

A hipótese do átomo primordial de Georges Lemaître

Felipe T. Falciano¹ e Júlio C. Fabris²

¹Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

²Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Georges Lemaître é uma figura singular com contribuições importantes à física e à cosmologia do século XX. Um dos pioneiros na elaboração do cenário do universo primordial, Lemaître foi alegadamente o primeiro a interpretar com profundidade o significado físico dos resultados observacionais da equipe de Hubble sobre a conexão entre o desvio para o vermelho das galáxias vizinhas e a expansão do universo. Aqui apresentamos a tradução do texto publicado por Lemaître em 1949 onde ele expõe de forma completa a ideia que o universo surge da desintegração de um “átomo primitivo”. Valendo-se das características dos processos radiativos, Lemaître desenvolve uma visão ampla sobre os processos físicos no universo primordial que guarda semelhanças interessantes com o que hoje se consolidou como o modelo padrão da cosmologia.

Abstract

Georges Lemaître is a singular figure with important contributions to 20th century physics and cosmology. One of the pioneers in the elaboration of the primordial universe scenario, Lemaître was allegedly the first to interpret in depth the physical meaning of the observational results of Hubble’s team on the connection between the redshift of neighbouring galaxies and the expansion of the universe. Here we present a translation of the text published by Lemaître in 1949, in which he fully explains the idea that the universe arises from the disintegration of a "primitive atom". Using the characteristics of radiative processes, Lemaître develops a broad vision of the physical processes in the primordial universe that bears interesting similarities to what has now become the standard model of cosmology.

Palavras-chave: Lemaître, cosmologia, átomo primitivo, universo.

Keywords: Lemaître, cosmology, primitive atom, universe.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n2.42147](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n2.42147)

1 Introdução

A Hipótese do Átomo Primordial, de autoria do físico, matemático e padre belga Georges Lemaître (1894-1966) é constantemente citada, mas pouco conhecida. No entanto, como outros trabalhos de Lemaître, é um marco na história da cosmologia, e uma das primeiras hipóteses para o estado inicial do universo.

Neste número dos Cadernos de Astronomia, com uma seção especial dedicada ao universo primordial, mostra-se pertinente apresentar a tradução do texto publicado por Lemaître em 1949 onde ele expõe de forma completa a ideia que o universo surge da desintegração de um “átomo primitivo”. Esta desintegração conduziria a uma configuração cósmica como a que observamos hoje. É importante lembrar que Lemaître, com

atuação profissional constantemente ligada à astronomia, sempre mostrou desejo e empenho de confrontar as teorias com os fatos observacionais. Com efeito, Lemaître demonstrou estar mais atualizado que o próprio Alexandre Friedmann, primeiro a propor a possibilidade de um universo dinâmico, do status experimental da teoria da relatividade geral.

A tradução apresentada a seguir foi feita diretamente do texto em francês veiculado na *Acta Pontificiae Academiae Scientiarum*, em 1949 [1]. O texto não contém nenhuma equação, mas procura expor o conceito do átomo primitivo e algumas ideias qualitativas de como, a partir dele, o universo evolui deste estado primordial até a complexa estrutura que hoje exhibe, com as diversas e complexas estruturas cósmicas observadas, tendo passado por diversos estágios evolutivos.

Georges Lemaître é uma figura singular na Física e Astronomia. A I Guerra Mundial eclodiu quando ele tinha 20 anos. Foi mobilizado, participando do conflito como oficial da artilharia, sendo inclusive condecorado. Estudou ciências, em particular física e matemática, obtendo seu diploma superior nestas disciplinas em 1920. Ao mesmo tempo, seguiu formação religiosa, tendo sido ordenado padre em 1923. Neste mesmo ano, ocuparia a posição de pesquisador associado da Universidade de Cambridge, Reino Unido, o que permitiu que ele mantivesse um contato próximo com um dos maiores astrônomos da época, Arthur Eddington (1882-1944). Em 1927 publicaria o artigo *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques* [2], onde realiza uma análise da expansão do universo a partir dos dados então existentes sobre o desvio para o vermelho das galáxias, o que levaria à lei de Hubble-Lemaître, estabelecendo a hoje bem conhecida relação entre a velocidade de recessão observada das galáxias $v = H_0 d$, sendo H_0 uma constante, denominada de constante de Hubble. Este artigo recebeu uma tradução para o inglês publicada no *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. O astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953) só viria a publicar o seu artigo sobre a relação velocidade \times distância das galáxias dois anos depois, em 1929. Mesmo assim, até recentemente a lei que estabelece esta relação era conhecida como lei de Hubble, e só recentemente a *International Astronomical Union* (IAU) definiu que ela fosse chamada de lei de Hubble-Lemaître guardando, no entanto, a denominação de constante de Hubble para H_0 .

As contribuições de Lemaître à física e à cosmologia são muitas, e estão sendo pouco a pouco reconhecidas no seu justo valor. Além da lei de Hubble-Lemaître, ele foi o primeiro a identificar a importância da constante cosmológica, e consequentemente de um estágio de aceleração cósmica, para que a idade do universo fosse maior que os dos seus constituintes [3]. Realizou também estudos importantes conectados com o colapso gravitacional e a física de buracos negros em um época na qual estes objetos eram muito pouco compreendidos [4].

