

Projeto de Pesquisa

Marina von Steinkirch, Mestrado

**Gravitação e Cosmologia:
Matéria e Energia Escuras e
Fenomenologia.**

Prof. Dr. Elcio Abdalla
Orientador

Resumo

A Relatividade Geral tem se mostrado a teoria mais adequada para a descrição dos fenômenos gravitacionais em escala astrofísica. Ela é aplicada com sucesso numa vasta classe de situações, desde a descrição de estrelas isoladas, em distâncias típicas do sistema solar, até a cosmologia, que lida com as maiores distâncias possíveis de serem observadas.

Deste modo, buscamos a compreensão de questões envolvendo a Teoria da Gravitação de Einstein e sua quantização, assim como aplicações destas e de teorias de campos em contextos cosmológicos.

Paralelamente, uma das questões mais importantes na cosmologia contemporânea envolve a possível existência de uma constante cosmológica positiva nas equações de Einstein. O estudo desta constante passa pela relação entre o espaço de de Sitter e uma Teoria de Campos invariante de escala na beirada do Universo.

A cosmologia teórica e observacional, apesar dos grandes avanços obtidos em anos recentes, ainda enfrenta tremendos desafios. O maior desafio hoje é a compreensão da Matéria e da Energia Escuras em termos de modelos baseados em propostas teóricas. Recentemente propusemos uma interação para a Matéria e Energia Escuras que explica a idade de antigos quasares, o que não poderia ser obtido dentro do modelo cosmológico padrão. Esperamos para o futuro próximo uma melhor compreensão destes modelos em termos de propriedades mais fundamentais.

1 Introdução Geral

Estamos atualmente presenciando uma revolução na cosmologia observacional. Novas observações astronômicas estão exigindo o refinamento dos modelos cosmológicos existentes e uma melhor compreensão da natureza da gravitação, em pequenas e grandes escalas. A interação entre física fundamental, astrofísica e cosmologia é cada vez mais importante.

O Modelo Padrão das Partículas Elementares foi exaustivamente testado em experimentos sofisticados nos últimos 50 anos. Hoje há bem menos a se esperar de experiências feitas no âmbito de grandes aceleradores. Existe, por outro lado, muito mais em observações cosmológicas. Desde que a cosmologia se tornou uma ciência de precisão com as observações do (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) WMAP, pode-se testar uma série de hipóteses físicas fundamentais. Além disto, as observações estão hoje novamente à frente da teoria, o que, no caso da física das partículas elementares não acontecia desde a confirmação da teoria de Weinberg-Salam. Isto nos propicia com um ambiente mais florido, propício a hipóteses robustas e avesso a especulações teóricas estéreis.

A questão é complexa, referindo-se ao conteúdo físico do universo. A estrutura do universo conhecido compõe-se em sua maior parte de matéria e energia escura, cujas características são desconhecidas. Temos algumas hipóteses de trabalho que têm tido algum sucesso supondo uma interação entre estas duas componentes e pretendemos continuar nesta linha de pesquisa que tem chamado a atenção de um número grande de contribuições nesta área.

No contexto da cosmologia o estudo da evolução de pequenas perturbações primordiais no universo é o ponto de partida para os modelos de formação de estrutura. É importante salientar que há evidências observacionais dessas perturbações primordiais. Elas deixaram marcas na radiação de fundo do universo e sua detecção com os satélites COBE e WMAP foi um grande triunfo da astrofísica experimental. Esses novos dados experimentais têm motivado inúmeros trabalhos em modelos inflacionários.

2.1 Perturbações e fenomenologia

Tanto a análise numérica da formação de galáxias quanto uma série de observações — da fração de bárions em aglomerados de galáxias, do número de aglomerados em função do desvio para o vermelho e da dinâmica das galáxias — indicam que a matéria aglomerativa (bárions mais matéria escura) soma $30\% \pm 10\%$ da energia crítica [1, 2, 3]. Ou seja, se a densidade de energia total do universo é a crítica, então em torno de 70% dessa energia está numa forma “escura” que não afeta a dinâmica de galáxias e de aglomerados de galáxias. Este é o assim chamado problema da *falta de energia*.

