

As origens da cosmologia científica: uma reconstrução racional lakatosiana

The origins of scientific cosmology: A Lakatosian rational reconstruction

Danilo Miranda Rodrigues | Universidade de São Paulo

danilo.rodrigues@usp.br

<https://orcid.org/0000-0001-7499-646X>

José Raymundo Novaes Chiappin | Universidade de São Paulo

chiappin@usp.br

<https://orcid.org/0000-0003-3202-2274>

RESUMO O artigo se insere em uma tradição existente de estudos de caso sobre a epistemologia de Imre Lakatos. Seu objetivo consiste em descrever uma reconstrução racional da cosmologia científica, cujo estatuto de cientificidade se consolida após a primeira metade do século XX, em uma combinação entre trabalhos teóricos e empíricos. Os critérios lakatosianos não nos permitem classificar a concepção de universo formulada por Albert Einstein como um programa de pesquisa. Podemos classificá-la, todavia, como uma tentativa de programa, que será recuperada em boa medida pelas contribuições de Friedman, Lemaître e Hubble. Argumentamos, ao longo deste artigo, que a cosmologia do século XX pode ser descrita em termos da concepção do Programa de Pesquisa de Friedman-Lemaître, uma vez que identificamos em ambas as contribuições a presença de um mesmo núcleo de teses e axiomas fundamentais, que será preservado nos trabalhos posteriores, como o modelo do big bang e o modelo do estado estacionário.

Palavras-chave: cosmologia – Lakatos – Einstein – Friedmann e Lemaître – universo.

ABSTRACT *The present article fits into an existing tradition of case studies on the epistemology of Imre Lakatos. Its objective is to describe a rational reconstruction of scientific cosmology, whose scientific status was consolidated after the first half of the 20th century, in a combination of theoretical and empirical works. Lakatosian criteria do not allow us to classify the conception of the Universe formulated by Albert Einstein as a Research Program. We can classify it, however, as an attempt at a program, which will be largely recovered by the contributions of Friedman, Lemaître and Hubble. We*

argue throughout this essay that 20th century cosmology can be described in terms of the conception of the Friedman-Lemaître Research Program, since we identify in both contributions the presence of the same core of fundamental theses and axioms, which will be preserved in later works, such as the big bang model and the steady state model.

Keywords: *cosmology – Lakatos – Einstein – Friedmann and Lemaître – universe.*

Introdução

As relações entre história e filosofia da ciência são muito profundas e férteis. A inseparabilidade de ambas é expressa no famoso epítome de Immanuel Kant: “a história da ciência sem a filosofia da ciência é cega, a filosofia da ciência sem a história da ciência é vazia”. Dentro dessa vasta interface entre as duas áreas de pesquisa, podemos observar, por um lado, instrumentos filosóficos utilizados para a análise de episódios históricos: seus aspectos racionais, sua progressividade e, por exemplo, o papel desempenhado pelos dados empíricos na gênese de diferentes concepções de mundo. Por outro lado, episódios históricos são comumente utilizados para avaliar as diferentes propostas epistemológicas em seu caráter descritivo ou em sua compatibilidade com a “história real” da ciência. Esse segundo aspecto se mostrou mais nítido nos grandes trabalhos na área de filosofia da ciência a partir dos anos 1960, período popularmente conhecido como “virada historicista”. Nesse período, surgiram os importantes trabalhos de Imre Lakatos, cujo nascimento acaba de completar seu centenário. Ele consolidou-se como um dos mais célebres filósofos da ciência no século XX e sua obra é, até hoje, objeto de bastante estudo e aplicações (Moulines, 2020).

O objetivo do presente artigo é realizar uma reconstrução racional, tal como concebida por Lakatos, da cosmologia científica. Esse empreendimento torna possível tanto avaliar a adequação da epistemologia do autor na descrição da história da ciência quanto empreender, em alguma medida, uma demarcação da história racional nessa área, inserindo o presente trabalho em uma extensa tradição de aplicação dos instrumentos de Lakatos em diferentes áreas da história da ciência. Lakatos descreve que a história da ciência é marcada pela competição entre programas de pesquisa e que diferentes teorias formuladas em determinada área da ciência podem possuir um “núcleo duro” em comum. Quando isso ocorre, ele identifica que tais teorias são parte de um mesmo programa de pesquisa.

Todavia, há importantes trabalhos que buscaram verificar a aplicabilidade da epistemologia de Lakatos e, para tal fim, confrontaram-na com episódios históricos da ciência, de onde vieram alguns registros de dificuldades e limitações em sua abordagem. Dentre os principais estudos de caso sobre sua metodologia, podemos destacar as robustas reconstruções racionais elaboradas pelo próprio Lakatos sobre o copernicanismo (Lakatos; Zahar, 1978) e por Zahar, sobre a teoria da relatividade (Zahar, 1973). Entre os estudiosos brasileiros, destacamos o estudo de caso da mecânica quântica produzido por Valter Alnis Bezerra (2004).

Também podemos citar os textos de José Raymundo Novaes Chiappin (1996) sobre a reconstrução racional do racionalismo, utilizando em partes, e com algumas modificações, os instrumentos lakatosianos. Muitas outras aplicações da sua epistemologia merecem destaque, mas citamos essas obras – que se mostraram bastante relevantes, algumas das quais infelizmente não foram respondidas por ele, também por conta de sua prematura morte – pelas particulares dificuldades relatadas pelos autores na tentativa de aplicação da epistemologia de Lakatos.

Sobre as origens da cosmologia científica

O primeiro desafio que se revela a uma tentativa de reconstrução racional sobre qualquer episódio da história da ciência é a identificação de seu núcleo duro. Existem diversas interpretações possíveis sobre a origem da cosmologia, desde puras especulações sobre o universo, que podem ser encontradas em textos de antigos pensadores, até a contemporânea prática científica, com seus métodos e instrumentos. Todavia, no início do século XX, há uma importante ruptura com a cosmologia praticada até então. Um olhar em retrospecto, partindo daquela praticada atualmente, permite-nos reconhecer um núcleo de teses, axiomas e princípios que remetem, no máximo, ao início do século XX.

Uma relação importante entre ciência e tecnologia pode ser inferida desta discussão: os limites tecnológicos demarcam os limites do alcance científico. Ao longo dos séculos, o ser humano foi, gradativamente, estabelecendo métodos e coletando dados que lhe permitissem medir distâncias maiores. Conseqüentemente, os modelos cosmológicos passaram a se tornar mais complexos e a contemplar maiores e mais distantes estruturas em larga escala. Uma questão diretamente relacionada às origens da cosmologia envolveu a possível existência de outras galáxias, caso contrário, o universo material seria restrito à Via Láctea, cercada ou não por um imenso vazio. A hipótese dos “universos-ilhas” remete, pelo menos, ao grande filósofo Immanuel Kant. Importante suporte empírico sobre a estrutura da nossa galáxia é fornecido por William Herschel (1738-1822), considerado um dos maiores construtores de telescópios do século XVIII.

Em 1783, com a intenção de determinar o formato do universo em nossa redondeza, Herschel finaliza a construção de um dos primeiros grandes telescópios refletores e, com esse instrumento, identifica mais de 3.400 diferentes estrelas. Assumindo que as de brilho mais fraco estejam mais distantes (o que não é necessariamente verdade), elabora um modelo tridimensional da nossa galáxia (King, 1979, p. 77). Herschel observou movimentos estelares preferencialmente no plano da galáxia, lançando luzes sobre o importante questionamento acerca da natureza das nebulosas, que são, em sua maioria, outras galáxias.

Na virada do século XIX para o XX, essa questão estava longe de ser resolvida, tanto que encontramos artigos desse período favoráveis e contrários à hipótese de o universo estar encerrado apenas em nossa galáxia. De certa forma podemos dizer que tal controvérsia foi cosmológica, pois continha uma discussão que envolvia a real extensão do cosmos. No artigo de Richard A. Proctor, publicado pela Royal Astronomical Society, encontramos uma leitura não muito favorável à existência de múltiplas galáxias espalhadas pelo universo, apesar da ausência de uma afirmação direta e categórica. O autor defende que os movimentos próprios são indicadores de distâncias estelares mais confiáveis do que seus respectivos brilhos aparentes. Como consequência, considera superestimadas algumas medidas de distâncias obtidas previamente. Seria necessário, portanto, considerar menores não apenas as dimensões conhecidas da Via Láctea, como também suas distâncias às estrelas de suas vizinhanças conhecidas até então.