Lemaître desenvolveu e consolidou o trabalho do matemático russo Alexander Friedmann

(1888-1925) que, em 1922, publicaria artigo mostrando que as equações da Relatividade Geral, quando aplicadas à cosmologia prevêm, de forma que podemos dizer *natural*, soluções dinâmicas indicando um universo em expansão.¹ Friedmann não pôde desenvolver de forma quantitativa as consequências observacionais de um universo em expansão devido tanto à sua morte prematura aos 37 anos de idade, quanto ao fato de que o conceito de galáxia só se solidificaria a partir dos anos 20, quando também surgem as primeiras medidas das velocidades de recessão destes objetos em largas escalas do universo.² As evidências observacionais para um universo em expansão viriam com a análise feita por Lemaître inicialmente, e confirmada posteriormente por Hubble.

A expansão do universo, quando extrapolada para o passado, indica um momento inicial. Este momento inicial é um estado em princípio singular, não admitindo uma descrição nem física nem matemática. Lemaître substitui este estado singular por um átomo primitivo. Obviamente, não estamos falando aqui de nenhum elemento da tabela periódica, mas uma configuração inicial (em princípio não singular) da qual se originam os elementos conhecidos hoje. O processo fundamental evocado por Lemaître é o da “desintegração” deste átomo primitivo, que leva não apenas aos elementos químicos conhecidos, mas também a todas as estruturas cósmicas observadas. No artigo de Lemaître os mecanismos desta desintegração e consequente formação do cosmo são evocados apenas qualitativamente. Ao nosso conhecimento, não houve um desenvolvimento ulterior quantitativo. Mas, o processo fundamental é repetidamente enfatizado: os processos de desintegração, em vários níveis, é que geram a dinâmica cósmica. Podemos pensar em um íntima conexão com a segunda lei da termodinâmica, que indica que a entropia do universo sempre cresce. Embora isto não seja explicitamente dito no texto, tal conexão pode ser considerada como natural.

O artigo começa e termina com uma citação do filósofo francês René Descartes (1596-1650):

¹Ver tradução do artigo original de Friedmann, com apresentação de H. Velten e W. Zimdahl [5]. É interessante notar que Friedmann lutou também na I Guerra Mundial, mas como aviador, tendo também sido condecorado por bravura.

²Ver artigo *Via Láctea: ilha isolada* [6].

Mundus est fabula (o mundo é uma fábula). Lemaître parece assim reconhecer que ele também está, nesta descrição do átomo primitivo e sua conexão com a dinâmica cósmica, realizando uma narrativa. Uma narrativa que estabelece o estado primordial do universo (não singular), o processo motor fundamental da evolução cósmica (a desintegração sucessiva dos elementos a partir do átomo primitivo), e as conexões possíveis com o universo observado hoje. O texto se distingue fortemente da literatura científica atual, possuindo um certo “sabor” de literatura clássica, sem dúvida reflexo da dupla formação do seu autor, ao mesmo tempo científica e teológica.

A obra cosmológica de Lemaître possui dois momentos de destaque. Sua primeira contribuição marcante foi demonstrar, de maneira independente de Friedmann, que as equações de Einstein admitem soluções dinâmicas para o universo (expansão ou contração). Ademais, sua profunda compreensão da teoria da relatividade geral o permitiu interpretar de maneira correta os então recentes resultados observacionais da equipe de Hubble sobre o desvio para o vermelho como sendo uma evidência da expansão do universo.

Em um segundo momento, Lemaître traz a cena cósmica conhecimentos de outras áreas da física, como a mecânica quântica e física estatística, para desenvolver uma hipótese coerente, porém extremamente ousada para época, sobre o estado do universo primordial. A hipótese do átomo primitivo de Lemaître pode de uma certa forma ser entendida como um desdobramento lógico do fato do universo estar em expansão. De fato, se o universo está em expansão, no passado ele deve ser progressivamente mais denso. Valendo-se das características físicas dos processos radiativos, onde átomos mais pesados decaem em átomos mais leves liberando energia, Lemaître desenvolve uma visão ampla sobre os processos físicos no universo primordial que guarda semelhanças interessantes com o que hoje se consolidou como o modelo padrão da cosmologia.

Em uma edição dedicada aos estudos do universo primordial, a tradução deste texto nos parece particularmente oportuna.

Sobre os tradutores

Felipe T. Falciano (ftovar@cbpf.br) é Doutor em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e Mestre em Filosofia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Desde 2009 é pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, vinculado à coordenação COSMO e atuando nas áreas de cosmologia e gravitação.

Júlio C. Fabris (julio.fabris@cosmo-ufes.org) é professor titular do Departamento de Física da UFES e pesquisador do CNPq. Suas atividades científicas versam sobre física teórica, com especial ênfase em cosmologia e gravitação.

Referências

- [1] G. Lemaître, *L'hypothèse de l'atome primitif*, Acta Pontificiae Academiae Scientiarum **XII**(6), 25 (1948). Disponível em <https://archives.uclouvain.be/ark:/33176/dli00000f2DF>, acesso em ago. 2023.
- [2] G. Lemaître, *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles **XLVII**, 49 (1927). Disponível em <https://archives.uclouvain.be/ark:/33176/dli000000eVnQ>, acesso em ago. 2023.
- [3] A. G. Lematre e A. S. Eddington, *The Expanding Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **91**(5), 490 (1931).
- [4] G. Lemaître, *L'univers en expansion*, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles **A 53**(2), 51 (1933). Disponível em <https://archives.uclouvain.be/ark:/33176/dli000000eXt8>, acesso em ago. 2023.
- [5] H. Velten e W. Zimdahl, *universo dinâmico de Friedmann*, *Cadernos de Astronomia* **3**(1), 151 (2022).
- [6] V. F. P. de Andrade e O. F. Júnior, *Via Láctea: Ilha Isolada?*, *Cadernos de Astronomia* **2**(1), 79 (2021).