O problema da falta de energia se tornou mais evidente quando dois grupos independentes mediram as curvas de luminosidade de supernovas do tipo Ia [4]. Os resultados dos dois grupos indicam que o universo está atualmente se expandindo a uma taxa acelerada. Isso significa que o universo não é hoje dominado por matéria “normal”, e sim por algum tipo de energia escura cuja pressão negativa acelera a expansão do universo [5].

Os argumentos a favor de uma componente de energia escura se tornaram ainda mais persuasivos com as últimas observações da radiação cósmica de fundo em microondas (RCF) [6, 7]. A localização do pico do espectro das anisotropias da RCF, medido com uma precisão de 10%, implica que a geometria do universo é aproximadamente plana [8]. Ou seja, existem três conjuntos de observações independentes que, combinados, constituem forte evidência da existência de energia escura: primeiro, as observações de galáxias e aglomerados indicam que a matéria escura mais a matéria bariônica só respondem por 40% ou menos da densidade de energia crítica; segundo, as SNIa indicam que mais de 50% da densidade de energia é “escura”; e terceiro, as anisotropias da RCF indicam que a densidade de energia total é aproximadamente igual à densidade crítica. Essas observações implicam portanto que a densidade total do universo é quase idêntica à densidade crítica, $\Omega = \rho/\rho_c = 1.05 \pm 0.1$, onde um terço da densidade de energia corresponde a matéria normal ou escura, e dois terços correspondem a energia escura. A

questão é: o que é essa energia escura?

A candidata mais tradicional para o posto de energia escura é a *constante cosmológica*, ou *energia de vácuo*. Uma constante cosmológica Λ , cuja pressão $p_\Lambda = -\rho_\Lambda = -\Lambda/(8\pi G)$ causa a aceleração da expansão do universo, poderia dar conta dos 70% da densidade de energia faltantes, sem interferir com a formação de galáxias (já que se trata de uma *constante* cosmológica, ela não possui nem induz inomogeneidades nos outros campos de matéria).

Entretanto, a constante cosmológica padece de graves dificuldades [9, 10]: primeiro, há o problema do *ajuste fino*, já que a escala de energia de vácuo é dezenas de ordens de magnitude menor que as escalas conhecidas em física de partículas elementares. A segunda dificuldade com a constante cosmológica é o *problema da coincidência*, ou seja, por que razão a constante cosmológica estaria se tornando dominante justamente nesta época (nos últimos cinco bilhões de anos) e não em qualquer outra época da história do Universo?

Com o objetivo de aliviar os problemas da constante cosmológica, vários outros candidatos a energia escura (ou *quintessência*) foram propostos, geralmente na forma de um campo escalar com energia cinética canônica [11, 12, 13, 14, 15, 16] ou não [17, 18]. A característica básica desses modelos de energia escura é a pressão negativa, que, pelas equações da Relatividade Geral, causa a aceleração da taxa de expansão do Universo. Uma segunda característica da qual participam a maioria desses modelos é que as perturbações do campo escalar da energia escura são suprimidas em escalas inferiores ao horizonte de Hubble H^{-1} , de modo que a existência do campo escalar não afeta dramaticamente o processo de formação de galáxias [15, 11].

Uma fascinante possibilidade é que o campo escalar de energia escura esteja em interação com o campo de matéria escura. Os modelos de táquions descrevem apropriadamente a energia escura [18]. Se isso se concretizar, será um formidável avanço para a cosmologia, explicando o papel de cada um dos dois mais misteriosos fenômenos observados no universo – a massa invisível em pequenas escalas e a massa invisível em largas escalas.

Portanto, um dos maiores desafios da cosmologia na próxima década será determinar a natureza e as propriedades físicas da energia escura e sua relação com a matéria escura e a formação de estruturas.

Pretendemos estudar e propor modelos de energia escura que sejam aceitáveis tanto física quanto fenomenologicamente. Estudaremos a fenomenolo-

gia usando tanto métodos analíticos quanto métodos numéricos.

2.2 Energia escura holográfica

Teoria Quântica de Campos em espaço curvo constitui uma razoável descrição do Cosmos. Por outro lado, teoria quântica da gravitação jamais foi completamente incluída em uma teoria unificada de todas as interações. Apesar disto, a idéia semi-clássica de holografia [19] tem sido usada na descrição de modelos cosmológicos [20].