Acredito que pesquisas futuras provarão não apenas que a Via Láctea como um todo está muito mais próxima do que temos imaginado, mas que partes dela estão absolutamente mais próximas de nós do que a mais brilhante das estrelas isoladas. Que partes da Via Láctea, por exemplo, na vizinhança de Alfa-Centauro, estejam mais próximas de nós do que essa estrela, acho que todo o aspecto da galáxia naquela vizinhança é suficiente para sugerir, se não para demonstrar (Proctor, 1869, p. 337).

Encontramos, em outro texto do mesmo período, também extraído dos anais da Royal Society, uma leitura bastante divergente sobre a Via Láctea e outros corpos no universo. O artigo de Cleveland Abbe, de 1876, aproxima-se bastante da compreensão moderna sobre a natureza das galáxias. Sem pretender incorrer em uma leitura excessivamente anacrônica, observamos, em seu texto, um forte indicativo de que o cosmos seja povoado por imensos aglomerados de estrelas, tais como a consagrada expressão “universos-ilhas” descreve as galáxias. Tomando como referência o grande catálogo de 1864, elaborado por John Herschel, o autor expõe o que considera ser a possível natureza das nebulosas mais conhecidas e próximas de nós.

O universo visível é composto por sistemas, dos quais a Via Láctea, a Grande e a Pequena Nuvem de Magalhães, e a Nebulosa, são os indivíduos, e que são eles próprios compostos de estrelas (simples, múltiplas ou em aglomerados) e de corpos gasosos, com contornos regulares e irregulares (Abbe, 1867, p. 262).

No mesmo artigo, o autor cita que “um exame cuidadoso foi suficiente para mostrar que a Grande e a Pequena Nuvem de Magalhães são agrupamentos distintos, independentes entre si e isolados da Via Láctea” (Abbe, 1867, p. 258), reforçando novamente a interpretação da existência de agrupamentos estelares independentes de nossa galáxia e quão vivo esse debate se encontrava na virada do século XIX para o século XX. Uma importante contribuição para o debate sobre as nebulosas é oferecida por Vesto Slipher, mais especificamente, por seu catálogo de nebulosas publicado em 1917. O autor apresenta resultados espectroscópicos de suas medidas realizados desde 1912 no observatório Lowell. Seu trabalho apresenta a velocidade radial de 25 nebulosas, algumas com sinal negativo, o que indica movimento de aproximação do Sistema Solar, e a grande maioria com velocidades de afastamento.

Diferentemente de outros contemporâneos, que foram mais cautelosos e não associaram imediatamente suas medidas espectroscópicas e seus desvios para a região do vermelho a movimentos de recessão de suas fontes, tal atitude é assumida por Slipher (1917), que cita categoricamente as “velocidades radiais” de suas nebulosas observadas.

RADIAL VELOCITIES OF TWENTY-FIVE SPIRAL NEBULÆ.

Nebula.	Vel.	Nebula.	Vel.
N.G.C. 221	- 300 km.	N.G.C. 4526	+ 580 km.
224	- 300	4565	+ 1100
598	- 260	4594	+ 1100
1023	+ 300	4649	+ 1090
1068	+ 1100	4736	+ 290
2683	+ 400	4826	+ 150
3031	- 30	5005	+ 900
3115	+ 600	5055	+ 450
3379	+ 780	5194	+ 270
3521	+ 730	5236	+ 500
3623	+ 800	5866	+ 650
3627	+ 650	7331	+ 500
4258	+ 500		

Figura 1: velocidades de galáxias por meio do efeito Doppler (Slipher, 1917, p. 405)

O trabalho de Slipher é importante para situarmos a cosmologia no início do século XX. Uma importante controvérsia entre H. Curtis e H. Shapley, em 1920, sobre a natureza das nebulosas, ficou conhecida como “o grande debate”, cuja solução teria que esperar até a publicação de Edwin Hubble, em 1923, quando seriam apresentados relevantes resultados sobre as distâncias das mesmas nebulosas, além da significativa relação entre distâncias e velocidades radiais (Hubble, Humason, 1931). Tais publicações nos permitem sentir o “clima acadêmico” sobre a natureza de tão estranhos objetos no ano da publicação do artigo cosmológico de Einstein, também em 1917.

O universo de Einstein: uma tentativa de programa de pesquisa

O artigo de Einstein de 1917 é considerado, a depender do que se entende por ciência, um dos pontapés iniciais da cosmologia científica. O autor busca aplicar suas concepções de espaço-tempo e matéria para o universo como um todo. A importância desse texto é bastante reconhecida por historiadores da cosmologia.

Albert Einstein não inventou a cosmologia, mas a colocou em uma base inteiramente nova e, como se viu, extremamente frutífera. É geralmente aceito que as sementes de uma revolução na cosmologia teórica foram plantadas quando Einstein completou sua Teoria Geral da Relatividade no outono de 1915 (Kragh, 1996, p. 6).

Observamos, ao longo das páginas iniciais do artigo de Einstein, que o “cenário cosmológico” no início do século passado ainda remetia ao modelo imaginado por Newton. Einstein inicia seu texto resumindo a concepção newtoniana de universo. Nessa concepção, o universo é infinito espacialmente e povoado por estrelas homoganeamente distribuídas. Há uma conhecida troca de cartas entre Newton e um religioso britânico, conhecido como reverendo Benthán. Nela, podemos observar o modelo de universo, lembrado e analisado por Einstein no início de seu texto.

Quanto à sua primeira pergunta, parece-me que, se a matéria do nosso Sol e seus planetas, e toda a matéria do universo, fosse uniformemente espalhados pelo céu, e se toda partícula tivesse uma gravidade inata em relação a todo o resto, e se todo o espaço, no qual se dispersasse essa matéria fosse não mais do que finito; a matéria no exterior desse espaço tenderia, por sua gravidade, para toda a matéria do interior dele, e, conseqüentemente, se concentraria no meio do espaço, formando ali uma grande massa esférica. Mas, se a matéria fosse distribuída uniformemente por um espaço infinito, ela jamais se reuniria numa massa única, mas parte dela se reuniria numa massa e parte em outra, formando então um número infinito de grandes massas, espalhadas a grandes distâncias uma da outra através de todo esse espaço infinito. E assim poderiam ser formados o sol e as estrelas fixas (Cohen e Westfall, 2002, p. 400).

Ao longo do intervalo de mais de 200 anos entre estes dois notáveis cientistas, não temos registros de observações empíricas utilizadas para sustentar alguma outra hipótese de natureza cosmológica. Até mesmo, na segunda metade do século XIX, boa parte dos círculos acadêmicos

procurou distanciar-se da cosmologia por seu caráter ser supostamente especulativo sem possibilidade de verificação empírica. Não nos surpreende, portanto, que, nas primeiras páginas de seu artigo, Einstein analise o universo newtoniano à luz dos então recentes avanços na mecânica dos fluidos e na mecânica estatística. Como uma aproximação, substitui a segunda lei de Newton pela bem conhecida equação de Poisson, somada às equações de movimento e às condições de fronteira do sistema em questão: o próprio universo.

$$\nabla^2 \varnothing = 4\pi G\rho$$

Para o caso de uma distribuição sem matéria (solução de De Sitter), essa equação se reduz à também bem conhecida equação de Laplace. Com o formalismo da equação de Poisson, ele dá início a uma verificação acerca das condições de fronteira deste grande fluido no modelo newtoniano de universo.

Segue-se então da equação de Poisson que, para que \varnothing possa tender a um valor limitado no infinito, a densidade média ρ deve tender a zero mais rapidamente do que na proporção inversa do quadrado da distância, conforme a distância r do centro aumenta. Nesse sentido, portanto, o universo segundo Newton é finito, embora possa possuir uma massa total infinitamente grande (Einstein, 1917, p. 2).

A conclusão no início de seu artigo é que, de acordo com a equação de Poisson, toda a massa do universo deve, necessariamente, ocupar uma porção finita do espaço (para que o potencial gravitacional não se torne infinito em nenhum ponto). Mas seria essa hipótese sustentável? Qual agente físico prenderia os corpos celestes a uma região limitada do espaço? Einstein, então, utiliza a mecânica estatística para descartar esta solução na qual a massa do universo está limitada espacialmente a uma região, pois seria necessário um potencial gravitacional muito intenso na fronteira desse “sistema newtoniano” e tal potencial não é compatível com as velocidades estelares observadas: “Se aplicarmos a lei de distribuição de moléculas de gás de Boltzmann às estrelas, comparando o sistema estelar com um gás em equilíbrio térmico, descobrimos que o sistema estelar newtoniano não pode existir” (Einstein, 1917, p. 2). Assim, antes de apresentar seu modelo, ele investiga e descarta as duas possíveis soluções cosmológicas fornecidas pela mecânica clássica. Para eliminar as duas contradições observadas e descritas anteriormente, Einstein lança mão de um modelo de universo com densidade constante e sem bordas ou infinitos.

