



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

A LEI DE HUBBLE

Lucas Porto Alegre de Almeida Duarte

Ioav Waga

Marta Feijó Barroso

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Lucas Porto Alegre de Almeida Duarte, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
02/2016

A Lei de Hubble

Este apêndice apresenta um texto com uma sugestão de abordagem para discutir a Teoria do Big Bang no ensino médio através do estudo da Lei de Hubble. O texto foi escrito de forma a auxiliar um professor de Física do ensino médio, mas que se necessário possa ser trabalhado diretamente com os alunos.

A Teoria do Big Bang é o nome dado ao atual modelo cosmológico, ou seja, modelo que explica o “funcionamento” do universo, sua origem e evolução. O uso da expressão “Teoria do Big Bang” não é bem aceito entre os físicos especializados, que preferem a maior precisão dada por “Modelo Padrão da Cosmologia”, mas a expressão popularizou-se entre o público em geral.

O texto se inicia com uma introdução breve a respeito do que é uma ciência, apresenta alguns dos primeiros modelos cosmológicos e aborda alguns estudos precursores da Teoria do Big Bang. Após isso, o texto tem como foco a Lei de Hubble. É discutido o procedimento experimental para obtenção da Lei de Hubble (como Hubble determinou as distâncias às galáxias e suas velocidades radiais) e também a interpretação de seu resultado, apresentando seu trabalho como a comprovação da expansão do universo, sendo portanto uma das evidências a favor da Teoria do Big Bang.

Durante sua elaboração procurou-se ter como pano de fundo a discussão do que é uma ciência, como ela “funciona” e evolui, quais as consequências de seus avanços, e outras questões semelhantes, usando como fio condutor a pergunta “como sabemos o que sabemos?”.

Introdução



Figura A.1. “Celestial Fireworks”¹

A figura A.1 apresenta uma fotografia tirada pelo telescópio espacial Hubble da NASA em comemoração aos 25 anos do lançamento do telescópio (24 de abril de 1990). Desde então, o telescópio Hubble vem contribuindo por meio das imagens captadas por ele na exploração do Sistema Solar e mesmo muito além deste. A imagem mostra o “nascimento” de jovens estrelas, e o nome dado a ela (Fogos de artifício celestial) é uma referência à comemoração do aniversário. Essa fotografia exemplifica perfeitamente o porquê do fascínio do homem pelo espaço sideral ser tão antigo e também o fato de ter sido um de seus primeiros objetos de estudo (tendo sido tão antigo quanto o avanço do intelecto humano o permitiu). De fato, é difícil imaginar que você tenha simplesmente passado o seu olho pela imagem sem apreciá-la por alguns instantes. Mais difícil ainda é imaginar este cenário “ao vivo” sendo ignorado mesmo

¹ Disponível em <<https://www.nasa.gov/image-feature/celestial-fireworks>> Acesso em dez. 2015

pelo mais ocupado e insensível dos homens. Bom, é evidente, considerando sua fonte, que essa imagem especificamente não seria vista a olho nu, mas imagens igualmente bonitas são tiradas por fotógrafos aqui mesmo da Terra, como as figuras A.2 e A.3.



Figura A.2. Alpes suíços



Figura A.3. Parque Estadual dos Três Picos – Friburgo - RJ²

Assim, constatamos o que todo observador que tenha dedicado um mínimo de tempo a olhar o céu noturno (ou fotografias deste) já sabe: as imagens também são

² Disponível em <<http://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2014/10/friburgo-rj-e-uma-das-10-melhores-cidades-para-observar-estrelas.html>> Acesso em mar.2016.

estonteantes vistas aqui da Terra. O que elas duas têm em comum? O fato de ambas terem sido tiradas em regiões elevadas e relativamente longe de quaisquer centros urbanos, de forma a evitar poluição luminosa. Assim é fácil compreender o porque não vemos um céu destes em nosso dia a dia em geral. E, embora não desejemos isso a ninguém, a próxima vez que faltar luz à noite em sua cidade, ou ao menos em seu bairro, note o quanto o céu estará mais parecido com a foto da figura A.3 do que quando as luzes da cidade estão acesas. Embora provavelmente nessa situação você estará mais preocupado em procurar lanternas ou velas e ligar para a companhia que fornece energia elétrica para sua cidade do que em olhar para o céu, esse pensamento certamente já deve ter passado pela cabeça de muitos. Ao menos passou na cabeça do fotógrafo francês Thierry Cohen que desenvolveu uma série de imagens denominadas “Darkned Cities”, que revela como seria o céu noturno de grandes cidades caso não houvesse luz elétrica e poluição. Para isso Cohen, através do processo de montagem, combinou imagens de grandes cidades com o céu noturno de lugares distantes de quaisquer grandes civilizações. Seu trabalho inclui imagens de Paris, Nova York, Tóquio, Los Angeles, Shangai, Hong Kong, São Francisco e mesmo de cidades brasileiras incluindo São Paulo, Rio de Janeiro e Niterói. Nas figuras A.4 e A.5 vemos as fotos do Rio de Janeiro e de Niterói, respectivamente.

Embora as figuras não representem o que de fato veríamos, elas nos dão uma noção do quão estonteante seria a imagem visualizada.

Mais uma vez, é perfeitamente compreensível que o céu noturno tenha sido alvo da análise de tantos povos antigos e que, depois de tanto observar, o homem tenha tentado compreender o funcionamento do universo. Como este texto trata de uma lei natural que consiste numa importante evidencia experimental de um dos modelos que tentam descrever o universo, investiremos algumas páginas analisando outras tentativas de descrever o universo, todas precedendo a atual.



Figura A.4. Rio de Janeiro³



Figura A.5. Niterói⁴

³ Disponível em < <http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2013/01/fotografo-simula-como-seria-ceu-de-cidades-sem-luz-em-darkened-cities.html> > Acesso em mar.2016.

⁴ Disponível em < <http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2013/01/fotografo-simula-como-seria-ceu-de-cidades-sem-luz-em-darkened-cities.html> > Acesso em mar.2016.

A Grécia Antiga

O “nascido” da ciência

Ao estudar a História da Física, ou de outras ciências, é comum que nosso ponto de partida seja a Grécia Antiga. Talvez uma pergunta que (espera-se) muitos devem ter feito é o porquê dessa convergência. Os gregos antigos coexistiram com diversos outros povos dos quais a cultura e, por extensão alguma contribuição intelectual, influenciaram os povos posteriores e até mesmo os da atualidade, tais como os egípcios, persas, mesopotâmios, para não falar nos povos que os precederam. É de se estranhar que todo o crédito recaia para um só povo. O que os caracteriza como a “linha de partida” do conhecimento humano? Foi de fato desse povo que originou-se todo o conhecimento atual? É quase óbvio que a resposta para essa pergunta é não. O conhecimento não surgiu da Grécia Antiga, pois este povo já era organizado e possuía, assim como os outros povos citados (por vezes até mais do que os gregos), noções de agricultura, economia, geometria, entre outras informações concernentes ao conhecimento humano sobre a natureza. Começamos o estudo das Histórias das Ciências pela Grécia antiga, pois o estudo trata do início da Ciência em questão, e não do início do conhecimento do que ela se propõem a estudar, o que não é a mesma coisa. A questão é um tanto quanto confusa, e nos remete a perguntas que ainda hoje possuem respostas (ou tentativas de respostas) que não convergem entre os pesquisadores da História da Filosofia, tais como “Quando um conjunto de conhecimentos constitui uma ciência?”. Tal assunto requereria muito mais atenção do que a tratada neste texto, fugindo do tema principal deste. Façamos então um breve apanhado desta questão com o fim de compreendermos o porquê de começarmos nosso retrospecto de modelos cosmológicos com o modelo de um grego da antiguidade.

As palavras Ciência e cientista, por incrível que pareça, são terminologias relativamente modernas. A palavra cientista foi criada pelo polímata vitoriano William Whewell, que a usou pela primeira vez em março de 1834. A palavra é uma variação do Latim “scientia”, que significa “conhecimento”, e o termo foi utilizado para designar aqueles que antes eram usualmente chamados de Filósofos Naturais⁵. Segundo o

⁵ Simon Singh, *Big Bang*. Primeira edição (traduzida), Editora Record, Rio de Janeiro, 2006.

dicionário Aurélio, Ciência é definida como “*Conjunto de conhecimentos fundados sobre princípios certos. Saber, instrução, conhecimentos vastos...*”. Embora as duas definições estejam relacionadas, a segunda não está totalmente de acordo com a primeira. Afinal, os povos contemporâneos aos antigos gregos (e mesmo os antecessores a eles) possuíam considerável grau de saber, instrução e conhecimentos vastos, tal como a geometria dos egípcios ou as observações astronômicas dos babilônios. O que diferencia o conhecimento desses povos e o dos gregos, diferença essa que caracteriza os saberes gregos com o que de fato se entende como ciência, é o fato destes (os gregos) terem se preocupado com as causas dos fenômenos, ao invés de apenas usá-los. Assim, enquanto os conhecimentos dos outros povos tinham um caráter mais prático, os gregos se perguntavam por que os fenômenos estudados ocorriam. Segundo Guthrie⁶:

“Aqui está a diferença fundamental entre eles [as civilizações mais antigas] e os Gregos. Os Gregos perguntara ‘Por que?’ e esse interesse em causas leva imediatamente a mais demandas: A demanda por generalização. O Egípcio sabe que o fogo é um instrumento útil. Ele tornará seus tijolos duros e duráveis, aquecerá sua casa, modificará areia em vidro, criará aço temperado e extrairá metais do minério. Ele [o egípcio] faz essas coisas e se contenta em aproveitar os resultados em cada caso. Mas se, como os Gregos, você pergunta por que a mesma coisa, o fogo, faz todas essas coisas diferentes, então você não mais está pensando separadamente o fogo que é aceso em fornos de tijolo, nas lareiras e o fogo na oficina do ferreiro. Você começa a perguntar qual é a natureza do fogo, em geral: Quais são as propriedades do fogo? O progresso em [fazer] generalizações mais altas constitui a essência do novo passo tomado pelos Gregos. Os métodos dos Babilônios têm um caráter algébrico e mostra que estavam cientes de certas regras algébricas, mas [. . .] “nenhuma tentativa foi feita para generalizar os resultados”[Guthrie cita outro autor]. Os Egípcios pensavam na geometria como uma questão de terras retangulares ou triangulares. Os Gregos a tiram do plano concreto e material e começam a pensar nos próprios retângulos e triângulos, que têm a mesma propriedade, estejam em campos de muitos acres ou em peças de madeira ou tecido de poucas polegadas ou, simplesmente, representados por linhas traçadas na areia.”

Já tratar a questão do porquê desse conhecimento ter se originado na Grécia e não em outros povos é um tema igualmente complexo, e de natureza mais social. Assim como no caso de “o quê de fato pode ser chamado de ciência?”, temos diferentes

⁶ Guthrie, citado no texto de Penha M. C. Dias e Raquel A. Sapunaru, *História da Física I – Formação das categorias do pensamento em Física (século XI a.C. – Século XVII d.C.)*, 2008. Disponível em [HTTP: www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico/2008/historia_fisica_1.pdf](http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico/2008/historia_fisica_1.pdf).

respostas por diferentes estudiosos, não sendo todas consensuais. Segundo o historiador George Sarton, citado no mesmo texto anterior, a ciência grega nasceu na Jônia (uma colônia grega) por esta ser um “terreno fértil a informações” devido (entre outras causas) a sua posição geográfica que:

“(...) era um lugar excelente para a mistura de ideias e culturas e o estímulo resultante. Na medida em que as pessoas ficam estagnadas em suas vilas ancestrais, elas não se perguntam muitas questões, pois cada pergunta foi feita e respondida um número de vezes e não há propósito em ficar se preocupando com elas. Pelo contrário, quando pessoas de diferentes raças e com tradições diferentes se agrupam, cedo ou tarde, ocorre aos mais inteligentes [no sentido de Sarton, pessoas individuais, não grupos] que há mais de um modo de se olhar para as coisas e de resolver problemas.”