Em cosmologia, o conteúdo energético do universo obedece a uma relação simples inspirada em holografia, qual seja, esta quantidade não pode ser maior que a massa do buraco negro cuja massa seja aquela do universo, ou seja,

$$\rho_D = \frac{3c^2 M_p}{L^2} \quad (1)$$

onde introduz-se uma constante fenomenológica c que caracteriza o modelo, e onde M_p é a massa de Planck. Esta é a chamada hipótese holográfica [21]. Para que não se viole a segunda lei da termodinâmica, $c \geq \sqrt{\Omega_\Lambda}$ [22, 23].

Nosso estudo parte do princípio de que haja uma interação entre energia e matéria escura. Supusemos, como modelo mais simples, dois fluidos em interação,

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_m + 3H\rho_m &= +Q \\ \dot{\rho}_D + 3H(1 + \omega_D)\rho_D &= -Q \end{aligned} \quad (2)$$

onde Q é uma dada interação. Foi proposto que tal interação fenomenológica fosse

$$Q = 3b^2 H(\rho_m + \rho_D) \quad (3)$$

onde b^2 é uma constante a ser fixada pelos dados observacionais (ver [23, 24, 25]).

Finalmente supusemos que, consistentemente com a fenomenologia [27, 28] e com o fato dos fluidos estarem em interação, a relação $\omega_D = p_D/\rho_D$ fosse dependente do tempo cosmológico.

2.3 Vínculos de idade, formação de estruturas e espectro de CMB para baixos valores de ℓ

A idade do universo, assim como a idade de objetos antigos dependem de modo fundamental da interação entre a matéria e a energia escuras.

Dos resultados de três anos de WMAP [26] em $z = 0$, $t_0 = 13.73_{-0.17}^{+0.13} Gyr$ e o valor da constante de Hubble é $H_0 = 73.4_{-3.8}^{+2.8} km/s/Mpc$, o que é compatível com os aglomerados globulares [29] e medidas HST [30].

Com tais dados pudemos mostrar que a interação não apenas é compatível com a idade atual, mas também explica o quasar APM 0879+5255, observado em $z = 3.91$ cuja idade de $2.1 Gyr$ [31, 32] parece ser grande demais.

Nós já consideramos a interação da energia escura holográfica em [24, 25]. Com a interação apenas a soma das energias se conserva. e temos,

$$\frac{\Omega'_D (1 - \Omega_k - \Omega_D)}{\Omega_D^2 (1 + \Omega_k)} \left[\frac{2 \cos y}{c \sqrt{\Omega_D}} + \frac{1}{\Omega_D} + \frac{\Omega'_k}{\Omega_D (1 + \Omega_k - \Omega_D)} - \frac{3b^2 (1 + \Omega_k)}{\Omega_D (1 + \Omega_k - \Omega_D)} \right] , \quad (4)$$

a linha denota a derivada em relação a $x = \ln a$ e $\cos y = \sqrt{1 - \frac{c^2 \Omega_k}{\Omega_D}}$. A equação de estado fica sendo

$$\omega_D = -\frac{1}{3} - \frac{2\sqrt{\Omega_D}}{3c} \cos y + \frac{b^2 (1 + \Omega_k)}{\Omega_D} . \quad (5)$$

e

$$\frac{H'}{H} = -\frac{3\Omega_D (1 + \omega_D + r)}{2} + \Omega_k, \quad (6)$$

onde $r = \frac{1 + \Omega_k - \Omega_D}{\Omega_D}$.

Para os limites de idade obtivemos os vínculos $0.018 \leq b^2 \leq 0.075$ para $c = 1$. Obtivemos também o espaço de parâmetros para b^2 e c . Vamos verificar a veracidade dos dados para modelos mais robustos de Teorias de Campos.

No contexto da análise de formação de estruturas, em um modelo com interação esperamos diferenças no processo de formação de estruturas, devido a propriedades de aglutinamento da matéria escura. Consideramos a perturbação descrita por

$$\delta \equiv \frac{\delta \rho_m}{\rho_m}, \quad (7)$$

assim como sua evolução temporal. Esta evolução se dá de acordo com

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - \frac{a\delta}{2} \frac{d(H^2\Omega_m)}{da} = 0 \quad . \quad (8)$$

A evolução da perturbação foi obtida e está de acordo com os dados observacionais. Isto explica a formação de estruturas em épocas muito remotas. Necessitamos agora de uma análise mais rigorosa baseada novamente em um modelo de campos em interação.

