



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

Revendo o debate sobre a Idade da Terra.

Felipe Nogarol

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Dr. Alexandre Carlos Tort

Rio de Janeiro
novembro de 2011

Reverendo o debate sobre a Idade da Terra.

Felipe Nogarol

Orientador: Dr. Alexandre Carlos Tort

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Presidente, Dr. Alexandre Carlos Tort

Dra. Penha Cardoso Dias

Dr. Sérgio Duarte

Rio de Janeiro
novembro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

- ? Nogarol, Felipe
Revendo o debate sobre a Idade da Terra. / Felipe Nogarol.
– Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2011.
ix, 14 f. : il. ; 30 cm.
Orientador: Dr. Alexandre Carlos Tort.
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2011.
Referências Bibliográficas: f. 107-111.
1. Ensino de Física. 2. Idade da Terra. 3. Kelvin. I. Tort, Alexandre Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Revendo o debate sobre a Idade da Terra..

Dedico esta dissertação a todos os professores do curso de mestrado profissionalizante em ensino de física do Instituto de Física da UFRJ.

Agradecimentos

Ao meu orientador Dr Alexandre Carlos Tort pela paciência, dedicação e empolgação no desenvolvimento desse trabalho.

A minha esposa Elaine Nogarol por seu apoio e paciência.

A profesora Dra. Deise Miranda Vianna pelas valiosas dicas sobre atividade para o ensino médio.

Ao professor Leonardo Raduan de Felice Abeid pela leitura e as diversas sugestões para o texto final.

A Bianca Tort pelas maravilhosas refeições e excelentes cafés.

A Débora M. Tort pelo excelente desenho da estrutura interna da Terra.

RESUMO

Revendo o debate sobre a Idade da Terra.

Felipe Nogarol

Orientador: Dr. Alexandre Carlos Tort

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Nesse trabalho analiso alguns dos os detalhes clássicos da discussão sobre a idade da Terra em meados do século 19 até início do século 20. Desenvolvo detalhadamente o cálculo de William Thomson (Lord Kelvin) baseado na teoria do calor de Fourier que adquiriu enorme influência no desenvolvimento das Ciências da Terra e em outra áreas do conhecimento humano. Um importante relato do cálculo da idade do Sol devido ao cientista alemão Hermann von Helmholtz é também apresentado com detalhes. O cálculo de Helmholtz foi muito importante para o subsequente trabalho de Kelvin. Ao olhar com atenção para essa discussão é possível retirar valiosas lições sobre o desenvolvimento da ciência e suas implicações culturais e sociais ao longo do tempo. Proponho com esse trabalho que essas lições sejam discutidas e implementadas para o ensino de física.

Palavras chave: Ensino de Física, Idade da Terra, Kelvin, Helmholtz, Idade do sistema solar.

Rio de Janeiro
novembro de 2011

ABSTRACT

Revisiting the debate about the Age of the Earth.

Felipe Nogarol

Supervisor: Dr. Alexandre Carlos Tort

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

In this work i analyze some of the classical aspects of the age-of-the-Earth debate that lasted from the 1850's until the beginning of the twentieth century. I present with details the calculations made by William Thomson (Lord Kelvin) based on Fourier's heat theory that acquired an enormous influence on the development of the Earth Sciences and other areas of human knowledge. An important related calculation of the age of Sun due to the German scientist Hermann von Helmholtz is also presented with details. Helmholtz' calculation was very important for Kelvin's subsequent work. A careful examination of this important debate sheds light on the real development of the scientific endeavor and its social and cultural implications. In this work I also propose that those lessons be discussed and implemented at the high-school level.

Keywords: Physics education, Age of the Earth, Kelvin, Helmholtz, Age of the solar system.