O que tem bastante sentido quando consideramos a posição da Jônia no século VI A.C., rodeada pelo Egito, pela Pérsia e o caminho para a Mesopotâmia. Já para outro autor, Duanne Roller, também citado no texto de Dias e Saponaru, os gregos foram motivados a compreender a natureza pelo fato de, segundo sua cultura, seus deuses, que personificavam a natureza, agiam como humanos, trapaceavam, discutiam, se enfureciam, se alegravam, etc. Sendo assim, era possível entendê-los e, por extensão, compreender o funcionamento da natureza.

Ainda que tenhamos diversas correntes de pensamento a definir o que é ciência e por quê ela surgiu, o fato é que em grande parte elas concordam que seu começo se deu na Grécia Antiga, sendo a evidência mais antiga a ser encontrada no século VI a.C., onde foi criada uma nomenclatura para designar a natureza, e, posteriormente, para designar o próprio estudo dessa. A seguir, veremos então o que se considera o primeiro modelo cosmológico, o modelo de Aristóteles.

O Modelo Aristotélico

Aristóteles foi um filósofo da Grécia antiga, que viveu entre os séculos IV e III A.C., e cujos estudos (e a crítica a eles) foram a base da formação das categorias do pensamento em Física, tendo influenciado o mundo por quase dois milênios (sobretudo à Europa medieval), segundo as autoras já citados Dias e Sapunaru. A ele é associado o primeiro modelo cosmológico. Denominamos aqui de modelo cosmológico um modelo científico que explique a origem, a evolução e o funcionamento do universo, visto que antes de Aristóteles, como já foi mencionado, os babilônios já possuíam dados astronômicos incrivelmente precisos, que inclusive foram utilizados por Cláudio Ptolomeu, que viveu aproximadamente 400 anos depois de Aristóteles, para este desenvolver seu próprio modelo. Aristóteles foi o primeiro, então, a criar um modelo que tentava explicar o funcionamento do universo. A figura A.6 representa um esquema bem simplificado do modelo Aristotélico.

Primeiramente vemos que seu modelo era Geocêntrico, isto é, era um modelo no qual a Terra ocupava uma posição central (era o centro do universo), o que era perfeitamente plausível para a época visto que, do ponto de vista daqui da Terra, tudo parece girar em torno de nós. Repare ainda que, além da chamada esfera das estrelas, camada que ficava mais afastada de nós, o universo aristotélico era composto apenas pela própria Terra, pelo Sol, a Lua, Mercúrio, Marte, Vênus, Júpiter e Saturno, não sendo conhecidos ainda os planetas Urano e Netuno e os diversos astros menores do sistema Solar. Mas um modelo envolve, além da observação, uma justificativa, e o porquê de a Terra estar no centro, segundo Aristóteles, é um tanto curioso, e está ligado ao sistema filosófico que o próprio desenvolveu. Segundo Aristóteles, o universo podia ser dividido em Sublunar e Supralunar. O primeiro, imperfeito, perecível, o segundo, perfeito, eterno. Aristóteles adotou a teoria de um antecessor seu, Empédocles, no qual o mundo sublunar era composto de quatro elementos primordiais, a água, a terra, o fogo e o ar, tendo cada um o seu “lugar natural”, de acordo com a sua natureza. Tudo mais (incluindo nós) teria uma certa proporção desses quatro elementos, cuja natureza também estava associada a duas qualidades a lhes caracterizar. De modo simples, podemos dividir os elementos e suas qualidades de acordo com a figura A.7 (embora Empédocles tenha “dividido” essas características em predominante e “secundária”).

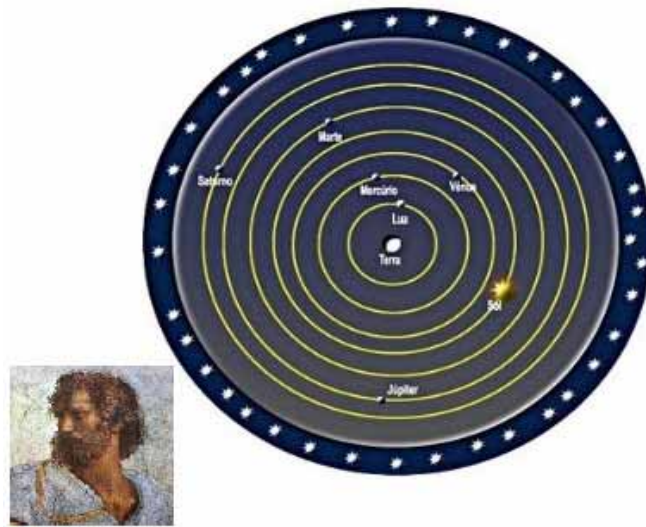


Figura A.6. Aristóteles (no canto) e um esquema simplificado de seu modelo cosmológico.⁷

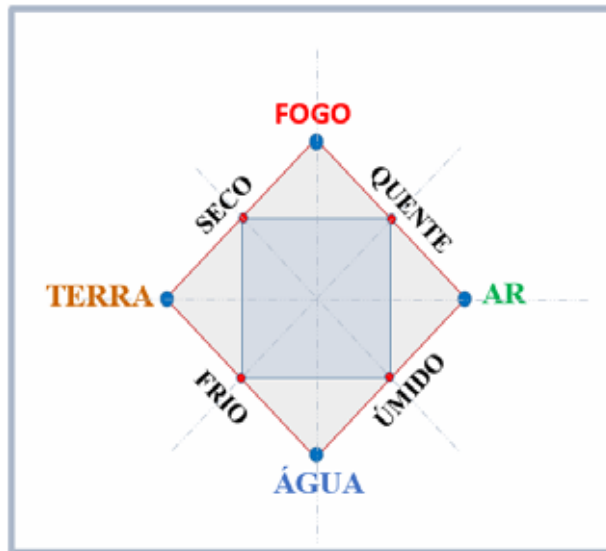


Figura A.7. Elementos primordiais (segundo Aristóteles) e suas qualidades.

A posição dos corpos depende então do tipo de material de que é feito. A terra por ser mais “pesada”, possui seu lugar natural mais abaixo do que os outros três elementos. Acima dela se encontra a água, depois o ar e por fim o fogo. Assim, se largamos uma pedra num lago essa afunda porque seu lugar natural é abaixo da água, e se assopramos bolhas de ar em baixo da água elas sobem por que o lugar natural do ar é acima da água. O fogo, que sempre “sobe”, tenta constantemente ficar em seu lugar natural, acima dos outros elementos. Seguindo esse raciocínio, se um corpo afunda na

⁷ Disponível em < http://www.portaldoastronomo.org/tema_pag.php?id=38&pag=2>.

água, é porque sua composição é em maior parte do elemento terra, se ele flutua, sua composição deve conter bastante ar. Como a terra é o elemento que fica abaixo de todos os outros, o planeta Terra resulta da “queda” de toda terra para o centro do universo.

Já o mundo supralunar era composto de um quinto elemento, o éter. Este era perfeito, e o movimento do mundo supralunar caracterizava essa sua perfeição. Para Aristóteles, o movimento podia ser caracterizado como natural ou violento. O violento era causado por forças que podiam retirar os corpos de seu lugar natural. O natural era um movimento “dos próprios corpos”, para voltar ao seu lugar natural. Assim, se erguemos uma pedra do chão, esta realizou um movimento violento, e quando está é solta, ela volta para seu lugar natural através do movimento natural. Ao chegar a seu lugar, o corpo para. O estado natural dos corpos é então o repouso, sendo este uma característica associada à perfeição, enquanto o movimento é associado à imperfeição. O mundo supralunar era perfeito, e embora este estivesse sempre em movimento, seu movimento era “especial”, perfeito, eterno, por ser um movimento circular uniforme (para os gregos antigos). Assim, não importava o fato de os corpos supralunares estarem em movimento já que seu movimento era equivalente a estar parados. Afinal, depois de um ciclo, você volta para o mesmo lugar.

O modelo Ptolomaico

Cláudio Ptolomeu foi um grego nascido no século II D.C., e que contribuiu profundamente para Astronomia, tendo organizado um modelo em sua obra denominada “Almagesto” (que significa “o maior de todos”) que consiste no maior tratado de Astronomia de toda a Antiguidade, segundo Dias e Sapunaru . O seu modelo, apesar de ainda estar ligado à antiga filosofia grega, sobretudo no aspecto de perfeição do movimento circular, responde a muitos dos problemas que seus antecessores não conseguiram. Na verdade, em certo sentido, seu modelo tentava “salvar” essa noção grega, conciliando-a com o que era observado (e que estava em aparente contradição com ela). Podemos apontar três desses problemas, todos concernentes aos planetas do Sistema Solar: primeiro, os planetas, ao longo de seu movimento anual, sofriam retrogradações (“davam marcha ré”) em certos trechos, e isso obviamente não

correspondia a um movimento circular (muito menos uniforme). Na figura A.8, vemos em vermelho a órbita de Marte vista aqui da Terra, constatando esse fato. Segundo, o “brilho” dos planetas variava no decorrer do ano, o que indicava uma maior proximidade (ou afastamento) dos planetas em relação à nós, observação também incompatível com um movimento circular. Terceiro, o tempo entre duas retrogradações sucessivas de um planeta varia.

O modelo de Ptolomeu explicava esses problemas em termos de movimentos circulares uniformes. E, embora não tenha sido ele a propor todos os “esquemas” que explicavam essas anomalias, ele organizou as informações acumuladas até sua época, modificou alguns desses parâmetros e acrescentou outro, que deixava seu modelo mais de acordo com os resultados observacionais, sobretudo no que se refere ao terceiro problema mencionado acima.

A explicação do movimento retrógrado e da variação do brilho dos planetas, preservando os movimentos “perfeitos” circulares foi feito através do seguinte artifício: O movimento dos planetas pode ser descrito como um círculo (chamado epiciclo) cujo centro também realiza um movimento circular (este segundo círculo recebe o nome de deferente). O centro do deferente é ocupado pela própria Terra. Esse esquema está exemplificado na figura A.9. Na figura A.10 temos uma imagem “completa” do Sistema Solar segundo esse esquema simplificado.

O artifício acima mencionado é uma versão simplificada do modelo de Ptolomeu, visto que apenas ele não consegue explicar a variação do tempo entre duas retrogradações sucessivas de um planeta. Para resolver esse problema foi adicionado pelos gregos uma excentricidade. Se a Terra não ocupar o centro do Deferente, estando “ligeiramente” deslocada em relação a este, o movimento do epiciclo pode ser considerado uniforme, não do ponto de vista da Terra, mas sim do centro do deferente. O modelo final de Ptolomeu contém ainda outra excentricidade, o chamado ponto equante, uma contribuição original do próprio Ptolomeu que melhora o modelo de forma que este fique ainda mais em conformidade com os dados observacionais. Esse esquema pode ser visto na figura A.11.



Figura A.8. Retrogradação dos planetas (Kaufmann, p.56). A figura mostra (em vermelho) uma retrogradação de Marte entre os meses de janeiro e março.

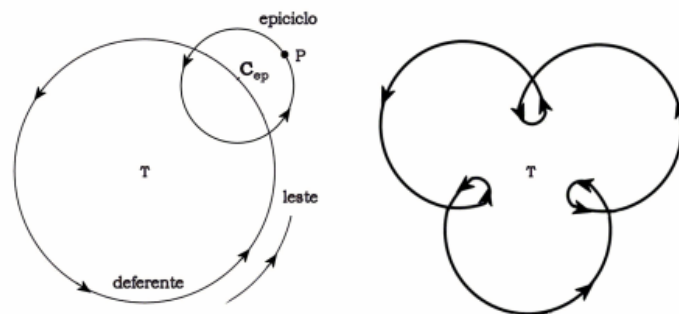


Figura A.9. A figura à esquerda é o modelo do epiciclo e do deferente simplificado. A figura da direita é o movimento resultante, visto da Terra; a figura é fechada, só se os períodos do epiciclo e do planeta forem comensuráveis.



Figura A.10: Ptolomeu (no canto) e um esquema simplificado de seu modelo cosmológico.⁸

⁸ Disponível em < http://www.portaldoastronomo.org/tema_pag.php?id=38&pag=2>

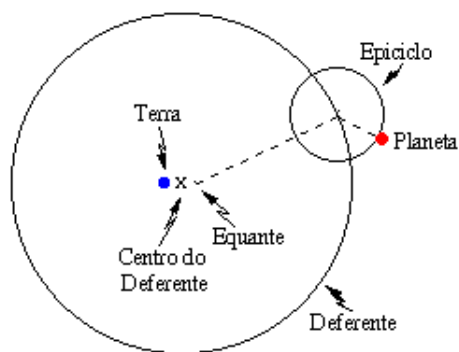


Figura A.11. Imagem reproduzida de H.M.Nussenzveig, Curso de Física Básica, v.1, pág 189).

