

PALESTRA¹

A HISTÓRIA DA TEMPERATURA DE 2,7 KELVIN ANTES DE PENZIAS E WILSON

A. K. T. Assis² e M. C. D. Neves³

Resumo: Esta é uma tradução do artigo “History of the 2.7 K Temperature Prior to Penzias and Wilson” publicado em *Apeiron*, Volume 2, páginas 79-84 (1995). Apresentamos a história das estimativas da temperatura do espaço intergaláctico. Começamos com os trabalhos de Guillaume e Eddington sobre a temperatura do espaço interestelar devida à luz das estrelas pertencentes à nossa galáxia Via Láctea. Discutimos então trabalhos relacionados com a radiação cósmica, concentrando-nos em Regener e Nernst. Também discutimos as pesquisas importantes de Finlay-Freundlich e Max Born sobre este tema. Finalmente, apresentamos o trabalho de Gamow e colaboradores. Mostramos que os modelos baseados em um universo em equilíbrio dinâmico sem expansão previram a radiação de 2,7 K antes e melhor do que os modelos baseados no estrondão (*big bang*).

1. Introdução

Em 1965 Penzias e Wilson descobriram a radiação cósmica de fundo (RCF) utilizando uma antena refletora no formato de chifre ou de corneta (*horn reflector antenna*) construída para estudar a rádio-astronomia (Penzias e Wilson 1965). Eles encontraram uma temperatura de $(3,5 \pm 1,0)$ K observando a radiação de fundo no comprimento de onda de 7,3 cm. Esta observação foi logo interpretada como sendo uma radiação fóssil do estrondão quente (*hot big bang*)⁴ com um espectro de corpo negro (Dicke e outros 1965). A descoberta foi considerada uma prova do modelo cosmológico padrão do universo baseado na expansão do universo (o estrondão), que teria previsto esta temperatura com os trabalhos de Gamow e colaboradores.

¹ As palestras não estão no formato do resumo expandido.

² Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 13083-859 Campinas, SP, Brasil. Email: assis@ifi.unicamp.br, homepage: <http://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

³ Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá – UEM, 87020-900 Maringá, PR, Brasil. Email: macedane@yahoo.com.

⁴ Nesta versão em português deste artigo estamos traduzindo a expressão inglesa *big bang* por *estrondão*, seguindo a sugestão de Soares (2002). O termo *big bang* foi criado por um dos mais ácidos críticos desta teoria, o Prof. Fred Hoyle (1915-2001), ao referir-se jocosamente, durante um programa radiofônico da BBC, à ideia de um universo “explosivo.” A tradução usualmente utilizada, *grande explosão*, é insatisfatória por trair o espírito com que o termo foi cunhado.

Neste artigo mostramos que outros modelos de um universo em equilíbrio dinâmico sem expansão haviam previsto esta temperatura antes de Gamow. Além disso, mostramos que as próprias previsões de Gamow foram piores do que estas previsões anteriores.

Antes de começar nossa análise listamos brevemente uma informação histórica importante que ajuda a compreender as descobertas. Stefan obteve experimentalmente em 1879 que o fluxo bolométrico total da radiação F emitido por um corpo negro na temperatura T era dado por $F = \sigma T^4$, onde σ é uma constante atualmente denominada de constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$). A dedução teórica desta expressão foi obtida por Boltzmann em 1884. Em 1924 Hubble estabeleceu que as nebulosas eram sistemas estelares localizadas fora da Via Láctea. Em 1929 ele obteve a famosa lei relacionando o desvio para o vermelho com a distância.

2. Guillaume e Eddington

A estimativa mais antiga que conhecemos sobre a temperatura do “espaço” é aquela devida a Guillaume (1896). Ela foi publicada em 1896, antes do nascimento de Gamow (1904). Citamos aqui um fragmento de seu texto (Assis e Neves 2014):

“O capitão Abney determinou recentemente a razão da luz do céu estrelado para a luz da Lua cheia; encontrando esta razão igual a 1/44, levando em consideração todas as reduções devidas à obliquidade dos raios com relação à placa [fotográfica]; e devidas à absorção atmosférica. Ao dobrar este valor para os dois hemisférios, e ao adotar a razão da intensidade luminosa da Lua para aquela do Sol como sendo 1/600.000 (uma média grosseira das medidas de Wollaston, de Bouguer e de Zöllner), encontraremos que o Sol nos envia 15.200.000 vezes mais energia vibratória do que o conjunto das estrelas. A elevação da temperatura de um corpo isolado no espaço, e submetido apenas à ação das estrelas, será igual ao quociente da elevação da temperatura devida ao Sol sobre a órbita da Terra pela raiz quadrada de 15.200.000, ou seja, aproximadamente 60. Além disso, este número deve ser considerado um valor mínimo, já que as medidas do capitão Abney, feitas em South Kensington, podem ter sido distorcidas por alguma outra fonte de luz. Concluimos que apenas a radiação das estrelas manteria o corpo de prova que assumimos ter sido colocado em diferentes locais do céu à temperatura de $338/60 = 5,6$ [graus] absolutos = $-207,4^\circ$ centígrados.

