

A COSMOLOGIA DE HUBBLE: DE UM UNIVERSO FINITO EM EXPANSÃO A UM UNIVERSO INFINITO NO ESPAÇO E NO TEMPO¹

André Koch Torres Assis*, Marcos Cesar Danhoni Neves**, Domingos Savio de Lima Soares***

*Instituto de Física ‘Gleb Wataghin’, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

** Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática, Universidade Estadual de Maringá - UEM

***Departamento de Física, ICEx, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Introdução

O conceito de um universo em expansão, com o qual estamos familiarizados hoje em dia, foi inventado independentemente pelo cientista russo Alexander Friedmann e pelo cosmólogo (e abade ...) belga Georges Lemaître, a partir de suas soluções para as equações da teoria da relatividade geral de Einstein, aplicadas ao fluido cósmico. Os seus trabalhos pioneiros foram publicados em 1922 e 1924 (A. F.), e em 1927 e 1931 (G. L.). A relação entre o desvio para o vermelho e a magnitude aparente (ou distância), descoberta por Edwin Hubble em 1929 (Hubble 1929), ajustava-se perfeitamente ao novo esquema teórico. A chamada “lei de Hubble” era precisamente o que era predito pelos modelos de Friedmann e Lemaître. Esta lei foi imediatamente erigida ao status de descoberta “observacional” da expansão do universo.

Este, naturalmente, não é o caso. A idéia de uma expansão é, inicialmente, uma idéia teórica – um efeito “estranho” observado no modelo precedente de de Sitter (veja a próxima Seção). As observações de Hubble são consistentes com a idéia, mas não são necessariamente uma prova dela. O próprio Hubble estava ciente disto e procurou durante

¹ Baseado em trabalho dos autores apresentado, por A. K. T. Assis, na 2nd Crisis in Cosmology Conference, realizada de 7 a 11 de setembro de 2008 em Port Angeles, Washington, Estados Unidos.

toda a sua vida a reposta correta para a questão apresentada pela sua descoberta: *O que causa os desvios para o vermelho?* As duas possibilidades consideradas por ele foram os modelos relativísticos da expansão e o paradigma da luz cansada. O último, incidentalmente, não é caracterizado por uma teoria física, a qual ainda não foi descoberta. A idéia foi originalmente sugerida por um dos maiores amigos de Hubble, Fritz Zwicky (Zwicky 1929). Ele e Richard Tolman recebem o seu cordial reconhecimento no prefácio de seu livro *The Realm of the Nebulae*, com as impressionantes palavras (Hubble 1936, p. ix): *No campo da cosmologia, o autor teve o privilégio de consultar Richard Tolman e Fritz Zwicky do Instituto de Tecnologia da Califórnia. O contacto diário com estas pessoas criou uma atmosfera comum na qual o desenvolvimento das idéias não podia ser atribuído a fontes definidas. O indivíduo, em certo sentido, fala pelo grupo.*

A propósito, este é o objetivo de qualquer colaboração de sucesso.

No seu *Principia*, Livro III, Isaac Newton apresentou as “Regras de Raciocínio em Filosofia.” A sua terceira regra reza como se segue (Newton, 2008, p. 186): *As qualidades dos corpos que não admitem intensificação nem diminuição de graus, e que pertencem a todos os corpos dentro do alcance de nossas experiências, devem ser consideradas como qualidades universais de todos os corpos de qualquer tipo.*

Em seus comentários sobre esta regra ele afirma que “Certamente não devemos abandonar a evidência das experiências devido a sonhos e a ficções vãs de nossa própria criação, nem devemos nos afastar da analogia da Natureza, que tem o costume de ser simples e sempre consoante a si própria.” Como mostraremos a seguir, este requisito foi definitivamente preenchido pelo tratamento que Hubble deu à cosmologia.

A mutabilidade das visões de Hubble concernentes à cosmologia

Edwin Powell Hubble (1889-1953) estabeleceu em 1924 que muitas nebulosas eram sistemas estelares fora da Via Láctea, quando

descobriu variáveis Cefeidas na Nebulosa de Andrômeda, usando o telescópio de 2,5 m no Monte Wilson.

Em 1929, ele determinou a famosa relação distância-velocidade, a qual é também chamada atualmente a *lei do desvio para o vermelho* ou *lei de Hubble* (Hubble 1929). O título de seu artigo é: “Uma relação entre distância e velocidade radial nas nebulosas extragalácticas.” Na Tabela I, Hubble colocou um símbolo v e chamou-o de “velocidades medidas em km/s.” Na verdade, ele e seu colaborador Milton L. Humason (1891-1972) nunca *mediram* diretamente as velocidades. O que eles mediram foram os desvios para o vermelho das nebulosas extragalácticas. Mas em seu importante artigo, Hubble considerou que os desvios para o vermelho representavam velocidades radiais reais das nebulosas. A principal conclusão do artigo aparece na página 139: “Os dados na tabela indicam uma correlação linear entre distâncias e velocidades, sejam estas últimas usadas diretamente ou corrigidas do movimento solar, de acordo com os procedimentos tradicionais.” O último parágrafo do artigo apresenta a interpretação que Hubble deu aos seus achados, o significado que ele deu a eles em 1929, a saber:

A importante característica, contudo, é a possibilidade de que a relação distância-velocidade possa representar o efeito de Sitter e, portanto, que dados numéricos possam ser introduzidos na discussão da estrutura geral do espaço. Na cosmologia de de Sitter, o deslocamento do espectro origina-se de duas fontes, uma diminuição aparente das vibrações atômicas e uma tendência geral das partículas materiais se dispersarem. Esta última envolve uma aceleração e, portanto, introduz o fator tempo. A importância relativa destes dois efeitos poderia determinar a forma da relação entre distâncias e velocidades observadas; e neste contexto deve ser enfatizado que a relação linear encontrada na presente discussão é uma primeira aproximação, representando uma faixa restrita em distância.