Nesse esquema final, temos o epiciclo girando em torno do centro do deferente com um movimento uniforme do ponto de vista do equante.

Embora Ptolomeu, assim como muitos dos antigos gregos, tenha deliberadamente tentado “salvar” a ideia do movimento circular perfeito, sua contribuição foi genuína, não se limitando a um “achismo”. Ele de fato conseguiu descrever o movimento dos Planetas do ponto de vista de um observador daqui da Terra com notável precisão, tendo sua obra perdurado por aproximadamente treze séculos!

O Modelo Copernicano

Nicolau Copérnico (1473–1543), outro brilhante astrônomo, nasceu numa província da Polônia (na época, Reino da Polônia). Seu trabalho em astronomia está contido na obra “De revolutionibus orbium coelestium” (nome original em latim que significa *Das Revoluções das Esferas Celestes*) que constitui uma grande mudança, do ponto de vista filosófico, em relação à astronomia da antiguidade. O livro, publicado no ano de sua morte, contém seu modelo cosmológico que, apesar da grande transição que representa, era bastante semelhante à astronomia grega. A repercussão do seu trabalho é um assunto controverso em Epistemologia, sendo um valioso exemplo de como o contexto histórico influencia os rumos das ciências tanto quanto as áreas econômicas e políticas.

A grande mudança reside no fato de que o modelo Copernicano propõe que o Sol seja (quase) o centro do universo (da época), e não a Terra. Os modelos que assim o fazem são chamados de heliocêntricos, enquanto que aqueles que descrevem o universo centrado na Terra são chamados de geocêntrico. A figura A.12 mostra um esquema simples do modelo de Copérnico.



Figura A.12. Copérnico (no canto) e um esquema simplificado de seu modelo cosmológico.⁹

A ideia de um modelo heliocêntrico já havia sido proposta por astrônomos gregos mesmo na época de Aristóteles, e fora refutada por um motivo bastante razoável: se a Terra se movesse ao redor do Sol, deveria existir (e de fato existe) um efeito denominado paralaxe. Esse efeito ocorre, por exemplo, ao olharmos os ponteiros de um relógio. Imagine, por exemplo, que o ponteiro da hora esteja exatamente no número 12 e nós observemos o relógio estando de frente para ele. Se dermos alguns passos para a esquerda, teremos a impressão de que o ponteiro está ligeiramente à direita do número 12. Analogamente, ao olharmos uma estrela no céu e a observarmos seis meses depois, ela deverá parecer deslocada da posição anterior pois, durante esse intervalo de tempo, nós nos movemos em relação à ela (meia volta ao redor do Sol). Como esse efeito nunca havia sido observado, a ideia de um modelo heliocêntrico foi abandonada. A razão para a não observação deste efeito é muito simples, ele é tão menos acentuado quanto maior for a distância entre o observador e o corpo para o qual ele olha. Se, no caso do relógio, estivermos muito distante dele, ao dar mais uma vez uns passos para a esquerda ou direita, praticamente não observaremos esse efeito. Na antiguidade não se imaginava

9 Disponível em < http://www.portaldoastronomo.org/tema_pag.php?id=38&pag=2>.

que as estrelas estivessem tão distantes que o efeito não fosse observável a olho nu, mas de fato elas estão, e este efeito só foi observado (com telescópio) em 1838!

Um dos grandes méritos do modelo de Copérnico foi a dedução (pela primeira vez) da escala relativa das distâncias dentro do sistema solar, todas em função do raio médio da órbita da Terra (distância média da órbita da Terra ao Sol), medida hoje chamada de unidade astronômica (U.A.). Na figura A13 mostramos uma tabela que compara os valores obtidos por Copérnico em comparação com os valores atuais.

| Planeta | Raio médio da órbita em U.A. | |
|----------|------------------------------|--------|
| | Copérnico | Atual |
| Mercúrio | 0,3763 | 0,3871 |
| Vênus | 0,7193 | 0,7223 |
| Marte | 1,5198 | 1,5237 |
| Júpiter | 5,2192 | 5,2028 |
| Saturno | 9,1743 | 9,5388 |

Figura A.13. Comparação entre os valores obtidos por Copérnico e os atuais dos raios médios planetários (em U.A.) (Nussenzveig – Vol.1 - 2002 – pág. 191)

Além disso, Copérnico obteve o tempo que os planetas do Sistema Solar levavam para completar uma volta em torno do Sol, ou seja, a duração do “ano” de cada planeta. Na figura 4.14 apresentamos uma tabela comparando os valores encontrados por Copérnico em comparação com os atuais.

| Planeta | Período sideral | |
|----------|-----------------|-------------|
| | Copérnico | Atual |
| Mercúrio | 87,97 dias | 87,97 dias |
| Vênus | 224,70 dias | 224,70 dias |
| Terra | 365,26 dias | 365,26 dias |
| Marte | 1,882 anos | 1,881 anos |
| Júpiter | 11,87 anos | 11,862 anos |
| Saturno | 29,44 anos | 29,457 anos |

Figura 4.14. Comparação entre os valores obtidos por Copérnico e os atuais da duração dos períodos siderais(anos) dos planetas do Sistema Solar (Nussenzveig – Vol.1 - 2002 – pág. 191)

Notemos o quão próximos os valores encontrados para ele estão dos atuais. Apesar disso, a “adoção” do modelo Copernicano é fruto de intensas discussões da Epistemologia, em particular, para responder a pergunta “Por que escolher um modelo ao invés de outro?”. Segundo Dias e Sapunaru, o historiador da ciência Thomas S. Kuhn aponta que o sistema Copernicano só é melhor que o Sistema Ptolomaico em termos qualitativos, recorrendo também aos epiciclos e deferentes, para descrição quantitativa de seu modelo. Ainda segundo Kuhn, poucas razões existiam para que se escolhessem entre as duas teorias, e segundo o autor a escolha se deveu ao contexto sócio-histórico de Copérnico, ou seja, ao Renascimento, um período de grandes inovações e contestações de autoridade.

Tycho Brahe e Johannes Kepler

Tycho Brahe (1546 – 1601) foi um astrônomo dinamarquês que ficou conhecido por sua incrível habilidade observacional. Ainda que em sua época não se usasse telescópio, Tycho conseguiu uma precisão superior à das melhores observações da antiguidade. Com seus dados, Tycho propôs um modelo próprio, intermediário ao Copernicano e Ptolomaico. Nele, todos os planetas (com exceção da Terra) giram em torno do Sol, enquanto este gira em torno da Terra. Seu modelo difere então do de Copérnico simplesmente por uma questão de referencial. Sua grande colaboração encontra-se em seus dados, incrivelmente precisos, pois foi com esses dados que seu assistente Johannes Kepler (que “herdou” suas observações) escreveu seu livro “Astronomia Nova”, publicado em 1609, que contém duas de suas três famosas leis a respeito do Sistema Solar. Kepler foi o primeiro a descrever corretamente as órbitas dos planetas ao redor do Sol, e a relacionar matematicamente os raios médios das órbitas dos planetas com seus respectivos períodos. Ele resolveu os problemas enfrentados pelos antigos gregos concernentes às retrogradações dos planetas abandonando a ideia do movimento circular perfeito. Utilizando as observações de Tycho Brahe, Kepler compreendeu que as órbitas dos planetas eram elipses, uma figura matemática que possui a forma oval. Essa constitui sua primeira lei.

Primeira Lei de Kepler: A Lei das Órbitas

A primeira Lei de Kepler diz que a órbita dos planetas do Sistema Solar ao redor do Sol é uma elipse com o Sol ocupando um dos focos dessa elipse, como indicado na Figura A15.

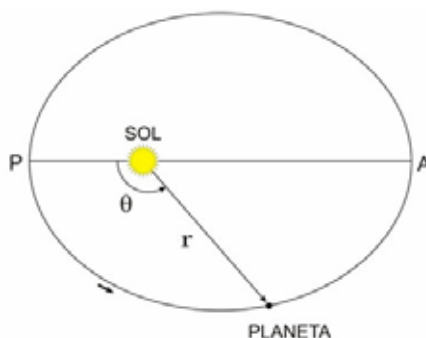


Figura A.15: Representação da órbita elíptica de um planeta ao redor do Sol.¹⁰

Vale ressaltar que essas elipses (no caso dos planetas do Sistema Solar) são bem pouco excêntricas (termo usado para designar o quão “oval” é uma elipse). A figura A15 é utilizada para ressaltar o fato de que a órbita é uma elipse, mas elas são tão pouco excêntricas que suas órbitas são quase circulares, razão pela qual levou tanto tempo para que se percebesse tal fato. O planeta que possui órbita mais excêntrica é Marte.

Segunda Lei de Kepler: A Lei das Áreas

A segunda Lei de Kepler diz que o raio (imaginário) que liga o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais. Logo, a velocidade dos planetas ao redor do Sol não é constante, sendo maior quando estes se encontram mais próximos dele. Essa lei é ilustrada na Figura A16.

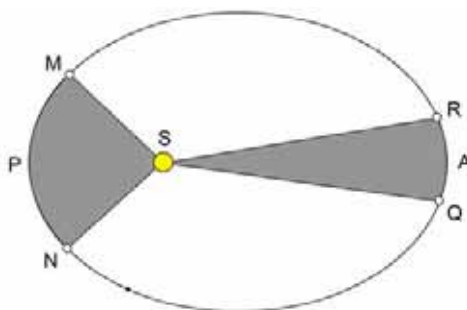


Figura A.16: Representação da Lei das Áreas¹¹

¹⁰ Disponível em < <http://www.uranometrianova.pro.br/astrologia/AA002/4leikepler.htm> >.

¹¹ Disponível em < <http://www.uranometrianova.pro.br/astrologia/AA002/4leikepler.htm> >.

Terceira Lei de Kepler: A Lei dos Períodos

A Terceira Lei de Kepler relaciona o período das órbitas dos planetas do Sistema Solar (o tempo que eles levam para dar uma volta em torno do Sol) com os seus respectivos raios médios (distância média ao Sol). Especificamente, Kepler percebeu que a razão entre o quadrado do período e o cubo do raio médio do planeta é uma constante, ou seja, é o mesmo valor para todos os planetas do Sistema Solar. Matematicamente:

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{constante}$$

O valor dessa constante depende da unidade de medida que empregamos para medir o período e o raio médio, mas ela é igual para todos os planetas do Sistema Solar. Se utilizarmos os valores das tabelas A.13 e A.14 e aplicarmos a equação da Terceira Lei de Kepler, encontraremos para essa constante o valor aproximado de 133.000 dias²/U.A.³

Isaac Newton e a Teoria da Gravitação Universal

Isaac Newton (1642 - 1727) foi um brilhante físico e matemático inglês cujas contribuições intelectuais permeiam diversos ramos dessas disciplinas. Na Física destacam-se seus trabalhos em Óptica e na Mecânica. Na última parte de seu livro “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural” (Philosophia Naturalis Principia Mathematica) ele formula a Lei da Gravitação Universal, na qual faz um estudo matemático e conceitual da gravidade.

Resumindo de modo bem simples, o enunciado matemático da Gravitação Universal de Newton diz que a força de interação gravitacional entre dois corpos é diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Assim, podemos expressá-la (em notação moderna) através da seguinte expressão matemática

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

sendo essa expressão usada para se calcular a intensidade da força gravitacional entre dois corpos. A direção dessa força está sempre sobre a reta que une os corpos (no caso de corpos pontuais) e ela é sempre atrativa. Nela, m_1 e m_2 são as massas dos corpos que se atraem, d é a distância entre eles e G é a chamada constante da gravitação universal, cujo valor é aproximadamente $6,67 \cdot 10^{-11} N \cdot m^2 / Kg^2$.