Rio de Janeiro
novembro de 2011

Sumário

1	O problema da idade da Terra	1
1.1	Resumo histórico do problema	1
1.2	A geologia e a idade da Terra.	9
1.3	A teoria da evolução e a idade da Terra.	16
2	A idade da Terra	23
2.1	A medida da idade da Terra ao longo da história	23
2.2	O experimento imaginário de Newton	25
2.3	Buffon testa o experimento de Newton	28
2.4	Helmholtz e a idade do Sol	29
2.5	O modelo de Helmholtz para o Sol	29
2.6	A energia associada ao campo gravitacional	32
2.7	O teorema trabalho-energia e o modelo de Helmholtz	34
2.8	O balanço de energia e tempo de contração	36
2.9	Kelvin, a teoria meteórica e a idade do Sol.	38
2.10	Kelvin, o modelo de Helmholtz e a idade do Sol	40
2.11	Kelvin estima a idade da Terra	41
2.12	A crítica de John Perry	52
2.13	A solução moderna para determinação da Idade da Terra	53
3	Atividade para o Ensino Médio	57
3.1	O problema da idade da Terra: uma proposta para o novo Ensino Médio	57
3.2	Introdução à atividade	61
3.3	Referencial teórico	62
3.4	A atividade	70
3.4.1	Introdução	70
3.4.2	Objetivos da atividade	70
3.4.3	Materiais para a proposta	71
3.5	Desenvolvimento da Atividade: Fase 1	71
3.5.1	Apresentação do Problema	71

3.5.2	Primeiras ideias	73
3.6	Desenvolvimento da Atividade: fase 2	74
3.7	Desenvolvimento da Atividade: fase 3	75
3.8	Desenvolvimento da Atividade: fase 4	76
3.9	Conclusão	76
A	Dedução da equação que governa a difusão de calor em uma dimensão	78
B	A fórmula de Leibniz	80
C	Radiotividade e a idade da Terra	81
C.1	O método rubídio estrôncio [29,32]	84
D	Texto 1: Primeiras ideias sobre a Idade da Terra	89
E	Texto 2: Qual a idade da Terra?	91
F	Texto 3: Lorde Kelvin contra geólogos e biólogos	94
	Referências bibliográficas	106

Capítulo 1

O problema da idade da Terra

1.1 Resumo histórico do problema

A determinação da idade da Terra desperta até hoje discussões calorosas envolvendo os mais diversos grupos de nossa sociedade. Saber a idade da Terra é uma curiosidade que acompanha o homem desde que começou a desenvolver sua capacidade de abstração. Quando o mundo foi criado? Essa é uma questão natural cuja resposta não é fácil de extrair das evidências que a natureza apresenta. Teólogos, filósofos e cientistas procuram por uma resposta satisfatória há vários anos.

Pode-se perguntar, por que é importante determinar a idade da Terra? Podemos imediatamente encontrar uma razão filosófica. A História mostra que a humanidade sempre lutou para determinar seu lugar no universo desde que começou a pensar organizadamente. Será que tudo que conhecemos foi criado especificamente para nós, ou somos um resultado menor dentro de um processo de formação de um universo de dimensões inimagináveis ao longo de tempo infinito? Pensar que tudo foi criado para nós estabelece uma situação de conforto e segurança. Galileu, Kepler e seus sucessores¹ mostraram que nosso lugar não era o centro do

¹Mesmo antes de Galileu e Kepler, alguns já questionavam a posição do homem como centro do universo.

universo. Não ocupamos uma posição central. Mesmo assim, ainda poderíamos acreditar que nosso tempo de existência foi parte central de um grande e intencional plano. Poderíamos acreditar que tudo foi criado com o objetivo de receber nossa estréia no universo de tal forma que a criação do universo teria ocorrido poucos dias antes do nosso aparecimento. Por essa razão, saber a idade da Terra passou a ser uma questão filosófica que necessitava de uma resposta urgente. Ela pode colocar nossas vidas numa perspectiva temporal e nos fornecer uma ideia melhor sobre o nosso espaço físico no cosmo [1].

Uma segunda razão pode ser apresentada para justificar a importância que atribuímos à determinação da idade da Terra. É uma razão científica. Sempre procuramos informações sobre o nosso ambiente físico simplesmente para satisfação de nossa curiosidade e para ampliar nossos conhecimentos científicos. Assim, a idade da Terra é simplesmente mais um fato interessante no conjunto de informações que cientistas reuniram na busca por uma descrição mais precisa do nosso universo físico [1].