A Hipótese do Átomo Primitivo

Georges Lemaître

Acadêmico Pontifício

RESUMO: O Autor propõe uma hipótese segundo a qual o mundo surgiu da desintegração de um único átomo, e mostra como se pode superar os contra-argumentos que podem ser apresentados.

Um dos retratos que nos chegou, do filósofo e matemático René Descartes, é acompanhado por um lema que nos parece oportuno recordar no início desta apresentação: *Mundus est fabula*. O mundo é uma bela história pela qual cada geração luta melhorar. Os vórtices de Descartes não sobreviveram ao progresso científico; talvez, no entanto, permaneça algo da atitude mental que levou Descartes a dizer *Mundus est fabula* no que Poincaré mais tarde chamou de hipóteses cosmogônicas pelas quais o homem não pode deixar de tentar contar a si mesmo a história do universo e reconstruir sua evolução passada.

O problema cosmogônico começou a surgir de maneira precisa quando, seguindo as pesquisas de Galileu e depois de Newton, foram descobertas as leis da mecânica. A existência dessas leis afastou, em certa medida, a arbitrariedade que até então reinava nas concepções cosmogônicas. Para a mecânica, a evolução de um sistema material é inteiramente determinada e pode ser calculada quando sabemos o que os matemáticos chamam de condições iniciais e o objetivo da cosmogonia é encontrar condições iniciais que apresentem algum caráter de simplicidade e de modo que o universo atual possa resultar delas pelo jogo de leis conhecidas.

Certamente pode-se perguntar se as leis, que são válidas no lugar onde estamos e na época em que vivemos, ainda são válidas longe, lá onde não podemos pensar em fazer a verificação e se elas eram válidas no passado remoto. O problema cosmogônico pode ser abordado nas mais diversas atitudes mentais. Aqueles cujo estado de espírito é de, acima de tudo, nunca admitir nada que não seja absolutamente certo, sem dúvida será melhor desistir. Abordar o problema cosmogônico

envolve necessariamente um certo risco. Não é apenas o risco de perder tempo tentando resolver um problema que poderia ser insolúvel, mas também o perigo de se perder. Mas esse risco não é compensado pela esperança de chegar a uma solução, a uma concepção do mundo em todo o seu alcance atual e em toda a duração de sua evolução passada, uma concepção cuja validade poderia basear-se em alguma confirmação experimental?

Ao tentar explicar a hipótese do átomo primitivo para vocês, tentarei fazê-los entender em que ela consiste, em vez de discutir o escopo exato dos argumentos que a sustentam. Também penso que uma conclusão definitiva não pode ser feita no momento e que tal conclusão dependerá do resultado de cálculos difíceis que ainda não puderam ser feitos e dos quais depende a comparação da hipótese com fatos experimentais. Estes talvez o confirmem, ou talvez compartilhem com ele o destino dos vórtices de Descartes e muitas outras hipóteses esquecidas.

Depois da mecânica, é naturalmente a astronomia que nos problematiza a contribuição mais essencial, descrevendo-nos qual é o estado atual do mundo ao nosso redor.

Assim como Copérnico, lançando a terra no espaço, nos ensinou que o lugar da inteligência era apenas uma grande pedra girando com algumas outras em torno da estrela incomparável, no centro de nosso sistema, o sol. De maneira semelhante, avanços posteriores nos ensinaram que o Sol é apenas uma estrela entre muitas outras. É inclusive uma estrela classificada entre as anãs, dez vezes menos massiva e milhares de vezes menos brilhante que certas outras estrelas chamadas gigantes.

A estrela mais próxima está a quatro anos-luz de distância, uma grande distância considerando que a luz leva apenas oito minutos para percorrer os cento e cinquenta milhões de quilômetros que nos separam do Sol.

O número de estrelas que podem ser vistas em grandes telescópios é de cerca de um bilhão e sua distribuição entre as várias magnitudes pelas quais seu brilho é medido permite que seu número total seja estimado em quase cem bilhões com uma massa total de cem bilhões de vezes maior que a do Sol.

Essas estrelas formam com nebulosas associadas a elas o que é chamado de galáxia e essas nebulosas são chamadas de nebulosas galácticas, ou seja, parte da galáxia.

A galáxia é um sistema achatado e a via leiteira, da qual deriva seu nome, é formada a partir das regiões mais distantes vistas do interior, seguindo o plano de simetria do sistema. Há um grande acúmulo de estrelas e nebulosas galácticas que circundam o céu.

A galáxia possui um movimento de rotação em torno de um centro localizado a cerca de trinta mil anos de distância. A velocidade do Sol em torno deste centro é de trezentos quilômetros por segundo, uma grande velocidade, do ponto de vista astronômico, pois é dez vezes a da Terra ao redor do Sol ou quinze vezes a do Sol em relação às estrelas que passam por ele.