Segundo o historiador Isaac Bernard Cohen, o grande mérito de Newton na Gravitação Universal teria sido a descoberta da interação mútua entre os corpos que possuem massa [Dias e Sapunaru (2008)]. Newton teria percebido que, se o Sol atrai a Terra, esta também deveria atrair o Sol, com uma força de mesma intensidade, pela Lei da ação e reação. Analogamente, o mesmo ocorreria com os demais planetas e o Sol, e com os planetas entre si e os demais corpos celestes do Sistema Solar. Em suma, cada corpo celeste também é um centro de força atrativa. Ainda segundo Cohen, a proporcionalidade da força gravitacional com o inverso do quadrado da distância já era suficientemente conhecida na época de Newton, sendo uma consequência da Terceira Lei de Kepler.

Curiosidade: A queda da história da maçã

Newton teria se desentendido com outro brilhante físico Inglês de sua época, Robert Hooke (1635 – 1703), tendo Hooke alegado ter sugerido a Newton o fato de a força gravitacional ser inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os corpos que interagem. Ele teria feito tal sugestão numa troca de cartas feita entre o fim de 1679 e o começo de 1680. Após Hooke ter escrito a Newton convidando-o a comentar sobre um método criado pelo próprio Hooke para descrever movimentos retilíneos, Newton teria respondido que não conhecia tal método e propôs na resposta um problema que, em linguagem moderna, corresponderia a obter a órbita de um corpo que se move sob o efeito de uma força central atrativa (tal como a gravitacional). A solução de Newton era uma curva espiralada e estava errada. Hooke teria respondido¹²:

“(...) a atração está sempre em uma proporção dupla com a distância ao centro, reciprocamente(...)”

(Turnbull 1960 apud Dias, Sapunaru 2008)

¹² Turnbull 1960 apud Dias, Sapunaru 2008

Ou seja, a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância, o que está correto. Hooke teria proposto que a solução seria “uma espécie de elipsoide”. Newton não respondeu a esta carta.

Uma história famosa em livros didáticos a respeito da descoberta da Gravitação Universal é o da queda de uma maçã. Segundo tal história, Newton, na década de 1660, ao se retirar para o campo fugindo do surto de peste em Londres, durante uma caminhada na qual pensava no porquê de a Lua estar presa à Terra, teria tido uma epifania ao observar uma maçã caindo de uma árvore. Tal queda teria-o feito pensar que a mesma interação que a maçã tem com a Terra (e que fez ela cair) existe também entre a Terra e a Lua, sendo esta interação o que prende ela à Terra. Segundo mencionado por Dias e Saponaru, o historiador Cohen afirmou que Newton não teria, à época, as bases conceituais que de fato o levaram a formular a lei (tal como o conhecimento da lei de ação e reação, que, segundo Cohen, teria sido formulada no último rascunho do *Principia*, por volta de 1685). A história teria sido inventada pelo próprio Newton para tornar mais convincente sua alegação de que sua formulação da Gravitação Universal ocorreria quase vinte anos antes da publicação do *Principia*, e, portanto, sem a “ajuda” dada por Hooke. Cohen propôs, após a leitura de Newton e seus cadernos de notas, que foi aplicando o método de Hooke que Newton aprendeu a tratar trajetórias curvas.

Einstein e a Teoria da Relatividade Geral

Albert Einstein (1879-1955) foi um físico nascido na Alemanha que revolucionou a Física lançando uma das bases da Física Moderna com o seu trabalho, a Teoria da Relatividade, estudo que é dividido em duas partes, a Teoria da Relatividade Restrita, publicada em 1905¹³, e a Teoria da Relatividade Geral, publicada em 1915¹⁴. Einstein colaborou para o desenvolvimento de diversas áreas da Física, como a Mecânica Estatística e a Mecânica Quântica, tendo, com um de seus trabalhos nessa área, o estudo sobre o efeito fotoelétrico, recebido o Prêmio Nobel de Física de 1921.

¹³ Willian J. Kaufmann, *Relativity and Cosmology*, 1st edition, New York: Joanna Cotler Books, 1973.

¹⁴ Einstein 1915, *Gesamtsitzung*, vom.4, conforme citado por Ioav Waga, Colóquio apresentado em 26/11/2015 no Instituto de Física da UFRJ (comunicação privada).

Seu trabalho sobre a Teoria da Relatividade Restrita foi uma tentativa de resolver um problema de sua época.

Para relacionar as coordenadas de tempo e espaço de dois referências inerciais era comum usar na época as chamadas transformações de Galileu, um conjunto de equações que expressavam tal relação. Uma das consequências destas equações era o caráter absoluto do tempo e espaço. O problema resolvido por Einstein em seu trabalho estava relacionado às transformações de Galileu e as equações de Maxwell, um conjunto de equações que expressa os fundamentos do eletromagnetismo. Com as equações de Maxwell é possível, por exemplo, deduzir a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e, segundo essas equações, esta velocidade é uma constante que depende do meio em que ela se propaga (especificamente de duas características dele, sua permissividade elétrica e sua permeabilidade magnética). O problema é que as equações de Maxwell não são invariantes frente às transformações de Galileu. Einstein resolveu esse problema realizando drásticas mudanças na Mecânica para corpos com velocidades comparáveis à da luz. Conceitualmente, Einstein quebrou o paradigma do caráter absoluto do tempo e do espaço.

Já a Teoria da Relatividade Geral considera também campos gravitacionais, sendo uma teoria de Gravitação, assim como a Teoria da Gravitação Universal de Newton. O trabalho de Einstein era, entretanto, mais abrangente que o de Newton. Para campos gravitacionais da ordem do campo na superfície da Terra, por exemplo, os dois trabalhos coincidiam até certo ponto; Einstein demonstrou, porém, que para campos gravitacionais muito superiores ao da Terra, como o campo nas proximidades do Sol, a gravitação de Newton não correspondia às observações. Para ilustrar como isso ocorreu, analisemos muito superficialmente a Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

Resumindo de forma bem simples, Einstein descreveu a gravidade não como uma força, mas sim como uma distorção do espaço-tempo. Tal conceito é comumente explicado com a seguinte analogia: imagine uma manta completamente esticada (ou pegue uma manta e faça você mesmo esse breve experimento; se não tiver uma manta, use um lençol, uma toalha ou mesmo uma camisa grande) amarrada em quatro pontas a suportes fixos. Imagine que a superfície dessa manta é o espaço sideral. Se colocarmos um objeto leve em cima dessa manta esticada, tal como uma bola de gude, ela será

deformada, ainda que pouco. Se, ao invés da bola de gude, colocarmos um objeto mais massivo, como uma bola de futebol, a deformação será maior. Se colocarmos os dois objetos próximos um do outro, o corpo menor será atraído para o maior por causa da deformação causada por ele. Essa deformação seria análoga ao que ocorre com os corpos no espaço. Todo corpo, devido à sua presença, deforma o espaço, assim como a bola de gude e a de futebol deformaram a manta, atraindo tudo a sua volta. Essa deformação seria a gravidade.

Einstein, com o seu trabalho, previu que, se um campo gravitacional fosse suficientemente intenso (tal como o gerado pelo Sol em seus “arredores”), a luz seria desviada pela distorção do espaço-tempo. Então, se uma estrela estivesse quase “atrás” do Sol (do nosso ponto de vista), ela seria vista por nós ligeiramente deslocada de sua posição devido à curvatura dos raios de luz emitidos por ela. A teoria Newtoniana também prevê tal desvio, mas o trabalho de Einstein sugere um desvio duas vezes maior. O problema é que não é possível, em condições normais, fazer tal observação já que a luz do Sol ofusca a de todas as demais estrelas. Porém tal observação poderia ser feita durante um eclipse solar, visto que a luz do Sol seria bloqueada por alguns momentos. Para testar a teoria de Einstein, duas equipes tentaram registrar (via fotografias) um eclipse solar que ocorreu em 1919, tendo elas sido enviadas para locais em que esse eclipse seria visível. Um desses locais foi na África, mas devido a condições climáticas adversas, não foi possível realizar fotografias que confirmassem (ou refutassem) o trabalho de Einstein. Já a outra equipe foi bem sucedida, tendo feito o registro do eclipse aqui mesmo no Brasil, especificamente na cidade de Sobral, no Ceará. Foi com o registro dessa equipe que o desvio da luz previsto por Einstein foi observado, sendo esta uma comprovação experimental da Teoria da Relatividade Geral.

Outra comprovação experimental do trabalho de Einstein vinha da observação da precessão da órbita de Mercúrio que, vista da Terra, é igual a 5600 segundos de arco por século. A teoria de Newton previa uma precessão de 5557 segundos de arco por século, apresentando uma diferença de 43 segundos de arcos por século. Usando as equações de seu trabalho de 1915, Einstein encontrou o valor da precessão concordante com a observação.

Friedmann, Lemaître e o Nascimento da Teoria do Big Bang

A Teoria da Relatividade Geral de Einstein passou a ser então a teoria vigente no que se refere à Gravitação, e continua a ser até o presente. Talvez isso mude devido alguns “problemas” que ela enfrenta atualmente. Hoje a Teoria da Relatividade é incompatível com outro modelo da Física, também nascido no início do século XX, a Mecânica Quântica. Pode ser então que tenhamos no futuro outra teoria que substitua (ou modifique em certo grau) a teoria proposta por Einstein por uma que esteja de acordo com a Mecânica Quântica. Até o momento porém, seu trabalho permanece como o vigente entre as teorias de gravitação. Sendo um trabalho extremamente amplo e bastante complexo, aconteceu com ele o que acontece com trabalhos dessa natureza: algumas de suas consequências foram constatadas anos depois de sua publicação, e sequer foram notadas por seu criador. Isso é perfeitamente normal no meio científico, sendo dessa forma, no geral, que ocorre a evolução de uma Ciência. Isso deve-se a uma limitação natural do ser humano, principalmente quanto ao fator tempo. A Ciência é, por isso mesmo, um trabalho coletivo. Assim, foi do trabalho de Einstein que surgiu a “semente” do atual modelo cosmológico, que hoje é popularmente chamado de a Teoria do Big Bang.

Os primórdios dessa teoria nasceram do trabalho independente de dois cientistas, Aleksandr Friedmann (1888-1925), um matemático russo, e Georges Lemaître (1894-1966), um cosmólogo belga. Friedmann publicou dois artigos, um em 1922 e outro em 1924, sobre diferentes possibilidades de modelos de universo, possibilidades essas advindas da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Até a época, o universo era pensado como sendo estático e eterno. A abordagem de Friedmann propunha a possibilidade de um universo dinâmico. Embora o trabalho de Friedmann tenha um caráter mais matemático, ele implicava uma interpretação inteiramente nova do universo, e, apesar de Friedmann não ter aprofundado muito a interpretação de suas possibilidades de universos dinâmicos, ele estava, como hoje sabemos, no caminho certo. Curiosamente, Einstein refutou, inicialmente, o artigo de Friedmann. Ele até mesmo escreveu uma carta para o periódico científico que publicara o artigo de Friedmann alegando um erro matemático no trabalho do matemático russo. Os cálculos de Friedmann, porém, estavam corretos, e Einstein se retratou ao constatá-lo. Ainda

assim, Einstein parecia convencido de que, embora possuísse validade matemática, o trabalho de Friedmann carecia de fundamentação física.

Friedmann não pôde dar continuidade a seu trabalho, tendo falecido em 1925, mas a ideia de um universo dinâmico voltou a ser considerada por Lemaître em 1927. Buscando desenvolver seu próprio modelo cosmológico, Lemaître, sem saber que Friedmann já havia seguido esse caminho alguns anos antes, redescobriu os modelos que descreviam um universo em expansão, também partindo das equações de Einstein da Relatividade Geral. Lemaître porém, foi mais à fundo na interpretação física de um universo em expansão. Ele teria sido o primeiro a pensar que, se o universo cresce e evolui, ele teve um aparente começo, em que era muito menor do que é hoje. Ele percebeu que essa interpretação implicava em um momento de criação. Em seu trabalho, ele afirmou que o universo teria começado em uma região pequena e compacta da qual expandiu e evoluiu até chegar ao ponto em que está hoje, acrescentando que este continuaria a evoluir no futuro. O modelo de Lemaître não é exatamente o que hoje chamamos de Big Bang, porém, seu trabalho é o precursor desse modelo, tendo seus sucessores partido de seu trabalho para chegar ao modelo atual. Ele já mencionava uma origem e expansão do universo, e, quanto a esses aspectos, estava correto.