Embora a ciência já tenha desenvolvido um conjunto de métodos bastante confiável para resolver a questão da idade da Terra², muitos ainda discordam dos valores obtidos pela ciência moderna³.

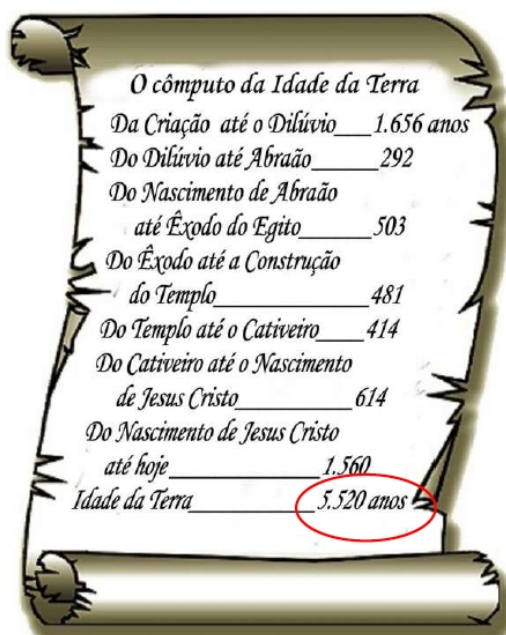
As controvérsias sobre a idade da Terra existem desde as primeiras tentativas de sua determinação. Diversos métodos para resolver a questão foram propostos e várias estimativas surgiram a partir desses métodos. Em alguns casos, não se buscava resolver a questão da idade da Terra. Afirmava-se apenas que a Terra deveria ser muito antiga (bilhões de anos) para que determinada teoria continuasse a se sustentar. Esse era o caso na biologia, ao tratar a evolução da vida, e na geologia ao tratar a formação de rochas. Muitas estimativas, como será mostrado, foram baseadas em relatos bíblicos, algumas são puramente especulativas e muitas foram baseadas em observações, medidas e cálculos que utilizaram conhecimentos

²A geocronologia é a ciência que utiliza um conjunto de métodos de datação para determinar a idade das rochas, fósseis, sedimentos e os diferentes eventos da história da Terra.

³A estratigrafia e a paleontologia permitem uma geocronologia relativa. A radiocronologia é um dos métodos de geocronologia absoluta.

científicos de determinada época e se tornaram obsoletas com os próprios avanços da ciência.

As principais fontes de idéias sobre a antiguidade da Terra no início da era cristã surgiram principalmente da filosofia e os registros históricos dos egípcios, caldeus e outros antigos povos do Oriente Próximo⁴. O conceito de eternidade do mundo foi uma especulação filosófica que foi amplamente difundida pelos pensadores gregos. Os primeiros cristãos se opunham à noção de eternidade do cosmos por causa de sua crença na criação do mundo por Deus. Para eles, a eternidade pertencia à Deus o criador absoluto. Além disso, os registros históricos de civilizações pagãs eram considerados pelos cristãos como pouco fiáveis, em comparação com os registros de inspiração divina dos relatos bíblicos.



<i>O cômputo da Idade da Terra</i>	
<i>Da Criação até o Dilúvio</i>	<i>1.656 anos</i>
<i>Do Dilúvio até Abraão</i>	<i>292</i>
<i>Do Nascimento de Abraão até Êxodo do Egito</i>	<i>503</i>
<i>Do Êxodo até a Construção do Templo</i>	<i>481</i>
<i>Do Templo até o Cativoiro</i>	<i>414</i>
<i>Do Cativoiro até o Nascimento de Jesus Cristo</i>	<i>614</i>
<i>Do Nascimento de Jesus Cristo até hoje</i>	<i>1.560</i>
<i>Idade da Terra</i>	<i>5.520 anos</i>

Figura 1.1: O conceito medieval da idade da Terra. Cálculo da idade da Terra, baseado nas escrituras bíblicas e realizado por James Ussher que foi publicado na Crônica de Cooper, em Londres, em 1560.

