

A PERSISTÊNCIA DO PRINCÍPIO COSMOLÓGICO

Resumo

Um dos principais pilares da Cosmologia Moderna é o Princípio Cosmológico, que afirma que em escalas de comprimento suficientemente grandes, a matéria no universo é distribuída de maneira homogênea e isotrópica. Este conceito aparenta carregar um “idealismo” que pode não necessariamente estar presente no universo. De fato, recentes observações [R.G. Clowes et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **429**, 2910 (2013); N.J. Secrest et al., *The Astrophysical Journal Letters* **908**, L51 (2021)] apontam para a possibilidade de violação do Princípio Cosmológico, ou seja, para a existência de estruturas tão grandes no universo, que infringem o princípio de distribuição homogênea e isotrópica de matéria em escalas cosmológicas. Isto, aliado a possíveis futuras observações, mostra uma possibilidade de quebra de paradigma para a cosmologia das próximas décadas. Teríamos de abandonar o Princípio Cosmológico? Quais as consequências de seu não abandono em vista destas recentes observações? Como seriam as novas equações que regem a dinâmica do universo se abandonássemos o Princípio Cosmológico? O abandono do princípio cosmológico tem implicações para a aceleração da expansão do universo? Estas e outras perguntas serão visitadas neste Projeto de Iniciação Científica a partir da hipótese do espaço-tempo I de Bianchi, que descreve anisotropias no universo. Para esta métrica, serão construídas as equações do tipo-Friedmann e as soluções dessas equações serão confrontadas com observações.

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Metodologia	2

1. Introdução

O Princípio Cosmológico (PC) é um dos principais pilares do Modelo Cosmológico Padrão (MCP) e estabelece que o universo em *grandes escalas de comprimento* é homogêneo e isotrópico [1]. A literatura [1] aponta para as escalas de comprimento em questão serem $> 100\text{Mpc}$ (megaparsec), sendo $1\text{pc} = 3,26$ anos-luz.

Um outro importante pilar do MCP é a Teoria da Relatividade Geral [2]. A junção desses dois pilares leva às renomadas Equações de Friedmann [1]:

$$3 \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = 8\pi G \rho + c^2 \Lambda, \quad (1)$$

$$3 \frac{\ddot{a}}{a} = -4\pi G \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + c^2 \Lambda. \quad (2)$$

Nelas, a é o fator de escala, G a constante de gravitação universal de Newton, ρ a densidade do universo, c a velocidade da luz, Λ a constante cosmológica e p a pressão do universo. Num modelo de universo onde rege o PC, a , ρ e p são funções do tempo t apenas (não dependem de nenhuma coordenada espacial). Além disso, p é a mesma em todas direções do universo, ou seja, se considerarmos coordenadas cartesianas, $p_x = p_y = p_z$, sendo p_i a componente da pressão na coordenada espacial i . Deve-se ressaltar que o fator de escala é quem rege a dinâmica do universo e dita como as distâncias evoluem no universo em expansão. Por outro lado, a constante cosmológica é a responsável por descrever a *aceleração* na expansão do universo, descoberta no final do século passado [3].

Recentemente, alguns trabalhos têm aparecido na literatura [4-7], e colocado em cheque o PC conforme preestabelecido.

Hunt e Sarkar [4] reportaram a existência do “void” local, onde nos encontramos, uma região de baixa densidade - comparada à densidade média do universo - que se estende por $200 - 300\text{Mpc}$. De acordo com Hunt e Sarkar, a própria inferência de aceleração na expansão do universo recente pode estar enviesada pela existência deste “void”.

Clowes et al. em [5] reportaram a existência de um grupo grande de quasares com tamanho característico ($\text{volume}^{1/3}$) $\sim 500\text{Mpc}$ localizado a um *redshift* $z \sim 1,3$. À época desta publicação, este grupo de quasares foi qualificado como a maior estrutura conhecida e definitivamente sugere incompatibilidade com a escala de homogeneidade, desafiando o PC.

