

Uma pedra no caminho da Teoria da Relatividade Geral

Domingos S.L. Soares
Departamento de Física, ICEx, UFMG — C.P. 702
30123-970, Belo Horizonte, MG

11 de julho de 2009

Resumo

O Modelo Padrão da Cosmologia representa um sério desafio para a Teoria da Relatividade Geral. Ao contrário de seu sucesso em outras aplicações, a teoria de Einstein aparentemente falha neste modelo. Neste sentido, pode-se afirmar que o Modelo Padrão da Cosmologia não merece o *status* de que goza na comunidade científica. Apresento as características da Teoria da Relatividade Geral que a fazem o sucesso teórico que é, e aquelas que apontam para uma falha em sua aplicação. A discussão é centrada em duas soluções particulares da Relatividade Geral, as quais podem ser representadas pelas métricas espaço-temporais a elas associadas: a métrica de Schwarzschild e a métrica de Friedmann-Robertson-Walker.

1 Introdução

A Teoria da Relatividade Geral (TRG) é uma teoria de grande sucesso, devido às inúmeras evidências experimentais que a sustentam.

Esta afirmação, na verdade, é dotada de um viés sutil, que muitas vezes permite que se ignore um insucesso particular da TRG, qual seja, as suas aplicações cosmológicas. Neste sentido é razoável dizer-se que a cosmologia, a ciência do universo, é verdadeiramente uma pedra de tropeço no caminho da TRG. É o que mostrarei a seguir.

As duas aplicações fundamentais da TRG são descritas por duas métricas: a métrica de Schwarzschild (MS) e a métrica de Friedmann-Robertson-Walker (MFRW). A primeira delas é a responsável pelo grande triunfo da teoria. Na seção seguinte apresentarei alguns aspectos da MS. Em seguida, discutirei a MFRW, e as razões pelas quais ela se constitui numa aplicação da TRG que não

funciona, quando aplicado ao mundo real, ou seja, ao conjunto de observáveis apresentados pela natureza física.

2 A métrica de Schwarzschild

Em 1916, logo após a publicação dos últimos artigos de Einstein, concernentes à TRG, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) resolveu as equações de campo de Einstein para um caso bastante particular, simples e de grande alcance quanto às suas possibilidades de aplicações experimental e observacional. Trata-se da determinação da métrica do espaço-tempo no exterior de uma distribuição de massa M , estática e esfericamente simétrica. É importante ressaltar que a solução de Schwarzschild é uma solução para o vácuo, fora do objeto de massa M , e é válida apenas nesta região do espaço-tempo. Ela pode ser descrita de maneira simplificada pela expressão do intervalo espaço-temporal ds :

$$(ds)^2 = \left(cdt\sqrt{1 - 2GM/rc^2} \right)^2 - \left(\frac{dr}{\sqrt{1 - 2GM/rc^2}} \right)^2 - (rd\theta)^2 - (rsen\theta d\phi)^2,$$

onde r , θ e ϕ são as usuais coordenadas esféricas.

Esta métrica é um sucesso em suas aplicações. Ela é verificada no movimento dos planetas, na deflexão da luz provocada por uma massa, na previsão correta do avanço do periélio na órbita de Mercúrio – onde a gravitação newtoniana falha – e nas aplicações dos modernos sistemas de posicionamento global (GPS). A sua singularidade no chamado “raio de Schwarzschild”, $r_S = 2GM/c^2$, levanta as discussões de um provável habitante do mundo natural, qual seja, o chamado “buraco negro”.

Em suma, a MS é a grande responsável pelo grande prestígio científico gozado pela TRG.

Mas veremos que uma outra aplicação da TRG vem encontrando dificuldades profundas. A métrica no interior de um fluido homogêneo e isotrópico tem uma aplicação óbvia: a cosmologia. E é nela que a TRG esbarra, desfavoravelmente, em seu primeiro grande confronto experimental.