Usando o programa CMBFAST analisamos as consequências do modelo para grandes ângulos. Obtivemos os diagramas de distribuição de probabilidades de b e de c . Nós o fizemos para diversas equações de estado para a matéria escura, utilizando os parâmetros conhecidos das recentes observações. Obtivemos $1/c$ com as incertezas 68.26%, 95.44% e 99.73%,

$$\frac{1}{c} = 0.56_{-0.20-0.48-0.55}^{+0.12+0.28+0.41}.$$

Obtivemos b^2 com incertezas 68.26%, 95.44% e 99.73%, de modo que juntando-se todos os vínculos obtivemos

$$\begin{aligned} 0.10 < b^2 < 0.22 & \quad (1 \sigma), \\ -0.05 < b^2 < 0.24 & \quad (2 \sigma), \\ -0.20 < b^2 < 0.27 & \quad (3 \sigma). \end{aligned}$$

2.4 Compreensão da parte escura do universo

Assim concluímos que b^2 não é zero, com confiança de 90%. Ademais, com boa probabilidade, $0.05 < b^2 < 0.2$. A pergunta à qual nos tornamos agora é sobre um modelo mais físico e mais realista da interação.

Temos duas possibilidades em vista. A primeira é de se obter a interação de um ponto de vista fenomenológico, através da termodinâmica obedecida pela energia e matéria escuras. Esperamos em tal caso alguns resultados em breve. Neste caso, as equações de evolução são obtidas como consequência direta da fenomenologia envolvida.

Outra possibilidade, mais ambiciosa, está em considerarmos um modelo lagrangeano. Neste caso a questão é mais complexa. Em primeiro lugar, o

modelo apresentado acima não pode ser obtido de uma lagrangeana, como podemos facilmente verificar. A lagrangeana deve conter modelos de táquions, ou mesmo *phantons*. Neste caso, depois de se obter um modelo minimamente realista (já de fato proposto) temos todo o trabalho descrito acima. Tal plano se realizará com a participação dos colaboradores professores Bin Wang e Chi Yong Lin, além de vários estudantes de mestrado e doutorado, dois de nosso grupo e dois chineses.

Pudemos também analisar a interação e suas conseqüências para o teorema do virial, obtendo vínculos muito mais fortes para o valor de b^2 [37].

Como conclusão, pretendemos:

- Reforçar os vínculos observacionais, especialmente levando-se em conta BAO (baryonic acoustic oscillations), CMB, idades e teorema do virial.
- Considerar modelos realísticos de teorias de campos.
- Considerar modelos fenomenológicos de fluidos em interação.

Referências

- [1] S. White and M. Rees, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **183**:311 (1978); C. Frenk, S. White and M. Davis, *Nature* **317**: 595 (1985); 2dFGRS Team (Will J. Percival *et al.*), astro-ph/0206256.
- [2] J. Ostriker and P. Steinhardt, *Nature* **377**: 600 (1995).
- [3] N. Bahcall, J. Ostriker, S. Perlmutter and P. Steinhardt, *Science* **284**: 1481 (1999); L. Wang, R. Caldwell, J. Ostriker and P. Steinhardt, *Astrophys. J.* **530**: 17 (2000).
- [4] S. Perlmutter *et al.*, *Nature* **391**: 51 (1998); A. Riess *et al.*, *Astron. J.* **116**: 1009 (1998).
- [5] I. Waga and J. Friemann, *Phys. Rev.* **D62**: 043521 (2000); A. Balbi *et al.*, *Astrophys. J.* **547**: L89-L92 (2001).
- [6] P. de Bernardis *et al.*, *Nature* **404**: 955 (2000); C. Netterfield *et al.*, astro-ph/0104460.