Park e colaboradores realizaram testes usando uma amostra de galáxias vermelhas luminosas do *Sloan Digital Sky Survey* num volume cujo raio alcança $\sim 430\text{Mpc}$ e concluíram que o PC não se sustenta mesmo em escalas de comprimento dessa ordem (mais de quatro vezes maiores que a assumida em [1]).

No ano passado, um novo teste envolvendo quasares [7] apontou para um conflito com o PC.

2. Objetivos

As Referências [4-7] entre outras abrem um novo campo de pesquisa na cosmologia teórica. Devemos persistir na hipótese do PC? Até que ponto ele é, de fato, um princípio, uma vez que pode ser testado? Existe uma nova escala de comprimento em que o PC pode ser revalidado? Do ponto de vista da dinâmica do universo, quais as consequências do abandono do PC?

Em paralelo, a acima mencionada descrição da aceleração da expansão do universo a partir da constante cosmológica carrega consigo o chamado *problema da constante cosmológica* [8]. O valor da constante cosmológica inferido a partir de observações astronômicas de supernovas Ia [3] é mais de 100 ordens de grandeza diferente do valor inferido via Física de Partículas a partir do cálculo da energia quântica do vácuo [8], que é a interpretação física que se dá a Λ .

Pode-se perguntar que consequências o abandono do PC teria para a dinâmica do universo, particularmente para a possibilidade de descrever a aceleração da expansão do universo em modelos inomogêneos e/ou anisotrópicos.

Estas e outras perguntas serão investigadas no presente Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica.

3. Metodologia

A dinâmica do universo é regida pelas Equações de Friedmann (1)-(2). Variações das Equações de Friedmann podem ser obtidas ao se abandonar o PC. Por exemplo, enquanto (1) e (2) são obtidas a partir da métrica de Friedmann-Lemâitre-Robertson-Walker [9-13],

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad (3)$$

equações do tipo-Friedmann podem ser obtidas de variações da métrica (3).

O espaço-tempo I de Bianchi (veja, por exemplo [14]) é descrito pela métrica

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2 dx^2 - b^2(dy^2 + dz^2), \quad (4)$$

sendo que nesse caso o fator de escala a age na coordenada x enquanto o fator de escala b nas coordenadas y e z .

Nesse caso, temos o fator de escala médio dado por

$$\bar{a} = (ab^2)^{1/3}, \quad (5)$$

enquanto o parâmetro de Hubble é

$$H = \frac{1}{3} \left(\frac{\dot{a}}{a} + 2 \frac{\dot{b}}{b} \right). \quad (6)$$

Um outro importante parâmetro cosmológico é o parâmetro de desaceleração, definido como

$$q = -\frac{\ddot{a}\bar{a}}{\dot{a}^2}, \quad (7)$$

tal que $q > 0$ indica um universo em expansão desacelerada e $q < 0$ um universo em expansão acelerada.

Vale ressaltar que os valores de q obtidos nos modelos a serem desenvolvidos no presente Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica poderão ser confrontados com dados observacionais [15] visando a conferência do bom comportamento desses modelos. Não apenas os valores de q podem ser vinculados a partir de observações mas também o *redshift* de transição de um universo em expansão desacelerada para um em expansão acelerada [15], sendo que o *redshift* z é definido como

$$\bar{a} = \frac{1}{1+z}. \quad (8)$$

É bastante comum na literatura se assumir

$$a = b^n, \quad (9)$$

sendo n um número real arbitrário (veja [14], [16-20]).

As equações do tipo-Friedmann serão encontradas para a Equação (4), juntamente com a hipótese de tensor energia-momentum de fluido perfeito, já implícita em (1)-(2), e nulidade da constante cosmológica, com o intuito de verificar a possibilidade de obtenção de um universo em expansão acelerada sem carregar o acima mencionado *problema da constante cosmológica*, mas como consequência da anisotropia do universo [21]. Apesar de (8), as equações do tipo-Friedmann ainda terão três incógnitas, o que torna, a princípio, o sistema insolúvel. Para contornar este problema, devemos trabalhar com uma equação de estado, ou seja, uma relação entre a pressão p e a densidade ρ do universo, como [1]