⁴ O termo foi aplicado originalmente para os Estados dos Bálcãs no Leste Europeu, mas hoje em dia normalmente descreve os países do Sudoeste Asiático entre o Mar Mediterrâneo e o Irã, especialmente em contextos históricos.

A questão da duração da Terra, na verdade, a existência do mundo, foi considerada pelas sociedades antigas, a civilização babilônica, sumeriana, egípcia e, naturalmente, pela civilização grega clássica, mas não se percebe nessas sociedades esforços para efetivamente contar o tempo decorrido desde a criação do mundo. Para os gregos, por exemplo, o mundo é cíclico e contar o tempo transcorrido desde a sua criação não fazia sentido. A questão da contagem do tempo decorrido desde a criação foi considerada pelo povo judeu e introduzida no Ocidente somente com o advento do Cristianismo [2, 3]. As primeiras cronologias são fundamentadas nos textos bíblicos e se devem a Teófilo de Antióquia (c.115-c.183), a Júlio Africano (fl.200-fl.250) e a Eusébio da Cesárea (c.260-c.340). A mais influente entre elas é a de Júlio Africano que supõe a história do homem compactada em uma única semana com cada dia tendo uma duração de mil anos. Mas Júlio acreditava que Cristo havia surgido no sexto dia, e estabeleceu a duração da Terra (*i.e.*: do mundo!) em 5.500 anos, valor próximo aos obtidos por Teófilo e Eusébio. Para os cristãos da Idade Média, os textos bíblicos eram passíveis de interpretação e não deviam ser tomados literalmente, mas sim como alegorias. A interpretação era privilégio dos estudiosos e teólogos da igreja medieval. A Reforma Protestante trás a volta da interpretação literal. As novas cronologias, a de Martinho Lutero (1483-1546) e a de James Ussher (1581-1656) estabelecem as datas da criação: 4000 a.C. e 4004. a.C., respectivamente. O método de Ussher, por exemplo, foi baseado nas gerações bíblicas, relatos históricos, ciclos astronômicos e numa árvore genealógica dos personagens bíblicos [4]. Assim, ele conclui que a Terra foi criada às 9 horas da manhã do dia 26 de outubro do ano 4004 a.C. William Whiston (1667-1752)⁵, usou seu conhecimento científico para determinar que o dilúvio bíblico tinha começado na quarta feira 28 de novembro de 4004 a.C (mesmo ano da criação da Terra segundo Ussher). Além de ser o suporte para as estimativas da idade da Terra, as escrituras bíblicas também davam suporte para as principais ideias sobre os processos de formação do nosso mundo. Cataclismas e catastrófes, tais como o dilúvio no tempo de Noé, eram entendidos como os principais modos de formação das características topográficas da Terra. Por causa das catastrófes, a Terra tem a aparência torturada que obser-

⁵Em seu livro *A Nova Teoria da Terra* apresentou uma descrição da criação divina da Terra e a possibilidade de um dilúvio global.

vamos. Ainda de acordo com o catastrofismo, a Terra é ao mesmo tempo jovem e imutável.

Em 1644, John Lightfoot, vice-chanceler da Universidade de Cambridge, após uma leitura cuidadosa das escrituras e antecipando-se à cronologia de Usher que foi publicada seis anos mais tarde em 1650, conclui [3, 6]: “de acordo com o calendário juliano, a Terra foi criada no dia 26 de outubro de 4004 a.C., às nove horas da manhã na Mesopotâmia”.

As cronologias baseadas nos textos bíblicos predominaram até o advento do Iluminismo. Com este aparecem as primeiras tentativas de determinar a idade da Terra com o emprego de métodos científicos.