“Não se deve concluir que a radiação das estrelas eleve em 5 ou 6 graus a temperatura dos corpos celestes. Se o astro em questão já possui uma temperatura muito diferente do zero absoluto, sua perda de

calor é muito mais forte; encontraremos a elevação da temperatura devida à radiação das estrelas ao calcular a perda usando a lei de Stefan. Encontramos assim que, para a Terra, a elevação da temperatura devida à radiação das estrelas é inferior a um cemilésimo de um grau. Ainda assim devemos considerar este número como um limite superior da ação que buscamos calcular.”

É claro que a estimativa de Guillaume de uma temperatura de corpo negro de 5 a 6 K pode não ter sido a mais antiga, pois a lei de Stefan já era conhecida desde 1879. Além disso, ela é restrita ao efeito devido às estrelas pertencentes à nossa própria galáxia.

Citamos agora do livro de Eddington, *The Internal Constitution of the Stars* (1988), publicado em 1926. O último capítulo deste livro tem como título “A Matéria Difusa no Espaço” e começa discutindo “A Temperatura do Espaço”:

“Capítulo XIII A Matéria Difusa no Espaço A Temperatura do Espaço.

“256. O total de luz recebido por nós das estrelas é estimado como sendo equivalente a aproximadamente 1.000 estrelas da primeira magnitude. Considerando uma correção média para reduzir a magnitude bolométrica para a visual para estrelas de tipos diferentes das estrelas das classes F e G, o calor recebido das estrelas pode ser estimado como correspondendo a 2.000 estrelas com magnitude bolométrica aparente 1,0. Inicialmente vamos calcular a densidade de energia desta radiação.

“Uma estrela com magnitude bolométrica absoluta 1,0 irradia 36,3 vezes a energia do Sol, ou $1,37 \times 10^{35} \text{ erg/s}$. Este valor fornece $1,15 \times 10^{-5} \text{ erg/(cm}^2\text{s)}$ sobre uma esfera com um raio de 10 parsecs ($3,08 \times 10^{19} \text{ cm}$). A densidade de energia correspondente é obtida dividindo [este valor] pela velocidade de propagação, obtendo-se $3,83 \times 10^{-16} \text{ erg/cm}^3$. A uma distância de 10 parsecs a magnitude aparente é igual à magnitude absoluta; portanto, a densidade de energia de $3,83 \times 10^{-16}$ corresponde a uma magnitude bolométrica aparente de 1,0.

“De acordo com estes cálculos, a radiação total das estrelas terá uma densidade de energia dada por:

$$2.000 \times 3,83 \times 10^{-16} = 7,67 \times 10^{-13} \text{ erg/cm}^3.$$

“Pela fórmula $E = \sigma T^4$, a temperatura efetiva correspondente a esta densidade é

3,18° absolutos.

“Em uma região do espaço que não esteja nas proximidades de qualquer estrela, esta [densidade de energia] constitui o campo de

radiação total, e um corpo negro, por exemplo, um termômetro de bulbo negro, vai adquirir neste local uma temperatura de $3,18^{\circ}$, de tal forma que sua emissão possa contrabalançar a radiação incidindo sobre ele e sendo absorvida por ele. Esta [temperatura] é algumas vezes denominada de ‘temperatura do espaço interestelar’.”

Um aspecto importante a enfatizar aqui é que a estimativa de Eddington de uma temperatura de 3,18 K não foi a primeira, já que Guillaume havia obtido um valor similar 30 anos antes. Embora Eddington não tenha citado Guillaume ou qualquer outro autor, é claro que ele estava seguindo a dedução de alguma outra pessoa. Esta conclusão é indicada pelas sentenças “O total de luz recebido por nós das estrelas é estimado [por quem?] como sendo...” e “Esta [temperatura] é algumas vezes denominada [por quem?] de ‘temperatura do espaço interestelar’.” Estas sentenças mostram que outros pesquisadores também haviam chegado a este resultado. É muito provável que nos cinquenta anos transcorridos entre a lei de Stefan (1879) e o livro de Eddington (1926) outros cientistas tenham chegado à mesma conclusão independentemente do trabalho de Guillaume (1896).