Fora da galáxia, existem outras galáxias. A palavra galáxia é, portanto, usada como nome próprio para designar os sistemas estelares dos quais acabamos de falar; ela é usada como nome comum para designar sistemas semelhantes a este, mas localizados fora dele. Entendemos assim como essas galáxias também são chamadas de nebulosas extragalácticas; assim como as estrelas podem ser consideradas sóis fora do sistema solar.

As mais próximas das nebulosas extragalácticas são as nuvens de Magalhães, depois a grande nebulosa de Andrômeda, elas formam com algumas outras o que se chama de aglomerado local e a nossa galáxia é uma delas.

Além disso, observamos outras nebulosas, reduções em pequenas e menos brilhantes dessas grandes nebulosas. Eles são, de fato, objetos semelhantes, mas localizados mais longe. Observamos uma distância estimada em quase um bilhão de anos. Essas nebulosas estão localizadas a dis-

tâncias mútuas de um milhão e meio de anos. Sua distribuição mostra grandes flutuações de densidade, mas sem nenhuma tendência de diminuir a densidade nas regiões externas, de modo que não há nenhuma indicação de que alcançamos o limite de o sistema de nebulosas como conseguimos observar a região externa da galáxia, onde as estrelas começam a rarear.

Além de simples flutuações na distribuição de nebulosas extragalácticas, existem verdadeiros aglomerados de nebulosas onde várias centenas de nebulosas estão reunidas a distâncias dez vezes menores que sua distância normal.

Esses aglomerados têm, do ponto de vista técnico, desempenhado um papel essencial no estudo das nebulosas, pois nos apresentam várias centenas de objetos localizados à mesma distância de nós. Eles mostraram, entre outras coisas, que é muito raro observar uma nebulosa dez vezes mais brilhante ou dez vezes mais escura que a média, enquanto isso é comum para estrelas. A determinação das distâncias relativas das nebulosas, e especialmente dos aglomerados de nebulosas, é, portanto, um problema comparativamente fácil.

A julgar pela posição das linhas de seu espectro, as nebulosas são animadas por velocidades extremamente altas. No aglomerado mais próximo, o de Virgo, as velocidades observadas variam de zero a três mil quilômetros por segundo. Além dessa grande dispersão de velocidades no mesmo aglomerado, há um movimento médio de afastamento que é maior quanto maior for a distância do aglomerado.

Um fenômeno semelhante é observado para nebulosas isoladas. A velocidade de afastamento é tal que bastaria para cobrir a distância que nos separa da nebulosa em questão em dois bilhões de anos.

É nisso que consiste a expansão do sistema de nebulosas ou expansão do universo.

Se a astronomia e a mecânica celeste têm um papel essencial na formulação do problema cosmogônico, há uma terceira ciência que lhe traz uma contribuição importante: é a física.

A matéria é radioativa. A radioatividade é um fenômeno de grande importância do ponto de vista cosmogônico, pois é um fenômeno que está se esgotando e, portanto, um fenômeno que deve ter sido mais importante no passado.

O elemento rádio desaparece pela metade em

mil e seiscentos anos. Se ainda podemos encontrar rádio em nossa velha Terra, é porque existe um material radioativo de vida mais longa, o ancestral do rádio, o urânio. Ele decai pela metade em 4,4 bilhões de anos, dando origem a toda uma série de produtos, inclusive o rádio.

Deixando de lado os detalhes dessas transformações, podemos dizer que finalmente o urânio se desintegrou em um átomo de chumbo e oito átomos de hélio. Estes últimos são ejetados com grandes velocidades e constituem os raios alfas.

Se houvesse um minério de urânio de quatro bilhões de anos, ele deveria conter tanto chumbo quanto urânio. Tal mineral não existe. É concebível que a observação do teor de chumbo dos minérios de urânio encontrados nas diversas camadas geológicas possa fixar a duração destes; descobrimos que existem rochas de dois bilhões de anos.

Mas de onde vem o próprio urânio? Ele mesmo tem um parente desaparecido? Ele existe há muito mais do que quatro bilhões de anos? Mas então o que aconteceu com o chumbo produzido? Não há muito mais chumbo do que urânio.

Mais recentemente, parecia que a radioatividade, longe de ser um fenômeno específico de algumas famílias de corpos, era um fenômeno bastante geral.

Não é apenas o chumbo que é um elemento estável produzido pela desintegração de um corpo radioativo. Ao lado da radioatividade natural, existe a radioatividade artificial, que mostra que todos os corpos estáveis podem ter sido o produto da desintegração de corpos radioativos que é possível produzir artificialmente. Esses corpos não existem mais, sem dúvida porque não há ancestral, como o urânio, com vida média suficiente, mas pode-se fazê-los passar artificialmente, em sentido contrário, aos últimos estágios que os elementos das famílias radioativas naturais.

A hipótese segundo a qual todos os corpos atuais resultam de transformações radioativas encontrou recentemente uma base experimental certa.

Essa hipótese foi, no entanto, proposta, quando esses fatos experimentais ainda não eram conhecidos, com base em considerações de outra natureza.

Sabemos que, se a energia se conserva em quantidade total, no entanto tem tendência a degradar-se, isto é, a modificar-se de forma uni-

lateral de tal forma que uma certa quantidade, a “entropia”, aumenta em qualquer sistema fechado.

O caso mais simples e fundamental é aquele em que essas noções são aplicadas à radiação do corpo negro acompanhada da quantidade mínima de matéria necessária para atingir o equilíbrio termodinâmico.