Pois se fosse possível considerar o universo como um *continuum* que é finito (fechado) em relação às suas dimensões espaciais, não precisaríamos de nenhuma dessas condições de contorno. Prosseguiremos mostrando que tanto o postulado geral da Relatividade quanto o fato das pequenas velocidades estelares são compatíveis com a hipótese de um universo espacialmente finito (Einstein, 1917, p. 3).

Esse modelo de Einstein, livre das contradições nas condições de fronteira, é conhecido na literatura como “universo cilíndrico de Einstein”, no qual o raio de um hipotético cilindro representaria o raio do universo (finito) e seu eixo, a coordenada temporal. Einstein também lança mão de uma hipótese adicional: uma interação de repulsão em larga escala, representada, em seus cálculos, pela famosa constante cosmológica. Esse recurso seria responsável por impedir que toda a estrutura colapse gravitacionalmente, mantendo o universo em repouso. Em um

pequeno livro, voltado à divulgação e popularização de suas ideias, Einstein explica o motivo de lançar mão de tal hipótese, que se tornará bastante polêmica posteriormente. “A segunda hipótese (o tamanho do universo independe do tempo) se me afigurava então indispensável, pois me parecia que, se ela fosse rejeitada, iríamos cair em especulações sem fim” (Einstein, 2007, p. 111).

O autor considerou, portanto, que, naquele momento, seria mais apropriado manter a estrutura espaço-temporal estática, pelo menos em escala cosmológica, a fim de evitar considerações ainda mais vagas e especulativas, envolvendo condições de fronteiras, infinitos e instabilidades. Se, por um lado, a teoria geral da relatividade se mostrou muito bem-sucedida ao ser confrontada com testes e capaz de fazer previsões observáveis, mensuráveis e distintas das previsões newtonianas, o mesmo não podemos falar de seu modelo cosmológico. Não houve, da parte de Einstein, a consideração sobre testes empíricos que pudessem confirmar seu modelo de universo.

Portanto, nosso argumento é de que Einstein tenha apresentado uma proposta de programa de pesquisa. Proposta que não se concretizará, mas que, apesar disso, apresenta-nos um interessante núcleo duro, que será, em partes, recuperado e enriquecido por seus contemporâneos. Apresentamos abaixo nossa tentativa de demarcar o núcleo duro da sua proposta de programa cosmológico. Nele se inserem as considerações fundamentais de qualquer candidato a programa de pesquisa, irrefutáveis por decisão metodológica de seu proponente.

Identificando as teses do núcleo duro

A primeira tese do núcleo duro da proposta de programa de Einstein é seu instrumento de trabalho mais poderoso: a utilização da teoria geral da relatividade. Como o próprio nome do artigo indica, suas considerações cosmológicas assumem, como ponto de partida, a validade da teoria geral da relatividade. Tal fundamentação encontra-se em diversas partes de seu artigo, como: “de acordo com a Teoria Geral da Relatividade, o caráter métrico do *continuum* espaço-tempo quadridimensional é definido em cada ponto pela matéria naquele ponto e o estado dessa matéria”. A própria cosmologia de Einstein é uma aplicação em larga escala dos princípios da relatividade geral. A validade da teoria da relatividade é o fundamento mais sólido de sua proposta cosmológica.

Observamos, sutilmente nas linhas do texto, como Einstein utiliza as importantes contribuições da mecânica estatística e da mecânica dos fluidos. Em citação apresentada no início deste capítulo (Einstein, 1917, p. 2), ele fundamenta sua argumentação na distribuição de Boltzmann. Nessas referências, o autor compara o universo a um gás em equilíbrio térmico. A descrição do universo enquanto fluido (formado pelas estrelas) em expansão não é um passo trivial e propiciou grande parte de suas considerações, tornando-se um importante instrumento heurístico em que os possíveis comportamentos do universo são modelados por fluidos em expansão, em equilíbrio ou em compressão, a depender das condições às quais esteja submetido. Essa hipótese é, portanto, a segunda tese que guardamos no núcleo duro da proposta de programa de Einstein.

A terceira e última tese do seu núcleo duro é resultado de sua solução matemática das equações de campo. Einstein comete erros de cálculo, além de apresentar uma justificativa que nos parece insatisfatória (Lima, Santos, 2017). Como consequência, obtém um modelo de

universo estático, com a matéria em equilíbrio. Não são os argumentos matemáticos que o guiam, aparentemente é sua crença na imobilidade do universo que o conduz em sua interpretação matemática das equações da relatividade. O questionamento apresentado por Friedmann será em torno dessa hipótese (universo em equilíbrio), que não deriva diretamente da relatividade geral, mas, como explicado por Einstein em citação anterior, deriva de uma decisão por maior simplicidade. Para não “cairmos em especulações sem fim” (Einstein, 2007, p. 111), ela lhe pareceu uma decisão natural, mas se revelará precipitada. Essa hipótese, terceira componente de seu núcleo duro, será objeto de grande debate e revisão ao longo da década posterior à publicação do artigo de Einstein: a imobilidade do universo como um todo.

Mesmo sem levarmos em consideração a ausência de argumentos empíricos, o modelo de universo estático de Einstein também se mostrou frágil matematicamente. Sua rigidez não resistiria à menor variação, mesmo local, das interações gravitacionais (Soares, 2012). Essa percepção pode ter, também, diminuído qualquer ímpeto por buscas mais diretas de verificação empírica. O modelo de Einstein nos parece ter sido, tanto para seu proponente quanto para seus contemporâneos, um ponto de partida para pesquisas adicionais e para a busca de melhores modelos para explicar a geometria do universo em termos da relatividade geral. Encontramos, no seu modelo cosmológico de 1917, parte das teses que formarão o núcleo duro da cosmologia científica. Podemos, com isso, afirmar que Einstein apresenta uma tentativa de programa de pesquisa ou um “protoprograma de pesquisa”.

Surgirão novos modelos cosmológicos, que buscarão responder satisfatoriamente às dificuldades apresentadas pela proposta de Einstein. Ressaltamos, porém, o pioneirismo de seu trabalho: um modelo sustentado pela teoria da relatividade colocou novamente a cosmologia no caminho dos cientistas, levando-a a um novo *status*. Nas décadas seguintes, a cosmologia estará cada vez mais no interesse de físicos, de químicos e de diferentes áreas da pesquisa científica. Fornecemos, na Tabela 1, um resumo das teses que compõem o núcleo duro da tentativa de programa de pesquisa de Einstein, contida no seu modelo cosmológico.

- ⇒ NE1: A teoria geral da relatividade descreve a gravitação e a geometria do universo.
- ⇒ NE2: A estrutura do espaço-tempo pode ser descrita como um fluido perfeito.
- ⇒ NE3: O universo em larga escala é fechado em si mesmo, estático e eterno.

Tabela 1: relação das teses que compõem o núcleo duro da tentativa de programa de pesquisa, formulada por Einstein, identificadas por N_{E1} , N_{E2} e N_{E3} (elaborada pelos autores)

O programa de pesquisa de Friedmann-Lemaître

Uma das primeiras reações formais ao modelo de Einstein foi a publicação de um artigo, em 1922, pelo físico e meteorologista soviético Alexander Friedmann ([1922] 1999). Seu trabalho demonstra que a relatividade de Einstein permite a obtenção de outros modelos teóricos de universo, mais abrangentes em suas previsões e mais robustos matematicamente. Faremos menção, também, ao cosmólogo belga Georges Lemaître, injustiçado por muito tempo devido ao pouco reconhecimento de seu trabalho. Lemaître obtém soluções para modelos de universo equivalentes às de Friedmann, com algumas diferenças metodológicas e ontológicas. Também obteve teoricamente uma relação equivalente à lei empírica conhecida como lei de Hubble.