A partir daqui não será dada continuidade ao “retrospecto” até a formulação da Teoria do Big Bang. O presente texto tem como objetivo a discussão de uma evidência experimental desse modelo, e não do modelo em si. Tendo como um de seus estímulos a crítica de uma abordagem artificial (“pronta”) e descontextualizada do Modelo Cosmológico Padrão, fez-se necessário esse texto introdutório para que se compreenda como “nasceu” esse modelo. Mais páginas não foram dedicadas a essa introdução a fim de que mais atenção fosse dada a outro aspecto, igualmente importante, e principal foco desse trabalho, que é a discussão de uma das evidências experimentais a favor da Teoria do Big Bang.

A leitura do texto até este ponto mostra dois pontos característicos das ciências: primeiro, ela evolui com o tempo, e esta evolução ocorre através dos erros de muitos, ou, mais especificamente, da correção destes erros. Em segundo lugar, para que haja a substituição de um modelo antigo por outro, mais atual, deve haver uma (ou mais) evidência(s) que mostre(m) que o atual é mais correto (ou mais completo) que o

anterior. Há várias evidências a favor da Teoria do Big bang, sendo três delas fundamentais: a expansão do universo, a abundância de elementos (átomos) leves no universo e a existência de uma radiação cósmica de fundo.

A expansão do universo (o tema central deste trabalho) será discutida nas próximas seções. Ela foi comprovada experimentalmente pela (modernamente) chamada Lei de Hubble. Em seguida, além da discussão de como se pode, empiricamente, “chegar” a essa lei, faz-se sua interpretação, evidenciando como os seus resultados implicam em um universo em expansão.

A Lei de Hubble

A Lei de Hubble é basicamente uma lei que relaciona a distância de certas galáxias até nós à sua velocidade radial. O termo “certas galáxias” foi empregado pois esta lei só é válida para galáxias muito afastadas de nós (em termos de escala astronômica), o que será analisado mais adiante. O fato é que essa lei só é válida para objetos fora da nossa galáxia (e para galáxias relativamente muito afastadas de nós). A lei de Hubble recebe este nome porque foi elaborada pelo cientista norte americano Edwin Hubble (1889-1953).

Hubble publicou dois resultados experimentais que sustentavam essa lei, um em 1929 e outro em 1931 (com mais galáxias analisadas). Realizou esse estudo (das distâncias e velocidades das galáxias) em função de trabalhos feitos por alguns contemporâneos seus acerca do movimento das galáxias.

Pouco tempo antes dos estudos de Hubble, cientistas haviam criado um método para medir as velocidades radiais de estrelas (ou de galáxias). Velocidade radial é o nome dado a velocidade de aproximação ou de afastamento de um corpo (no caso as estrelas) em relação a algum outro (no caso a Terra). Os métodos utilizados serão discutidos mais adiante.

Os trabalhos dos contemporâneos de Hubble mostravam que a grande maioria das galáxias se afastavam de nós, enquanto algumas poucas se aproximavam. Em certo

sentido, cada corpo no espaço está em movimento. A Terra (sobre a qual gira a Lua) gira em torno do Sol, assim como os demais planetas do Sistema Solar. O Sol gira em torno do centro de nossa galáxia, a Via Láctea, e esta, como todas as outras galáxias, também se movimenta no espaço. Ao analisar as galáxias à nossa volta, era de se esperar (na época de Hubble) que aproximadamente metade delas estivesse se aproximando de nós e as outras estivessem se afastando, ou seja, uma distribuição aleatória destes corpos no espaço, o que a princípio faz bastante sentido. Um padrão de movimento sugere alguma interação comum a todos. E o fato de (muito) mais galáxias se afastarem de nós do que se aproximarem já é por si só razão suficiente para procurar algum padrão no movimento desses corpos. Para se ter uma ideia dos números, o astrônomo Vesto Slipher, o primeiro a medir com sucesso (em 1912) a velocidade de uma galáxia (embora na época não se soubesse que eram galáxias e fossem caracterizadas como nebulosas) em 1917 já havia medido a velocidade de 25 galáxias. Destas, 21 se afastavam de nós enquanto apenas 4 se aproximavam.

Diversas tentativas de explicar o afastamento das galáxias foram feitas, porém não se chegou a um consenso. Quando Hubble tomou conhecimento dessa dominância do afastamento em relação à aproximação das galáxias em relação a nós, começou a investigação que culminaria na Lei de Hubble. Já existiam propostas teóricas para a relação matemática entre a distância das galáxias e sua velocidade radial, faltando entretanto uma evidência experimental para sustentá-las. Hubble não propôs o modelo matemático assim como também não propôs interpretações para suas medidas. O que ele fez foi investigar se havia de fato uma relação matemática entre essas duas grandezas.

A “construção” da lei

Antes de discutir as implicações da Lei de Hubble, façamos uma abordagem que torne claro como Hubble fez as medidas que levaram a essa lei. Ao estudar os corpos celestes, os astrônomos, em geral, só podem contar com a luz (radiação de forma mais geral) que esses corpos emitem (ou refletem). Buscaremos então explicar como o estudo dessa luz permite tirar conclusões tais como a distância dos corpos até nós e sua velocidade.

Para compreender como a Lei de Hubble ganhou forma, iremos analisar os dois métodos experimentais utilizados em sua observação: a medida da distância das galáxias até nós, e a medida da velocidade radial (de afastamento ou aproximação) dessas galáxias também em relação à nós.

A medida da distância

A técnica para medir a distância de estrelas até nós é uma técnica indireta. É analisando a luz que chega até nós (de estrelas ou de galáxias) que determinamos o quão distante o corpo que a emite está. No caso do trabalho de Hubble, a luz estudada para se determinar a distância das galáxias pertencia a um certo tipo de estrela dentro dessa galáxia. Isso porque o método da determinação da distância das estrelas utilizado por Hubble não funciona para qualquer estrela. Ele só funciona para um tipo especial de estrelas denominadas cefeidas. Essas cefeidas funcionaram como âncora para a determinação das distâncias às galáxias. Uma estrela (que pode ou não estar no centro de sua galáxia) é usada como referência para se determinar a distância à galáxia à qual ela pertence pelo fato da dimensão de uma galáxia ser praticamente desprezível em comparação com sua distância até nós (como se ela fosse um ponto). Para compreender um pouco melhor este fato, imagine que você possui uma fita métrica muito extensa (na verdade, uma fita quilométrica), e que você queira determinar com ela o quão longe é a sua casa até uma praça que fica do outro lado da cidade que você mora. Para isso, você fixa o início da fita na porta da sua casa e anda em linha reta (imagine que isso seja possível) até essa praça, atravessando toda a cidade. Ao chegar na praça, a distância que você percorreu é tão grande que não faz diferença se você fixar a trena na entrada da praça ou no centro dela. A mudança de valor seria na ordem de metros, enquanto que o valor da distância é da ordem de vários (possivelmente dezenas de) quilômetros. O mesmo vale para o caso das cefeidas e das galáxias. Então, usando o mesmo método utilizado por Hubble, não é possível determinar distâncias a qualquer galáxia, mas sim àquelas que possuam cefeidas. Portanto, o primeiro passo na determinação da distância à uma galáxia é encontrar, na galáxia, uma estrela do tipo cefeida, para então aplicar o método à estrela. Dito isso, para entender o método da medida da distância às galáxias, precisamos conhecer um pouco mais sobre estrelas do tipo cefeida.

Cefeidas

As cefeidas são um tipo de estrela que se destaca por duas características. A primeira: são estrelas variáveis, ou seja, o brilho emitido por elas varia com o passar do tempo e de forma periódica. Assim, ela vai de uma fase menos brilhante para uma mais brilhante e depois volta para a menos brilhante completando o ciclo. Elas não são as únicas estrelas variáveis; o que as destaca das demais estrelas variáveis é a sua segunda característica marcante: a variação do seu brilho possui uma forma assimétrica, possuindo tempos diferentes de aumento e diminuição de seu brilho. Observe na figura A.17 o gráfico de variação no brilho da Delta do Cefeu. Para efeito de comparação, mostramos na figura A.18 uma estrela variável com variação simétrica. Trata-se da estrela Algol¹⁵.

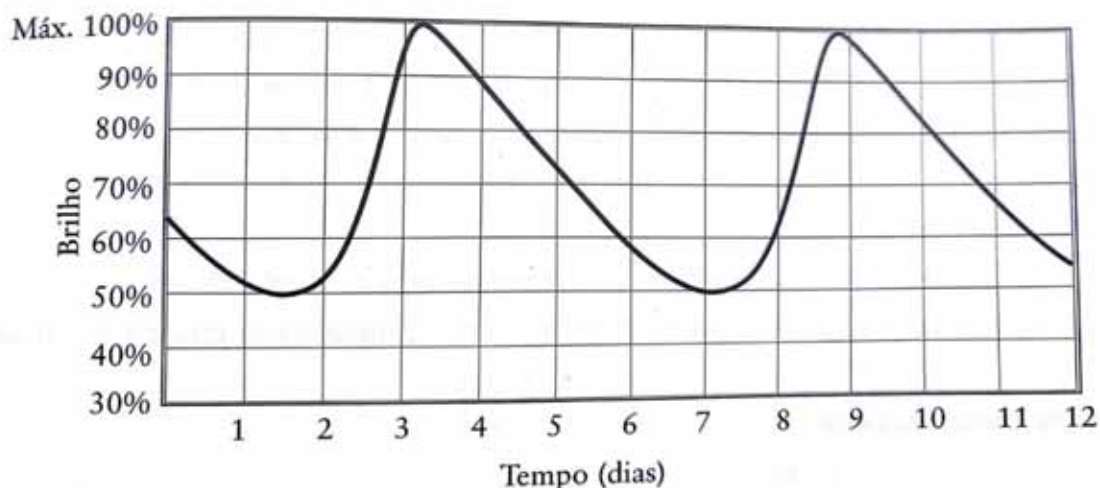


Figura A.17. Gráfico da variação do brilho da estrela Delta do Cefeu. O eixo horizontal representa o tempo e o eixo vertical a porcentagem do brilho. Imagem de Singh 2006.

¹⁵ Simon Singh, *Big Bang*. 1a edição. Rio de Janeiro: Record, 2006.

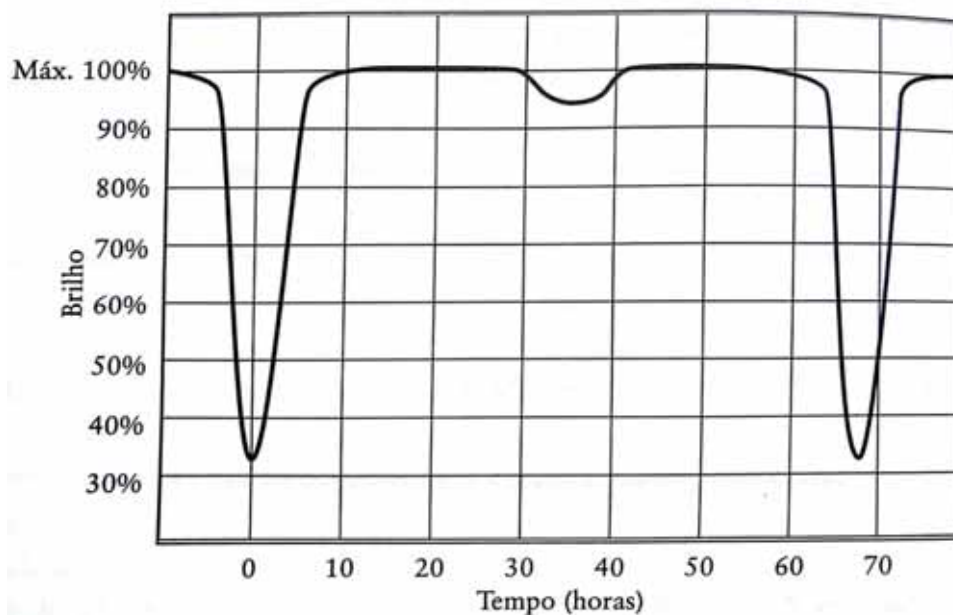


Figura A.18. Gráfico da variação do brilho da estrela Algol. Imagem de Singh 2006.

