocidade da luz no vácuo ($c = 3{,}0 \times 10^8$ m/s) e a teoria é a **Teoria da Relatividade Restrita** (RR).



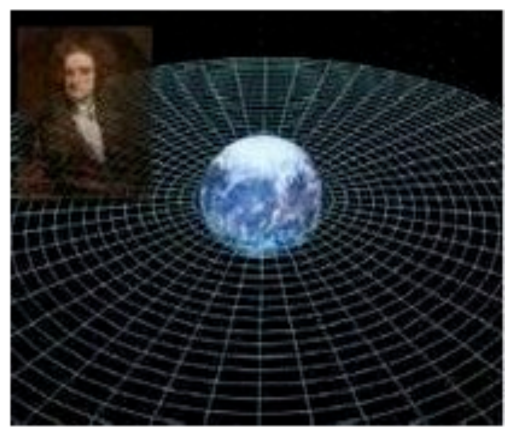
Não, Continuando...

A RR ainda impôs algumas condições à Física: ao redefinir os conceitos de como medir o espaço (distância) e intervalo de tempo, entrelaçando-os, Einstein alterou os alicerces da Física de tal modo a se ter não apenas a cinemática relativística, mas também a dinâmica, termodinâmica, **gravitação**, etc. relativísticos.

Para Newton, a ***Lei da Gravitação Universal*** consiste em uma força de atração de ação à distância, conforme figuras abaixo.



Gravitação para Newton



O espaço para Newton obedece à geometria de Euclides.

Atualmente!!!

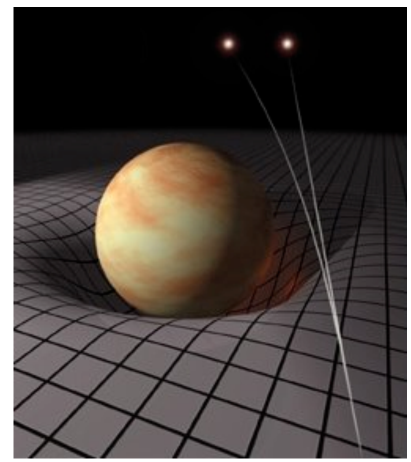
Para Einstein, a "***Lei da Gravitação Universal"***, denominada de ***Teoria da Relatividade Geral*** (**RG**), publicada em 1915, consiste em uma modificação da geometria do espaço, não sendo plano, conforme adotara Newton, mas sim curvo obedecendo a uma nova geometria, conforme figuras abaixo.

Gravitação para Einstein

O espaço para Einstein obedecia à geometria (espaçotempo curvo) de Riemann.

Gravitação para Newton

O espaço para Newton obedece à geometria (espaço plano) de Euclides.



Os objetos movem-se no espaçotempo que é "encurvado" devido a presença de um corpo massivo, descrevem naturalmente curvas sem ter a necessidade de uma força central de ação à distância para desviá-los!!!!

Com isso, surge uma pergunta!!!!

Qual a pergunta?

O espaço obedece à geometria (plana) de Euclides ou à geometria (curva) de Riemann?

Para Einstein era um argumento teórico utilizado na RG (intuição?), faltando assim uma comprovação “experimental”, o que foi conseguido no céu do Brasil e agradecido pelo próprio Einstein que, em retribuição ao artigo escrito por Lélio Gama (1892 – 1981), pesquisador do Observatório Nacional, sobre a importância do registro do eclipse em Sobral, Ceará no ano de 1919. Einstein escreveu:

“*A pergunta que minha mente formulou foi respondida pelo ensolarado céu do Brasil*” [2]

Albert Einstein, 1925

Eclipse de 29.05.1919.

Acampamento em Sobral para observação do Eclipse do Sol, em 29 de maio de 1919.

um tipo simples de buraco negro!

As soluções das equações de Einstein apresentadas na RG, divulgada em 1915, dão margem a diversas soluções, dentre elas a de Karl Schwarzschild (1873-1916) que a apresentou em 1916 com as seguintes condições:

• Uma esfera de massa M imóvel no espaço vazio e isotrópico.

•Sem carga elétrica.

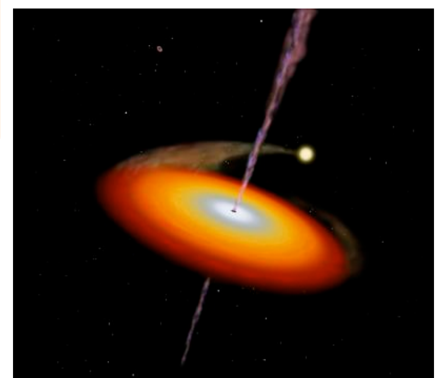
Onde em sua solução define-se: (Se quiser saber um pouco mais)

$r^* = \frac{2GM}{c^2}$, em que c é a velocidade da luz no vácuo; G a constante gravitacional; r^* é o raio do centro de massa a "***pontos críticos***" e M a massa desse corpo. Com uma simples algebrada:

$\sqrt{\frac{2GM}{r^*}}$ que se parece com: $v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$

Karl Schwarzschild (1873-1916)

r a solução de Schwarzschild como um lor da velocidade de escape (v_{esc}).



escape para qualquer objeto ser igual a o vácuo), com a limitação imposta pela (RR)?!?!?!?!*

um pouco mais!