Verificamos, neste caso, que a entropia da radiação negra é medida pelo número de fótons que a constituem e que durante as misturas irreversíveis a energia cuja quantidade total permaneceu a mesma foi distribuída em um maior número de pacotes elementares, de quanta, de fótons distintos.

Do ponto de vista quântico, o princípio de degradação de energia aparece, portanto, como um princípio de pulverização de energia.

As transformações radioativas fornecem outro exemplo de transformações irreversíveis em que um núcleo atômico se quebra em nove fragmentos, espalhando a energia originalmente condensada.

Esses dois exemplos extremos permitem afirmar que a transposição para a linguagem quântica do princípio da degradação da energia é que a matéria existe em pacotes de energia ou quanta distintos e que no jogo natural das transformações, a energia total, sempre a mesma, finalmente se vê dividida em um número cada vez maior de fragmentos.

Considerando uma origem fotônica da matéria, Jeans sugeriu, assim, como um começo possível, uma radiação eletromagnética de comprimento de onda baixíssimo, que sem dúvida apresentaria, segundo ele, as possibilidades necessárias. Mas quem diz comprimento de onda muito curto diz alta frequência, e como a energia individual dos fótons é proporcional à sua frequência, fótons de alta energia individual e portanto em número pequeno.

Essas considerações levam a supor como condição inicial a partir da qual o universo atual poderia evoluir, através do jogo de leis físicas e mecânicas conhecidas, daquilo que chamei de hipótese do átomo primitivo.

De acordo com esta hipótese, o universo teria começado em um estado onde a energia total estava concentrada em um único quantum em um único pacote de energia que dificilmente pode ser representado de outra forma que não seja um núcleo atômico.

A tendência da matéria a se pulverizar não seria aqui senão a instabilidade radioativa do átomo primitivo; os próprios fragmentos radioativos se desintegrariam por sua vez, assim como os membros sucessivos das famílias naturais de corpos radioativos. A fragmentação parou quando chegamos a elementos estáveis, ou corpos de vida longa como o urânio.

O átomo primitivo não deve ser considerado um transurânico. Pode ser um isótopo de massa extremamente grande de corpos atuais e até, mais provavelmente, do nêutron.

Atualmente existe uma tendência de dar aos núcleos atômicos uma certa estrutura e uma certa complexidade. A física do núcleo ainda está em sua infância e não parece estabelecido que o núcleo seja realmente um complexo sistema de partículas elementares. Entretanto, se prevalecesse essa tendência, bastaria considerar o átomo primitivo como tendo um máximo de concentração e um mínimo de entropia. Seríamos, sem dúvida, levados a atribuir-lhe um raio que não seria completamente nulo, mas que teria alguns minutos de luz e, portanto, astronomicamente falando, seria bastante insignificante em comparação com as dimensões atuais do universo.

Uma hipótese como a do átomo primitivo esbarra em objeções que, à primeira vista, parecem destinadas a lhe ser fatais.

Em primeiro lugar, onde estava esse átomo, durante sua desintegração e como entender que tendo sido originalmente um fenômeno tão estritamente localizado, pode-se obter um universo que as observações astronômicas mostram ser globalmente homogêneo?

Uma segunda dificuldade é causada pela radiação que é acompanhada pelas transformações radioativas, radiação que não pode deixar de ocorrer e sem dúvida com uma energia muito maior ainda para essas transformações antigas, que devem ter envolvido massas atômicas muito consideráveis. O que aconteceu com essa radiação, não devemos observá-la?

Finalmente, a terceira dificuldade, como conceber que a partir da desintegração primitiva se obtenha, em um tempo não muito maior que o da vida média do urânio, o universo atual formado por estrelas organizadas em galáxias?

Tentaremos explicar como essas três dificuldades são resolvidas.

A primeira é explicada pelos conceitos geométricos introduzidos em 1854 por Riemann. Riemann fez a observação muito simples de que não há conexão lógica entre as duas noções seguintes: a de um volume de medida finita e a de uma extensão determinada por um limite que a separa de uma extensão exterior. A conexão que o “senso comum” estabelece entre essas duas noções logicamente independentes deve-se unicamente à intuição geométrica que adquirimos nos experimentos geométricos em que se baseia nosso senso comum. Em outras palavras, rejeitamos a possibilidade de um espaço sem limites que, no entanto, tem um volume finito, não porque seria absurdo, mas porque nunca vimos nada parecido.

Como não temos intuições diretas de um espaço de milhões ou bilhões de anos-luz e como as propriedades geométricas podem muito bem depender de suas dimensões, de forma que a semelhança geométrica seria apenas uma aproximação para figuras muito pequenas, as únicas que sabemos diretamente, pode muito bem ser que o espaço real seja de volume finito e não tenha limites.

Poderíamos assim conceber que, levando em todas as direções um comprimento, digamos, de dez bilhões de anos-luz, teríamos encontrado em um ou outro desses raios levados em todas as direções todas as nebulosas que existem. Fora do espaço assim delimitado, não há nada. Mas então você vai me dizer o que acontecerá se quisermos estender um desses raios dez bilhões de anos-luz. A solução dos geometras é a seguinte: este raio bate por sua extremidade contra a extremidade do raio semelhante traçado na direção oposta. É impossível imaginar isso com uma imaginação que só foi capaz de se treinar em volumes minúsculos em escala humana. Mas não há dificuldade em conceber que dois emissários correndo dez bilhões de anos-luz em duas direções opostas finalmente se encontrarão face a face. Se representarmos em pequena escala humana o que acabamos de afirmar para o espaço total, somos levados a representar todo o espaço dentro de uma pequena esfera, esta esfera tem uma borda, mas nessa borda os pontos reais são representados duas vezes, como em um planisfério os pontos do centésimo octogésimo meridiano são representados duas vezes nas duas bordas do mapa.