O francês Benoit de Maillet (1656-1738), um naturalista amador, foi um dos primeiros pesquisadores que tentou determinar a idade da Terra. Ele discutiu que a cronologia bíblica poderia não estar correta. Sua teoria em grande parte baseia-se nas suas observações geológicas de campo, feitas durante viagens extensas ao longo do Egito e outros países mediterrâneos e fundamenta-se sobre os processos que hoje são conhecidos como sedimentação, excluindo outros agentes geológicos ou geomorfológicos, exceto alguns pequenos aspectos de intemperismo. A partir da observação de conchas fossilizadas incorporados em rochas sedimentares em montanhas altas acima do nível do mar, Benoit de Maillet reconheceu a verdadeira natureza dos fósseis. Por essa observação ele concluiu que a terra era originalmente inteiramente coberta pela água. Maillet deduziu uma taxa de queda do nível do mar de cerca de três centímetros por século, a partir de locais onde os portos antigos estavam agora acima do nível do mar. Aplicando tais taxas, ele concluiu para a idade da Terra o valor de 2,4 bilhões de anos, que está perto do número atual. Embora essa estimativa esteja incorreta do ponto de vista moderno, deve-se observar que ela contém a semente de um progresso real. Benoit de Maillet viu a importância do lento processo natural de funcionamento durante longos períodos de tempo. Ele introduziu a idéia de que a Terra poderia ter bilhões de anos [5].

Em 1779, Georges-Louis Leclerc (1707-1788), o Conde de Buffon, tentou

determinar experimentalmente a idade da Terra. Como estava familiarizado com grande parte das evidências geológicas disponíveis, Buffon suspeitava que a Terra era bastante antiga. Familiarizado também com os escritos de Newton sobre o arrefecimento dos cometas depois da passagem destes pelas proximidades do Sol, Buffon perguntou-se em quanto tempo uma esfera de material derretido do tamanho da esfera da Terra esfriaria até atingir uma temperatura em que a vida pudesse ser sustentada. Para responder a esta pergunta, Buffon efetuou experimentos com um grupo de esferas de diferentes tamanhos e materiais. Aquecendo as esferas ao rubro, permitia que esfriassem e media o tempo de resfriamento. Buffon então usou as taxas de resfriamento das esferas de seu experimento para determinar o tempo que um modelo da Terra levaria para resfriar de um estado primordial incandescente até atingir a temperatura ambiente. Seu resultado: aproximadamente 75 mil anos para que o processo de resfriamento ficasse completo [5]. O processo experimental empregado por Buffon prenuncia a abordagem teórica de Kelvin, um século depois. Mas o golpe mais severo nas cronologias baseadas nos textos bíblicos veio nos séculos 18 e 19 com o estudo intenso dos registros fósseis. Grandes durações temporais eram necessárias para explicar a riqueza da fauna e da flora encontradas nesses registros. É o começo da era do tempo ilimitado que tanto desagradava Kelvin que nele via uma grosseira violação das leis da então nova ciência da termodinâmica. Para os eminentes cientistas franceses Georges Cuvier (1769-1832) e Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829), e outros, os registros fósseis em estratos sucessivos, cada um com sua própria fauna e flora, exigiam durações temporais muito maiores do que as relatadas pelos textos bíblicos. James Hutton (1726-1797), escocês, médico, fazendeiro, e geólogo amador, depois de explorar durante anos as formações geológicas da Escócia e da Inglaterra conclui que exceto pela criação, os relatos bíblicos não fazem parte da história natural da Terra. Em um trabalho publicado em 1788, *The Theory of Earth*, Hutton argumenta que as forças da natureza, a água e o fogo, principalmente o fogo⁶, atuando lentamente, mas durante um tempo indefinido, são suficientes para explicar a acidentada geografia física da Terra. Para Hutton, mais preocupado com as forças

⁶Hutton era um *plutonista* ou *vulcanista*, como eram chamados os que defendiam a ação do fogo como principal agente transformador. Os que defendiam a ação da água como principal agente transformador eram chamados *netunistas*.

da natureza do que com o decurso do tempo, não havia “nenhum vestígio de um começo, nenhuma perspectiva de um final”. Hutton não advogava uma duração infinita, mas sim uma duração tão grande que era melhor qualificá-la como indefinida.