As soluções matemáticas obtidas por Friedmann

Muitos autores consideram que o trabalho de Friedmann seja de natureza puramente matemática. Os artigos de 1922 e 1924 não dialogam diretamente com aspectos da astronomia observacional, como as medidas de efeito Doppler para obtenção de velocidades ou as estimativas de distâncias, tampouco dialogam com as crescentes discussões sobre os “universos-ilhas” e a possibilidade da existência de aglomerados estelares além da Via Láctea. Avaliações mais pormenorizadas sobre a vida e obra de Friedmann questionam tal leitura, pelo menos quando estendida à sua produção acadêmica como um todo, defendendo que Friedmann, ao longo de todos os seus trabalhos, usualmente buscou interpretações físicas e verificações empíricas para suas pesquisas (Bagdonas e Silva Neto, 2023).

Seus resultados matemáticos buscaram elucidar que os modelos de universo dinâmico não são incompatíveis com uma densidade finita de matéria e um universo espacialmente fechado. Os chamamos de “resultados matemáticos” pela natureza de seu trabalho, ausente de considerações ontológicas mais profundas ou de uma atitude categoricamente realista diante dos possíveis modelos de evolução do universo, sendo tal característica notada por historiadores que também estudaram suas contribuições cosmológicas.

A brilhante investigação de Friedmann foi principalmente um exercício matemático e ele não expressou nenhuma preferência por um modelo em detrimento de outro. Ele não argumentou que nosso universo está de fato se expandindo ou que realmente teve origem em uma singularidade (Kragh, 2017, p. 14).

O primeiro de seus artigos, “On the curvature of space”, buscou deduzir, por meio de algumas hipóteses, a estrutura geométrica do universo e provar a possibilidade de um espaço cósmico de curvatura constante, mas que poderia variar com o tempo. Suas hipóteses são em partes físicas e em partes geométricas. Fisicamente, considera as mesmas hipóteses de Einstein e de Willem de Sitter e, geometricamente, considera que o universo possui curvatura constante. Como resultado de sua matemática, ele obtém que as soluções de Einstein e de Sitter são casos particulares: “o universo poderia estar em expansão, contração ou estático e que ‘não possuímos conhecimento atualmente para distinguir’ suas soluções” (Friedmann, [1922] 1999, p. 1). Ele encontrou, além da solução estática de Einstein e da solução vazia de De Sitter, respostas dinâmicas para a evolução do cosmos com densidade de matéria não nula. No mesmo artigo de 1922, Friedmann efetua a primeira estimativa moderna para a idade do universo. Suas soluções adicionais corroborarão futuramente os resultados da astronomia observacional, especialmente após o artigo de Hubble de 1929, conforme admitido por Einstein em 1932. Friedmann percebe que as ideias de um universo em expansão acelerada ou até mesmo oscilante também são compatíveis com as equações da teoria da relatividade geral.

As suposições nas quais baseamos nossas considerações se dividem em duas classes. À primeira classe pertencem as suposições que coincidem com as adotadas por Einstein e De Sitter; elas se relacionam com as equações a que os potenciais gravitacionais obedecem, e ao estado e ao movimento da matéria. À segunda classe pertencem as suposições sobre o caráter geral, por assim dizer, geométrico do mundo; de nossa hipótese segue como um caso especial o ‘mundo cilíndrico’ de Einstein e também o ‘mundo esférico’ de de Sitter (Friedmann, [1922] 1999, p. 2).

O trabalho de Friedmann nos parece uma forma de discussão da “cinemática cosmológica”, uma vez que o autor se mostra preocupado em contemplar as possíveis soluções matemáticas que relacionam o raio do universo ao tempo. São diferentes condições de existência, condições iniciais e condições de contorno que restringiram as soluções possíveis. Diferentemente de Einstein e de De Sitter, não parece que o autor esteja disposto a escolher apenas um dentre os possíveis modelos dinâmicos de universo. Sua percepção de que as equações de campos eram compatíveis também com um universo em crescimento abriu caminho para a possibilidade de posteriores investigações cosmológicas, tanto teóricas quanto empíricas.

Friedmann foi o primeiro que propôs a solução geral do problema cosmológico dentro do marco da Relatividade Geral e se deve a ele o descobrimento fundamental de que, com as hipóteses lançadas nas “Considerações cosmológicas” de Einstein, as equações de campos relativísticos se reduzem a um sistema de duas equações diferenciais que admitem uma infinidade de soluções, espacialmente fechadas ou abertas, onde a métrica do espaço é função do tempo cósmico (Ponty, 1971, p. 74).

Afastamento entre as galáxias: as considerações de Lemaître

No principal aspecto a ser considerado na reconstrução, o núcleo duro do programa, os trabalhos de Friedmann e de Lemaître são equivalentes, apesar de terem sido concebidos de forma independente e apresentarem algumas distinções, por isso inserimos ambos no núcleo e nomearemos o programa de pesquisa de Programa de Friedmann-Lemaître. Se o trabalho de Friedmann possui um viés voltado à abordagem matemática das soluções das equações de campos relativísticos, as contribuições de Lemaître colocaram maior ênfase na física envolvida em tais equações. A diferença entre os trabalhos de ambos se apresentava mais na abordagem e no “espírito” do que no conteúdo formal.

Lemaître não apresenta o modelo de universo expansionista como apenas uma solução matemática, mas como um modelo evolucionário para o universo real. Seu artigo de 1927 apresenta valiosas contribuições cosmológicas, porém, por motivos diferentes de Friedmann, seu trabalho também não recebeu grande reconhecimento de imediato. Uma parcela desta explicação está no periódico escolhido por ele: os *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*.

Apesar de já ter, nessa data, discutido suas ideias com cientistas de renome, como Einstein, Shapley e Eddington (seu professor em Cambridge, entre 1923 e 1924), Lemaître publicou em um periódico de baixo impacto acadêmico. O reconhecimento a suas hipóteses começa a aumentar a partir de 1930, quando “se reconhecia que algum tipo de universo dinâmico teria que substituir as soluções estáticas de Einstein e de De Sitter existentes”. A existência dessas possíveis soluções foi amplamente debatida na reunião da Royal Society, em 10 de janeiro daquele ano (Kragh, 1996, p. 31).

Por ter seu trabalho ignorado, Lemaître resolve enviar uma correspondência a Eddington, juntamente com uma cópia de seu artigo de 1927, lembrando-lhe que já ofereceu uma solução para o dilema entre os modelos de Einstein e de De Sitter. O entusiasmado e imediato reconhecimento por parte de Eddington da primazia do trabalho do ex-aluno incluiu uma tradução de seu artigo para o inglês, uma nota de reconhecimento para a revista *Nature* e uma cópia para De Sitter, que residia em Leiden.

Quando Lemaître introduz o conceito de “átomo primordial”, ele não se refere a uma singularidade, muito menos ao estado que será conhecido como big bang; demonstrará inclusive certo desinteresse por essa teoria. O salto entre defender que o universo em expansão tenha ocupado um volume microscópico no passado e alegar que tenha se iniciado em uma singularidade simplesmente não foi dado por ele.

Uma singularidade cósmica é uma noção não física na medida em que nem o espaço nem o tempo existem, e a densidade não é apenas enorme, mas infinita. Lemaître sempre enfatizou que a cosmologia poderia e deveria ser entendida em termos físicos e, portanto, negou que o começo do mundo pudesse ser representado por uma verdadeira singularidade ou ‘aniquilação do espaço’, como ele a chamava (Kragh, 1996, p. 54).

Podemos observar, no texto de Lemaître, uma antecipação da expressão matemática que será consagrada como lei de Hubble. Também introduz equações diferenciais do mesmo tipo que Friedmann, mas incluindo um termo devido à pressão exercida pela radiação, inserindo, assim, a termodinâmica na cosmologia relativística. Muitas são as semelhanças entre as propostas de Friedmann e Lemaître. Nesse sentido, os historiadores costumam apresentar essa proposta como “modelo de Friedmann-Lemaître”, apesar de ambos, ao que parece, jamais terem trabalhado em colaboração.

Para mostrar mais detalhadamente o trabalho de Lemaître, utilizaremos a tradução para o inglês de seu texto originalmente publicado nos anais da Academia de Bruxelas. O texto inicia com uma breve exposição das teorias de De Sitter e de Einstein, com seus pontos fortes e fracos. A primeira tem a vantagem de estar de acordo com a aparente velocidade de recessão das nebulosas, sugerida por Slipher em 1917. Já a cosmologia de Einstein prevê a existência de matéria e fornece uma explicação satisfatória para relação entre a massa e o raio do universo.