Um outro ponto que devemos ter em mente é que Eddington e Guillaume estavam discutindo a temperatura do espaço interestelar devida às estrelas pertencentes à nossa própria galáxia, eles não estavam se referindo ao espaço intergaláctico. Devemos nos lembrar que Hubble somente estabeleceu com certeza a existência de galáxias externas à Via Láctea em 1924.

3. Regener

Os raios cósmicos foram descobertos em 1912 por V. F. Hess (Rossi 1964). Ele realizou um voo de balão e observou que um eletroscópio eletrizado era descarregado mais rapidamente nas altas altitudes do que ao nível do mar, contrariamente às expectativas. Esta descarga é devida à ionização do ar, sendo que esta observação mostrou que esta ionização aumentava com a altitude. Era conhecido que a radiação emitida por substâncias radioativas ionizavam o ar, e as medidas de Hess mostraram que a radiação responsável pela ionização natural do ar entrava na atmosfera a partir de cima, e não a partir do solo.

Em 1928 R. A. Milikan e Cameron (1928a) encontraram que a energia total dos raios cósmicos no topo da atmosfera era um-décimo daquela energia devida à luz e calor das estrelas. Em 1933 E. Regener (1933 e 1995) concluiu que ambos os fluxos de energia tinham essencialmente o mesmo valor. Este é um resultado muito importante com profundas implicações cosmológicas: Ele indica que a densidade de energia da luz das estrelas de nossa própria galáxia está em equilíbrio com a radiação cósmica, que é, em grande parte, de origem extra-galáctica. Sempre foi difícil saber

exatamente a origem dos raios cósmicos, mas o fato de que a maior parte de suas componentes ter se originado fora de nossa galáxia foi inferido a partir de uma outra medida de Millikan e Cameron (1928b). Neste trabalho eles mostraram que a intensidade da radiação vindo do plano da Via Láctea era a mesma que aquela vindo de um plano normal à Via Láctea. Esta isotropia indicava claramente uma origem extra-galáctica para os raios cósmicos.

O trabalho geral de Regener foi descrito da seguinte maneira por Rossi (1964):

“Nas décadas de 1920 e 1930 a técnica dos eletroscópios com auto-gravação levados por balões até as camadas mais altas da atmosfera ou mergulhados a grandes profundidades sob a água foi levado a um grau sem precedentes de perfeição pelo físico alemão Erich Regener e seu grupo. Devemos a estes cientistas algumas das medidas mais precisas já feitas sobre a ionização dos raios cósmicos em função da altitude e profundidade.”

Em seu trabalho de 1933 Regener mencionou o seguinte (Regener 1933 e 1995):⁵

“Contudo, a densidade de energia produzida pelos raios cósmicos, que é aproximadamente igual à densidade da luz e calor emitidos pelas estrelas fixas, é muito interessante de um ponto de vista astrofísico. Um corpo celeste tendo as dimensões necessária para absorver os raios cósmicos – no caso de uma densidade de 1, teríamos um corpo com o diâmetro de vários metros (5 metros de água absorvem 9/10 dos raios cósmicos) – será aquecido pelos raios cósmicos. O aumento na temperatura será proporcional à energia dos raios cósmicos absorvidos (S_U) e à superfície (O). A temperatura do corpo vai aumentar até que o calor que ele emite – no caso da radiação de corpo negro $\sigma T^4 O$ – atinge o mesmo valor. Obtemos então a temperatura final de $T = \sqrt[4]{S_U / \sigma}$. Substituindo os valores numéricos obtemos 2,8 K.”

4. Nernst

O trabalho de Regener foi discutido pelo famoso físico Walther Nernst (1864-1941) que recebeu o prêmio Nobel de química em 1920 pela sua terceira lei da termodinâmica (1906). Ao redor de 1912 Nernst havia desenvolvido a ideia de um universo em um estado estacionário. Ele expressou esta ideia em termos simples em 1928 (Nernst 1928):

⁵ Estamos substituindo o termo *Ultrastrahlung* (ultrarradiação) utilizado por Regener e outros autores da época pela expressão “radiação cósmica”, como esta radiação é denominada hoje em dia.

“O universo está em uma condição de estado estacionário, isto é, as estrelas fixas atuais esfriam continuamente e novas estrelas estão sendo formadas.”

Em 1937 ele desenvolveu este modelo e propôs uma explicação de luz cansada para o desvio para o vermelho cosmológico, a saber, a absorção da radiação pelo éter luminífero, diminuindo a energia e a frequência da luz das galáxias (Nernst 1937 e 1995a). Desta forma o desvio para o vermelho cosmológico não seria devido a um efeito Doppler de acordo com Nernst. Neste trabalho ele também mencionou o artigo importante de Regener discutido anteriormente.