Como conciliar qualquer valor de velocidade de escape (v_{esc}), conforme a Lei da Gravitação Universal de Newton, com o limite imposto pela RR de Einstein?

Não tem como conciliar! Experimentos evidenciam a condição imposta para o limite de velocidade em c (previsto na RR) e a solução de Schwarzschild para as equações da RG está correta para as condições adotadas. Observe a situação abaixo:

Aqui é o vácuo!

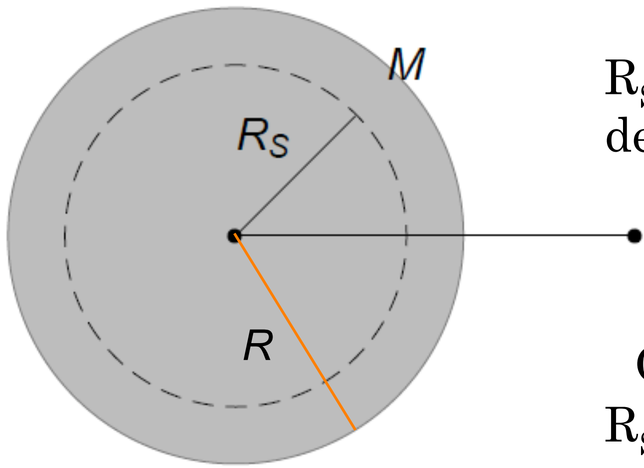


Figura: Massa esférica **imóvel.**

Se a massa M estiver contida na esfera de raio R_S, temos uma situação crítica!!!!

R_S é denominado de raio de Schwarzschild, onde:

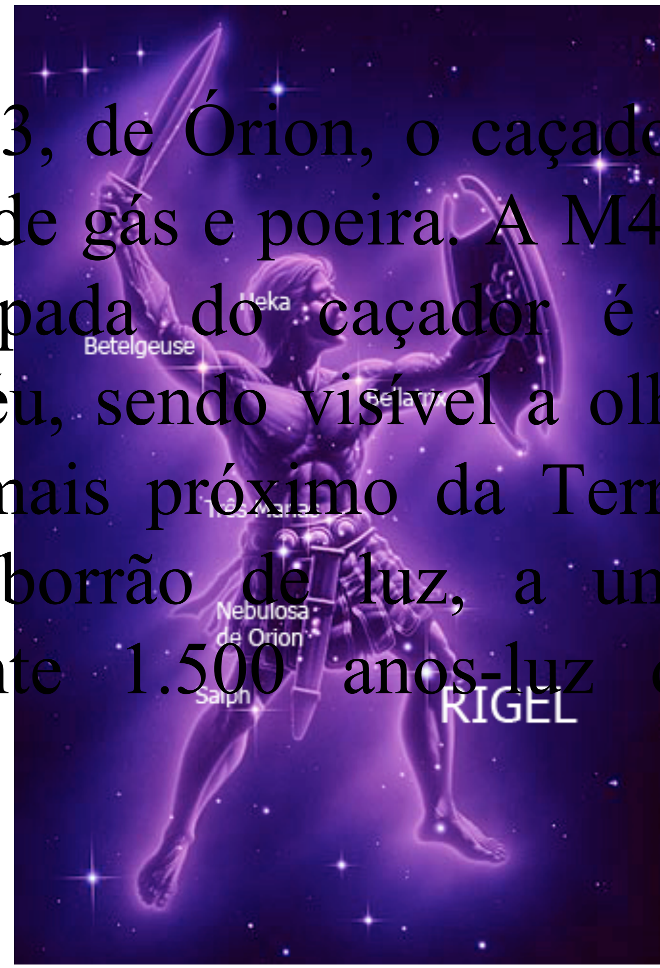
$$R_S = r^* = \frac{2GM}{c^2}$$

OBS:
R_S é denominado pelos astrofísicos como horizonte de eventos, com o limite para buracos negros ($R < R_S$)

Como se formam os buracos negros?

