Escalarização de buracos negros topológicos

Contact Information:
Email: `felipe.console@usp.br`

Betti Hartmann, Felipe Cônsole*

***Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos**

Abstract

Estudamos soluções do tipo buracos negros para um modelo escalar-tensorial da gravidade em 5 dimensões onde o campo escalar possui acoplamento não mínimo com a métrica do espaço-tempo por meio do termo de Gauss-Bonnet. Esse tipo de acoplamento força o campo escalar adquirir um comportamento não trivial perto do buraco negro, fenômeno conhecido como escalarização espontânea.

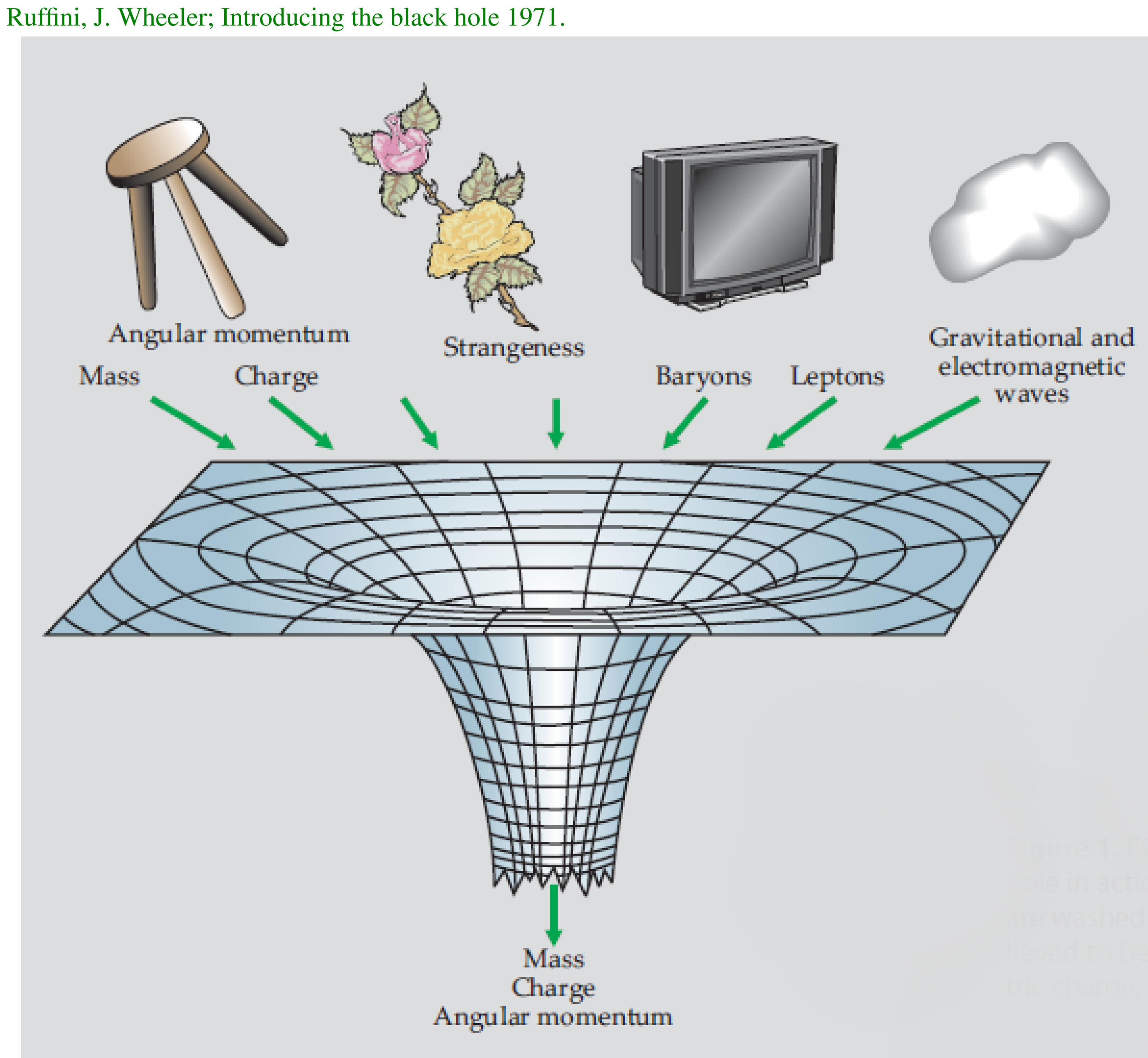
Introdução

Apesar das previsões da Relatividade Geral (RG) estarem de acordo com todas as observações e experimentos já realizados pelos humanos, há motivos para acreditar que a teoria da Relatividade Geral não pode ser a palavra final no que diz respeito à gravidade. Entre esses motivos encontram-se as misteriosas matéria e nergia escura, sobre as quais sabemos muito pouco e não são totalmente explicadas no contexto da RG. Na tentativa de entender o que são matéria e energia escura, por exemplo, foram propostos várias modelos de teorias de gravidade que diferem da RG, sendo estes modelos conhecidos como teorias alternativas à RG. O exemplo mais simples mas no entanto, com uma rica fenomenologia, é o modelo escalar-tensorial da gravidade. Nestes modelos, em geral, há um acoplamento não mínimo entre o campo escalar e o tensor métrico, o que faz o campo escalar desempenhar um papel não trivial no espaço tempo, modificando as equações de Einstein da RG. As soluções do tipo buracos negros para estes modelos podem diferir das soluções da RG e por meio da análise de dados provenientes da detecção de ondas gravitacionais cuja fonte é a fusão de buracos negros, podemos comparar nossas soluções com as observações e, possivelmente, eliminar ou corroborar algumas teorias alternativas à RG.