No ano seguinte Nernst publicou um outro artigo discutindo a temperatura da radiação no universo (Nernst 1938 e 1995b). Ele chegou aqui em uma temperatura no espaço intergaláctico de 0,75 K. Ele discutiu mais uma vez o trabalho de Regener e afirmou que o desvio para o vermelho cosmológico não era devido a um efeito Doppler.

É importante enfatizar nos trabalhos de Eddington, Regener, Nernst e outros que discutiremos em seguida a utilização da lei de Stefan-Boltzmann, que é característica de uma radiação de corpo negro. Um outro ponto a ser enfatizado é que as densidades de energia destas radiações (devida à luz das estrelas de nossa galáxia e devida aos raios cósmicos, por exemplo) foram medidas e encontrou-se que possuíam o mesmo valor, indicando uma situação de equilíbrio dinâmico. Sciama descreveu esta situação nos seguintes termos (Sciama 1971):

“O fluxo de raios cósmicos quase certamente preenche a Via Láctea, e corresponde a uma densidade de energia no espaço interestelar de aproximadamente $1 eV cm^{-3}$ ($10^{-12} erg/cm^3$). Esta densidade é comparável com a densidade de energia da luz das estrelas, com a densidade de energia cinética turbulenta do gás interestelar e, como veremos em seguida, com a densidade de energia do campo magnético interestelar. Este fato está na base de nossa afirmação de que os raios cósmicos são importantes dinamicamente. Eles constituem um gás relativístico cuja energia e pressão não podem ser ignorados. A quase igualdade das várias densidades de energia provavelmente não é acidental, mas apesar de muitas tentativas uma compreensão completa desta igualdade ainda não foi alcançada.”

E novamente ele afirmou o seguinte na página 185, após mencionar a descoberta de Penzias e Wilson da radiação de corpo negro de 3 K:

“De um ponto de vista do laboratório 3 K é uma temperatura muito baixa. De fato, para medi-la os observadores de micro-ondas tiveram de usar um terminal imerso em hélio líquido. Apesar disto, de

um ponto de vista astrofísico 3° K é uma temperatura muito alta. Um campo de radiação universal de corpo negro a esta temperatura contribuiria com uma densidade de energia em todo lugar de 1 eVcm^{-3} . Como vimos no Capítulo 2 [página 25], esta é exatamente a densidade de energia em nossa galáxia dos vários modos de excitação interestelar – luz das estrelas, raios cósmicos, campos magnéticos e nuvens turbulentas de gás. Assim, mesmo em nossa galáxia a radiação de fundo cosmológica seria para muitos fins tão importante quanto os modos de energia bem conhecidos de origem local.”

Gostaríamos de fazer dois comentários importantes aqui. O primeiro é que a parte principal da radiação cósmica pode ter uma origem extragaláctica (ver o comentário anterior sobre o trabalho de Millikan e Cameron), assim como ocorre com os campos magnéticos que preenchem todo o espaço. Se este é o caso, entre três modos de excitação extra-galáctica (o fluxo de raios cósmicos, os campos magnéticos e a RCF) estariam em equilíbrio térmico entre si e também com os campos de energia gerados dentro de nossa própria galáxia, tais como a luz das estrelas e as nuvens turbulentas de gás. A maneira mais fácil de entender este fato é concluindo que o universo como um todo está em um estado de equilíbrio dinâmico.

5. McKellar e Herzberg

Gostaríamos de mencionar aqui brevemente o trabalho de 1941 de Herzberg (baseado nas observações feitas por A. McKellar) discutindo medidas do cianogênio feitas no espaço interestelar. Herzberg encontrou uma temperatura de 2,3 K caracterizando o grau observado de excitação das moléculas CN caso elas estivessem em equilíbrio em um banho térmico (Herzberg):

“A observação de que no espaço interestelar só estão preenchidos os níveis [energéticos] rotacionais mais baixos de CH, CH⁺ e CN, é facilmente explicada pela desocupação dos níveis mais altos pela emissão do espectro de rotação no infra-vermelho (ver a página 43) e pela falta de excitação para estes níveis por colisões ou radiação. A intensidade do espectro de rotação do CN é muito menor do que a intensidade do CH ou CH⁺ devido ao menor momento de dipolo assim como a menor frequência [devido ao fator ν^4 na equação (1.48)]. Este é o motivo pelo qual foram observadas linhas do segundo nível mais baixo (K = 1) para o CN. A partir da razão de intensidades das linhas com K = 0 e K = 1, segue-se uma temperatura de 2,3 K, a qual obviamente tem apenas um significado muito restrito.”