Um corpo massivo deforma a geometria do espaço a sua volta, de acordo com a RG. Mas como surge esse corpo massivo? Um exemplo está descrito abaixo:

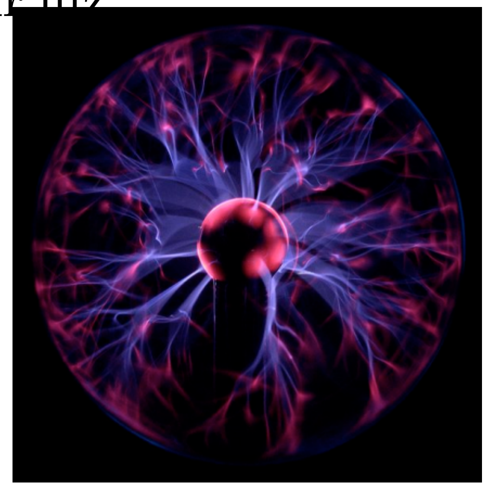
As nebulosas, Messier 42 e 43, de Órion, o caçador, são imensas e difusas nuvens de gás e poeira. A M42, localizada na bainha da espada do caçador é a nebulosa mais brilhante no céu, sendo visível a olho nu, é o berçário de estelas mais próximo da Terra. Aparece no céu como um borrão de luz, a uma distância de aproximadamente 1.500 anos-luz da Terra.



Órion

Então...

Nessas regiões há gás ionizado, átomos ou moléculas carregados eletricamente, podem emitir luz.



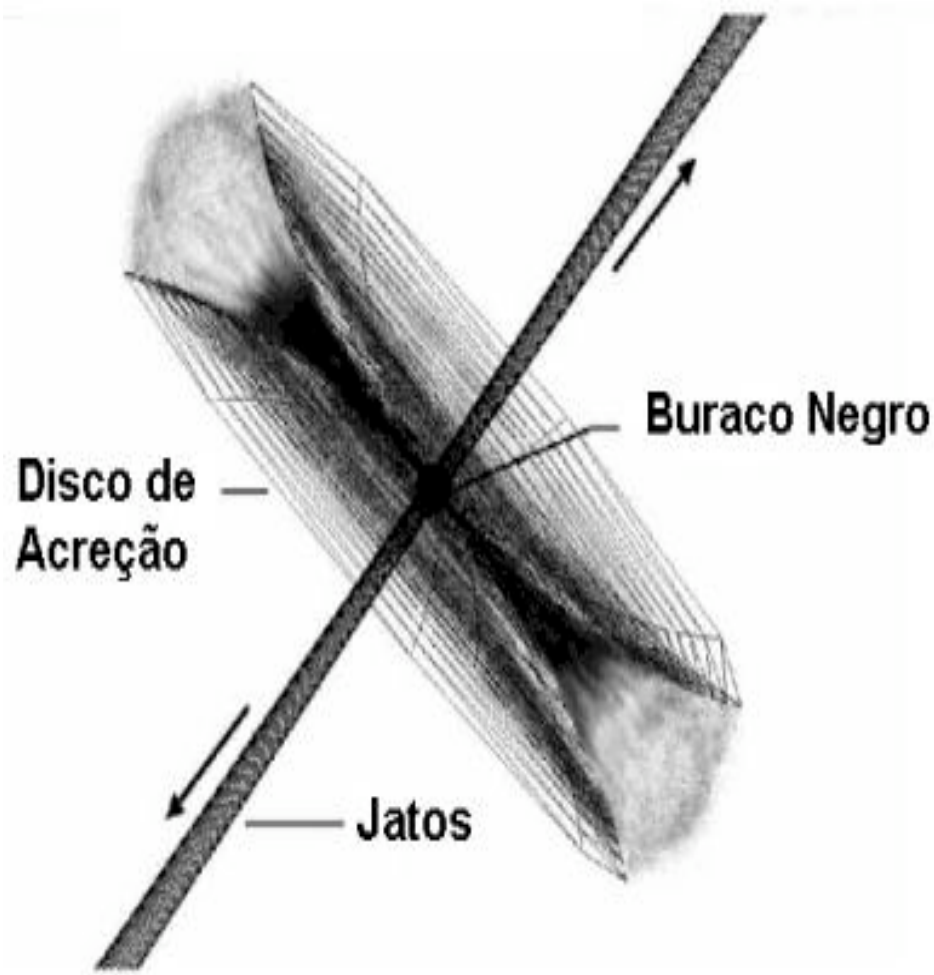
Quando o campo gravitacional tem pouca intensidade, a Lei Gravitação Universal (Newton) é uma boa aproximação da Relatividade Geral (Einstein). Assim, nessas regiões onde o campo gravitacional tem pouca intensidade, podemos utilizar Newton, onde matéria atrai matéria, "condensando" essa massa gasosa que, por sua vez, com esse acréscimo de massa, passa a atrair mais íons (matérias). E assim...