Willem de Sitter (1872-1934) foi um matemático, físico e astrônomo holandês. Em 1916-17, ele havia obtido uma solução para as equações de campo de Einstein da relatividade geral descrevendo a expansão do universo. Hubble o encontrou em 1928 em Leiden, onde de Sitter era professor de astronomia e diretor do Observatório de Leiden (Christianson 1996, p. 198). Este último parágrafo do artigo de Hubble mostra que em 1929 ele achava que a expansão do universo era uma possibilidade real.

Contudo, deve ser ressaltado, que, já em 1935, Hubble estava muito mais cauteloso ao se referir às velocidades de recessão. Em um artigo com R. Tolman (Hubble e Tolman 1935), logo na seção introdutória, os autores fazem uma afirmação clara de sua preocupação a respeito da nomenclatura apropriada:

Até que evidência adicional esteja disponível, ambos os autores desejam manter a mente aberta em relação à explicação final mais satisfatória para o desvio para o vermelho das nebulosas e, na apresentação das descobertas puramente observacionais, continuar a usar a expressão velocidade de recessão “aparente”. Contudo, ambos tendem à opinião de que se o desvio para o vermelho não é devido a um movimento de recessão, a sua explicação envolverá provavelmente princípios físicos muito novos.

Em 1935, Hubble foi convidado a proferir oito Conferências Silliman na Universidade Yale. Estas conferências constituíram-se na base do seu livro *The Realm of the Nebulae*, publicado em 1936. Neste livro ele foi muito mais cuidadoso ao declarar o que era realmente medido e o que constituía interpretação. Nas páginas 2 e 3, ele menciona que o observador acumula dados de luminosidades aparentes das nebulosas e desvios para o vermelho de seus espectros. As distâncias destas nebulosas podem ser indicadas pela sua tenuidade e não são medidas diretamente. A mais simples relação obtida entre estes dois dados é “uma relação linear entre desvios para o vermelho e distâncias como indicadas pela tenuidade das nebulosas” (Hubble 1936, p. 3).

Relativamente à origem destes desvios para o vermelho, isto é, o que os causa, ele mencionou nas páginas 33-34 que uma possível interpretação é a de que eles poderiam ser devidos ao movimento radial das nebulosas em relação à Terra:

Os espectros das nebulosas são peculiares em que as linhas não estão nas posições usuais encontradas nas fontes de luz próximas. Elas estão deslocadas em direção à extremidade vermelha de suas posições normais, como é indicado por espectros de comparação apropriados. Os deslocamentos, denominados desvios para o vermelho, aumentam, na média, com a tenuidade aparente da nebulosa sob observação. Como a tenuidade aparente mede a distância, segue-se que os desvios para o vermelho aumentam com a distância. Uma investigação detalhada mostra que a relação é linear.

Desvios microscopicamente pequenos, tanto para o vermelho quanto para o violeta, têm sido observados nos espectros de outros corpos astronômicos que não as nebulosas. Estes deslocamentos são seguramente interpretados como resultados do movimento na linha de visada – velocidades radiais de recessão (desvios para o vermelho) ou de aproximação (desvios para o violeta). A mesma interpretação é freqüentemente aplicada aos espectros das nebulosas e tem originado a expressão relação “velocidade-distância” para a relação observada entre desvios para o vermelho e tenuidade aparente. Nesta suposição, acredita-se que as nebulosas afastam-se de nossa região do espaço, com velocidades que aumentam com a distância.

Apesar de não ter sido encontrada outra explicação plausível para os desvios para o vermelho, a interpretação como desvios em velocidade pode ser considerada como uma teoria ainda a ser testada pelas observações correntes. Testes críticos podem ser feitos com os instrumentos existentes. Fontes de luz em rápida recessão deveriam

parecer mais tênues do que fontes estacionárias às mesmas distâncias, e, próximo aos limites dos telescópios, as velocidades “aparentes” são tão grandes que os efeitos deveriam ser apreciáveis.

Ele estava usando o adjetivo “aparente” antes da palavra “velocidade” para enfatizar que isto era apenas uma interpretação. O próprio Hubble começou a propor possíveis testes com o objetivo de verificar ou rejeitar esta suposição, como indicado pelo último parágrafo acima. O Capítulo V deste livro é devotado à “relação velocidade-distância”. Na Placa VIII do livro Hubble afirma: “Desvios para o vermelho parecem desvios de velocidade, e nenhuma outra explicação satisfatória está disponível no presente momento: os desvios para o vermelho são devidos ou a um movimento real de recessão ou a um princípio da física até agora desconhecido.” Nas páginas 121-123 ele colocou observações cautelosas sobre a interpretação destes desvios para o vermelho, nossa ênfase:

As observações mostram que os detalhes nos espectros das nebulosas estão deslocados em direção ao vermelho a partir de suas posições normais, e que os desvios para o vermelho aumentam com a tenuidade aparente das nebulosas. A tenuidade aparente é confiantemente interpretada em termos de distância. Portanto, o resultado observacional pode ser reafirmado – desvios para o vermelho aumentam com as distâncias.