3 A métrica de Friedmann-Robertson-Walker

As aplicações da TRG à cosmologia são extremamente simplificadas, do ponto de vista da complexidade matemática, quando se adota o *Princípio Cosmológico*.

O Princípio Cosmológico afirma, basicamente, que toda a matéria do universo está distribuída de forma uniforme em todas as direções. Para a construção dos modelos cosmológicos desprezamos o fato de que a matéria se concentra em estrelas, as estrelas se estruturam em galáxias, e assim por diante, em estruturas

cada vez maiores. “Alisamos” tudo, inventamos o “fluido cósmico”, que se distribui de forma homogênea e isotrópica no universo. A sua densidade de matéria e energia coincide com a densidade real das estrelas, galáxias e aglomerados.

Assim como o espaço-tempo é curvo no exterior de uma concentração de massa, uma distribuição contínua de matéria também pode ser descrita por um espaço-tempo curvo, o qual se estende e é gerado pelo fluido cósmico. O Modelo Padrão da Cosmologia (MPC) adota esta perspectiva simplificadora ao utilizar a TRG em sua construção.

Um dos fatos experimentais basilares para o MPC constitui-se na descoberta feita por Edwin Hubble de que os espectros de objetos cósmicos distantes são sistematicamente desviados para a extremidade vermelha do espectro eletromagnético. Este desvio é tanto maior quanto maior é a distância — ou como na descoberta original, quanto menor é a luminosidade aparente — de determinada classe de objetos. Este fato experimental ficou conhecido na literatura científica como *lei de Hubble*.

Na formulação do MPC, a lei de Hubble pode ser encarada de várias formas, devido à liberdade da escolha do sistema de coordenadas cosmológico. É instrutivo ler o que Bertrand Russell (1963, Zahar Editores), em seu livro “ABC da Relatividade”, capítulo XI, ‘O universo em expansão’, escreveu a respeito:

“A lei de gravitação de Einstein, combinada à concepção de distribuição uniforme — a uniformidade exata —, permite-nos construir vários modelos do universo, nos quais a curvatura geral assume várias formas distintas. A principal consequência dessa curvatura geral está em o universo se apresentar, em alguns modelos, como se estivesse expandindo-se. Há aqui certa liberdade de escolha, em razão de igual liberdade que temos, na teoria da relatividade, na escolha dos sistemas de coordenadas. Podemos escolher as coordenadas de forma que a matéria uniformizada se apresente em repouso e o espaço-tempo tenha uma determinada curvatura, ou de forma a que a matéria se apresente em expansão e a curvatura pareça reduzida. A escolha das coordenadas será uma questão de gosto, não fazendo diferença alguma para o resultado final, que é a predição de que, segundo esses modelos do universo, se observará que os espectros dos objetos distantes se apresentarão deslocados para o vermelho. Podemos atribuir esse deslocamento para o vermelho à expansão, ou à curvatura, ou em parte à expansão e em parte à curvatura. Como a concepção de expansão é de mais fácil aceitação mental do que a de curvatura do espaço-tempo, torna-se, em geral, mais conveniente falar-se de universo em expansão do que de universo curvo, mas os dois conceitos são iguais em termos matemáticos. No caso do deslocamento para o vermelho nas linhas espectrais do Sol — efeito esse de que nos ocupamos no Capítulo IX —, tornou-se mais conveniente fazer-se consideração inversa, atribuindo-se tal deslocamento à curvatura.”