Uma grande estudiosa de estrelas variáveis foi Henrietta Leavitt, que trabalhava como computadora voluntária no Harvard College Observatory. Computador era um termo utilizado na época para descrever pessoas que manipulavam dados e faziam cálculos. Leavitt analisava e catalogava chapas fotográficas, avaliando o brilho das estrelas e medindo sua localização. Ela adquiriu interesse especial pelas cefeidas, tendo dedicado grande parte do seu tempo em sua análise, e foi ela quem possibilitou a criação do método de medida de distância a essas estrelas, criando uma espécie de escala astronômica, permitindo avanços de extrema importância na astronomia, como a própria Lei de Hubble e a determinação que as nebulosas (como eram chamadas na época) eram galáxias similares à Via Láctea. Essa constatação foi feita por Hubble, utilizando o método desenvolvido por Leavitt.

Depois de passar considerável tempo medindo e catalogando estrelas do tipo cefeida, Leavitt buscou uma relação entre as duas únicas informações disponíveis em relação a qualquer estrela variável (à época), seu período de oscilação e seu brilho. O primeiro problema enfrentado por ela foi o fato de o brilho (medido daqui da Terra) depender não só da própria estrela, mas de sua distância até nós. Assim, se ela comparasse duas estrelas A e B, e observasse que A brilha mais do que B, não teria como saber se A de fato emitia mais luz do que B ou se ela estava apenas mais próxima de nós. Pense no Sol, por exemplo; ele parece muito mais brilhante do que todas as

outras estrelas no céu, porém sabemos que ele é uma das estrelas menos brilhantes em comparação com as demais que vemos. Simplificando mais esse raciocínio, imagine que você tenha uma lanterna bem potente acesa num dia ensolarado. Se você olhar para o Sol, você sentirá um incômodo por causa da luz nos seus olhos. Agora, se você direcionar a luz da lanterna diretamente para um de seus olhos e posicioná-la a meio centímetro dele, a luz da lanterna parecerá tão incômoda quanto a luz do Sol (ou até mais), e isso, obviamente, não se deve ao brilho intrínseco da lanterna, mas sim ao fato de o Sol estar muito mais afastado do seu olho do que ela. Essa dificuldade de se lidar com o brilho aparente de uma estrela foi resolvida de uma maneira extremamente engenhosa por Leavitt.

Analisando chapas fotográficas da formação estelar conhecida como Pequena Nuvem de Magalhães, Leavitt localizou 25 variáveis cefeidas. E, embora não se soubesse à época qual a distância entre a Terra e a Pequena Nuvem de Magalhães, Leavitt supôs que a distância entre as cefeidas eram relativamente pequenas, quando comparadas com a distância de qualquer uma delas até a Terra. Essa suposição foi decisiva para resolver o problema do brilho aparente, e, embora você possa achar estranha uma suposição dessas, feita no que parece ter sido um palpite, se analisarmos a situação, veremos o quão coerente essa suposição é. Ela pode ser respaldada pelo raciocínio utilizado anteriormente, sobre a determinação da distância de sua casa a uma praça. Caso ela não seja clara o bastante, considere a história contada por Simon Singh, autor do livro “Big Bang”, que faz em seu livro uma esclarecedora analogia que nos permite entender de modo extremamente simples o raciocínio de Leavitt. Imagine que você está em um campo aberto num local em que o céu está repleto de pássaros. Como eles estão aleatoriamente distribuídos na imensidão do céu, é impossível apenas olhando, determinar qual o maior (ou o menor) dos pássaros. Assim como no caso das estrelas, um pássaro que pareça grande pode ser pequeno mas estar mais próximo de você do que os demais. Agora imagine que você veja ao longe apenas um grupo de pássaros migrando naquela típica formação em V. É bem razoável a suposição de que a distância entre dois desses pássaros seja desprezível em comparação com a distância do bando em relação à nós, pois sabemos que os pássaros estão bem próximos uns dos outros. Assim, se um desses pássaros parece ser maior do que todos os outros, é bem provável que ele de fato o seja. Portanto, a suposição de Leavitt tem muita lógica.

Munida dessa hipótese, Leavitt conseguiu investigar, para esse pequeno grupo de estrelas, uma relação entre seu brilho intrínseco e o período de oscilação. Uma vez que, assim como no caso dos pássaros, as cefeidas estivessem muito mais próximas umas das outras do que qualquer uma delas estivesse de nós, um maior brilho por parte de uma delas seria decorrente da própria estrela, e não de sua distância até nós. Dessa forma foi resolvido o problema do brilho aparente, embora, devemos notar, o problema estava resolvido para o grupo de 25 cefeidas que Leavitt localizou na Pequena Nuvem de Magalhães (ou em grupos de estrelas semelhantes a essa).

Uma vez considerado que a relação entre o brilho aparente dessas estrelas corresponderia a mesma relação de seu brilho real (a estrela aparentemente mais brilhante do grupo seria de fato a mais brilhante), Leavitt pôde buscar a relação entre o brilho intrínseco das cefeidas com o período desse brilho. O resultado foi incrível. Havia de fato uma relação entre essas duas grandezas, de forma que os pontos do gráfico que as relaciona seguiam uma curva regular. As figuras A.19 e A.20 constituem os gráficos feitos com as observações de Leavitt.

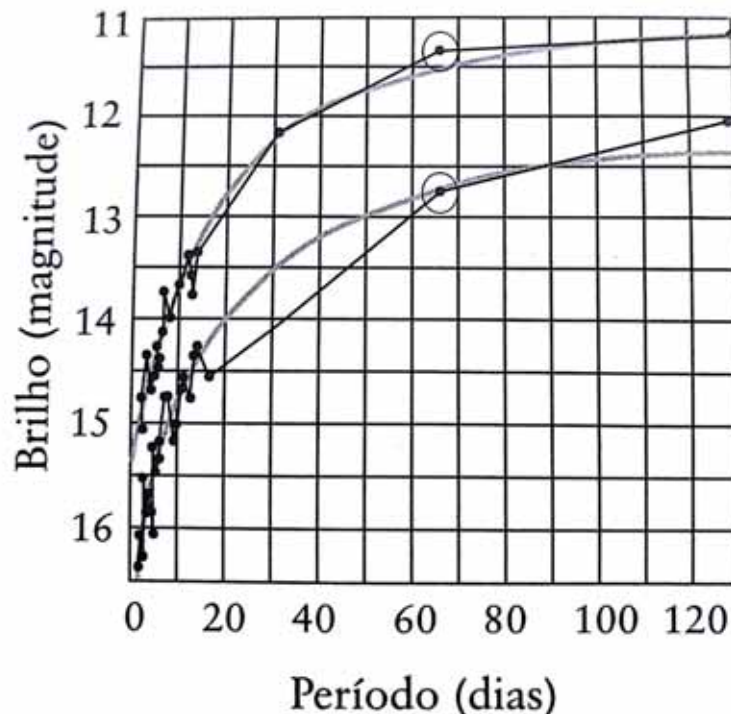


Figura A.19. Gráfico do brilho em função do período das 25 cefeidas da Pequena Nuvem de Magalhães analisadas por Leavitt . Imagem de Singh, 2006.

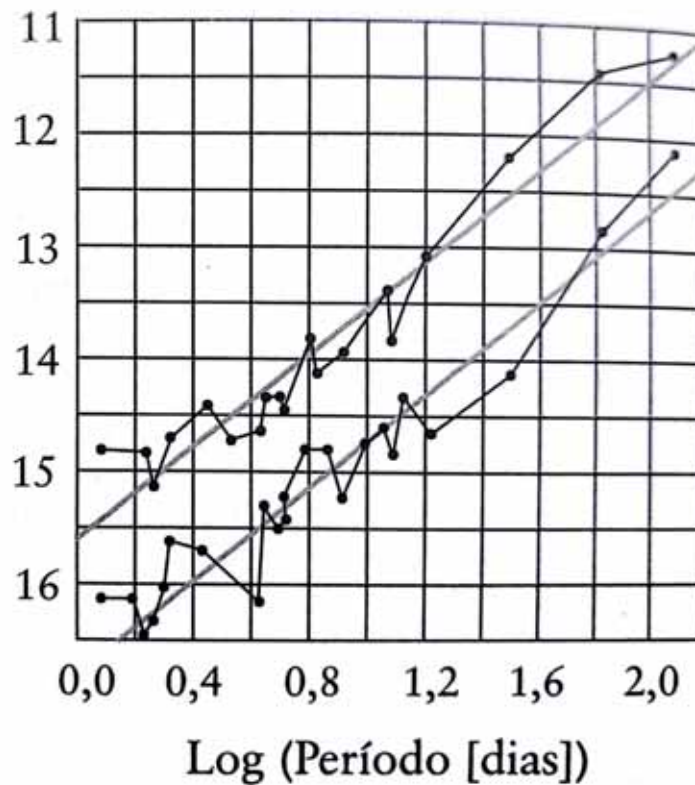


Figura A.20. Gráfico do brilho em função do período das cefeidas da Pequena Nuvem de Magalhães em escala logarítmica. Imagem de Singh, 2006.

Algumas observações devem ser feitas a respeito das figuras A.19 e A.20. Primeiramente, a unidade de medida do brilho das estrelas usada por Leavitt é a magnitude. Esta é uma unidade peculiar cuja medida ocorre no sentido decrescente. Assim, quanto menor o valor da magnitude maior o brilho. Na figura 4.20 vemos o gráfico na escala logarítmica, que é usada, entre outros motivos, para linearizar certos gráficos. Assim, apesar de a relação entre brilho e o período das cefeidas não ser linear, vemos que, quanto maior o brilho de uma cefeida, maior será o período deste brilho; e agora falamos do brilho real da estrela, pois nos apoiamos na hipótese de Leavitt. Com essas informações em mãos, é possível saber o quanto uma cefeida está mais distante de nós do que outra cefeida. Para isso bastavam três passos. Medir o período de cada uma das cefeidas, determinar o brilho real delas através do conhecimento da relação brilho versus período e medir o brilho aparente dessas estrelas, podendo-se determinar com esses dados a distância relativa entre elas. Isso porque o brilho de um corpo incandescente cai com o quadrado da distância a esse corpo. Assim, se uma cefeida A

possuísse um brilho 25 vezes inferior ao de uma cefeida B (e ambas possuíssem o mesmo brilho real), então A estaria 5 vezes mais afastada de nós do que B, pois $5^2 = 25$. Porém, repare que, apenas com essas informações, não é possível determinar a distância de uma cefeida até nós. O máximo que pode ser feito é dizer o quão mais afastada está uma cefeida em relação a uma outra. Para determinar nossa distância até as cefeidas conhecidas era necessário saber a distância de pelo menos uma delas, para então, com o método citado acima, determinar as distâncias das demais.

Os responsáveis pela determinação da distância até as cefeidas conhecidas foram os membros de uma equipe de astrônomos que incluiu Harlow Shapley e Ejnar Hertzsprung, que, através de uma combinação de técnicas, mediram a distância até uma variável cefeida. O método utilizado por eles não era válido para qualquer cefeida, mas este conhecimento somado ao trabalho de Leavitt fizeram das cefeidas uma espécie de régua cósmica, e esse conhecimento que tornou possível a medida das distâncias dessas estrelas até nós.

A possibilidade de se determinar a distância das cefeidas foi aproveitada por Hubble em outra questão de tremenda importância antes da proposta de sua lei. No início do Século XX, não se sabia a natureza das chamadas nebulosas espirais. Alguns defendiam que elas eram galáxias, assim como a nossa Via Láctea, enquanto outros defendiam a ideia de que elas eram sistemas de estrelas localizados dentro na nossa própria galáxia. Em 1920 ocorreu um debate entre dois famosos astrônomos da época, Herbert Curtis e Harlow Shapley, para debater essa e outras questões. Curtis defendia a ideia de que as espirais eram galáxias enquanto Shapley acreditava que elas eram simplesmente objetos nebulosos. A questão não foi decidida na ocasião por falta de dados precisos acerca da nossa distância às nebulosas. Hubble, ao analisar a nebulosa de Andrômeda, encontrou nela uma estrela do tipo cefeida. Utilizando o método de Leavitt, Hubble pôde determinar a distância de Andrômeda até a nossa Via Láctea, e verificar que essa era uma galáxia como a nossa, visto que ela estava numa distância muito maior que o limite de nossa própria galáxia. Hubble resolveu desta forma a questão da natureza das nebulosas espirais.