As interpretações dos próprios desvios para o vermelho não inspiram tão grande confiança. Os desvios para o vermelho podem ser expressos como razões, $d\lambda/\lambda$, onde $d\lambda$ é o deslocamento de uma linha espectral cujo comprimento de onda normal é λ . Os deslocamentos, $d\lambda$, variam sistematicamente, ao longo de qualquer espectro particular, mas a variação é tal que a razão, $d\lambda/\lambda$, permanece constante. Assim $d\lambda/\lambda$ especifica o desvio para qualquer nebulosa, e é a razão que aumenta linearmente com as

distâncias das nebulosas². De agora em diante, a expressão desvio para o vermelho será empregada para a razão $d\lambda/\lambda$.

Além do mais, os deslocamentos, $d\lambda$, são sempre positivos (em direção ao vermelho) e assim o comprimento de onda de uma linha deslocada, $\lambda + d\lambda$, é sempre maior do que o comprimento de onda normal, λ . Os comprimentos de onda aumentam pelo fator $(\lambda + d\lambda)/\lambda$, ou pelo equivalente $1 + d\lambda/\lambda$. Ora, existe uma relação fundamental na física, a qual afirma que a energia de qualquer quantum de luz, multiplicada pelo comprimento de onda do quantum, é constante. Desta forma

Energia \times comprimento de onda = constante.

Obviamente, como o produto mantém-se constante, os desvios para o vermelho, aumentando o comprimento de onda, devem reduzir a energia nos quanta. Qualquer interpretação plausível dos desvios para o vermelho deve explicar a perda de energia. A perda deve ocorrer ou nas próprias nebulosas ou nos caminhos imensamente longos percorridos pela luz em sua viagem para o observador.

A investigação exaustiva do problema levou às seguintes conclusões. Várias maneiras são conhecidas pelas quais os desvios para o vermelho são produzidos. De todas elas, somente uma produzirá grandes desvios sem introduzir quaisquer outros efeitos, os quais poderiam ser interessantes, mas que não são observados. Esta explicação interpreta os desvios para o vermelho como efeitos Doppler, quer dizer, como desvios de velocidades, indicando um movimento real de recessão. Pode ser afirmado com certa segurança que os desvios para o vermelho ou são desvios de

² [Nota de Hubble] A velocidade radial aparente de uma nebulosa é, em primeira aproximação, a velocidade da luz (300.000 km/s) multiplicada pela razão $d\lambda/\lambda$.

velocidade ou então eles representam algum princípio físico até agora não identificado.

A interpretação como desvios de velocidades é geralmente adotada pelos pesquisadores teóricos, e a relação velocidade-distância é considerada como o fundamento observacional para as teorias de um universo em expansão. Tais teorias são bastante comuns. Elas representam as soluções das equações cosmológicas, as quais partem da suposição de um universo não estático. Elas substituem as soluções anteriores feitas sob a suposição de um universo estático, as quais são agora consideradas como casos especiais da teoria geral.

Os desvios para o vermelho das nebulosas, em muito grande escala são, contudo, bastante novos em nossa experiência, e a confirmação empírica de sua interpretação provisória como os familiares desvios de velocidades, é altamente desejável. Testes cruciais são possíveis, pelo menos em princípio, já que as nebulosas em rápida recessão deveriam aparecer mais tênues do que as nebulosas estacionárias às mesmas distâncias. Os efeitos da recessão não são notados a menos que as velocidades atinjam frações apreciáveis da velocidade da luz. Esta condição é satisfeita e, portanto, os efeitos deveriam ser mensuráveis, próximo ao limite de detecção do refletor de 2,5 m.

O problema será discutido de forma completa no capítulo final. A investigação necessária é cercada de dificuldades e incertezas, e as conclusões a partir dos dados disponíveis atualmente são um tanto duvidosas. Elas são mencionadas aqui para enfatizar o fato de que a interpretação dos desvios para o vermelho está pelo menos parcialmente dentro dos limites da investigação empírica. Por esta razão a atitude do observador é um pouco diferente daquela do investigador teórico. Pelo fato dos recursos dos telescópios ainda não estarem exauridos, o julgamento deve ser suspenso até que seja confirmado pelas observações se os desvios para o vermelho realmente representam ou não movimento.

Enquanto isto, os desvios para o vermelho podem ser expressos em uma escala de velocidades por uma questão de conveniência. Eles se comportam como os desvios de velocidades e são muito simples quando representados na mesma escala familiar, independentemente de sua explicação final. O termo “velocidade aparente” pode ser usado, de forma cautelosa, nas afirmações, e o adjetivo deve estar sempre implícito quando ele for omitido no uso geral.

O teste proposto por Hubble foi denominado de “efeito de número”. Ele o descreve nas páginas 193-196 de *The Realm of the Nebulae*.

Os efeitos dos desvios para o vermelho são calculados com as suposições alternativas de que (a) eles representam movimento (são desvios de velocidades) e (b) eles não representam movimento. Desde que os resultados numéricos não são os mesmos, as diferenças observadas podem ser usadas para identificar a interpretação correta. [...]

A radiação de uma nebulosa pode ser representada como pacotes de energia de quanta de luz – fluindo em todas as direções. A luminosidade aparente é medida pela taxa na qual os quanta atingem o observador, juntamente com a energia nos quanta. Se ou a energia ou a taxa de chegada é reduzida, a luminosidade aparente é diminuída. Os desvios para o vermelho reduzem a energia nos quanta, quer as nebulosas estejam estacionárias ou em recessão. Assim um “efeito de energia” pode ser esperado, independentemente da interpretação dos desvios para o vermelho. *A taxa de chegada (i.e., o número dos quanta atingindo o observador por segundo) é reduzida se as nebulosas estão se afastando do observador, mas caso*

contrário não. Este fenômeno, conhecido como “efeito de número”, deveria em princípio fornecer um teste crucial da interpretação dos desvios para o vermelho como desvios de velocidades.

