



Cosmologia quântica de Wheeler-DeWitt: suas tentativas e falhas

Alexandre da Silva Fernandes*
Instituto de Física - Universidade de Brasília

A cosmologia quântica de Wheeler-DeWitt é descrita a partir da formulação hamiltoniana da Relatividade Geral (RG) proposta em 1962 por Arnowitt, Deser e Misner (ADM) e utilizando a interpretação da física quântica de Everett-Wheeler. Ao longo das décadas muita pesquisa foi feita com essa teoria. Contudo, ela apresenta alguns problemas, como falta de evidências da física quântica de Everett-Wheeler e interpretação da função de onda cosmológica, dentre outras. Um breve histórico da RG e da cosmologia é feito, com foco na formulação de Wheeler e DeWitt, apresentando suas dificuldades e citando algumas soluções que foram entregues à comunidade científica com o passar do tempo.

Palavras chaves: Relatividade Geral. Equação de Wheeler-DeWitt. Cosmologia quântica.

INTRODUÇÃO

Desde os primórdios dos tempos o ser humano tem olhado para o céu em busca de como funciona as engrenagens do universo. Essas observações iniciais tinham vários objetivos, indo da previsão das estações para plantação e colheita até o apreciar dos movimentos celestes. No século XII a busca por unificar as leis celestes com as da Terra foi intensificada com os trabalhos de Newton [1]. No início do século XX chegou-se a imaginar que a Física estaria concluída, bastando apenas melhorar a tecnologia para precisões cada vez mais finas. Mas, duas pequeninas manchas no límpido e azulado céu de brigadeiro da ciência se tornariam tornados de revolução no pensamento humano do universo [2].

Em 1900, Max Planck abre as portas de uma grande área ao explicar fenômenos que não se encaixavam com a sólida física clássica que tinha regência desde Newton. A inauguração da física quântica permitiu gigantescos avanços no conhecimento e na tecnologia até os dias hoje. Apenas cinco anos mais tarde um funcionário de um escritório governamental da Suíça abre uma outra porta para o conhecimento humano. E somente 10 anos depois, esse mesmo desconhecido na comunidade científica transtorna a visão de universo [2].

Em 1916, Einstein generalizava sua teoria da Relatividade Especial (RE) de tal forma que poderia ser relacionada com o universo. O centro da teoria da Relatividade Geral (RG), que são as equações de campo no formato de $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi T_{\mu\nu}$, tem previsões confirmadas apenas 3 anos após a publicação, no eclipse que também foi registrado em Sobral - CE. A curvatura da luz vindo de

uma estrela e passando pelo campo gravitacional do Sol foi medido com uma precisão calculada anteriormente [5]. Depois desse evento, outros grandes resultados da RG também foram registrados ao longo das décadas: explicação do avanço do periélio de Mercúrio [6], descoberta de buracos negros [7], [8] e as ondas gravitacionais [10], [9].

No fim da década de 1920 Hubble detecta a dinâmica do universo e inaugura a cosmologia observacional com bases teóricas na RG [4], [11]. Os trabalhos de Alexander Friedmann [12], George Lemaître [13], Howard Robertson [14], [15] e Arthur Walker [16] deram base para a conhecida métrica de FLRW:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - \kappa r^2} + r^2 d\Omega^2 \right], \quad (1)$$

onde $d\Omega^2 \equiv d\theta + \sin^2\theta d\phi^2$ e κ assume valores de $-1, 0, +1$, que são curvaturas espaciais. Juntamente com o princípio cosmológico de isotropia e homogeneidade (não há nenhuma localização especial e nem centro no universo) [17], a lei de Hubble e as equações de campo da RG o conhecimento sobre o universo é condensado na Teoria do Big Bang ou Modelo Cosmológico Padrão (MCP) [18].

Mas o MCP tem alguns problemas intrínsecos. Por exemplo, o modelo não explica a planaridade e a alta isotropia medidas pelo Planck [19]. Outro problema sério advém que 90% do universo é constituído de algo chamado matéria escura e energia escura. Outro entrave vem do início do universo: o MCP não é capaz de explicar o nascimento ou a origem do Big Bang. Para resolver este último problema, especificamente, é necessário a cosmologia quântica, ou seja, uma teoria que trate a gravitação a nível quântico e que seja aplicável à cosmologia [29].

Até o momento, não há uma teoria com evidências observacionais. Mesmo assim, intensas pesquisas foram fei-

* alexandre.fernandes@catolica.edu.br

tas e uma delas tem sido amplamente estudada por cinquenta anos. O foco deste artigo será a cosmologia quântica de Wheeler-DeWitt, principalmente na tentativa de resolver alguns problemas e falhas no MCP do universo.