A medida da velocidade

Agora que está claro qual o método utilizado por Hubble para determinar as distâncias das galáxias medidas em relação à Terra, abordaremos como foram feitas as medidas das velocidades radiais dessas galáxias, lembrando que velocidade radial é a velocidade de aproximação ou de afastamento de um corpo em relação a outro (no caso das galáxias em relação à Terra). Este método também consiste na análise da luz emitida pelas galáxias que chega até nós, e para compreendê-lo, em certo ponto, será necessário o conhecimento da interpretação da luz enquanto onda eletromagnética, pois o método utiliza nossos conhecimentos acerca de um fenômeno ondulatório, o chamado efeito Doppler.

Para começar, vamos expor alguns avanços no estudo da natureza da luz, avanços esses que permitiram a criação do método da medida da velocidade radial das galáxias. Na verdade, a determinação da velocidade do corpo que emite a luz é apenas uma das informações que se pode obter analisando a luz por ele emitido. Essa forma de obtenção de dados através da luz recebe a atual designação de espectroscopia, e embora não a exploremos por completo, parte dela será exposta a fim de ficar clara a forma como Hubble determinou a velocidade radial das galáxias estudadas. Exploraremos então o essencial para que essa compreensão ocorra.

Espectroscopia

A luz é um dos objetos de estudo mais antigos da humanidade. Diversas interpretações já foram dadas na tentativa de explicar corretamente os diversos fenômenos associados a ela. Quando a luz muda de meio de propagação, por exemplo, ela muda de direção. Assim, quando observamos a clássica imagem de um lápis parcialmente mergulhado em um copo com água, temos a impressão de que o lápis está quebrado, e que essa quebra ocorre justamente na fronteira entre a superfície da água e o ar, isso porque é nesse ponto que a luz modifica sua propagação. Esse fenômeno é denominado refração, e é apenas um de muitos que compreendemos com a interpretação ondulatória da luz. Na tentativa de simplificar ao máximo os nossos objetos de estudo,

evitaremos as explicações dos muitos fenômenos conhecidos para evitar um efeito “bola de neve”. A princípio, só precisamos saber que, ao atravessar certos corpos (ou substâncias), dependendo do ângulo de incidência, a luz denominada branca (a luz solar) pode ser dividida em outras cores. Tal fato é comumente visto no fenômeno do arco-íris, quando a luz atravessa algumas gotas d’água na atmosfera, ou com o auxílio de um prisma.

O estudo da luz por meio de um prisma foi feito por muitos cientistas, entre eles Isaac Newton. Após deixar passar um feixe da luz do Sol em um prisma, Newton compreendeu que a luz branca é composta pelas cores do arco-íris. Ele mostrou isso recombinando os feixes de luz separados pelo prisma em um anteparo, tendo como resultado a luz branca que havia incidido inicialmente no prisma. Newton percebeu que cada cor era desviada de forma diferente ao atravessar o prisma, e por isso ela era dividida na imagem composta pelas mesmas faixas de cores do arco-íris. A luz solar se decompõe no prisma da mesma forma que nas gotículas de água na atmosfera. A decomposição da luz por um prisma foi apenas um de muitos passos no estudo da luz. Com o passar do tempo, o prisma foi substituído por outros instrumentos ópticos, como a rede de difração, por exemplo. Ela é mais conveniente por fornecer mais informações acerca da luz que à atravessa que um prisma. O fato é que, através de suas pesquisas, Newton entendeu que a luz branca se dividia ao passar pelo prisma em sete cores numa imagem contínua como a representada na figura A.21. Ou seja, segundo Newton, essas sete cores (denominadas primárias) juntas formavam o branco.

Com o passar do tempo e o avanço da tecnologia, aparatos experimentais mais potentes permitiram o avanço desse estudo, de modo que outros cientistas conseguiram perceber alguns detalhes do espectro solar que na época de Newton passaram despercebidos. O cientista inglês William Wollaston, por exemplo, percebeu umas listras escuras no espectro solar, como é mostrado na figura A.22. Posteriormente a ele, o fabricante de lentes alemão Joseph von Fraunhofer, embora não tenha conseguido explicar o porquê da existência dessas listras, fez um estudo minucioso a respeito delas, tendo as catalogado.

Utilizando o mesmo método de Newton para analisar a luz do Sol, o físico escocês Thomas Melvill analisou, em 1752, a luz emitida pela chama da queima de

certas substâncias. A forma da luz refratada pelo prisma não assumiam mais a forma de um espectro contínuo, mas sim de um discreto. Ou seja, a imagem visualizada por Melvill foi a de algumas “linhas” de luz, como mostra a figura A.23.



Figura A.21: Espectro contínuo.¹⁶



Figura A.22: Espectro contínuo com as listras escuras encontradas por Fraunhofer.¹⁷

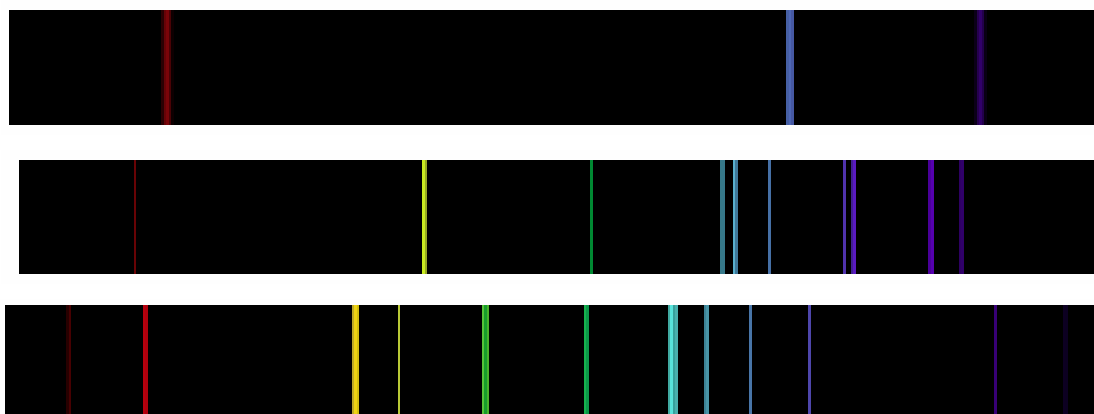


Figura A.23. Imagens de espectros discretos.¹⁸

Em 1826 o astrônomo inglês John Herschel percebeu que estes espectros forneciam uma espécie de impressão digital da substância colocada na chama, pois cada substância apresentava um espectro que podia ser associado a ela. Assim, sempre que o experimento fosse feito com uma dada substância, ela apresentaria a mesma imagem no anteparo. E, se uma substância desconhecida fosse encontrada, para identificá-la bastava

¹⁶ Disponível em < <http://fsicaeequimicaa.blogspot.com.br/2010/11/tipos-de-espectros.html> > .

¹⁷ Disponível em < <http://fsicaeequimicaa.blogspot.com.br/2010/11/tipos-de-espectros.html> > .

¹⁸ Disponível em < http://www.passo-a-passo.com/mec/7.3.6/05_teoriam.htm > .

visualizar o seu espectro e compará-lo com o de amostras conhecidas. Hoje em dia essas linhas recebem o nome de espectro de emissão e elas são usualmente obtidas pela passagem de uma corrente elétrica em um tubo contendo a substância a ser analisada no estado gasoso. Porém o efeito é essencialmente o mesmo do método utilizado por Melvill. O primeiro espectro da figura A.23, por exemplo, é obtido quando o gás dentro do tubo é o hidrogênio. O segundo e o terceiro são, respectivamente, Hélio e Carbono. Se uma amostra contiver os três tipos de gás, a imagem resultante será uma superposição dos três espectros da figura A.23.

É desnecessário enfatizar o quanto esse método representou um avanço para a Química. Porém não foi só essa Ciência a beneficiada por ele. Os astrônomos perceberam o quão valioso ele era para a sua própria área de estudo. Com ele, era possível fazer algo que, anteriormente se imaginava impossível: analisar a composição química das estrelas. Considerando que, simplificada mente elas podem ser vistas como uma grande bola de gás incandescente, podemos analisar sua luz, decifrando de que elas são feitas. E isso ocorreu graças aos esforços do físico alemão Gustav Kirchhoff que compreendeu a existência das linhas escuras no espectro solar. Na verdade ele fez mais do que isso, ele elaborou três leis a respeito da emissão contínua (com e sem listras escuras) e discreta dos espectros. Para o nosso objetivo, basta compreendermos (embora seja uma simplificação que oculta alguns aspectos acerca do processo de emissão e absorção de luz) que as listras escuras no espectro das estrelas ocupam as mesmas posições que as linhas dos espectros discretos ocupariam caso as submetessem ao método acima citado. Assim, se uma estrela é composta apenas de hidrogênio, ao analisarmos o seu espectro, encontraremos a mesma imagem da figura A.22, porém com três linhas escuras localizadas na mesma posição que as linhas coloridas na imagem do espectro discreto do hidrogênio (primeira imagem da figura A.23).

A denominação atual desse método experimental é espectroscopia, e ela é feita usando dispositivos chamados espectrômetros. Esse nome vem do termo espectro, pois hoje sabemos que a luz é apenas uma pequena fração de todo espectro eletromagnético existente. A cor da luz é um estímulo visual associado à frequência dela. Mas nossos olhos, como todo instrumento de medida (no caso, um instrumento óptico) possui limitações. Assim, só enxergamos uma faixa de todas as frequências possíveis. Com o

passar do tempo, outras frequências da radiação eletromagnética foram detectadas, e a figura que criamos a partir da ordenação das frequências da luz se torna (desta vez, em ordem decrescente) a mostrada na Figura A.24.

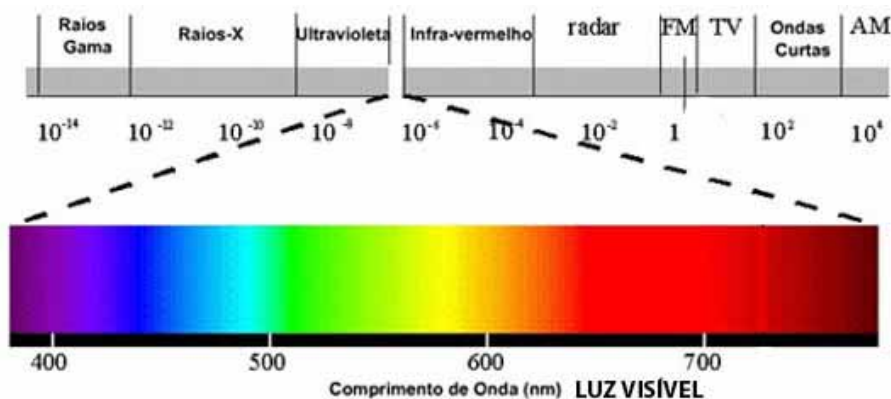


Figura A.24 Espectro eletromagnético apresentado em ordem crescente de comprimento de onda.¹⁹

A análise química das estrelas, que por si só já representou um gigantesco avanço para astronomia, não foi o único avanço possibilitado pelo estudo de seus espectros. Esse estudo permitiu também descobrir como determinar a velocidade radial das estrelas (ou das galáxias, no caso de Hubble), usando o fenômeno ondulatório denominado efeito Doppler. Com as informações que temos até o momento adicionado a esse conhecimento poderemos enfim compreender o método utilizado por Hubble para traçar o gráfico associado a sua lei.

Efeito Doppler

Até aqui falamos sobre os estudos da luz que, em certo momento, possibilitaram a constatação de que o universo está em expansão. Para concluir, resta apenas um tópico a ser discutido: o efeito Doppler. De forma sucinta, efeito Doppler é o nome dado à mudança aparente na frequência de uma onda devido ao movimento relativo entre o emissor da onda e o receptor. No dia a dia, podemos perceber esse efeito quando uma ambulância passa por nós com a sirene ligada. Quando ela se aproxima o som que ela

¹⁹ Disponível em < <http://fsicaeequimicaa.blogspot.com.br/2010/11/tipos-de-espectros.html> > .

emite parece mais agudo, o que indica uma frequência elevada. A partir do momento que ela passa (começando então a se afastar), o som passa então a ser mais grave, indicando uma frequência mais baixa do que a ouvida originalmente. Tal efeito pode ser ainda mais evidenciado caso você assista uma corrida de Fórmula 1. A diferença do som dos carros de agudo para grave é mais acentuada que nas ambulâncias, pois estes se movem muito mais rápido, de forma que o efeito Doppler é mais acentuado. Esse efeito, embora seja mais facilmente percebido com o som, ocorre com toda e qualquer onda.