O “efeito de número”, mais precisamente, o “efeito de número de fótons”, foi de fato tratado em um artigo anterior com o seu amigo e colaborador de longa data, o cosmólogo Richard Tolman (Hubble e Tolman 1935), os quais propuseram este tipo de teste. O teste é o chamado *efeito Tolman*, que foi investigado em detalhes posteriormente por Sandage e colaboradores (Lubin e Sandage 2001, e as referências ali citadas). Um resultado positivo para a realidade da expansão por meio de tal teste não é ainda definitivo porque as incertezas observacionais e os efeitos evolucionários nas galáxias comprometem a conclusão final (mas veja Andrews 2006 e Lerner 2006, os quais encontraram um resultado negativo para o teste).

A conclusão preliminar de Hubble vindo das observações era claramente contrária à interpretação de que os desvios para o vermelho eram devidos ao movimento radial das nebulosas para longe da Terra (Hubble 1936, p. 197):

O coeficiente observado [de incremento da magnitude] é menor aqui do que na relação calculada a partir de ambas as interpretações dos desvios para o vermelho, mas é muito mais próximo ao coeficiente representando ausência de movimento. O exame cuidadoso das possíveis fontes de incertezas sugere que as observações podem provavelmente ser explicadas se os desvios para o vermelho não são desvios de velocidades. Se os desvios para o vermelho são desvios de velocidades então alguns fatores vitais devem ter sido desprezados na investigação.

No mesmo ano em que *The Realm of the Nebulae* foi publicado, 1936, Hubble proferiu três conferências, do Memorial de Rhodes em Oxford, nos dias 29 de outubro, 12 e 26 de novembro. De uma nota

publicada no periódico *Nature* podemos conhecer os pontos de vista expressos por ele nestas conferências, nossa ênfase (H.H.P. 1936):

[...] As conferências, que trataram sucessivamente da região observável, do papel dos desvios para o vermelho, e dos possíveis modelos do universo, revelaram que um modelo estático, mais uma dependência desconhecida até agora da frequência da luz com a distância, é provavelmente mais aceitável do que um ou outro dos modelos homogêneos em expansão da relatividade geral.

[...] Sem forçar de forma alguma as observações, mas às custas da postulação de uma nova propriedade da radiação, nós podemos descrever a contagem das nebulosas em termos de um simples universo estático. [...]

Se nenhuma recessão é suposta, a contagem observada das nebulosas é satisfatoriamente descrita a partir da suposição de que estamos observando uma porção finita de um universo de nebulosas muito maior, mas um universo no qual a frequência da luz varia uniformemente com a distância. Se, por outro lado, a recessão é admitida, a contagem observada das nebulosas não é satisfatoriamente descrita por qualquer dos modelos homogêneos em expansão da relatividade geral, mas se forem forçados a se ajustar exigirão que o universo seja fechado, que nós o tenhamos explorado até os seus mais extremos limites com o telescópio de 2,5 m, e que ele seja um universo predominantemente preenchido com matéria não luminosa, distribuída de tal maneira a absorver ou a espalhar quantidades insignificamente pequenas de luz.

A grande e receptiva audiência que assistiu às três conferências, cada uma delas um primor de exposição e clareza, teve pouca dificuldade em concordar com o Dr. Hubble que as conseqüências de se supor nenhuma recessão eram as menos difíceis de se aceitar.

Estas conferências foram publicadas em 1937 sob o título de *The Observational Approach to Cosmology*, ou, *O Enfoque Observacional da Cosmologia* (Hubble 1937). Neste livro, Hubble mencionou o que o levou a procurar interpretações alternativas para os desvios para o vermelho das nebulosas, no lugar da interpretação usual como sendo devidos a uma velocidade radial real de afastamento da Terra. Em particular, mencionou que estes motivos foram os grandes valores encontrados para as velocidades aparentes (Hubble 1937, p. 29): “A característica perturbadora era o fato de que as ‘velocidades’ atingiam enormes valores e eram precisamente correlacionadas com as distâncias.”

Vale a pena comentar um pouco sobre este importante aspecto mencionado por Hubble. Em 1929, o maior valor da velocidade radial v das nebulosas citado por Hubble era $v = 1.800 \text{ km/s}$ (Hubble 1929, Tabela 2). Isto implica $v/c = 6 \times 10^{-3}$, onde $c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$ é a velocidade da luz no vácuo. Por volta de 1936, quando ele escreveu *The Realm of the Nebulae*, este valor havia aumentado para $v = 39.000 \text{ km/s}$, implicando em $v/c = 0,13$ (Hubble 1936, Placa VII, p. 104). Em 1942, ele estava obtendo velocidades de recessão de até $1/7$ da velocidade da luz, i.e., $v/c \approx 0,14$ (Hubble 1942, p. 104). Estas velocidades de recessão extremamente grandes constituem uma fonte de dúvida sobre a interpretação do desvio para o vermelho como um efeito de velocidade. A razão disto é que todas as outras velocidades dos grandes objetos astronômicos conhecidos são muito menores. Por exemplo, a velocidade orbital da Terra ao redor do Sol é de aproximadamente 30 km/s ($v/c \approx 10^{-4}$); a velocidade orbital do sistema solar relativa ao centro de nossa galáxia é aproximadamente 250 km/s ($v/c \approx 10^{-3}$); e os movimentos aleatórios ou peculiares das galáxias é da mesma ordem de grandeza.