- [7] S. Hanany *et al.*, *Astrophys. J.* **545**: 5 (2000).
- [8] A. Jaffe *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **86**: 3475-3479 (2001).
- [9] S. Weinberg, *Rev. Mod. Phys.* **61**:1 (1989).
- [10] S. Carroll, *Living Rev. Rel.* **4**: 1 (2001), astro-ph/0004075.
- [11] B. Ratra. and P. J. Peebles, *Phys. Rev.* **D37**: 3406 (1988)
- [12] J. Frieman, C. Hill, A. Stebbins and I. Waga, *Phys. Rev. Lett.* **75**: 2077 (1995).
- [13] C. Wetterich, *Astron. Astrophys.* **301**: 321 (1995).
- [14] V. Silveira and I. Waga, *Phys. Rev.* **D56**: 4625 (1997).
- [15] R. Caldwell, R. Dave and P. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* **80**:1582 (1998).
- [16] I. Zlatev, L. Wang and P. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* **82**: 896, 1999; P. Steinhardt, L. Wang and I. Zlatev, *Phys. Rev.* **D59**: 123504 (1999).
- [17] C. Armendariz-Picón, V. Mukhanov and P. Steinhardt, *Phys. Rev. Lett.* **85**: 4438 (2000).
- [18] A. Sen, *JHEP* **0204**: 048 (2002); G. Gibbons *Phys. Lett.* **B537**: 1 (2002); T. Padmanabhan *Phys. Rev.* **D66**: 021301 (2002); A. Frolov, L. Kofman, A. Starobinsky, hep-th/0204187; G. Shiu, I. Wasserman, hep-th/0205003.
- [19] G. 't Hooft gr-qc/9310026; L. Susskind *J. Math. Phys.* **36** (1995) 6377.
- [20] Bin Wang, Elcio Abdalla and Ru-Keng Su *Phys. Lett.* **B611** (2005) 21, **B503** (2001) 394;
- [21] K. Enqvist and M. S. Sloth *Phys. Lett.* **93** (2004) 221302; Kari Enqvist, Steen Hannestad and Martin S. Sloth *JCAP* **0502** (2005) 004.
- [22] M. Li, *Phys. Lett. B* **603**, 1 (2005).
- [23] Bin Wang , Yungui Gong, Elcio Abdalla, gr-qc/0511051; D. Pavon and W. Zimdahl, *Phys. Lett.* **B628** (2005) 206, gr-qc/0505020; Jian-yong Shen, Bin Wang, Elcio Abdalla and Ru-Keng Su *Phys. Lett.* **B609** (2005) 200, hep-th/0412227; Zuo-Yi Huang, Bin Wang, Elcio Abdalla and Ru-Keng Su *JCAP* **0605** (2006) 013 hep-th/0501059.

- [24] B. Wang, Y. G. Gong, E. Abdalla, *Phys. Lett. B.* **624** (2005) 141
- [25] B. Wang, C. Y. Lin, E. Abdalla, *Phys. Lett. B***637** (2006) 357.
- [26] D. N. Spergel *et. al.* astro-ph/0603449 ApJ; D. N. Spergel *et. al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175 (2003); N. Jarosik *et. al.*, astro-ph/0603452; G. Hinshaw *et. al.*, astro-ph/0603451.
- [27] R. Caldwell, M. Doran, *Phys. Rev. D* **69** (2004), 103517.
- [28] U. Alam, V. Sahni, A. A. Starobinsky, *JCAP* **0406** (2004) 008; D. Huterer, A. Cooray, *Phys. Rev. D***71** (2005) 023506; Y. Wang, M. Tegmark, astro-ph/0501351; H.K.Jassal, J.S.Bagla, T. Padmanabhan *Phys. Rev. D***72** (2005) 103503, astro-ph/0506748.
- [29] L. M. Krauss and B. Chaboyer *Science* **299** (2003) 65; L. M. Krauss and B. Chaboyer astro-ph/0201443.
- [30] W. L. Freedmann, et al, *Astrophys. J.* **553** (2001) 47
- [31] G. Hasinger, N. Scharrel, S. Komossa, *Astrophys.J.* **573** (2002) L77, S. Komossa, G. Hasinger, in *XEUS studying the evolution of the universe*.
- [32] A. Friaca, J. S. Alcaniz, J. A. S. Lima, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **362** (2005) 1295.
- [33] Birrel, N. D. e Davies, P. C. W. (1986) *Quantum Fields in Curved Space* (Cambridge: Cambridge University Press).
- [34] Abramo, L. R. e Finelli, F. (2003) *Phys. Lett. B*, **575**, 165.
- [35] Sen. A. A. (2006) gr-qc/0604050.
- [36] K.B. Efetov, *Adv. Phys.* 32 (1983).
- [37] Signature of the interaction between dark energy and dark matter in galaxy clusters. E. Abdalla, L.Raul W. Abramo, L. Sodre Jr., B. Wang, arXiv:0710.1198