Assim nascem as estrelas!!!!!!

Esquematicamente?

A figura compara os diferentes ciclos evolutivos das estrelas. Na parte central uma nebulosa dá origem a estrelas com diferentes massas. Na parte esquerda da figura está representado o ciclo evolutivo de uma estrela de pequena massa (como o Sol), que terminará a sua vida como uma anã branca. Na parte direita está representado o ciclo de vida de uma estrela de grande massa que pode terminar a sua vida como uma estrela de nêutrons ou um buraco negro.

Resumidamente:



O disco de acresção ele deve ter dimensões pequenas da ordem de milisegundos-luz para os estelares e dias-luz para os supermassivos no centro das galáxias. [5]

Um pouco mais...

Quem foi Schwarzschild?

- http://pt.wikipedia.org/wiki/Karl_Schwarzschild
- http://scienzapertutti.lnf.infn.it/biografie/schwarzschild-bio.html

Evidências de buraco negros:

•http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/bn/evid_estelares.htm
•http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/bn/evid_bn_agns.htm
•http://www.observatorio.ufmg.br/pas19.htm
•http://oglobo.globo.com/blogs/mulherdasestrelas/posts/2010/04/11/grandes-explosoes-gravidade-forte-buracos-negros-282824.asp
•http://www.portaldoastronomo.org/tema_pag.php?id=7&pag=4
•http://www.observatorio.ufmg.br/pas19.htm
•http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/bn/encontrar.htm

Comparando tamanhos de corpos celestes

- http://bitaites.org/no-mundo-da-lua/no-cosmos-um-gigante-tambem-e-um-berlinde

Bibliografia:

- [1] **Wheeler, Tiomno e a Física brasileira**, Bassalo, J. M. B. e Junior, O. F. in, http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-47442003000400013
- [2] Tolmaquim, A. T. , Einstein o viajante da Relatividade na América do Sul, Vieira & Lent casa Editorial ltda, 1ª edição, 2003, Rio de Janeiro, R. J., p.73.
- [3] http://astro.if.ufrgs.br/evol/node53.htm
- [4] http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/bn/formacao.htm
- [5] http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/bn/encontrar.htm
- http://www.if.ufrgs.br/~rns/posters/buracos_negros_resize.jpg
- http://www.portaldoastronomo.org/noticia.php?id=300
- http://people.bu.edu/pbokulic/blackholes/
- Notas de aula de Tópicos de Física Contemporânea, do Programa de Mestrado de Ensino em Física, IF – UFRJ, ministrado no 1º semestre de 2010, pelo professor Alexandre C. Tort.

Muito obrigado!!!!!!!!!!

Solução de Schwarzschild das equações de Einstein para a RG

Métrica para uma simetria esférica geral:

$$(c\,d\tau)^2 = g_{00}\,(ct,r)\,(d(ct))^2 - g_{11}\,(ct,r)\,(dr)^2 - r^2\left((d\theta)^2 + \sin^2\theta\,(d\varphi)^2\right) \qquad (1)$$

Para se determinar as funções $g_{00}(ct,r)$ e $g_{11}(ct,r)$, basta substituir essa métrica nas equações de campo de Einstein, especificando-se antes as condições de contorno.

O que Schwarzschild fez foi supor um corpo esférico (obedecendo a simetria da métrica acima), imóvel, em um espaço vazio e iotrópico e com carga elétrica nula como condições de contorno, onde obteve as funções desejadas, $g_{00}(ct,r)$ e $g_{11}(ct,r)$:

$$g_{00}\,(ct,r) \rightarrow g_{00}\,(r) = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) \quad \text{e} \quad g_{11}\,(ct,r) \rightarrow g_{11}\,(r) = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1}$$

Substituindo as funções acima em (1), entramos uma métrica para as condições impostas.

$$(c\,d\tau)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)(d(ct))^2 - \frac{(dr)^2}{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)} - r^2\left((d\theta)^2 + \sin^2\theta\,(d\varphi)^2\right)$$

Esse métrica é denominada “Métrica de Schwarzschild”!!!!!

Solução de Schwarzschild para as equações de Einstein para a RG

Fazendo $d\theta = d\varphi = 0$, a métrica de Schwarzschild reduz-se a :

$(c\,d\tau)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)(d(ct))^2$, onde se obtém: $d\tau = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{1/2} dt$

Se definirmos $r^* = \frac{2GM}{c^2}$, $\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{1/2} \to 0$ e $dt \to \infty$, já que $d\tau$ é finito!!!

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

Interpretando:

O intervalo de tempo (*dt*) medido por quem está observando o outro na fronteira R_S, congela (tende ao infinito!!!!!), como pode isso?

Para voltar