Com o fim de remover a característica perturbadora das ‘velocidades’ extremamente altas de recessão, Hubble apresentou, à página 30 de seu livro *The Observational Approach to Cosmology*, uma interpretação mais plausível, nossa ênfase:

Bem, talvez as nebulosas estejam todas se afastando desta maneira peculiar. Mas a idéia é um tanto surpreendente. O observador cauteloso naturalmente examina outras possibilidades antes de aceitar a idéia

mesmo como uma hipótese de trabalho. Ele relembra a formulação alternativa da lei dos desvios para o vermelho – a luz perde energia proporcionalmente à distância que ela viaja pelo espaço. *A lei, nesta forma, soa bastante plausível. O espaço interestelar, nós acreditamos, não pode ser inteiramente vazio.* Deve existir um campo gravitacional através do qual os quanta de luz viajam por muitos milhões de anos antes deles atingirem o observador, e *pode haver alguma interação entre os quanta e o meio circundante.* O problema convida a especulação, e, de fato, tem sido cuidadosamente examinado. Mas nenhuma solução satisfatória e detalhada foi encontrada. As interações conhecidas foram examinadas, uma após a outra – e elas falharam em dar conta das observações. A luz pode perder energia durante a sua jornada através do espaço, mas, se assim for, ainda não sabemos como a perda pode ser explicada.

No terceiro capítulo de seu livro, página 45, ele resumiu as possíveis explicações alternativas como se segue, nossa ênfase: “A conferência anterior descreveu a aparência e o comportamento dos desvios para o vermelho no espectro das nebulosas, e chamou a atenção para as interpretações alternativas possíveis. Se os desvios para o vermelho são produzidos nas nebulosas, onde a luz se origina, eles são provavelmente os familiares desvios de velocidades, e medem uma expansão do universo. Se as nebulosas não estão se afastando rapidamente, os desvios para o vermelho surgem provavelmente entre as nebulosas e o observador; *elas representam alguma interação desconhecida entre a luz e o meio através do qual ela viaja.*” Na página seguinte ele expressou claramente a sua suspeita contra a expansão do universo, a saber: “A suposição de movimento, por outro lado, levou a uma relação dos desvios para o vermelho não linear, de acordo com a qual as velocidades de recessão aceleram com a distância ou com o tempo contado retrospectivamente. Um universo que estivesse expandindo desta maneira seria tão extraordinariamente jovem, o intervalo de tempo desde que a expansão começou seria tão breve, que suspeitas são levantadas imediatamente, tanto no que diz respeito à

interpretação dos desvios para o vermelho como desvios de velocidades, quanto à teoria cosmológica na sua forma atual.”

Quando a lei de distribuição espacial das nebulosas não era interpretada a partir da suposição de desvios de velocidades, Hubble obteve uma distribuição uniforme das nebulosas e estava bastante satisfeito com isto (Hubble 1937, p. 49): “A distribuição uniforme é um resultado plausível e bem vindo.” Na página 51, acrescentou: “Portanto, aceitamos a distribuição uniforme, e supomos que o espaço é consideravelmente transparente. Assim, os dados dos levantamentos são simples e completamente explicados pelas correções de energia somente – sem o postulado adicional de um universo em expansão.” Nas páginas 60-61, ele apresentou outra conclusão duvidosa que surge da suposição de universo em expansão, nossa ênfase:

A natureza da curvatura [espacial] possui implicações um tanto sérias. Como a curvatura é positiva, o universo é fechado. O espaço é fechado como a superfície de uma esfera é fechada. O universo possui um volume definido, finito, apesar de não ter fronteiras no espaço tridimensional. O valor numérico extraordinariamente pequeno do raio de curvatura é uma surpresa completa. Ele implica que uma grande fração do universo, talvez, um quarto, possa ser explorada com os telescópios existentes³. *O pequeno volume do universo é outra conclusão estranha e duvidosa.* A interpretação familiar dos desvios para o vermelho como desvios de velocidades restringe muito seriamente não somente a escala de tempo, a idade do universo, mas também as dimensões espaciais. Por outro lado, a interpretação alternativa possível, que os desvios para o vermelho não são desvios de velocidades, evita ambas as dificuldades, e apresenta a região observável como uma amostra insignificante de um universo que se estende indefinidamente no espaço e no tempo.”

³ [Nota de Hubble] O volume do universo seria $2\pi^2 R^3$, onde R é o raio de curvatura, ou aproximadamente 2×10^{27} anos luz cúbicos. O universo poderia conter aproximadamente 400 milhões de nebulosas.

No final do livro, ele apresentou claramente o seu modelo preferido do universo, nossa ênfase (Hubble 1937, pp. 63-64):

[...] Contudo, o modelo continuamente em expansão, do primeiro tipo, parece um tanto duvidoso. Ele não pode ser descartado pelas observações, mas sugere uma interpretação forçada dos dados.

As características perturbadoras são introduzidas pelos fatores de recessão, pela suposição de que os desvios para o vermelho são desvios de velocidades. A divergência de uma relação linear dos desvios para o vermelho, a divergência de uma distribuição uniforme, a curvatura necessária para restaurar a homogeneidade, a matéria excessiva requerida pela curvatura, cada um destes é meramente o fator de recessão em outra forma. Estes elementos identificam um único modelo entre o rol de mundos em expansão, e, neste modelo, as restrições na escala de tempo, a limitação das dimensões espaciais, a quantidade de matéria não observada, é, cada um, equivalente ao fator de recessão.