Nosso mapa esférico do espaço é limitado por

um limite, a borda do mapa. Quando chegarmos a esta borda e parecermos forçados a sair do mapa, se quisermos continuar avançando, basta lembrar que este ponto da borda que estamos alcançando também está representado no ponto oposto da esfera, para que possamos nos mover para esta outra representação do mesmo ponto, continue a jornada caminhando para dentro.

A linha reta formada pelos dois raios opostos de dez bilhões de anos-luz é, portanto, soldada em uma única linha fechada, tendo como comprimento total, ou “volta da linha” vinte bilhões de anos-luz. Por razões técnicas designa-se sob o nome de raio de espaço o terço da circunferência da linha.

É concebível que a circunferência da linha, ou o que dá no mesmo, o raio do espaço, varie com o tempo. Obtemos então o que se chama de espaço de raio variável. Suponha que o raio aumente com o tempo. As nebulosas que estão distribuídas no espaço e o preenchem uniformemente irão, portanto, separar-se umas das outras. Se, por exemplo, em torno de uma linha reta, vinte mil nebulosas estão alinhadas que dividem essa linha reta em partes iguais, então, quando o comprimento da linha reta aumenta, a distância das nebulosas individuais deve aumentar na mesma proporção. Encontramos o fenômeno astronômico da expansão do sistema nebuloso e agora o interpretamos como uma indicação de que o raio finito do espaço está aumentando.

No passado, o raio do espaço era menor. Nada nos impede de supor que, no momento em que o átomo primitivo se desintegrou, o raio do espaço era extremamente pequeno, de modo que esse átomo, que representamos para nós mesmos como tendo apenas cerca de dez minutos de raio de luz, preencheu todo o espaço, o raio deste não sendo maior. Astronomicamente, diríamos que o raio do espaço começa do zero, quando o átomo começa a se desintegrar. Os fragmentos resultantes dessa desintegração podem, portanto, preencher uniformemente o espaço de raio crescente e, quando a desintegração avança e o raio aumenta, a matéria continua a preencher uniformemente todo o espaço. Podemos, portanto, conceber como, da desintegração do átomo primitivo, pode resultar um universo globalmente homogêneo.

Esta é a explicação da primeira dificuldade.

A segunda dificuldade diz respeito ao que acon-

teceu com o raio emitido durante desintegrações sucessivas.

Em primeiro lugar, pode-se mostrar que a intensidade dessa radiação é reduzida, numa proporção igual à do raio do espaço no momento da emissão para o raio no momento da observação.

Os primeiros raios são assim perdidos para observação; os raios que nos chegam correspondem a um compromisso entre a energia de emissão que sem dúvida diminuiu à medida que a fragmentação avançava e o fator de redução que aumentava à medida que aumentava o raio do espaço.

Parece que esta radiação pode ser identificada com os raios cósmicos. Isso está de acordo com a qualidade dos raios cósmicos, dos quais pelo menos uma parte tem uma intensidade individual que supera qualquer fenômeno, mesmo nuclear, atualmente existente. Isso parece indicar que corresponde a fenômenos atualmente esgotados.

Do ponto de vista quantitativo, devemos comparar a intensidade total dos raios cósmicos com a de toda a matéria, pois é toda a matéria que atualmente está organizada em estrelas que um dia lhes deram origem.

Einstein mostrou que a energia é equivalente à matéria e deu uma fórmula simples para dizer quantos gramas pesa a unidade de energia de um erg. Podemos, portanto, transformar em gramas por centímetro cúbico os valores dados pelos físicos para a intensidade da radiação cósmica em ergs por centímetro quadrado, (é preciso dividir por c^3). Encontramos 10^{-34} gramas por cm^3 . Por outro lado, encontra-se 10^{-30} gramas por cm^3 para a matéria da nebulosa assumida como distribuída uniformemente pelo espaço. Para um fator de redução devido à variação do raio de cem ou mil, os raios são encontrados como um ou dez por cento da energia material. Isso é o que se espera para a radiação de transformações análogas às atuais.

A densidade 10^{-30} g/ cm^3 foi obtida com base na distância média das nebulosas e na observação espectroscópica da rotação em torno de seu centro de algumas das mais brilhantes entre elas. A massa é então estimada assumindo que a atração gravitacional que ela exerce sobre um ponto da borda é suficiente para compensar a força centrífuga devido à rotação que tenderia a fazê-la escapar para o espaço.

Para esclarecer o terceiro ponto, precisamos fa-

lar sobre a teoria da relatividade.

Einstein mostrou que a teoria da gravitação de Newton é uma aproximação de uma teoria mais profunda, onde a matéria aparece como uma manifestação do caráter não euclidiano do espaço, ou melhor, do espaço-tempo.

Esta teoria é confirmada pela observação de pequenos desvios da lei de Newton que a teoria prevê e o mais famoso dos quais é uma pequena perturbação do planeta Mercúrio para a qual Leverrier já se aventurou a prever a existência de um planeta, cujos elementos ele havia calculado, e ao qual ele havia dado o nome de Vulcano, mas que não se mostrou fiel ao encontro matemático. Esta perturbação é uma consequência da nova teoria.