Duas soluções foram propostas. A de De Sitter ignora a existência da matéria e supõe sua densidade igual a zero. Isso leva a dificuldades especiais de interpretação que serão mencionadas mais tarde, mas é de extremo interesse para explicar naturalmente as velocidades de afastamento observadas de nebulosas extragalácticas, como uma simples consequência das propriedades do campo gravitacional sem ter que supor que estamos em um ponto do universo diferenciado por propriedades especiais. A outra solução é a de Einstein. Atende ao fato evidente de que a densidade da matéria não é zero, e leva a uma relação entre essa densidade e o raio do universo. Essa relação previu a existência de massas enormemente maiores do que quaisquer outras conhecidas na época. Estas já foram descobertas, tendo-se tornado conhecidas as distâncias e dimensões das nebulosas extragalácticas. Pelas fórmulas de Einstein e dados observacionais recentes, o raio do universo é cerca de cem vezes maior do que os objetos mais distantes que podem ser fotografados por nossos telescópios (Lemaître, 1931, p. 483).

Sua proposta emerge como uma tentativa de preservar os pontos positivos e melhorar os pontos negativos de ambas as propostas. Lemaître busca encontrar um modelo para a dinâmica do universo que inclua as soluções de ambos como casos particulares, uma vez que se mostram, por diferentes motivos, insatisfatórios. Mais do que encontrar um sistema mais geral, seu trabalho apresenta fortes traços de realismo científico.

Cada teoria tem suas próprias vantagens. Uma está de acordo com as velocidades radiais observadas das nebulosas, a outra com a existência da matéria, dando uma relação satisfatória entre o raio e a massa do universo. Parece desejável encontrar uma solução intermediária que possa combinar as vantagens de ambos (Lemaître, 1931, p. 484).



Figura 2: Os possíveis modelos de universo, de acordo com as equações de Friedmann: expansão (diferentes maneiras), estático ou pulsante. A solução de Einstein contempla apenas o caso estático
(Crédito da imagem: Roberto Boczko)

A lei de Hubble-Lemaître e seu lugar no núcleo duro do Programa de Friedmann-Lemaître

Somando-se os passos dados por ambos, chama a atenção a existência de soluções expansionistas e, particularmente, Lemaître, que descreve a solução expansionista como única a verdadeiramente corresponder ao universo físico e deriva teoricamente a lei de Hubble-Lemaître. Entendemos que, muito mais do que um modelo, temos um verdadeiro programa de pesquisa, uma vez que testes empíricos passam a ser concebidos com o intuito de verificar a possível expansão do universo. O que caracteriza, então, seu núcleo duro “irrefutável”? Certamente precisamos nele incluir a teoria geral da relatividade, assumida como verdadeira, desde a primeira página, nos artigos de ambos. Também observamos que as diferentes propostas cosmológicas assumem que o universo se comporta como um fluido sem pressão, sujeito às leis da termodinâmica e da mecânica estatística.

Por que os trabalhos de Friedmann e Lemaître não são incluídos no mesmo programa de pesquisa proposto por Einstein? Para responder a essa questão precisamos olhar à frente na história da cosmologia relativística e procurar o que Lakatos classifica como “série empiricamente progressiva de teorias” relacionadas a um mesmo “núcleo duro”. A partir da década de 1930, a visão de um universo em expansão se torna majoritária na pesquisa em cosmologia.

Haverá uma interessante disputa entre a teoria do big bang e a teoria do estado estacionário, mas ambas assumem a validade da relatividade geral, da descrição do universo como fluido e, principalmente, que as galáxias estão se afastando entre si. A partir da segunda metade da década de 1930, aqueles pesquisadores que não consideravam esse núcleo duro foram se tornando cada vez mais dissidentes e se afastando da linha de pesquisa dominante, o que caracteriza a consolidação do programa de pesquisa da cosmologia relativística ou o Programa de Pesquisa de Friedmann-Lemaître.

A interpretação dos *redshifts* observados em termos de velocidades radiais foi aceita pela maioria dos cientistas, mas também houve quem a negasse e defendesse interpretações alternativas que não envolviam um universo em expansão. Durante a década de 1930, sugestões de alternativas sem velocidade eram comuns; no entanto, embora muitos astrônomos estivessem dispostos a considerar o universo em expansão não mais do que uma hipótese, os esquemas alternativos falharam em obter apoio geral (Kragh, 1996, p. 33).

Um dos primeiros trabalhos que contribuíram para a determinação das velocidades de afastamento entre as galáxias foi o citado texto de Slipher, de 1917, no qual apresentou os resultados de medição dos *redshifts* para 25 galáxias diferentes e então calculou a velocidade de afastamento das mesmas (Slipher, 1917). O também norte-americano Edwin Hubble apresenta, em 1929, uma ampliação do trabalho de Slipher. Obteve, por métodos independentes, os valores, respectivamente, das velocidades de afastamento e das distâncias em que se encontram 45 diferentes nebulosas.

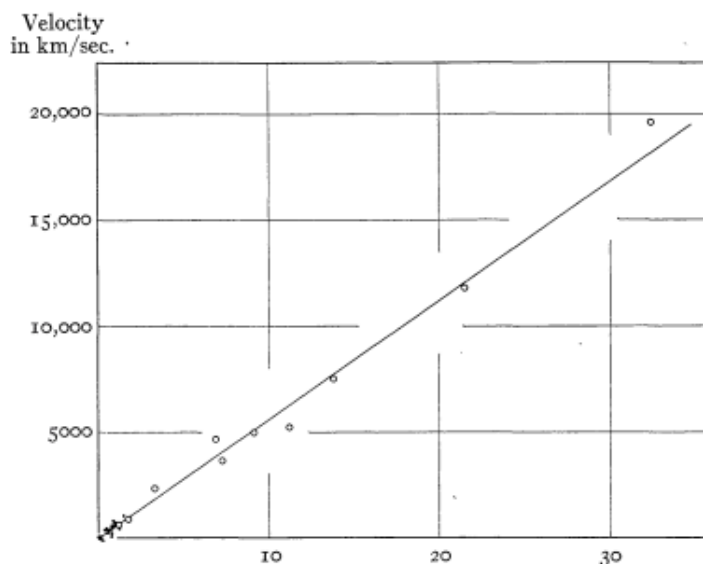


Figura 3: À direita, temos a relação obtida empiricamente entre velocidades e distâncias galácticas, apresentada por Hubble e Humason no artigo de 1931 (Hubble e Humason, 1931, p. 77). Essa linearidade já havia sido prevista teoricamente por Lemaître em 1927, no entanto, pela pouca repercussão de seu trabalho, acabou sendo consagrada na literatura apenas como lei de Hubble

Na Figura 3, as galáxias mais distantes apresentam as maiores velocidades de afastamento, sendo um dos aspectos mais importantes desse trabalho a relação linear entre esta distâncias e velocidades nebulares. A expressão matemática dessa relação entre as duas grandezas ficou conhecida como a mencionada lei de Hubble-Lemaître e pode ser enunciada na forma:

$$V = H_0 \cdot d$$

O termo H_0 é o coeficiente angular da reta, conhecido como “constante de Hubble”, grandeza fundamental para a estimativa da idade do universo. Diferentemente de Lemaître, a relação obtida por Hubble foi unicamente empírica, ajustando uma reta aos dados coletados sobre distâncias e velocidades das diversas nebulosas. A lei também se converterá em um valioso instrumento de medida de distâncias para novas nebulosas a partir da medida de suas velocidades de recessão. Apesar de Hubble não se posicionar oficial e favoravelmente à expansão do universo, esse resultado é atualmente considerado como uma das suas primeiras evidências empíricas. Não confundamos a hipótese de Lemaître sobre um universo que se expande a partir de um instante em que seu volume era muito pequeno (chamado por ele de átomo primordial) com a hipótese de um universo que se expande a partir de uma singularidade, o que compõe a teoria do big bang. A lei de Hubble-Lemaître é publicada em 1929 a partir de sua obtenção empiricamente. A teoria do big bang apenas começa a ser formulada por George Gamow durante a Segunda Guerra Mundial. A velocidade de afastamento das galáxias constitui parte do núcleo duro do Programa de Friedmann-Lemaître, já a hipótese da origem do universo a partir de uma explosão inicial, não. Não devemos associar o trabalho de Hubble tão diretamente com a expansão do universo e muito menos com a hipótese formulada por Gamow e seus colaboradores.