O teorema da calvície

O teorema da calvície (na verdade uma conjectura, pois há provas apenas para exemplos específicos de acoplamento de certos tipos de campos de matéria com a métrica do espaço-tempo) afirma que os buracos negros são caracterizados apenas por três parâmetros: a sua massa, sua carga elétrica e o seu momento angular. Parâmetros estes que satisfazem uma generalização da lei de Gaus. Isso faz com que esses objetos enigmáticos sejam, do ponto de vista da física clássica, bastante simples. Por exemplo, dois buracos negros com os mesmos três parâmetros (assumindo a planicidade assintótica) descrevem o mesmo espaço tempo, enquanto que estrelas de nêutrons com mesma massa, carga elétrica e momento angular não necessariamente são identicas; a distribuição da densidade de energia dentro da estrela de nêutron pode fazer com que o espaço-tempo ao redor destas estrelas sejam diferentes. Esta simplicidade dos buracos negros vai pela alcunha deles não possuirem *cabelo*. Onde cabelo é uma metáfora para para a simplicidade dos buracos negros no sentido de que quando duas pessoas são calvas, elas são mais semelhantes.

Figure 1: Buracos negros na relatividade geral são caracterizados apenas pela sua massa, carga elétrica e momento angular. Imagem tirada de R. Ruffini, J. Wheeler; Introducing the black hole 1971.



O modelo

Estudamos uma teoria escalar-tensorial em 5 dimensões cuja ação é dada por

$$S = \int d^5x\sqrt{-g}\left[R + \left(\alpha + \gamma\phi^2\right)\mathcal{G} - \partial_\mu\phi\partial^\mu\phi\right] \tag{1}$$

onde R é o escalar de Ricci, α e γ constantes de acoplamento, ϕ o campo escalar e $\mathcal{G}$ o termo de Gauss-Bonnet que é dado por

$$\mathcal{G} = R^{\mu\nu\sigma\rho}R_{\mu\nu\sigma\rho} - 4R^{\mu\nu}R_{\mu\nu} + R^2, \quad \mu,\nu,\sigma,\rho = 0,1,2,3,4.$$

$R_{\mu\nu\sigma\rho}$ é o tensor de Riemann e $R_{\mu\nu}$ o tensor de Ricci. O termo de Gauss-Bonnet possui a importante propriedade de ser um *invariante topológico* em 4 dimensões e para $\gamma = \phi = 0$, há soluções analíticas que descrevem buracos negros com diferentes topologias para o horizonte de eventos [2]. A topologia do horizonte de eventos é dada pelo parâmetro k que pode assumir os valores $k = -1, 0, 1$ e descrevem horizonte de eventos com topologia hiperbólica, plana e esférica, respectivamente.

As equações de movimento para o campo escalar e para a métrica são dadas por

$$\Box\phi + 2\gamma\phi\mathcal{G} = 0 \tag{2}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = -\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi + \frac{1}{2}g_{\mu\nu}(\partial\phi)^2 + (\alpha + \gamma\phi^2)\mathcal{K}_{\mu\nu} \tag{3}$$

onde

$$\mathcal{K}_{\mu\nu} = \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\left(R_{\alpha\beta\gamma B}R^{\alpha\beta\gamma\delta} - 4R_{\alpha\beta}R^{\alpha\beta} + R^2\right) - 2RR_{\mu\nu} + 4R_{\mu\alpha}R^\alpha_\nu + 4R_{\alpha\beta}R^\alpha_{\mu\nu} - 2R_{\mu\alpha\beta\gamma}R^{\alpha\beta\gamma}_\nu. \tag{4}$$

O termo de Gauss-Bonnet só é identicamente nulo em espaços-tempo planos e, portanto, força o campo escalar a ter um comportamento não trivial. Para encontrar soluções que descrevem buracos negros, fazemos o seguinte ansatz esfericamente simétrico para a métrica e apara o campo escalar

$$ds^2 = -N(r)A^2(r)dt^2 + \frac{1}{N(r)}dr^2 + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2 + \sin^2\theta\sin^2\varphi d\chi^2\right), \quad \phi = \phi(r). \tag{5}$$

Sabemos que para $\gamma = \phi = 0$, o modelo admite soluções com horizonte de evento esférico dado por

$$N(r) = 1 + \frac{r^2}{2\alpha}\left(1 - \sqrt{1 + \frac{8\alpha M}{r^4}}\right) \quad , \quad A(r) \equiv 1, \quad \phi(r) \equiv 0 \tag{6}$$

sendo o horizonte de eventos localizado em $r = r_h$ dado por

$$r_h = \sqrt{2M - \alpha}. \tag{7}$$

Pesquisa em andamento

Estamos trabalhando na obtenção da solução numérica da equação para o campo escalar e para a equação de Einstein (Equações 2 e 3). Os próximos passos envolvem fazer uma análise das propriedades termodinâmicas destes buracos negros e procurar por soluções com caráter solitônicas deste modelo. O estudo das soluções com simetria axial é uma generalização imediata mas que requer um tratamento numérico mais cuidadoso.

References

[1] Yves Brihaye, Betti Hartmann, and Jon Urrestilla. Solitons and black hole in shift symmetric scalar-tensor gravity with cosmological constant. *JHEP*, 06:074, 2018.

[2] Rong-Gen Cai. Gauss-Bonnet black holes in AdS spaces. *Phys. Rev.*, D65:084014, 2002.

[3] Thomas P. Sotiriou and Shuang-Yong Zhou. Black hole hair in generalized scalar-tensor gravity: An explicit example. *Phys. Rev.*, D90:124063, 2014.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001