Obviamente há um grande significado neste resultado, embora sua importância não tenha sido reconhecida por Herzberg. Este fato foi discutido

por Sciama (1971). Apenas devemos enfatizar mais uma vez que este resultado não foi obtido utilizando a cosmologia do estrondão (big bang).

6. Finlay-Freundlich e Max Born

Em 1953-1954 Finlay-Freundlich (1953, 1954a, 1954b) propôs um modelo de luz cansada para explicar o desvio para o vermelho das linhas solares e alguns desvios para o vermelho anômalos de várias estrelas, assim como para explicar o desvio para o vermelho cosmológico. Ele propôs um desvio para o vermelho proporcional à quarta potência da temperatura, sendo seu trabalho analisado mais profundamente por Max Born (1953, 1954). Sua fórmula foi expressa da seguinte forma: $\Delta\nu/\nu = -AT^4\ell$, na qual $\Delta\nu$ era a mudança na frequência da linha espectral, ν sua frequência original, A era uma constante, T a temperatura do campo de radiação e ℓ era o comprimento do caminho através do campo de radiação. O que nos interessa aqui é a discussão de Finlay-Freundlich sobre o desvio para o vermelho cosmológico (1954b):

“§6. O Desvio para o Vermelho Cosmológico

O caráter fundamental do efeito que está sendo considerado levanta, necessariamente, a questão de saber se ele também não pode ser a causa do desvio para o vermelho cosmológico que tem sido interpretado até o momento como um efeito Doppler. Se este for o caso, a influência do fator ℓ na fórmula (1) é dado explicitamente pelas observações. O desvio para o vermelho observado $\Delta\lambda/\lambda$ aumenta de $0,8 \times 10^{-3}$ para cada milhão de parsec ($= 3 \times 10^{24} \text{ cm}$), o que corresponde a um aumento na velocidade de 500 km/s quando interpretado como um efeito Doppler. Um aumento de 10 km/s – correspondendo a um desvio para o vermelho para uma estrela do tipo B2 com temperatura $T_B = 20.000 \text{ K}$ – corresponderia a uma trajetória de $\ell_S = 1,2 \times 10^{23} \text{ cm}$.

“No que diz respeito à temperatura média T_S do espaço intergaláctico, além do fato de que ela tem de ser próxima do zero absoluto, nenhuma informação confiável está disponível. Contudo, se interpretarmos o desvio para o vermelho cosmológico da mesma forma que interpretamos os desvios para o vermelho das estrelas, então a seguinte equação deve valer:

$$T_S^4 \ell_S = T_B^4 \ell_B, \text{ ou } T_S = T_B (\ell_B / \ell_S)^{1/4}. \quad (3)$$

“A equação (3) mostra que o valor de T_S obtido desta forma não depende fortemente do valor de ℓ_B . Considerando para ℓ_B os dois valores extremos, 10^7 cm e 10^9 cm , obtemos os dois valores razoáveis a seguir:

$$T_s = 1,9 K \text{ e } T_s = 6,0 K .$$

“Em um artigo recente, Gamow (1953) [Gamow, G., 1953, Dan. Acad. Math.-Phys. Section, **27**, No. 10] deduziu um valor para T_s de 7 K a partir de considerações termodinâmicas assumindo uma densidade média de matéria no espaço no valor de $10^{-30} g/cm^3$.

“Portanto, podemos ter de encarar que o desvio para o vermelho cosmológico não é devido a um universo expandindo, mas sim a uma perda de energia sofrida pela luz nos imensos comprimentos de espaço que ela tem de percorrer vindo dos sistemas estelares mais distantes. A descoberta de Stebbins e Whitford, segundo a qual o desvio para o vermelho cosmológico é acompanhado paralelamente de um excesso de avermelhamento não explicado, indica que o espaço intergaláctico não é completamente vazio (1948) [Stebbins, J., e Whitford, A. E., 1984, Ap. J., 108, 413]. Assim, a luz pode estar exposta a algum tipo de interação com a matéria e com a radiação no espaço intergaláctico.”

Dois pontos principais a serem enfatizados aqui: (A) Finlay-Freundlich propôs uma interpretação alternativa para o desvio para o vermelho cosmológico, com esta nova interpretação sendo diferente da explicação por efeito Doppler, e (B) chegou a uma temperatura do espaço intergaláctico entre $1,9 K < T < 6,0 K$. Estes feitos são muito importantes, excepcionais.