Uma das mais famosas e influentes discussões a respeito da idade da Terra, e que será detalhada nesse trabalho, envolveu William Thomson (1824-1907) (posteriormente Lord Kelvin), geólogos e biólogos no século 19 e durou pelo menos 60 anos. O debate em questão envolve quase que exclusivamente cientistas britânicos. As razões para isto não são muito claras, mas pode-se pensar que a topografia peculiar das Ilhas Britânicas tenha tornado a geologia de campo o passatempo favorito de cientistas profissionais e amadores. No continente europeu, os geólogos, amadores ou não, estavam mais interessados no desenvolvimento da mineralogia, cristalografia, estratigrafia e paleontologia. A controvérsia teve consequências profundas sobre o desenvolvimento das ciências da Terra. William Thomson, físico, engenheiro e inventor, posteriormente Lord Kelvin de Largs, ou simplesmente Kelvin, um dos maiores cientistas da Era Vitoriana, se contrapõe a uma corrente de pensamento geológico conhecida como *uniformitarianismo* cujos princípios foram estabelecidos por outro grande cientista britânico, Charles Lyell (1797-1875) em seu influente livro *Principles of Geology*, publicado em 1830. Kelvin também se contrapõe à Charles Darwin (1809-1882) e a teoria da evolução exposta na *Origem das Espécies*, publicada pela primeira vez em 1859.

Em 1830, Charles Lyell (1797-1875) publica o primeiro volume da sua influente obra *Principles of Geology* onde adotando os pontos de vista de Hutton sobre a questão⁷, expõe os princípios que norteavam a formação da crosta terrestre. Opondo-se aos catastrofistas que preconizavam forças naturais de grande intensidade atuando durante breves intervalos de tempo para explicar a formação da geografia física da Terra, Lyell, como Hutton o fizera anteriormente, afirma que exceto por ações localizadas e eventuais, a superfície da Terra está em equilíbrio dinâmico, sujeita à ação de forças naturais, água, fogo, vento, que atuam ao longo

⁷Lyell focalizou sua atenção na formação da crosta terrestre, enquanto Hutton procurava entender a formação da Terra.

de durações temporais tão grandes que é melhor considerá-las como indefinidas ou de magnitudes inimaginável à mente humana. O trabalho de Lyell, o segundo volume foi publicado em 1833 e a obra completa teve doze edições, é a grande referência da escola de pensamento geológico que tornou-se dominante na ciência britânica do período: o uniformitarismo. Enquanto isto, a teoria de evolução de Darwin exigia grandes durações temporais para que as espécies pudessem evoluir e alcançar as formas que observamos hoje. Darwin, na primeira edição de seu livro faz um cálculo simples e chega a conclusão que foram necessários 300 milhões de anos para a formação do Weald⁸, um vale escavado pela ação da erosão situado no sul da Inglaterra. É contra essas durações imensuráveis dos uniformitaristas e a visão darwiniana da evolução biológica que Kelvin decide contrapor-se. Kelvin, ele próprio um amante da geologia (entre os seus muitos outros interesses), via no pensamento uniformitarista uma grosseira violação das leis da termodinâmica que ele contribuíra para estabelecer, pois em seu entendimento as perdas de energia levariam a uma diminuição da atividade natural da Terra e o calor perdido nesta atividade seria irrecuperável. No darwinismo, Kelvin via uma falta de explicação para a origem da vida⁹, a exigência de durações temporais enormes e a aleatoriedade que acarretava em uma ausência de propósito divino que como homem medianamente religioso, mas leitor e admirador de William Paley (1743-1805)¹⁰, abominava. É contra esse pano de fundo que devemos entender a participação e a enorme influência que Kelvin teve sobre a questão da idade da Terra e o posterior desenvolvimento das ciências da Terra.