I. COSMOLOGIA QUÂNTICA DE WHEELER-DEWITT

Para se trabalhar com uma gravitação quântica é necessário se ter uma energia gravitacional. Rosenfeld foi um dos primeiros físicos, em 1930, a investigar as consequências de uma quantização do campo gravitacional [21]. Mas na RG a expressão de energia gravitacional é dependente do sistema de coordenadas, ou seja, não é possível construir um tensor verdadeiro que expresse a energia gravitacional e, com isso, quantizar o campo [22], [23]. Para contornar este impeditivo a RG foi reconstruída em um formalismo hamiltoniano (assim como a física quântica) em 1962, por Arnowitt, Deser e Misner [24] e aplicada em espaço-tempo globalmente coberto por hipersuperfície e, posteriormente, a quantização resulta na equação de Wheeler-DeWitt [25]. Com todo esse esforço monumental e com cinquenta anos de intensas pesquisas, essa solução tem sérios problemas.

Em 1967 Bryce S. DeWitt publica na Physical Review um artigo onde é mostrado a equação de Einstein-Schrödinger [21] que é descrita como [26]

$$\hat{\mathcal{H}}\Psi(a) = 0,$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial a^2} + \frac{p}{a} \frac{\partial}{\partial a} + g_c k a^2 - g_\lambda a^4 - g_r k^2 - \frac{g_s k}{a^2} \right) \Psi(a) = 0 \quad (2)$$

onde as constantes g_c é a de acoplamento de curvatura, g_λ está associada à constante cosmológica, g_r corresponde ao termo de radiação e g_s como matéria. Já p indica a ambiguidade do ordenamento dos fatores a , que é o fator de escala cosmológico, e o operador momento Π_a e k é a geometria do espaço-tempo, com valores de -1, 0 ou 1 [27].

Esta teoria foi trabalhada por DeWitt durante vários anos. A equação em si, (2), nasceu de diversas discussões com Wheeler, onde se tentava descobrir a estrutura do domínio de uma variedade onde se teria uma mecânica quântica gravitacional. Mesmo depois de várias décadas de pesquisas com esta teoria, muitos problemas ainda não foram solucionados [25].

Um grande problema na teoria é o fato de Ψ , que é a função de onda do universo, não ter um significado físico. Como seria uma função de onda cosmológica, em analogia com Ψ da física quântica? O que seria um estado, no sentido cosmológico?

Outro problema é a interpretação da física quântica. A interpretação padrão é a de Copenhagen, que tem caráter de dá sentido aos experimentos. A interpretação dada por Everett e Wheeler é a base dessa teoria. Ela tenta

descrever vários universos, pela função de onda cosmológica, de tal forma que o tempo e a probabilidade não tem significados físicos quando há colapsos gravitacionais extremos (como no início do universo e em buracos negros). E essa interpretação, que tenta ser mais geral que a escola de Copenhagen, não traz evidências de universos por onde essa função de onda teria trajetórias [25], [27], [28].

Outra dificuldade encontrada é com o ordenamento. Há uma analogia entre o superhamiltoniano quântico e o superhamiltoniano clássico. Entretanto, essa questão, ainda não resolvida, decorre do problema do tempo descrito anteriormente. Além disso, um outro problema existente se refere às condições de contorno para se obter uma solução única e garantir que as funções de onda sejam quadrado integráveis [29].

Um destaque adicional da equação de Wheeler-DeWitt não representar um mundo físico é que perde-se a noção de autovalores e, conseqüentemente, a noção de espectro do operador, que é a base central de operação da teoria. Se não há autovalores, não há o que se medir no mundo físico. E a perda de sentido de tempo ou de evolução temporal do sistema desencadeia uma confusão maior: um universo sem dinâmica e desenvolvimento de seus parâmetros físicos simplesmente não faz sentido [28], [27].

II. CONCLUSÃO

Nesse breve texto foi apresentado um panorama sobre a cosmologia quântica de Wheeler-DeWitt. Desde as primeiras investigações da natureza quântica do campo gravitacional em meados dos anos 1930 até os dias atuais várias propostas foram apresentadas. Wheeler e DeWitt fizeram suas pesquisas baseadas na formulação hamiltoniana da RG feita por ADM e aplicação em espaço-tempo globalmente recoberto por uma hipersuperfície. A interpretação da física quântica e a quantização da formulação de ADM resultaram na equação de Einstein-Schrödinger (originalmente chamada assim por DeWitt).

Desde 1967, intensas pesquisas se desenrolaram por vários físicos. Apenas como exemplo, Hawking e Vilenkin tem uma vasta publicação que segue as ideias propostas por Wheeler e DeWitt. Várias dissertações e teses foram produzidas no mesmo caminho, colocando essa teoria como uma das mais trabalhadas nos últimos 50 anos.