É surpreendente que Hubble ainda seja considerado o descobridor da expansão do universo, apesar de ter publicamente se pronunciado cético em relação a ela. Muitos autores de divulgação científica que conviveram com ele sabiam disso, mas continuaram propagando esta visão historicamente errada. Até o ano de sua morte, em 1953, ele permaneceu cauteloso em relação à interpretação cosmológica dos desvios espectrais (Bagdonas, 2011, p. 3).

Hubble e Humason se limitaram a citar os desvios espectrais para o vermelho na radiação das nebulosas, sem especular sobre a causa desse fenômeno. Podemos inferir, em uma leitura atenta do artigo de 1931, que os autores são cuidadosos em expor a lei empírica que relaciona a aparente velocidade de recessão galáctica sem afirmar categoricamente que os *redshifts* medidos devam ser interpretados como verdadeiro movimento de afastamentos galácticos e, muito menos, fruto de uma expansão do universo.

A presente contribuição diz respeito a uma correlação de dados empíricos de observação. Os escritores são obrigados a descrever os ‘aparentes deslocamentos de velocidade’ sem se aventurar na interpretação e seu significado cosmológico. Observações adicionais são desejáveis e serão realizadas, embora pareça provável que as características gerais da relação já estão descritas quase no limite dos equipamentos existentes (Hubble, Humason, 1931, p. 38).

Parece-nos, desse modo, que os autores não se posicionam no contexto do crescente debate em cosmologia. O reconhecimento da importância dessa lei, mesmo que obtida empiricamente nesse trabalho, deu-se de forma imediata e irá permear o debate entre a teoria do big bang e do estado estacionário.

Teorias distintas, mas com um núcleo duro em comum

Lakatos descreve que, no interior de um programa de pesquisa, encontramos, além do seu “núcleo duro”, sua “heurística positiva”. Nela se insere uma série de teorias empiricamente

progressivas. Todas essas teorias partilham do mesmo núcleo duro. Lakatos também descreve a “heurística negativa”, é ela quem demarca o que o cientista não deve fazer para permanecer vinculado a determinado programa de pesquisa. Em outras palavras, a prática da heurística negativa estabelece os limites entre os elementos que fazem parte do cinturão de proteção e aquilo que já faz parte do núcleo “irrefutável”.

A heurística negativa especifica o ‘núcleo’ do programa que é ‘irrefutável’ por decisão metodológica dos seus protagonistas; a heurística positiva consiste num conjunto parcialmente articulado de sugestões ou palpites sobre como mudar e desenvolver as ‘variantes refutáveis’ do programa de pesquisa, e sobre como modificar e sofisticar o cinto de proteção ‘refutável’ (Lakatos, Musgrave, 1979, p. 165).

O sucesso de um determinado programa de pesquisa está associado à sua capacidade de produzir previsões testáveis. Sob esse viés, os programas de pesquisa são classificados como progressivos ou degenerativos. Outro aspecto de destaque da metodologia lakatosiana é o papel desempenhado pelas anomalias: em uma primeira fase, um mesmo programa de pesquisa engloba teorias em disputa, que convivem com uma série de anomalias. “Pode ser racional colocar a inconsistência em quarentena temporária, *ad hoc*, e prosseguir com a heurística positiva do programa” (Lakatos, Musgrave, 1979, p. 176).

Por meio de um olhar para a história, podemos reconhecer o núcleo duro da cosmologia científica: a soma das hipóteses fundamentais partilhadas por todas as componentes de uma série de teorias.

Um dos traços cruciais do falseacionismo sofisticado é substituir o conceito de teoria, como conceito de descoberta, pelo da série de teorias. É uma sucessão de teorias e não uma teoria determinada que se avalia como científica ou pseudocientífica. Mas os elementos dessa série de teorias costumam estar ligados por notável continuidade, que os solda em programas de pesquisa (Lakatos, Musgrave, 1979, p. 161).

Na reconstrução da cosmologia do século XX, observamos, principalmente, a formação de duas grandes teorias: a teoria do big bang e a teoria do estado estacionário. Tanto os artigos publicados pelos criadores da teoria do estado estacionário (Hoyle, Bondi e Gold), quanto aqueles publicados pelos proponentes da teoria do big bang (Gamow, Alpher e Hermann) assumem a validade da lei de Hubble-Lemaître como um dos pontos de partida para seus desenvolvimentos teóricos e empíricos. Com isso, esperamos justificar que a citada lei é parte do núcleo duro do Programa de Friedmann-Lemaître. Vejamos a referência a ela feita em um artigo publicado por Fred Hoyle, como instância de corroboração de sua estimativa:

Finalmente, notamos que um número adimensional é obtido dividindo-se o comprimento $a/3$ que aparece em (19) pelo ‘alcance’ k das forças nucleares. Usando dados de laboratório para A , juntamente com a determinação dada acima para $a/3$ (com base em uma comparação com a relação velocidade-distância de Hubble-Humason), obtemos cerca de 4×10^{39} para esse número (Hoyle, 1948, p. 1).

O ensaio acima se soma ao argumento de seus dois principais colaboradores, no qual podemos observar, ainda, uma importante citação à mesma lei e, mais uma vez, a concordância

de sua nova teoria com a lei de Hubble-Lemaître é uma tentativa de validar a teoria do estado estacionário junto à comunidade de astrônomos.

Vemos, portanto, que nossa teoria concorda com a observação, pelo menos tão bem quanto os modelos relativísticos, quando seus numerosos parâmetros livres são ajustados. A dedução original de Hubble que seus dados sugeriram, em uma interpretação relativística, um universo improvavelmente pequeno está quantitativamente de acordo com nossa teoria (Bondi e Gold, 1948, p. 2).

Ambos os trabalhos expressam a satisfação da concordância de seus modelos com os dados obtidos por Hubble. No artigo de Hoyle, há um parâmetro obtido por comparação, termo a termo, de seu desenvolvimento, com a lei de Hubble-Lemaître. Já o artigo de Bondi e Gold expressa como sua teoria se mostra em boa concordância com a dedução original contida nessa lei. Olhando para o outro lado da disputa, a análise dos originais de Alpher e Herman, dois dos três proponentes da teoria do big bang, revela que eles também citam a contribuição de Hubble, de onde partem para justificar seu modelo.

Embora não seja particularmente pertinente ao estudo relatado neste artigo, é interessante notar que se pode encontrar a dependência da taxa de expansão universal no tempo neste tipo de modelo. Esta taxa é a variação percentual na distância adequada por unidade de tempo, determinada por Hubble a partir do desvio para o vermelho nos espectros das nebulosas, e é dada em $V=Hd$, onde V é a velocidade de recessão de uma nebulosa a uma distância d (Alpher, Herman, 1949, p. 2).

Nas páginas iniciais do artigo, consideram a taxa de expansão do universo em função do tempo como premissa para o posterior desenvolvimento de suas ideias, apresentadas subsequentemente. Uma satisfação ainda maior à lei de Hubble-Lemaître é prestada no artigo publicado de forma independente pelo líder do grupo, o soviético George Gamow:

outro método extremamente importante de comparar as consequências da cosmologia relativística com as propriedades observadas do nosso universo é apresentado pelos estudos de Hubble sobre o desvio para o vermelho e a densidade do espaço no caso de galáxias muito perturbadas (Gamow, 1946, p. 3).

Esperamos, como encerramento desta seção, ter justificado em que medida a disputa entre as duas teorias não se configura uma disputa entre programas de pesquisa, mas o desenvolvimento de uma série progressiva de teorias, uma vez que claramente compartilham de um mesmo núcleo duro, que pode ser resumido na Tabela 2.

- ⇒ **NFL1: A lei de Hubble-Lemaître descreve o movimento de afastamento entre as galáxias.**
- ⇒ **NFL2: A teoria geral da relatividade descreve a gravitação e a geometria do universo.**
- ⇒ **NFL3: A estrutura do espaço-tempo pode ser descrita como um fluido perfeito.**

Tabela 2: relação das teses que compõem o núcleo duro do Programa de Pesquisa de Friedmann-Lemaître, identificadas por N_{F-L1} , N_{F-L2} e N_{F-L3} (elaborada pelos autores)

Limitações e desafios da abordagem lakatosiana

Uma vez realizada essa reconstrução racional, identificando o núcleo duro e a série de teorias cosmológicas, podemos fazer breves considerações sobre as dificuldades de descrição de episódios da história da ciência por meio dos instrumentos da epistemologia de Lakatos. Tais dificuldades se revelam, em diferentes intensidades, na utilização de diversas áreas da história da ciência, e a cosmologia não é exceção. Procuramos dialogar com as dificuldades relatadas por outros autores que, por exemplo, avaliaram a epistemologia de Lakatos em sua leitura da termodinâmica, da mecânica quântica ou da relatividade.