A teoria da relatividade prediz que, mesmo na aproximação newtoniana, outra força poderia estar presente, além da atração na razão inversa do quadrado da distância; esta outra força, ao contrário da primeira, aumentaria com a distância. Poderia ser totalmente insensível na observação dos planetas e só se manifestar quando as distâncias se tornam muito grandes, ou seja, em escala cósmica. Esta força depende de uma constante à qual demos o nome de constante cosmológica. A teoria não indica sua magnitude ou seu sinal (nem indicou o da constante de atração universal). O caso interessante é quando a nova força seria uma repulsão, pois assim ela pode contrabalançar a atração newtoniana e levar a um equilíbrio entre as duas forças.

É possível calcular a constante cosmológica, se conhecermos a densidade da matéria. Para o valor 10^{-30} gr/cm³ indicado acima, e para o valor da expansão em dois bilhões de anos, verificamos que a repulsão cósmica atualmente prevalece sobre a atração gravitacional e que essas duas forças se equilibraram quando o raio do espaço era dez vezes menor do que é agora. Esses cálculos dão para o raio atual o valor de cerca de dez bilhões de anos-luz que usamos acima.

Como nos aglomerados de nebulosas a distância das nebulosas é cerca de dez vezes menor do que nas nebulosas isoladas, somos levados a interpretar esses aglomerados como regiões ainda parcialmente em equilíbrio. Há, no entanto, uma dificuldade advinda das altas velocidades das nebulosas desses aglomerados, velocidades que parecem fazer com que o sistema se disperse. Mas, por outro lado, o aglomerado constitui um centro

de atração para as nebulosas externas e estas podem, até certo ponto, substituir as nebulosas que escapam.

Somos assim levados a admitir que o raio do espaço, que partia praticamente do zero, aumentava cada vez com menor velocidade e alcançava, e ultrapassava lentamente, o valor do bilhão de anos em que se deu o equilíbrio entre a atração e a repulsão, a expansão retomando em seguida a um ritmo acelerado.

É essa lenta passagem pelo equilíbrio que nos dará a solução para nossa terceira dificuldade. De fato, esse equilíbrio é instável. Bastam pequenos desvios locais de densidades e velocidades, nas condições médias que asseguram esse equilíbrio, de modo que, localmente, a expansão desacelerada, em vez de ser seguida de uma retomada da expansão, seja seguida de uma contração. Localmente a matéria retrocede para um centro accidental de condensação, enquanto o sistema como um todo retoma sua expansão. Condensações locais, portanto, separam-se umas das outras como fazem as nebulosas extragalácticas.

O desenvolvimento posterior da teoria depende da ideia que se pode ter do estado da matéria no momento em que ocorrem essas condensações locais que devem ser interpretadas como nebulosas extragalácticas.

É preciso encontrar para esse estado intermediário as condições que podem resultar da desintegração inicial e das quais pode resultar o mundo atual.

Acredito que devemos imaginar, nesse estado intermediário, a matéria como formada por nuvens gasosas movendo-se umas em relação às outras a velocidades muito altas.

Essas nuvens teriam a densidade de equilíbrio e teriam pouca tendência a se contrair. Se, ao contrário, duas dessas nuvens se encontrassem, elas se achatariam uma sobre a outra enquanto a energia cinética se dissiparia em radiação; uma vez iniciada a contração, a atração gravitacional dominando a repulsão cósmica transformaria o sistema em uma estrela ou, se o momento angular for suficiente, em um sistema de estrelas e satélites.

Esses encontros entre as nuvens ocorrerão especialmente nas regiões de condensação onde as nuvens se chocam. Isso terá duas consequências. Em primeiro lugar, uma parte notável das nuvens

se transformará em estrelas. Em segundo lugar, como resultado da dissipação de energia durante as colisões entre nuvens, o sistema pode adquirir um alto grau de condensação central.

A suposição de que as nuvens se movem com grandes velocidades relativas é necessária para explicar que, em aglomerados de nebulosas, as nebulosas individuais se movem com grandes velocidades.

Devemos realmente conceber que uma nuvem anormalmente densa pode servir como um núcleo de condensação em torno da qual uma nebulosa se formará. Este núcleo só poderá reter, entre as nuvens que passam perto dele, aquelas que têm quase a mesma velocidade que ele, as demais escaparão de sua atração. A velocidade das nebulosas é, portanto, uma manifestação da velocidade das nuvens das quais elas foram formadas.

As idéias que acabamos de indicar são suscetíveis de estudo quantitativo. Devemos ser capazes de deduzir as condições iniciais para a formação de uma nebulosa, um núcleo central retendo todas as nuvens, até a velocidade de escape. Este problema é fácil e está resolvido. Mas ainda seria necessário monitorar o efeito dos choques entre as nuvens sobre sua distribuição e o grau de concentração das nebulosas que elas formam.

Este aspecto do problema é muito mais difícil e a solução está longe de ser completa.

Se esse cálculo pudesse ser feito, forneceria uma distribuição teórica de densidades em uma nebulosa. Como a distribuição real é conhecida pela observação fotométrica das nebulosas extragalácticas, a comparação dos dois resultados, astronômico por um lado, teórico por outro lado, poderia fornecer um confronto decisivo da teoria com os fatos.