A métrica que descreve o espaço-tempo no interior de um fluido homogêneo

e isotrópico foi determinada pelo russo Alexander Friedmann (1888-1925), no início da década de 1920, quando, à semelhança de Schwarzschild, ele resolveu as equações de campo de Einstein da TRG, sob as condições simplificadores do Princípio Cosmológico. Em 1935, o físico-matemático norte-americano Howard Robertson (1894-1975), e quase que simultaneamente, o matemático inglês Arthur Walker (1909-2001), mostraram que a métrica de Friedmann podia ser obtida a partir de argumentos puramente geométricos, desde que o fluido obedeça ao Princípio cosmológico. Desta maneira, temos a chamada *métrica de Friedmann-Robertson-Walker* (MFRW):

$$(ds)^2 = (cdt)^2 - R^2(t) \left[\left(\frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}} \right)^2 + (rd\theta)^2 + (r\text{sen}\theta d\phi)^2 \right],$$

onde $R(t)$ é o fator de escala e k a constante de curvatura do espaço. Esta métrica descreve os modelos em expansão típicos do MPC. Obviamente ela também admite modelos em contração.

O comportamento da radiação de objetos distantes, de acordo com a lei de Hubble, é perfeitamente descrito pela MFRW, como discutido acima, nas palavras de Bertrand Russell.

Mas existe uma terceira interpretação radical e possível para o fenômeno observacional apresentado pela luz emitida por objetos distantes. Ela não possui uma formulação definitiva, em termos de processos físicos, mas pode ser identificada, de forma geral, como um novo paradigma, qual seja, o “paradigma da luz cansada”. Nesta nova visão, que é adotada em alguns modelos cosmológicos alternativos ao MPC, a luz perde energia ao se deslocar pelas enormes distâncias, desde os objetos remotos. Como isto ocorre, ou seja, qual é o processo físico atuante, ainda é matéria de debate. A propósito, esta era a idéia defendida pelo próprio Hubble, quando os primeiros modelos cosmológicos surgiram, motivados pela TRG. O paradigma da luz cansada deve ser entendido desta forma geral, e não relacionado a determinado processo físico que o justifique. As teorias cosmológicas alternativas ao MPC lançam mão de processos físicos distintos, dentro deste paradigma, e algumas delas também adotam a expansão ou curvatura do espaço-tempo como explicações teóricas da lei de Hubble.

Modernamente, parece, no entanto, não haver necessidade de teorias alternativas já que a MFRW é fisicamente plausível — e esteticamente satisfatória — para a explicação de muitos fenômenos observados no universo, especialmente a lei de Hubble. E a pedra, então. Como ela aparece no caminho da MFRW?

4 A pedra no caminho

Há várias pedras. Na verdade, o caminho trilhado pela TRG, pelas mãos do MPC, é um caudaloso rio de pedregulhos e rochas monumentais. Descreverei duas destas pedras, que são, de fato, rochas sólidas e de difícil — mas não impossível, por princípio — remoção.

O MPC faz uma previsão bem definida a respeito do conteúdo de matéria e energia do universo. O modelo se sustenta sobre a seguinte base de matéria e energia.

- matéria bariônica observada: 0,5%
- matéria bariônica não observada (“escura”): 3,5%
- matéria não bariônica (“escura”): 26%
- energia não eletromagnética “escura”: 70%

As quantidades listadas acima variam ligeiramente de autor para autor, mas a substância é a mesma. O que mais chama a atenção no balancete do MPC é a predominância de componentes não detectadas diretamente pela observação ou através de experimentos. Elas são as componentes denominadas “escuras”. Dentre as três componentes escuras, duas delas são, adicionalmente, desconhecidas: a matéria não bariônica e a energia escura. Elas são discutidas em âmbito teórico mas não há ainda um consenso sobre as suas reais naturezas.

Podemos dizer que o MPC repousa sobre o desconhecido.

A segunda pedra é conhecida como “o problema da constante cosmológica”. A energia escura é uma componente que possui uma propriedade diametralmente oposta à da conhecida radiação eletromagnética. Esta entra no cômputo energético das equações de campo de Einstein de forma a contribuir atrativamente, do ponto de vista gravitacional. Um universo preenchido apenas por energia eletromagnética teria uma curvatura positiva. A energia escura aparece com um efeito repulsivo, gerando uma curvatura espaço-temporal negativa. Existem vários candidatos — campos quânticos — para serem os responsáveis pela energia escura. E há também uma candidata — fortíssima, por sinal —, que é a preferida dos adeptos do MPC, qual seja, a constante cosmológica.