Estrutura excessivamente rígida dos programas de pesquisa, quando comparada a casos históricos

Existe uma certa dificuldade em enquadrar a “história real” da ciência na estrutura proposta por Lakatos: seja por um possível desmembramento do núcleo duro em dois ou mais programas independentes ou pela impossibilidade metodológica de reconhecer o próprio núcleo. Um exemplo concreto de certa “rigidez estrutural” é destacado por Bezerra em sua avaliação da reconstrução que o próprio Lakatos fez dos primórdios da mecânica quântica, período conhecido como antiga teoria atômica (ATA).

O modelo lakatosiano possui uma rigidez de estrutura que acaba constituindo uma fonte de dificuldades para ele mesmo. Em primeiro lugar, essa rigidez se manifesta na caracterização do núcleo de um programa de pesquisa. A ocorrência de qualquer modificação nos postulados do núcleo obriga necessariamente a passar a falar em termos de um programa de pesquisa diferente do inicial. Assim, qualquer revisão da heurística negativa nos coloca o problema de ter que explicar uma transição entre dois programas de pesquisa. Além disso, qualquer omissão cometida no momento de caracterizar a classe de postulados do núcleo acabará causando problemas de análise mais adiante. Em segundo lugar, pressupõe-se a existência de uma demarcação demasiado rígida entre os postulados do núcleo e as hipóteses que constituem a heurística positiva. Desse modo, qualquer ambiguidade encontrada ao se descreverem essas duas classes de elementos (por exemplo, a existência de uma hipótese cuja função não pode ser facilmente enquadrada em uma classe à exclusão da outra) acarreta um problema de aplicabilidade do modelo (Bezerra, 2004, p. 27).

Muito embora seja prudente ressaltar que Lakatos não concebe sua metodologia como estrutura fixa, mas sob um viés dialético (com heurística negativa e heurística positiva em dialética), e em nenhum de seus textos admite tal rigidez, tal como podemos observar explicitamente em um de seus escritos mais consagrados.

A dialética da heurística positiva e a negativa num programa de pesquisa pode ser melhor esclarecida por meio de exemplos. Esboçarei, portanto, alguns aspectos de dois programas de pesquisa espetacularmente bem-sucedidos: o Programa de Prout, baseado na ideia de que todos os átomos são compostos de átomos de hidrogênio, e o Programa de Bohr, baseado na ideia de que a emissão da luz se deve a elétrons que saltam de uma órbita para outra no interior dos átomos (Lakatos, Musgrave, 1979, p. 169).

Alguma dificuldade com a epistemologia de Lakatos também nos parece ser apontada indiretamente por Chiappin (1996) ao conceber o conjunto de instrumentos Metodologia da Teoria da Ciência, com o intuito de refinar a avaliação das teses que compõem o núcleo duro de um programa de pesquisa e de melhor classificar as relações entre o núcleo e as diferentes teorias do programa.

[...] uma estrutura mais fina no núcleo teórico do programa racionalista, por meio da qual podem-se perceber os detalhes e nuances de cada uma das propostas racionalistas, tornando a compreensão do debate mais rigorosa e iluminando mais cuidadosamente os principais problemas envolvidos com a evolução do programa (Chiappin, 1996, p. 198).

A avaliação unicamente empírica da progressividade das teorias?

Outra questão importante é verificar o papel dos problemas empíricos e dos problemas conceituais. Observamos que, ao longo da história da ciência, certas contribuições empíricas levam à formulação de sistemas teóricos (e não apenas contribuem no âmbito de verificar tais sistemas). Além disso, na série de teorias que Lakatos insere desenvolvendo-se a partir da heurística positiva do programa, as teorias são sequencialmente mais progressivas. Todavia, a avaliação lakatosiana de tal progressividade concentra-se no excesso de conteúdo empírico que uma delas apresenta em comparação com sua predecessora.

Laudan, outro eminente filósofo do período conhecido como “virada historicista”, ao longo de seu conhecido livro *O progresso e seus problemas* (1977), coloca em relevo sua crítica a Lakatos nesse ponto, especialmente por ele supostamente ignorar a importância dos chamados “problemas conceituais”. Laudan argumenta que a avaliação de teorias apenas pelos problemas empíricos que elas resolvem não é a mais apropriada, tanto pela possível subdeterminação empírica, quando teorias rivais possuem o mesmo conteúdo empírico, quanto pela importância dos aspectos conceituais que podem colocar teorias concorrentes em patamares distintos.

Tais teorias são exemplificações específicas do programa geral de pesquisa, que pode ser progressivo ou regressivo – o progresso, muito mais para Lakatos que para Kuhn, é função exclusiva do crescimento empírico de uma tradição. É a posse de maior ‘conteúdo empírico’ ou de um mais alto ‘grau de corroboração empírica’ que torna uma teoria superior e mais progressiva que outra (Laudan, 2011, p. 108).

Laudan se afasta de Kuhn e Lakatos ao dar um peso significativo aos problemas conceituais em uma disputa entre teorias. Aparentemente, os dois atribuem peso muito maior às anomalias e às verificações empíricas como fator determinante em uma sucessão de paradigmas ou competição entre programas de pesquisa. O episódio do eclipse de Sobral é um relevante caso em que problemas conceituais levaram a um desgaste de uma teoria, até então, abundantemente consagrada e à ascensão de um novo e complexo sistema teórico, atrelado a uma nova visão de mundo, inicialmente sem comprovação empírica (Rodrigues, 2021). Essa nova teoria revelou-se, rapidamente, promissora ao resolver anomalias, até então, de pouca importância.

É fundamental ressaltar, desde o começo, que um problema conceitual, em geral, será mais sério que uma anomalia empírica [...] Essa diferença de peso acontece não porque a ciência é mais racionalista que empírica, mas porque costuma ser mais explicar um resultado experimental anômalo do que rejeitar de saída um problema conceitual (Laudan, 2011, p. 91).

Podemos complementar a crítica de Laudan, feita com bastante propriedade, com um aspecto peculiar da cosmologia científica: a relevância dos dados empíricos para a construção do próprio núcleo duro. Na cosmologia houve uma escassa fonte de problemas empíricos até o final da década de 1960, o que evidencia que a disputa entre as diferentes teorias cosmológicas se deu majoritariamente no campo dos problemas e interpretações conceituais possíveis.

Considerações finais

A cosmologia alcança, no século XX, um *status* de ciência e a condição de realizarmos investigações concretas sobre o universo em larga escala. Os instrumentos concebidos por Lakatos nos permitem organizar e reconstruir esse importante episódio da história da ciência na seguinte estrutura: o modelo cosmológico de Einstein traz as “sementes” de um programa de pesquisa, suas contribuições fornecem as bases para a formação de algumas das teses que irão compor o núcleo desse programa. As outras teses serão concebidas graças às contribuições de Friedmann e Lemaître, estando relacionadas, direta ou indiretamente, com o constante afastamento entre as galáxias. Tal afastamento está pressuposto nas diferentes versões da teoria do big bang e do estado estacionário, o que justifica sua inserção no núcleo duro desse programa (Rodrigues, 2023). Na Figura 4, apresentamos um resumo esquemático da reconstrução racional proposta ao longo deste artigo: um programa cujo núcleo se forma com as contribuições de Einstein, Friedmann e Lemaître e cuja heurística positiva é formada pelas teorias de Lemaître, do estado estacionário (concebida pelo trio Hoyle, Gold e Bondi) e, finalmente, pela teoria do big bang (concebida pelo trio Gamow, Alpher e Hermann).