Agora que percebemos que o estado intermediário da matéria ou estado pré-estelar consiste em nuvens gasosas que se movem em alta velocidade, devemos examinar se podemos explicar a origem dessas nuvens no âmbito da nossa teoria.

A questão é entender como um gás, a partir dos produtos de desintegrações sucessivas do átomo primitivo e seus fragmentos. No início, devemos ter núcleos atômicos movendo-se com velocidades enormes como nos raios alfa que são núcleos de hélio.

Núcleos ainda mais massivos devem, como raios de canal, possuir altas velocidades de re-

cuo. Certamente essas partículas às vezes devem se encontrar: mas choques muito violentos não podem ser, como nos gases, choques elásticos, esses choques destrutivos devem simplesmente causar novas transformações nucleares. Como essa radiação pode ter se separado em uma parte que resta da radiação e é observada como raios cósmicos, e uma parte que formou as nuvens gasosas das quais nasceram as estrelas e as nebulosas?

Há um fenômeno relacionado à expansão do espaço que fornece um elemento de solução para esse problema. Este fenômeno é muito análogo à atenuação da radiação como resultado da expansão, que mencionamos várias vezes em nossa exposição.

Para perceber isso, tomemos nossa imagem de pontos igualmente distribuídos em retas partindo do mesmo centro e de comprimento igual a metade da volta da reta.

Todos esses pontos se afastam do centro da representação com velocidades tanto maiores quanto mais se afastam dele.

Eles representam a velocidade normal no universo em expansão.

Agora suponha que um átomo tenha uma velocidade anormal. Suponhamos, por exemplo, que ela esteja no centro, onde, em nossa representação, a velocidade normal é zero, e que, ao contrário, ela seja movida por uma alta velocidade. Então, ele se afastará do centro ao longo de um dos raios, alcançará regiões cada vez mais distantes, onde a velocidade normal não é mais zero, a alta velocidade com que se move se tornará cada vez menos anormal. No entanto, ele não vai deixar a representação. Se ele atingir a borda, ele voltará na direção oposta. Se voltar ao centro, voltará para lá com uma velocidade bem menor do que tinha na largada.

A sua velocidade própria será, de fato, reduzida na proporção da expansão, ou seja, na proporção dos valores do raio do espaço no início e no fim.

Nos estágios iniciais da expansão, esse fenômeno deve ter reduzido consideravelmente as velocidades próprias, ou seja, a diferença entre a velocidade individual e a velocidade normal no local por onde a partícula passa.

Podemos então entender que, como resultado dessa atenuação das dispersões das velocidades, os átomos têm alguma chance de se encontrarem às vezes, com velocidades relativas baixas o su-

ficiente para que o choque seja elástico e se isso se repetir com bastante frequência e envolver um número suficiente de átomos para formar localmente uma nuvem gasosa.

Entendemos que apenas nuvens gasosas são formadas, porque é muito improvável que o fenômeno que estamos invocando tenha ocorrido em todos os lugares ao mesmo tempo.

Também entendemos que essas nuvens são animadas por altas velocidades umas em relação às outras, pois são provenientes de partículas rápidas, viajando com quase a mesma velocidade, mas que podem ter uma alta velocidade comum.

Este é o estado atual da hipótese do átomo primitivo. Talvez vocês a considerem digna de consideração e de ser implementada do ponto de vista técnico. Sem dúvida também, vocês podem achar prudente suspender o julgamento até que um confronto crucial possa ser feito com os fatos.

Não podemos terminar esta apresentação sem considerar por um momento a própria origem que nossa teoria dá ao universo: o momento inicial, a fragmentação inicial; o momento em que o espaço nasceu com um raio partindo de zero, o momento em que a multiplicidade nasceu na matéria.

Esta origem surge-nos, no espaço-tempo, como um pano de fundo que desafia a nossa imaginação e a nossa razão, opondo-lhes uma barreira que não podem transpor. O espaço-tempo nos aparece, semelhante a um corte cônico. Progredimos rumo ao futuro seguindo os geradores do cone até a borda externa do vidro. Contornamos o espaço

percorrendo um círculo normalmente até as geratrizes. Quando subimos em pensamento o curso do tempo, nos aproximamos do fundo do copo, nos aproximamos desse momento único, que não teve ontem porque ontem não havia espaço.

Começo natural do mundo, origem para a qual o pensamento não pode conceber uma pré-existência, pois é o próprio espaço que começa e nada podemos conceber sem espaço. O tempo parece poder estender-se à vontade tanto para o passado como para o futuro. Mas o espaço pode começar, e o tempo não pode existir sem espaço, então pode-se dizer que o espaço estrangula o tempo e o impede de se estender além do fundo do espaço-tempo.

Mas esta origem é também o começo da multiplicidade. É um momento em que a matéria é um único átomo, um momento em que as noções estatísticas que assumem a multiplicidade não têm utilidade. Pode-se perguntar se nestas condições a própria noção de espaço não se esvai no limite e só gradualmente adquire um sentido à medida que a fragmentação termina e os seres se multiplicam.

Devemos reclamar que nossas noções mais familiares desaparecem quando se aproximam do termo final que não devem passar? Eu não penso assim.

Para encerrar, não posso deixar de recordar a palavra de René Descartes com a qual comecei e que sem dúvida também se aplica ao átomo primitivo: *Mundus est fabula*.