A sua história começou com Einstein, que na primeira aplicação da TRG ao universo, a introduziu na forma de uma constante em suas equações de campo. O seu objetivo era equilibrar o efeito atrativo da matéria e energia eletromagnética e assim obter um universo estático, como ele intuía ser o caso nos idos de 1917. Hubble ainda não havia descoberto as galáxias e nem a sua famosa lei, mencionada anteriormente.

Hoje, o MPC não advoga um universo estático, mas um universo com expansão *acelerada!* Quer dizer, amplia-se a necessidade de uma constante cosmológica que não apenas deve contrabalançar a atração gravitacional da matéria e energia eletromagnética, mas suplantá-la e oferecer um universo atual de curvatura negativa, ou seja, em expansão acelerada. Pode-se entender fisicamente esta repulsão como uma espécie de “elasticidade” do tecido espaço-temporal, cuja energia “elástica” provém da energia de ponto zero do vácuo. E é exatamente aqui que surge a segunda “pedra”.

Steven Weinberg foi um dos primeiros a explicitar, de forma quantitativa, o, agora famigerado, *problema da constante cosmológica*. Em um artigo, publicado em 1989 (Review of Modern Physics, vol. 61, pág. 1) e apropriadamente intitulado “*The cosmological constant problem*”, ele define o problema e discute cinco possíveis soluções teóricas do mesmo. Todas elas falham, mas cumprem o papel de manter acesa a chama da esperança de solução no futuro.

O problema é o seguinte. A constante cosmológica foi originalmente inserida no lado esquerdo da equação de campo de Einstein — o lado da métrica —, mas ela pode ser passada para o lado direito — o lado do momentum e da energia —, e ser interpretada como uma componente de energia associada ao substrato espaço-temporal, o vácuo. As observações da expansão acelerada fazem uma previsão objetiva desta densidade de energia. Weinberg calcula então o valor teórico desta densidade de energia, integrando as energias de ponto zero de todos os modos normais de vibração associados ao vácuo quântico. Ele obtém um valor 10^{118} vezes maior que o valor “observado” cosmológicamente. Este valor pressupõe um corte no número de onda das oscilações do vácuo, de acordo com as prescrições gerais da eletrodinâmica quântica. Se se considera apenas as energias de ponto zero da cromodinâmica quântica a discrepância é aliviada para um fator de 10^{41} . O que realmente não melhora muito a situação. Este, portanto, é o problema.

5 Conclusão

O MPC goza de um *status* científico injustificável. Não se questiona aqui a pertinência acadêmica de tal modelo. Mas, na qualidade de modelo *rejeitado* pelas evidências experimental e observacional, ele deveria gozar de suas reais prerrogativas, que são aquelas de um modelo falho. Como não há um modelo cosmológico satisfatório, todos os modelos disponíveis devem ser investigados. O MPC é injustificadamente considerado como modelo apropriado ao universo. E ele, definitivamente, não o é.

A TRG pode ser avaliada através de suas duas mais famosas métricas: a MS e a MFRW. O estrondoso sucesso da TRG revela-se pelas inúmeras e bem sucedidas aplicações da MS. Já a MFRW revela o seu ponto fraco. O MPC, baseado na MFRW, mostrou-se inconsistente com os fatos empíricos, e tornou-se *a formulação de uma sequência de especulações destinadas a demonstrar novas especulações*. Isto é muito pouco para se proclamar como válida uma teoria verdadeiramente científica. Assim, o MPC constitui-se na pedra no caminho da TRG¹.

¹Em tempo: o universo é constituído de 99,999% de plasma, tornando importantes as interações eletromagneto-hidrodinâmicas em sua descrição teórica global, a saber, na cosmologia. Este fato não é levado em conta no MPC.