Por outro lado, se o fator de recessão é eliminado, se os desvios para o vermelho não são primariamente desvios de velocidades, o quadro é simples e plausível. Não existe evidência da expansão e não existe restrição da escala de tempo, nenhum traço de curvatura espacial, e nenhuma limitação das dimensões espaciais. Além do mais, não existe nenhum problema de material entre as nebulosas. A região observável é perfeitamente homogênea; ela é uma amostra muito pequena para indicar a natureza do universo como um todo. O universo pode até estar em expansão, desde que a taxa de expansão, a qual a teoria não especifica, seja imperceptível. Neste caso, o universo poderia mesmo estar em contração.

É muito fácil perceber qual dos dois cenários para o universo era o preferido pelo próprio Hubble. Este é a escolha que ele apresentou no último parágrafo deste livro (Hubble 1937, p. 66): “Dois quadros do universo estão vivamente desenhados. As observações, no momento, parecem favorecer um quadro, mas elas não descartam o outro. Parecemos encarar, como uma vez nos dias de Copérnico, a escolha entre um universo pequeno e finito, e um universo indefinidamente grande, mais um novo princípio da natureza.”

Discussões interessantes sobre este universo sem fim e sem expansão foram feitas por Marmet e Reber (1989) e Reber (1977, 1986).

Cinco anos mais tarde, Hubble voltou a este assunto apresentando essencialmente os mesmos pontos de vista, embora com mais dados, em um artigo intitulado “O problema do universo em expansão” (Hubble 1942). Ele expressou o seu objetivo como se segue: “Uma fase deste ambicioso projeto é o teste observacional da teoria corrente do universo em expansão da relatividade geral.” Ele apresenta a interpretação usual dos desvios para o vermelho como devidos a velocidades de recessão e menciona que “as observações foram realizadas até quase 250 milhões de anos luz onde os desvios para o vermelho correspondem a velocidades de recessão de aproximadamente 42.000 km/s ou 1/7 da velocidade da luz.” Como vimos anteriormente, Hubble estava impressionado com estes enormes valores. Depois de apresentar as conseqüências da interpretação usual, ele fez o seguinte comentário: “Esta situação parece tão extraordinária que alguns observadores a vêem com justificada reserva, e tentam imaginar explicações alternativas para a lei dos desvios para o vermelho. Até o momento, eles falharam. Existem outras maneiras conhecidas pelas quais os desvios para o vermelho poderiam ser produzidos, mas todos eles introduzem efeitos adicionais que deveriam ser evidentes e na realidade não são encontrados. Os desvios para o vermelho representam efeitos Doppler, recessão física das nebulosas, ou a ação de algum princípio da natureza até agora desconhecido.” Ele comparou a teoria da expansão com as observações reais das nebulosas e concluiu: “O restante da informação recentemente acumulada não é favorável à teoria. Ele é tão prejudicial, na verdade, que a teoria, na sua forma atual, só pode ser salva supondo-se que os resultados observacionais apresentam erros sistemáticos ocultos.” Numa seção dedicada à interpretação dos desvios

para o vermelho, ele mencionou que suas “investigações foram planejadas para determinar se os desvios para o vermelho representavam ou não recessões reais.” Na primeira e na segunda figura de seu artigo, ele mostra como um universo estacionário resulta em um melhor ajuste aos dados do que um universo em expansão, no que diz respeito à lei dos desvios para o vermelho e à distribuição das nebulosas em grande escala. Relativamente a este último aspecto, concluiu o seguinte: “Sob a suposição de que os desvios para o vermelho não representam recessão real, a distribuição em grande escala é consideravelmente homogênea – o número médio de nebulosas por unidade de volume espacial é apreciavelmente o mesmo para cada uma das esferas. [...] Todos estes dados levam a uma concepção muito simples de um universo homogêneo, aparentemente infinito, do qual a região observável representa uma amostra insignificante”.

O primeiro e último parágrafos de sua conclusão são muito claros a respeito de seu modelo preferido do universo e deve ser citado integralmente, a saber:

Assim, o uso de correções de enfraquecimento [luminoso] leva a um tipo particular de universo, mas a um tipo que a maioria dos estudantes provavelmente rejeita como altamente improvável. Além do mais, as características esquisitas deste universo são meramente as correções de enfraquecimento manifestadas em diferentes formas. Omitam-se as correções de enfraquecimento e todas as esquisitices desaparecem. Só nos resta o conceito simples e mesmo familiar de um universo aparentemente infinito. Todas as dificuldades são transferidas para a interpretação dos desvios para o vermelho, os quais não podem ser então os familiares desvios de velocidades. [...] Enquanto isto, com base na evidência agora disponível, as discrepâncias aparentes entre a teoria e as observações devem ser reconhecidas. Apresenta-se uma escolha, como uma vez nos dias de Copérnico, entre um universo estranhamente pequeno e finito e um universo aparentemente infinito, mais um novo princípio da natureza.