Mas, com os problemas destacados nesse texto e a falta de evidências observacionais tem preocupado a comunidade científica no sentido de não se ter um norte exato para onde seguir. E, por causa dessas dificuldades, várias outras pesquisas foram sendo trabalhadas, na tentativa de quantizar ou entender a natureza mais intrínseca da gravidade. Exemplos disso é a teoria de supercordas, a teoria M, a gravitação em loop, dentre outras.

Contudo, se houver uma forma de contornar os problemas que a RG apresenta a ponto de se obter uma equivalência entre os resultados da RG com adição de

possibilidade de se estudar a natureza da gravidade, uma nova área dentro da cosmologia quântica pode ser desenvolvida. E essa teoria já existe e está em pleno desenvolvimento e com previsões já postas: Teleparalelismo Equivalente à RG (TERG) [30]. Combinando essa te-

oria com cosmologia e aplicando a quantização de Weyl [31], um novo tipo de cosmologia quântica surge mas com sólidos fundamentos físicos: a Cosmologia Quântica em Gravidade Teleparalela [27]. Mas ela será tema em outra oportunidade.

-
- [1] V. O. Rivelles, Física na Escola **8**, 10 (2007).
- [2] P. A. Schulz, Revista Brasileira de Ensino de Física **29**, 509 (2007).
- [3] A. Einstein, Math. Ann. **102**, 687 (1930).
- [4] A. Einstein, *A teoria da relatividade especial e geral* (Contraponto, Rio de Janeiro, 1999).
- [5] F. W. Dyson, A. S. Eddington e C. Davidson, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, **220**, 291 (1919).
- [6] R. Gazzinelli, *Teoria da relatividade especial* (Editora Blucher, São Paulo, 2009).
- [7] K. Schwarzschild, Phys.-Math. Klasse, **1916**, 189 (1916) [*arXiv:physics/9905030v1*].
- [8] S. Bowyer, E. T. Byram, T. A. Chubb e H. Friedman, Science **147**, 394 (1965).
- [9] LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration Phys. Rev. Lett. **116** 241103-1 (2016).
- [10] LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration Phys. Rev. Lett. **116** 061102-1 (2016).
- [11] E. Hubble, Proc. Nati. Acad. Sci. **15**, 168 (1929).
- [12] A. Friedman, Gen. Relativ. Gravit. **31**, 1991 (1999).
- [13] A. G. Lemaître, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles **47**, 483 (1927); Mon. Not. R. Astron. Soc. **92**, 49 (1931).
- [14] H. P. Robertson, Astrophys. J. **82**, 284 (1935).
- [15] H. P. Robertson, Astrophys. J. **83**, 187 (1936); **83**, 257 (1936).
- [16] A. G. Walker, Proceedings of the London Mathematical Society, **s2-42**, 90 (1937).
- [17] B. S. Ryden, *Introduction to Cosmology* (Addison-Wesley, San Francisco, 2003).
- [18] A. B. Henriques, *A Teoria da Relatividade Geral* (IST Press, Lisboa, 2009).
- [19] Planck Collaboration, Astron. Astrophys. **594**, 1 (2016).
- [20] C. Roque De Bom, *Histórias consistentes em modelos de cosmologia quântica dominados por radiação*, dissertação, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2013.
- [21] B. S. DeWitt, Gen. Relativ. Gravit. **1**, 181 (1970).
- [22] A. Einstein, Math. Ann. **102**, 687 (1930).
- [23] C. W. Misner, K. S. Thorne e J. A. Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1973).
- [24] R. Arnowitt, S. Deser e C. W. Misner, *The dynamics of General Relativity em Gravitation: an introduction to current research* (John Wiley & Sons, New York, 1962), editado por L. Witten.
- [25] B. S. DeWitt, Phys. Rev. **160**, 1113 (1967).
- [26] L. G. Martins, *Modelos cosmológicos e buracos negros no contexto da gravitação de Horava-Lifshitz*, dissertação, Universidade Federal de Lavras, 2015.
- [27] A. S. Fernandes, *Cosmologia quântica na gravidade teleparalela*, dissertação, Universidade de Brasília, 2017.
- [28] D. J. Griffiths, *Mecânica quântica* (Pearson, São Paulo, 2011).
- [29] C. Roque De Bom, *Histórias consistentes em modelos de cosmologia quântica dominados por radiação*, dissertação, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2013.
- [30] J. W. Maluf, Anna. Phys. **525**, 339 (2013).
- [31] S. C. Ulhoa e R. G. G. Amorim, Advances in High Energy Physics **2014**, 1 (2014).