É importante citar aqui Max Born (1954) quando discutiu a proposta de Finlay-Freundlich de que este novo efeito poderia ser devido a uma interação fóton-fóton, a saber:

“Claramente um efeito como este não está de acordo com a teoria atual. Contudo, ele tem uma consequência atrativa. Uma aplicação simples das leis de conservação de energia e momento linear mostra que uma colisão deste tipo só é possível se for criado um par de partículas com momentos opostos. A energia de uma destas partículas é $h\nu' = -h\delta\nu/2$, onde $\delta\nu$ é dado pela equação (6) [$\delta\nu = -C\nu\bar{\nu}/\nu_0$]. Caso as partículas secundárias sejam fótons, sua frequência é da ordem de grandeza das ondas de radar (para o Sol temos $\nu' \sim 2 \times 10^9 s^{-1}$, $\lambda' \sim 15 cm$). Assim, o desvio para o vermelho está ligado com a rádio-astronomia.”

Precisamos apenas nos lembrar aqui do trabalho de Penzias e Wilson realizado 11 anos mais tarde com uma antena em forma de chifre construída para estudar ondas de rádio que encontrou a RCF com um comprimento de onda característico de 7 cm... Esta descoberta de Penzias e Wilson tem de ser considerada como um sucesso retumbante da previsão de Max Born!

7. Gamow e Colaboradores

Vimos que Finlay-Freundlich (1954b) mencionou que Gamow havia deduzido o valor de 7 K para o espaço intergaláctico em 1953. Só conseguimos encontrar dois outros artigos antes deste trabalho de 1953 com uma previsão desta temperatura feita por colaboradores de Gamow, a saber, Alpher e Herman (1948, 1949). No primeiro deste trabalho estes dois autores afirmaram o seguinte:

“A temperatura do gás na época da condensação era de 600 K e a temperatura no universo na época atual encontra-se como sendo de aproximadamente 5 K . Esperamos publicar os detalhes destes cálculos em um futuro próximo.”

No segundo destes trabalhos, no qual foram apresentados os detalhes destes cálculos, eles afirmaram o seguinte (nossa ênfase em *itálico*):

“De acordo com a equação (4) $[\rho_r \rho_m^{-4/3} = \text{constante}]$, a especificação de ρ_m'' , ρ_m' e ρ_r' fixa a densidade atual da radiação, ρ_r' . De fato, encontramos que o valor de ρ_r' consistente com a equação (4) é dado por

$$\rho_r' \cong 10^{-22} \text{ g / cm}^3, \quad (12d)$$

“que corresponde a uma temperatura atual da ordem de 5 K . Esta temperatura média para o universo é para ser interpretada como a temperatura de fundo que resultaria apenas da expansão universal. Contudo, a energia térmica resultando da produção de energia nuclear nas estrelas aumentaria este valor.”

Destas afirmações fica evidente que a previsão que fizeram em 1948 era de que $T \approx 5\text{ K}$, enquanto que em 1949 obtiveram uma temperatura maior do que 5 K , embora perto deste valor.

A única previsão adicional desta temperatura feita por Gamow que conhecemos antes da descoberta de Penzias e Wilson (além daquela já mencionada de 7 K feita em 1953) foi publicada por Gamow (1961) em seu livro *The Creation of the Universe*. A primeira edição deste livro foi em 1952, apenas quatro anos antes do trabalho de Penzias e Wilson. Neste livro existe apenas um lugar no qual ele discute a temperatura do universo, a saber [21, página 42, nossa ênfase em **negrito**]:

“A relação apresentada anteriormente entre o valor da constante de Hubble e a densidade média do universo nos permite deduzir uma expressão simples que nos fornece a temperatura durante os estágios iniciais da expansão em função do tempo contado a partir da

compressão máxima. Expressando este tempo em segundos e a temperatura em graus (ver Apêndice, páginas 142-143), temos:

$$\text{temperatura} = \frac{1,5 \times 10^{10}}{[\text{tempo}]^{1/2}}$$

“Assim, quando o universo tinha a idade de 1 segundo, 1 ano e 1 milhão de anos, sua temperatura era de 15 bilhões, 3 milhões, e 3 mil graus absolutos, respectivamente. **Inserindo a idade atual do universo ($t = 10^{17} s$) nesta fórmula, encontramos**

$$T_{\text{atual}} = 50 \text{ graus absolutos}$$

“a qual está razoavelmente de acordo com a temperatura atual do espaço interestelar. Sim, nosso universo levou algum tempo para esfriar do calor devastador de seus dias iniciais até o frio glacial de hoje em dia!”

Discutimos abaixo estas previsões de Gamow e seus colaboradores.