Programa de Pesquisa de Friedmann- Lemaître

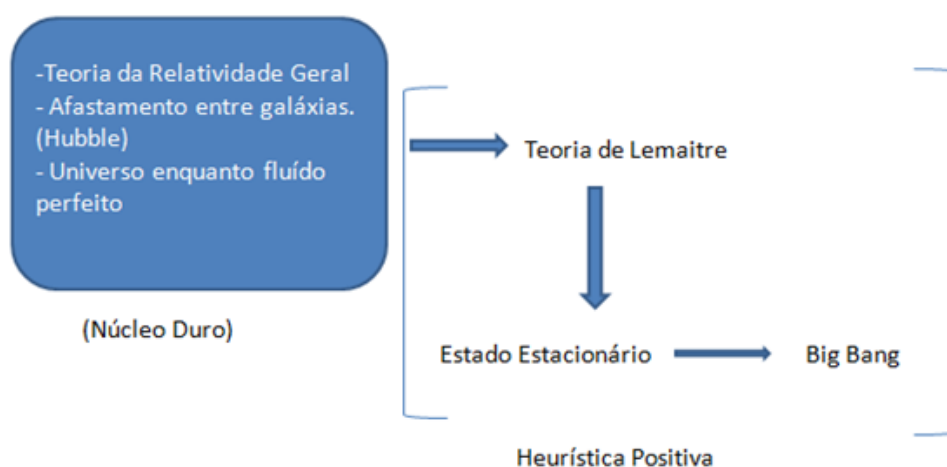


Figura 4: resumo esquemático da estrutura do Programa de Pesquisa de Friedmann-Lemaître (elaborado pelos autores)

É salutar reforçarmos, enquanto comentário final, que somente com a formulação da lei de Hubble-Lemaître os primeiros testes empíricos do modelo de universo em expansão passam a ser concebidos e, portanto, não podemos reconstruir nenhum programa de pesquisa na área da cosmologia antes desse episódio. A utilização da epistemologia de Lakatos nos permite, ainda, compreender o potencial com o qual futuras reformulações conceituais ou anomalias empíricas podem afetar o cenário atual da cosmologia, uma vez que revisões em teses do núcleo duro trarão um impacto muito maior do que a formulação de teorias adicionais que façam parte da mesma heurística positiva.

Nota de pesar: Assim como toda a comunidade de historiadores e de filósofos da ciência no Brasil, os autores ficaram profundamente tristes ao receber a notícia do falecimento do professor João Zanetic. Suas “notas de aula” dos cursos de Gravitação e de Evolução dos Conceitos da Física, ministrados no Instituto de Física da USP, levaram grande quantidade de jovens pesquisadores a direcionar seu interesse e paixão profissional para a pesquisa em história e filosofia da ciência. Sua tese de doutorado, “Física também é cultura”, abriu caminhos e debates para a urgência de maior interdisciplinaridade no ensino de física, questão tão urgente nos tempos que a educação pública vive em nosso país. Foi um privilégio escutar como o professor João nos contava sobre Paulo Freire e a recepção de seus textos em terras chilenas durante os anos de ditadura militar no Brasil. À memória do professor João gostaríamos de deixar o nosso agradecimento e aos seus familiares as nossas condolências.

“Quando se fala em cultura, raramente a física comparece na argumentação. Cultura é quase sempre evocação de obra literária, sinfonia ou pintura; cultura erudita, enfim. Tal cultura, internacional ou nacional, traz à mente um quadro de Picasso ou de Tarsila, uma sinfonia de Beethoven ou de Villa Lobos, um romance de Dostoiévski ou de Machado de Assis, enquanto que a cultura popular faz pensar em capoeira, num samba de Noel ou num tango de Gardel. Dificilmente, porém, cultura se liga ao teorema de Godel ou às equações de Maxwell!”

João Zanetic

Referências bibliográficas

- ABBE, C. On the distribution of the nebulae in space. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 27, n. 7, p. 257-264, 1867. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/27.7.257a>.
- ALPHER, R.; HERMAN, R. Remarks on the evolution of the expanding universe. *Physical Review*, v. 75, p. 1089-1095, 1949.
- BAGDONAS, A. *Discutindo a natureza da ciência a partir de episódios da história da cosmologia*. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Programa Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- BAGDONAS, A.; SILVA NETO, C.P. da. O papel epistêmico da diversidade e as origens metafísicas da teoria do big bang: reflexões para a educação científica. *Ciência & Educação*, v. 29, e23029, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1516-731320230029>. Acesso em: 30 abr. 2024.

- BEZERRA, V.A. "Schola quantum": progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte II: crítica à leitura lakatosiana. *Scientiae Studia*, v. 2, n. 2, 2004.
- BONDI, H.; GOLD, T. The steady-state theory of the expanding universe. *Royal Astronomical Society*, v. 108, n. 3, p. 252-270, 1948. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/108.3.252>
- CHIAPPIN, J.R.N. Racionalidade, decisão, solução de problemas e o programa racionalista. *Ciência e Filosofia*, v. 5, p. 155-219, 1996.
- COHEN, B.; WESTFALL, R. *Newton: textos, antecedentes e comentários*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2002.
- EINSTEIN, A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie [Considerações cosmológicas sobre a teoria da relatividade geral]. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, p. 142-152, 1917.
- EINSTEIN, A. *Teoria da relatividade geral e especial*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2007.
- FRIEDMANN, A. On the curvature of space. *General Relativity and Gravitation*, v. 31, n. 12, p. 1991-2000, [1922] 1999. (Originalmente publicado como Über die Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik*, v. 10, p. 377-386, 1922)
- GAMOW, G. Expanding universe and the origin of elements. *Physical Review*, v. 70, p. 572-573, 1946. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.572.2>.
- GAMOW, G. *My world line*. New York: The Viking Press. 1970.
- HARRISON, E.R. *Cosmology: The science of the universe*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- HOYLE, F. A new model for the expanding universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 108, n. 5, p. 372-382, 1948.
- HUBBLE, E.; HUMASON, M. The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae. *Astrophysical Journal*, v. 74, p. 43, 1931.
- KING, H.C. *The history of the telescope*. New York: Dover, 1979.
- KRAGH, H. *Cosmology and controversy: The historical development of two theories of the universe*. Princeton: Princeton University Press, 1996.
- KRAGH, H. *Cosmology and the origin of the universe: Historical and conceptual perspectives*. [preprint]. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1706.00726v1>. Submetido em: 2 jun. 2017. Acesso em: 30 abr. 2024.
- LAKATOS, I.; MUSGRAVE, A. A crítica e o desenvolvimento do conhecimento. Tradução de O.M. Cajado e P.R. Mariconda. São Paulo: Cultrix; Edusp, [1965] 1979.
- LAKATOS, I. History of science and its rational reconstructions. *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, v. 1970, p. 91-136, 1970.
- LAKATOS, I.; ZAHAR, E. Why did Copernicus's research programme supersede Ptolemy's? In: Worrall, J.; Currie, G. (eds.). *The methodology of scientific research programmes*. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. p. 168-192. (Philosophical Papers, v. 1). DOI:10.1017/CBO9780511621123.006.
- LAUDAN, L. *O progresso e seus problemas: rumo a uma teoria do crescimento científico*. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora Unesp, 2011.
- LEMÂÎTRE, G. A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 91, n. 5, p. 483-490, 1931. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>.
- LIMA, J.A.S.; R.C., SANTOS. 100 anos da cosmologia relativística (1917-2017). Parte I: das origens à descoberta da expansão universal (1929). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, n. 1, e1313, 2017.
- MERRITT, D. Cosmology and convention. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 57, p. 41-52, 2017.
- MOULINES, C. *O desenvolvimento moderno da filosofia da ciência (1890-2000)*. São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia, 2020.

- PONTY, J. M. *Cosmologia del siglo XX*. Barcelona: Gredos, 1971.
- PONTY, J. M.; MORANDO, B. *The rebirth of cosmology*. New York: Knopf, 1976.
- PROCTOR, R. Note on the Sun's motion in Space and on the relative distances of the fixed stars of various magnitudes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 30, p. 9-20, 1869.
- RODRIGUES, D.M. O eclipse de Sobral em 1919: breve análise sobre a proposta epistemológica de Larry Laudan. *Revista Paranaense de Filosofia*, v. 1, n. 2, p. 111-128, 2021.
- RODRIGUES, D.M. *As origens da cosmologia científica: uma reconstrução racional*. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.
- RYDEN, B. *Introduction to cosmology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- SLIPHER, V. Nebulae. *Proceedings of the American Philosophical Society*, v. LVI, n. 5, 1917.
- SOARES, D. O universo estático de Einstein. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 1, 2012.
- ZAHAR, E. Why did Einstein's programme supersede Lorentz's? *The British Journal for the Philosophy of Science*, v. 24, n. 2, p. 95-123, 1973.

Recebido em outubro de 2023

Aceito em novembro de 2023