Devido ao efeito Doppler, então, caso uma fonte esteja emitindo uma onda e você se aproxime dela, detectará uma frequência maior do que a emitida. Já se estiver se afastando dela, a frequência captada por você será menor que a emitida pela fonte. A frequência da onda sonora está associada a quão grave ou aguda é uma onda; percebemos um som mais agudo (aumento da frequência) ao nos aproximarmos da fonte sonora e um som mais grave (redução da frequência) quando nos afastamos dela. Para a luz, a característica associada à frequência é a cor (na faixa do visível). Assim, quando uma fonte luminosa estiver se afastando de nós, as cores emitidas por essa fonte sofrerão o que chamamos de “desvio para o vermelho”, pois neste caso a frequência da onda diminui. De modo análogo, ao nos aproximarmos de uma fonte luminosa, ocorre o desvio para o azul. Lembre-se da nossa ordenação das cores de acordo com a sua frequência (figura 4.21). Esse desvio é facilmente percebido ao analisar espectros de substâncias conhecidas. Lembre-se que, através da espectroscopia foi possível criar uma espécie de impressão digital de cada substância. Assim, se analisamos uma substância luminosa distante de nós, e vemos que o espectro discreto dela não coincide com nenhum dos estudados, mas é muito próximo do espectro do hélio, por exemplo, porém um pouco deslocado para a extremidade vermelha do espectro, sabemos que a substância em questão é composta de hélio e está se afastando de nós. De fato, pelo tanto que é desviado o espectro, podemos calcular a velocidade da fonte luminosa.

De volta à Lei de Hubble: A interpretação do resultado

Em 1929, Hubble já medira a distância e a velocidade de 46 galáxias. Ele começou confirmando as velocidades medidas por Slipher para depois medir distâncias e velocidades de galáxias tão distantes não medidas anteriormente por nenhum cientista.

Apesar do grande número de medidas, a margem de erro de mais da metade dessas era muito grande, de modo que Hubble utilizou apenas as medidas que ele considerava mais confiáveis, e com elas ele traçou um gráfico de velocidade em relação versus distância para as galáxias estudadas, como mostrado na figura A.25²⁰.

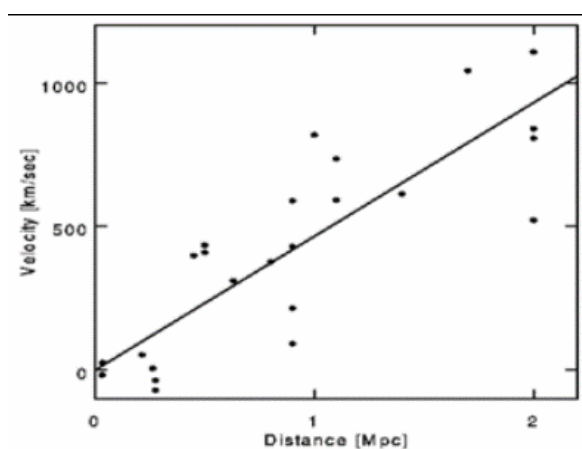


Figura A.25: Gráfico publicado por Hubble em 1929. O eixo horizontal representa a distância e o eixo vertical a velocidade de afastamento, sendo que a cada ponto corresponde uma galáxia.

A observação das medidas indicou a Hubble a existência de uma relação linear entre distância e velocidade. Embora nem todos os pontos estejam sobre uma única reta, existe uma tendência geral, e isso sugere que a velocidade de uma galáxia é proporcional à sua distância a nós. O resultado matemático dessa relação linear é conhecido, nos dias de hoje, como a Lei de Hubble, e é representada pela seguinte equação matemática:

$$v = H_0 \cdot D$$

sendo $H_0 \approx 70 \text{ km}/(\text{s Mpc})$ ²¹, onde v é a velocidade das galáxias, D é a distância até elas e H_0 é uma constante de proporcionalidade chamada constante de Hubble. Essa

²⁰ Hubble 1929, citado por Ioav Waga. Colóquio apresentado em 26/11/2015 no Instituto de Física da UFRJ (comunicação privada).

²¹ E. Harrison, *The Science of the Universe*, 2nd edition, Cambridge University Press, New York, 2000.

equação permite constatar a existência de uma proporcionalidade entre as duas grandezas medidas. Assim, se uma galáxia A se encontra duas vezes mais afastada de nós do que outra galáxia B, ela (galáxia A) também se afastará de nós duas vezes mais rápido que a galáxia B.

Na verdade, este primeiro resultado a ser publicado foi bastante questionado. A distribuição dos pontos no gráfico, como podemos observar, não estava tão ordenado a ponto de sugerir uma reta, como indicado na figura 4.25. Devido este fato, Hubble refez o seu estudo, com a ajuda de seu assistente Milton Humason, publicando em 1931 um novo gráfico contendo mais galáxias (algumas que estavam até vinte vezes mais distante que qualquer uma relatada no trabalho de 1929), como mostrado na figura A.26.

Como é possível notar, os pontos deste segundo gráfico sugerem muito mais fortemente uma relação linear do que o primeiro. Nele, todos os pontos do gráfico de 1929 estão no pequeno quadrado localizado no canto inferior esquerdo da figura 4.25.

Embora algumas considerações acerca da interpretação física dos parâmetros da Lei de Hubble devam ser feitas²², vemos que a velocidade de afastamento das galáxias mais distantes de nós é diretamente proporcional à sua distância. Assim, se uma galáxia X se encontra três vezes mais distante de nós que outra galáxia Y, então X deve se afastar três vezes mais rapidamente de nós do que Y. Essa relação entre as duas grandezas foi o que tornou possível a constatação da expansão do universo, e tal constatação pode ser feita através de uma analogia comumente empregada para se explicar a própria expansão. Imagine (ou pegue) um balão desses de festas na qual tenha sido colados algumas moedas de dez centavos (ou outros objetos igualmente pequenos). Agora imagine esse balão enquanto ele está sendo enchido de ar, como na figura A.27.

Nesta analogia, o balão seria o nosso universo; especificamente, a superfície do balão seria nosso universo. Apenas a superfície do balão deve ser considerada, o menino que assopra e mesmo o interior do balão não cumprem papéis nessa analogia. Estamos portanto imaginando um universo “achatado” em duas dimensões. As moedas nesse caso seriam as galáxias. O crescimento do balão enquanto ele é enchido corresponde à expansão do universo. Repare que, enquanto isso ocorre, as moedas se afastam, não por

²² A discussão mais aprofundada é feita no Capítulo 4 (p. 49) da dissertação de Lucas P.A.A. Duarte, da qual este texto constitui parte integrante como material associado.

estarem se movendo propriamente falando, mas sim pelo fato do espaço entre elas estar crescendo.

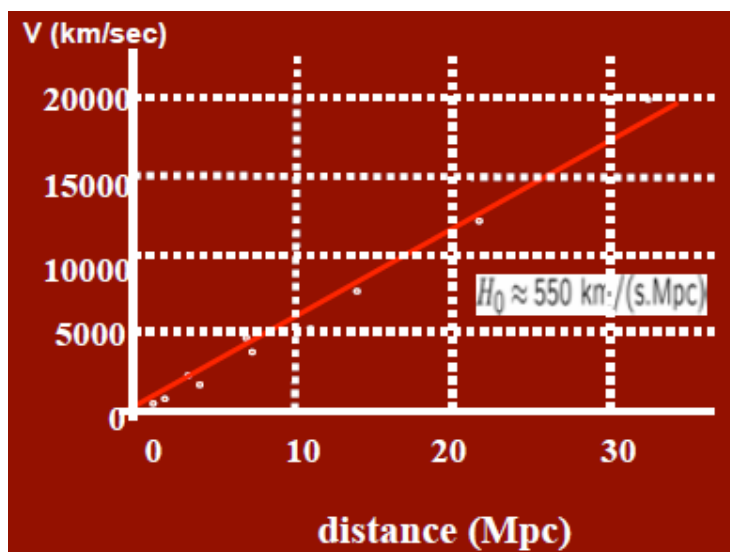


Figura A.26. Gráfico da lei de Hubble com as medidas publicadas em 1931. O eixo horizontal representa a distância e o eixo vertical a velocidade de afastamento, sendo que a cada ponto corresponde uma galáxia.

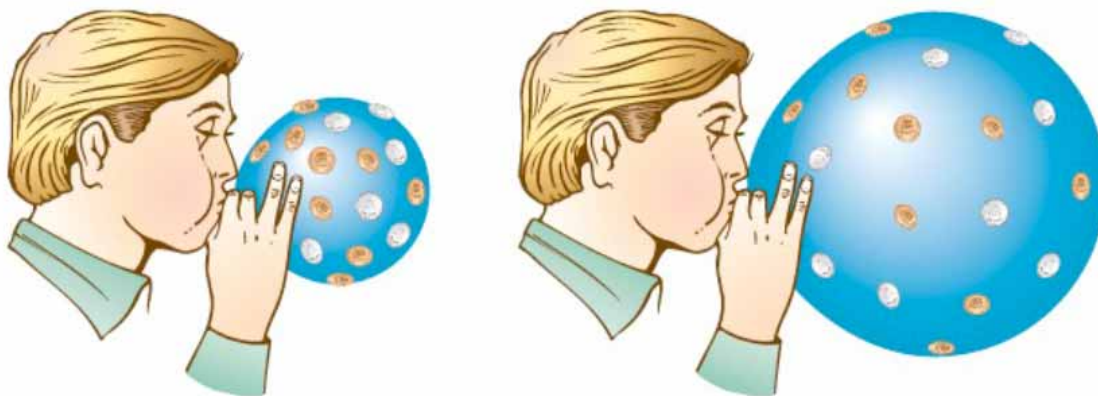


Figura A.27: analogia da expansão do universo.²³

Observe como a Lei de Hubble é consistente com essa situação. Escolha uma moeda para tomar de referência na imagem da figura A.27. Agora olhe para uma moeda que se encontre bem próxima a ela. Conforme o balão cresce, a distância entre elas aumenta. Agora faça a mesma observação, considerando porém uma moeda que esteja

²³ Disponível em < http://francisco-scientiaestpotentia.blogspot.com.br/2010_05_01_archive.html > Acesso em nov. 2015

inicialmente bem afastada de sua moeda de referência. Como ela estava mais distante que a primeira moeda, o afastamento dela foi igualmente maior. Esse fato ilustra também outras características (hipóteses) curiosas do nosso universo: é homogêneo e isotrópico (em grandes escalas), o que quer dizer que ele é simétrico, ou seja, não possui centro e é igual em todas as direções que nós olhemos. Em outras palavras, onde quer que estejamos no universo, teremos a impressão de estar localizados no centro dele, visto que veremos todos os pontos (bem distantes) se afastarem de nós. Para compreender essa ideia, refaça a análise das moedas que se afastam escolhendo outra moeda como referência.

Outro aspecto importante nessa analogia é o fato de se ter usado moedas (ou objetos colados) ao invés de marcas pintadas no balão. Isso é fundamental pois a expansão do universo só é perceptível para grandes distâncias, sendo irrelevante para distâncias do tamanho de uma galáxia, do contrário esta teria sido constatada muito tempo antes do que foi. Ou seja, as estrelas da nossa galáxia não estão se afastando de nós. Na verdade nem mesmo as galáxias mais “próximas” de nós estão (pelo menos não devido à expansão do universo). A galáxia de Andrômeda, como já foi mencionado, está na verdade se aproximando de nós. Isso explica também porque nem todas as galáxias possuem desvio para o vermelho, e porque a Lei de Hubble não se aplica às galáxias relativamente mais próximas à nós. Assim como a Terra e os demais planetas do Sistema Solar giram em torno do Sol, as estrelas giram em torno de suas galáxias e as galáxias se movem pelo espaço. Esse movimento é aleatório. Quando Hubble analisava galáxias muito distantes, o movimento local das galáxias era desprezível se comparado ao movimento decorrente da expansão do universo.

Com isso, apresentamos as ideias básicas sobre a Lei de Hubble que permitem a discussão da expansão do Universo.