Uma possibilidade, sobre o que ele pensava ser este novo princípio da natureza, pode ser encontrada numa entrevista, publicada em 1948, quando Hubble foi capa da revista *Time* (edição de 09 de fevereiro de 1948, página 62, disponível em <http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,856024-8,00.html>). O redator aparentemente supõe que Hubble defende o modelo finito em expansão: “Outros críticos questionam o ‘desvio para o vermelho’ como uma medida de velocidade. A explicação usual do efeito de avermelhamento é que o movimento do corpo luminoso para longe do observador ‘estica’ as ondas de luz fazendo-as mais longas (mais vermelhas) do que o normal. Mas como a luz vermelha contém menos energia por unidade (fóton) do que a luz violeta, os críticos de Hubble sugerem que a luz possa perder uma parte de sua energia ao atravessar o espaço, tornando-se assim mais vermelha. Ela pode partir de uma nebulosa distante como uma jovem e vigorosa luz violeta e chegar na Terra depois de milhões de cansativos anos como uma velha e cansada luz vermelha. Se isto é o que acontece, talvez as nebulosas não estejam se movendo de forma alguma? [...] Enquanto isto, ele [Hubble] procurará evidência de que o ‘desvio para o vermelho’ não indica velocidade mas é devido a algum outro efeito, tal como a luz se tornando ‘cansada’. Hubble não espera tal evidência, mas se a encontrar ela será muito bem vinda. A luz cansada, ele acredita, seria uma descoberta tão sensacional quanto o universo explosivo”.

Christianson, biógrafo de Hubble, cita esta entrevista, a qual mostra claramente o que Hubble pensava sobre a interpretação alternativa dos desvios para o vermelho (Christianson 1996, p. 318):

Hubble então abordou uma hipótese alternativa abraçada por aqueles que acham a teoria da expansão muito fantasiosa. Argumentam que o desvio para o vermelho não indica expansão mas algo muito diferente. A luz parte, de uma nebulosa distante, jovem, vigorosa e violeta. Mas depois de milhões de anos, a sua energia é gasta, as suas ondas se alongam, e ela se torna mais vermelha, transformando-se na “luz cansada” capturada pelas placas tomadas no Monte Wilson e no Palomar. Se isto for o que

acontece, as nebulosas podem estar se movendo muito pouco – ou não se movendo de forma alguma.

Ainda que Hubble não admitisse ser pressionado, ele finalmente admitiu “não esperar” encontrar evidência visual que destruísse a hipótese do desvio para o vermelho, embora ele “a receberia de muito bom grado se a encontrasse. A luz cansada... seria uma descoberta tão sensacional quanto o universo explosivo.

Sumário e considerações finais

Analizamos as visões de Edwin Hubble em relação à estrutura do universo em grande escala. Em 1929, ele inicialmente aceitou um universo finito em expansão de modo a explicar os desvios para o vermelho das galáxias distantes. Mais tarde, ele se voltou para um universo infinito no espaço e no tempo e um novo princípio da natureza, com o objetivo de explicar o mesmo fenômeno. Inicialmente, ele ficou impressionado pela concordância de sua relação desvio para o vermelho-distância com uma das previsões do modelo cosmológico de de Sitter, a saber, o chamado “efeito de Sitter”, o fenômeno do afastamento das partículas materiais, levando a um universo em expansão.

Uma quantidade de evidências observacionais, no entanto, fez com que ele ficasse bastante cético com este quadro. Elas eram melhor explicadas por um universo estático e infinito. As evidências que ele encontrou foram:

(i) os enormes valores que ele estava encontrando para as velocidades de “recessão” (1.800 km/s em 1929 até 42.000 km/s em 1942, levando a um $v/c = 1/7$), com os desvios para o vermelho sendo interpretados como devidos a velocidades de recessão. Todas as outras velocidades reais conhecidas, de grandes objetos astronômicos, são muito menores do que tais velocidades.

(ii) O teste do “efeito de número”, o qual é a dependência da luminosidade das nebulosas com o desvio para o vermelho. Hubble encontrou que um universo estático é, dentro das incertezas observacionais, ligeiramente favorecido. O teste é equivalente ao

moderno “efeito Tolman” para o brilho superficial das galáxias, e cujos resultados ainda são matéria de acirrada discussão.

(iii) O valor pequeno para o tamanho e para a idade do universo curvo em expansão, implicados pela taxa de expansão que ele tinha determinado, e,

(iv) o fato de que uma distribuição uniforme das galáxias em grande escala é mais facilmente obtida a partir da contagem de galáxias, quando um modelo estático e geometricamente plano é considerado. Em um universo em expansão e fechado, Hubble encontrou que a homogeneidade só era obtida às custas de uma grande curvatura. Mostramos, citando os seus trabalhos, que Hubble permaneceu cautelosamente contrário ao modelo do Big Bang até o fim de sua vida, o que diverge das afirmações comuns em autores modernos. Para explicar os desvios para o vermelho, em um universo sem expansão, Hubble argumentou em favor de um novo princípio da natureza, como o mecanismo da “luz cansada” proposto por seu amigo, o astrônomo Fritz Zwicky, em 1929. Por outro lado, ele estava ciente das dificuldades de tal suposição radical.

A objeção de Hubble quanto à idade do universo, mencionada acima, merece um esclarecimento. Como vimos, ele sempre foi fortemente influenciado pelas observações nas suas conclusões contrárias ao universo fechado em expansão. A taxa da expansão, i.e., a *constante de Hubble*, estava especialmente relacionada a esta conclusão em particular. Ela havia sido determinada por ele mesmo em 1929 como aproximadamente $500 \text{ km/s Mpc}^{-1}$ (Hubble 1929). Décadas mais tarde, após a morte de Hubble em 1953, este valor foi revisado para a conhecida faixa $50\text{-}100 \text{ km/s Mpc}^{-1}$ (ou mais especificamente 72 km/s Mpc^{-1} , de acordo com os resultados finais do Projeto Chave do HST para H_0 , Freedman et al 2001). Com um fator de recessão quase dez vezes menor e, conseqüentemente, uma idade do universo quase dez vezes maior, o modelo poderia parecer muito mais palatável no que diz respeito às suas dimensões espaciais e temporais. Mesmo assim, de modo a manter a validade do modelo do Big Bang seria necessário a introdução de inúmeras hipóteses *ad hoc*.