$$p = \omega\rho, \quad (10)$$

com ω constante. Existe um valor particular de ω de alto interesse para nossos propósitos e este valor é 0. Quando $\omega = 0$, $p = 0$ e analisar equações de Friedmann ou do tipo-Friedmann para $p = 0$ é analisar a dinâmica de um universo dominado por poeira ou matéria não-relativística ou simplesmente matéria. Enquanto a constante cosmológica pode ser descrita por um fluido exótico com $\omega = -1$ (pressão negativa), um universo com $\omega = 0$ tem sua dinâmica dominada simplesmente por matéria, na forma de galáxias, aglomerados de galáxias etc. Ou seja, esta hipótese nos leva a não assumir nenhum tipo de fluido exótico responsável pela aceleração da expansão do universo. Se ainda assim, as soluções das equações do tipo-Friedmann apontarem para um universo em expansão acelerada, isto se deve à anisotropia tomada na métrica (4).

Nota sobre a viabilidade do Projeto

O presente Projeto de Pesquisa é de cunho teórico, de modo que seguramente haja viabilidade para sua execução. Eventualmente os resultados nele obtidos serão sim confrontados com observações astronômicas, mas estes dados podem facilmente serem obtidos acessando o *site* do repositório de artigos científicos da NASA <https://ui.adsabs.harvard.edu>.

Cronograma

1^o e 2^o meses: leitura dos primeiros cinco capítulos da Referência [1].

3^o e 4^o meses: obtenção das equações do tipo-Friedmann a partir da Eq.(4).

5^o e 6^o meses: obtenção das soluções para os fatores de escala a e b utilizando-se da Equação (9) e da equação de estado (10) com $\omega = 0$.

7^o e 8^o meses: obtenção do fator de escala médio (5), do parâmetro de Hubble (6) e do parâmetro de desaceleração (7).

9^o e 10^o meses: confronto entre os resultados teóricos obtidos para q e os dados observacionais em [15].

11^o e 12^o meses: confronto entre os resultados teóricos obtidos para o *redshift* de transição a partir da Eq.(8) e os dados observacionais em [15].

Referências

1. B. Ryden, *Introduction to Cosmology* (Cambridge University Press, 2017).
2. R. d'Inverno, *Introducing Einstein's Relativity* (Oxford University Press, 1992).
3. A.G. Riess et al., *Astron. J.* **116**, 1009 (1998).
4. P. Hunt and S. Sarkar, *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* **401**, 547 (2010).
5. R.G. Clowes et al., *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* **429**, 2910 (2013).
6. C.-G. Park et al., *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* **469**, 1924 (2017).
7. N.J. Secrest et al., *Astrophys. J. Lett.* **908**, L51 (2021).
8. S. Weinberg, *Rev. Mod. Phys.* **61**, 1 (1989).
9. A. Friedmann, *Zeits. Phys. A* **10**, 377 (1922).
10. A. Friedmann, *Zeits. Phys. A* **21**, 326 (1924).
11. G. Lemâitre, *Annal. Soc. Scient. Brux. A* **47**, 49 (1927).
12. H.P. Robertson, *Astrophys. J.* **82**, 248 (1935).
13. A.G. Walker, *Proc. London Math. Soc.* **42**, 90 (1937).
14. M. Farasat Shamir, *Adv. High Ener. Phys.* **2017**, 6378904 (2017).
15. R. Giotri et al., *J. Cosm. Astrop. Phys.* **03**, 027 (2012).
16. X.-X. Wang, *Chin. Phys. Lett.* **22**, 29 (2005).
17. K.S. Thorne, *Astrophys. J.* **148**, 51 (1967).
18. C.B. Collins and S.W. Hawking, *Astrophys. J.* **180**, 317 (1973).
19. M. Sharif and M. Zubair, *Astrophys. Spa. Sci.* **330**, 399 (2010).
20. P.H.R.S. Moraes, *Int. J. Mod. Phys. D* **25**, 1650009 (2016).
21. J. Colin et al., *Astron. Astrophys.* **631**, L13 (2019).