8. Discussão e Conclusão

Na maioria dos livros didáticos atuais encontra-se a afirmação de que Gamow e colaboradores previram a temperatura de 2,7 K antes do trabalho de Penzias e Wilson, enquanto que a teoria do estado estacionário de Hoyle, Narlikar e Gold não teriam previsto esta temperatura. Portanto, a previsão correta de 2,7 K é aclamada como um dos argumentos mais fortes a favor do estrondão. Contudo, estes dois modelos (estrondão e teoria do estado estacionário) têm um aspecto muito importante em comum, a saber, ambos aceitam a interpretação do desvio para o vermelho cosmológico como sendo devido a um efeito Doppler, ou seja, estes dois modelos aceitam a expansão do universo.

Mas existe um terceiro modelo do universo que foi desenvolvido no século XX por vários cientistas incluindo Nernst, Finlay-Freundlich, Max Born e Louis de Broglie (1966). Ele é baseado em um universo que está em equilíbrio dinâmico, sem expansão e sem criação contínua de matéria. Revisamos este assunto em artigos anteriores (Assis 1992, 1993). Embora ele não seja considerado por quase nenhum livro didático atual que lida com cosmologia, este terceiro modelo demonstra ser o modelo mais importante de todos.

Para entender como os livros didáticos negligenciam totalmente a cosmologia de equilíbrio, vale à pena citar uma carta enviada por Gamow para Arno Penzias, em 1965, após a descoberta de Penzias e Wilson (curiosamente a carta foi datada de 1963...). Esta carta foi reproduzida no artigo de Penzias (1972) e diz:

“Obrigado por enviar-me seu artigo sobre a radiação de 3 K. Está muito bem escrito exceto que a “história inicial” não está “tão

completa”. A teoria daquilo que é conhecido, hoje em dia, como a “bola de fogo primordial”, foi inicialmente desenvolvida por mim em 1946 (Phys. Rev. 70, 572, 1946; 47, 505, 1948; Nature 162, 680, 1948). A previsão do valor numérico da temperatura atual (residual) pode ser encontrada no artigo de Alpher & Hermann (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) que a estimaram como sendo 5 K, e no meu artigo (Kong. Dansk. Ved. Sels. 27, No. 10, 1953) com a estimativa de 7 K. Mesmo no meu livro popular *Creation of the Universe* (Viking 1952) você pode encontrar (na pág. 42) a fórmula $T = 1,5 \times 10^{10} / t^{1/2} K$, e o limite superior de 50 K. Assim, você pode ver que o mundo não começou com o todo-poderoso Dicke.

“Atenciosamente, G. Gamow”

Esta carta, como acabamos de ver, não corresponde aos fatos verdadeiros. Gamow, na edição revisada de seu livro de 1952, publicada em 1961, calculou uma temperatura específica. Assim, neste trabalho Gamow não estimou um “*limite superior de 50 K*”. A necessidade que Gamow tinha de convencer todo mundo de que ele havia previsto corretamente, e antes de qualquer outra pessoa, a temperatura da radiação cósmica de fundo fica evidente de outra parte do artigo de Penzias (1972):

“Está além dos objetivos deste trabalho avaliar as várias explicações teóricas da [temperatura] de 3 K. Apesar disso, a reivindicação exclusiva da teoria do universo quente em evolução é a de que ela previu a radiação de fundo antes da descoberta. No quarto Simpósio sobre Astrofísica Relativística “Texas”, George Gamow era o presidente da Sessão sobre Radiação Cósmica de Microondas. Ele terminou sua apresentação com um comentário que, no melhor de minha memória, foi o seguinte, “Se eu perder um níquel, e alguém encontrar um níquel, não posso provar que ele é o meu níquel. Contudo, perdi um níquel exatamente onde eles encontraram um níquel.” Os aplausos foram longos e efusivos.”

Como mencionamos neste artigo, Gamow e colaboradores obtiveram temperaturas desde $T \approx 5 K$ até $T = 50 K$, em ordem crescente (5 K, $\geq 5 K$, 7 K e 50 K)... Estas previsões são muito ruins quando comparadas com aquelas obtidas por Guillaume, Eddington, Regener e Nernst, McKellar e Herzberg, Finlay-Freundlich e Max Born, que previram os seguintes valores, respectivamente: $5 K < T < 6 K$, $T = 3,1 K$, $T = 2,8 K$, $T = 2,3 K$ e $1,9 K < T < 6,0 K$! Todos estes autores obtiveram estes valores a partir de medidas e/ou cálculos teóricos, mas nenhum deles utilizou o estrondão. Isto significa que a descoberta de Penzias e Wilson não pode ser considerada uma evidência conclusiva a favor do estrondão. Muito pelo contrário! Afinal de contas, os modelos de um universo em equilíbrio dinâmico previram o

valor desta temperatura antes de Gamow e com melhor precisão. E não apenas isto, já que Max Born também previu que o desvio para o vermelho cosmológico e a radiação cósmica de fundo deveriam estar relacionados com a rádio-astronomia, com esta previsão sendo feita onze anos antes da descoberta de Penzias e Wilson utilizando uma antena refletora no formato de chifre que havia sido construída para estudar emissões de rádio!