Isso nos faz lembrar aquela estória contada por Lakatos (1970, pp. 100-101):

A estória é sobre um caso imaginário de mau-comportamento planetário. Um físico da era pré-einsteiniana adota a mecânica de Newton e sua lei de gravitação, N , as condições iniciais dadas, I , e calcula, a partir daí, a trajetória de um pequeno planeta recentemente descoberto, p . Mas o planeta se desvia da trajetória calculada. Considera o nosso físico newtoniano que o desvio era proibido pela teoria de Newton e que, portanto, uma vez confirmado, ele rejeita a teoria N ? Não. Ele sugere que deve existir um planeta, até agora desconhecido, p' , o qual perturba a trajetória de p . Ele calcula a massa, a órbita, etc, deste hipotético planeta e então pede a um astrônomo experimental para testar a sua hipótese. O planeta p' é tão pequeno que mesmo o maior telescópio disponível não é capaz de observá-lo: o astrônomo experimental solicita um financiamento de pesquisa para construir um ainda maior. Em três anos o novo telescópio está pronto. Se o desconhecido planeta p' fosse descoberto ele seria saudado como uma nova vitória da ciência newtoniana. Mas ele não é descoberto. Abandona o nosso cientista a teoria de Newton e a sua idéia de um planeta perturbador? Não. Ele sugere que uma nuvem de poeira cósmica esconde o planeta de nós. Calcula a localização e as propriedades desta nuvem e solicita financiamento de pesquisa para enviar um satélite e testar os seus cálculos. Se os instrumentos do satélite (possivelmente novos e baseados em uma teoria pouco testada) registrasse a existência da hipotética nuvem, o resultado seria louvado como uma vitória extraordinária da ciência newtoniana. Mas a nuvem não é encontrada. Abandona o nosso cientista a teoria de Newton, juntamente com a idéia do planeta perturbador e a idéia da nuvem que o esconde? Não. Ele sugere que existe algum campo magnético naquela região do universo, o qual perturba os instrumentos do satélite. Um novo satélite é enviado. Se o campo magnético fosse encontrado, os newtonianos celebrariam uma vitória sensacional. Mas ele não é. É isto considerado como uma

refutação da ciência newtoniana? Não. Ou ainda uma outra hipótese genial é proposta ou... toda a estória é enterrada nos volumes empoeirados dos periódicos e a estória nunca mais é mencionada novamente.

O enfoque de Hubble concernente à cosmologia mostra que ele, certamente, não concordaria com o atual status quo do paradigma cosmológico moderno, já que ele era, acima de tudo, impulsionado pelas observações e pelas conseqüências daí advindas. As inumeráveis hipóteses *ad hoc* introduzidas no moderno modelo do Big Bang, de maneira a fazê-lo consistente com o conteúdo de matéria-energia do universo, apenas sugerem o que um Edwin Hubble, obcecado pelo mundo real, pensaria de tal situação.

Referências

- ANDREWS, T. B. 2006, Falsification of the expanding universe, 1st *Crisis in Cosmology Conference: CCC1*, pp. 3-22, eds. E. J. Lerner e J. B. Almeida, American Institute of Physics, Melville.
- CHRISTIANSON, G. E. 1996, *Edwin Hubble: Mariner of the Nebulae*, The University of Chicago Press, Chicago.
- FREEDMAN, W. L. et al. 2001, Final results from the Hubble Space Telescope Key Project to measure the Hubble constant, *Astrophysical Journal*, 553: 47-72.
- H. H. P., 1936, The observational approach to cosmology, *Nature*, 138: 1001-1002.
- HUBBLE, E. 1929, A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15: 168-173.
- HUBBLE, E. 1936, *The Realm of the Nebulae*, Dover, New York (edição de 1958).
- HUBBLE, E. 1937, *The Observational Approach to Cosmology*, Clarendon Press, Oxford.
- HUBBLE, E. 1942, The problem of the expanding universe, *American Scientist*, 30: 99-115.
- HUBBLE, E., TOLMAN, R. 1935, Two methods of investigating the nature of the nebular red-shift, *Astrophysical Journal*, 82: 302-337.
- LAKATOS, I. 1970, Falsification and the methodology of scientific research programmes, *Criticism and the Growth of Knowledge*, eds. I. LAKATOS e A. MUSGRAVE, pp. 91-196, Cambridge University Press, Cambridge.

- LERNER, E. J. 2006, Evidence for a non-expanding universe: surface data from HUDF, 1st *Crisis in Cosmology Conference: CCC1*, pp. 60-74, eds. E. J. LERNER e J. B. ALMEIDA, American Institute of Physics, Melville.
- LUBIN, L. M., SANDAGE, A. 2001, The Tolman surface brightness test for the reality of the expansion. IV. A measurement of the Tolman signal and the luminosity evolution of early-type galaxies, *Astronomical Journal*, 122: 1084-1103.
- MARMET, P., REBER, G. 1989, Cosmic matter and the nonexpanding universe, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 17: 264-269.
- NEWTON, I. 2008, *Principia – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Edusp, São Paulo. Livro II: *O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência)*, Livro III: *O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente)*. Traduções de A. K. T. Assis.
- REBER, G. 1977, Endless, boundless, stable universe, *University of Tasmania Occasional Paper*, 9: 1-18.
- REBER, G. 1986, Intergalactic plasma, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 14: 678-682.
- ZWICKY, F. 1929, On the redshift of spectral lines through interstellar space, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15: 773-779.