Nossa conclusão é que a descoberta da radiação cósmica de fundo (RCF) por Penzias e Wilson é um fator decisivo favorável a um universo em equilíbrio dinâmico, além de ser contrária aos modelos de um universo em expansão, tais como o modelo do estrondão (big bang) e o modelo do estado estacionário (steady-state).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Anthony L. Peratt por lhes indicar o artigo de Guillaume. A. K. T. A. agrade ao CNPq, FAPESP e FAEP pelo apoio financeiro nos últimos anos.

Referências

Alpher, R. A. e Herman, R., 1948, *Nature* 162, 774-775.

Alpher, R. A. E Herman, R. 1949, *Physical Review* 75, 1089-1095.

Assis, A. K. T., 1992, *Apeiron* 12, 10-16.

Assis, A. K. T., 1993, in: *Progress in New Cosmologies: Beyond the Big Bang*, ed. H. C. Arp e outros, Plenum, 153-167.

Assis, A. K. T. e Neves, M. C. D., Tradução comentada do artigo de Guillaume de 1896 sobre a temperatura do espaço. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Vol. 31, págs. 654-570 (2014). Doi: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n3p564>.

Born, M., 1953, *Göttinger Nachrichten*, 7, 102-108.

Born, M., 1954, *Proceedings of the Physical Society A* 67, 193-194.

de Broglie, L., 1966, *Comptes Rendues de l'Academie des Sciences de Paris* 263, 589-592.

Dicke, R. H., Peebles, P. J. E., Roll, P. G. e Wilkinson, D. T., 1965, *Astrophysical Journal* 142, 414-419.

Eddington, A. S., 1988, *The Internal Constitution of Stars*, Cambridge University Press, Capítulo 13, pág. 371. Reimpressão da edição de 1926.

Finlay-Freundlich, E., 1953, *Göttinger Nachrichten*, 7, 95-102.

Finlay-Freundlich, E., 1954a, *Proceedings of the Philosophical Society A* 67, 192-193.

Finlay-Freundlich, E., 1954b, *Philosophical Magazine* 45, 303-319.

Gamow, G., 1961, *The Creation of the Universe*, Viking, edição revisada.

Guillaume, C.-E., 1896, *La Nature* 24, série 2, pág. 234. Tradução para a língua portuguesa em Assis e Neves 2014.

Herzberg, G., *Molecular Spectra and Molecular Structure*. Vol. I: *Spectra of Diatomic Molecules*.

Millikan, R. A. e Cameron, G. H., 1928a, *Physical Review* 31, 163-173.

- Millikan, R. A. e Cameron, G. H., 1928b, *Physical Review* 31, 921-930.
- Nernst, W., 1928, *Journal of the Franklin Institute* 207, 135-142.
- Nernst, W., 1937, *Zeitschrift für Physik* 106, 633-661. Tradução para a língua inglesa em Nernst 1995a.
- Nernst, W., 1938, *Annalen der Physik* 32, 44-48. Tradução para a língua inglesa em Nernst 1995b.
- Nernst, W., 1995a, *Apeiron* 2, 58-71. Tradução de P. Huber e outros.
- Nernst, W., 1995b, *Apeiron* 2, 86-87. Tradução de G. Moesle.
- Penzias, A. A., 1972, in: *Cosmology, Fusion & Other Matters*, F. Reines (ed.), Colorado Associated University Press, 29-47.
- Penzias, A. A. e Wilson, R. W., 1965, *Astrophysical Journal* 142, 419-421.
- Regener, E., 1933, *Zeitschrift für Physik* 80, 666-669. Tradução para a língua inglesa em Regener, 1995.
- Regener, E., 1995, *Apeiron* 2, 85-86. Tradução de G. Moesle.
- Rossi, B., 1964, *Cosmic Rays*, McGraw-Hill, Capítulo 1, pág. 1.
- Sciama, D. W., 1971, *Modern Cosmology*, Cambridge University Press.
- Soares, D. S. L. A tradução de *Big Bang*. 2002. Disponível em: <http://www.fisica.ufmg.br/~dsoares/>.