Kelvin em 1846, mesmo ano em que fora designado para a universidade de Glasgow, comunica seu cálculo da idade da Terra baseado em princípios físicos. Nessa época Thomson já era um cientista respeitadíssimo o que fazia com que seus comunicados a respeito de questões científica tivessem um respaldo de verdade junto à muitos cientistas e ao público da época. A partir desse comuni-

⁸Duramente criticado por Kelvin, Darwin retirou o cálculo a partir da terceira edição de *Origem*.

⁹Kelvin defendia a idéia de que a vida origina-se na Terra a partir de formas pré-existentes vindas do espaço a bordo de meteoros que atingiram a superfície da Terra [7].

¹⁰William Paley, importante pensador cristão inglês, introduziu o argumento teleológico no seu livro *Natural Theology* como prova da existência de Deus. Na Era Vitoriana, sua influência intelectual era enorme.

cado de Kelvin inicia-se a discussão pois se seus cálculos estivessem realmente corretos muitas teorias da biologia e da geologia deveriam ser abandonadas porque requerem uma Terra muito mais antiga do que aquela dos cálculos de Kelvin. Os geólogos consideravam ser necessário um período de tempo muito maior para ocorrer as sedimentações observadas e a teoria da evolução das espécies de Darwin requeria um intervalo de tempo bem mais longo para que as transformações propostas fossem observadas. [4, 5].

Os argumentos de Kelvin e sua proposta para a idade da Terra foram baseadas em seus conhecimentos de termodinâmica e calor. Embora tenha inicialmente proposto em 1846 que a Terra deveria ter por volta de 100 milhões de anos, admitiu, posteriormente, que esse número era uma aproximação por causa de suas hipóteses simplificadoras. Assim, modificou esse número para algo entre 20 milhões e 400 milhões de anos [5]. Essa afirmação adquiriu grande peso junto aos pesquisadores da época, visto que era uma afirmação de Kelvin feita com fundamentos na física e escrito em uma linguagem matemática que poucos entendiam. É nesse contexto que surge a controvérsia que será analisada ao longo desse trabalho que numa visão pedagógica abre um leque de possibilidades para a educação em ciências. Ao detalhar toda a linha de raciocínio de Kelvin, o presente trabalho mostra como o desenvolvimento da ciência é uma construção humana, e por isso sujeita às emoções e vaidades do homem. Abordando a interligação de diversas áreas científicas podemos perceber porque é essencial uma visão holística no desenvolvimento e no ensino de ciência.

1.2 A geologia e a idade da Terra.

Esta seção foi baseada nos trabalhos de José Henrique Popp [8] e Marina Bento Soares [9].

Medir intervalo de tempo é fundamental para a ciência. Dessa forma, é necessário quantificar o tempo para definir o que são processos e mudanças e para que relações de antes e depois possam ser estabelecidas. Uma das formas que geólogos usam para realizar tal medida é a análise dos vestígios que a Terra apre-

senta. As rochas, por exemplo, registram os eventos que moldaram a Terra e a vida no passado ao longo de uma complicada e extensa história. Esse registro, entretanto, está incompleto. Muitos, especialmente do início da Terra, foram apagados ou são difíceis de decifrar. Apesar disso, existem registros de episódios suficientemente preservados para dar aos geólogos a certeza de que a Terra possui bilhões de anos. Para datar esses episódios e determinar a idade da Terra, os geólogos utilizam duas escalas de tempo de forma complementar:

- A escala relativa de tempo: baseada na sequência de rochas e na evolução da vida. Nessa escala determina-se uma sucessão temporal de eventos, sem que se saiba exatamente quando e quanto tempo esses eventos levaram para acontecer.
- A escala absoluta de tempo: baseada na radioatividade natural dos elementos químicos presentes nos minerais constituintes das rochas. Nessa escala determina-se quando os eventos aconteceram através da obtenção de uma idade absoluta.

As evidências para determinação da idade da Terra estão relacionadas com as rochas que formam a crosta terrestre. Uma vez que as rochas são registros de processos geológicos é possível determinar processos que ocorreram no passado através do estudo dessas rochas e, assim, entender como era o nosso planeta em tempos anteriores ao surgimento das formas de vida complexa. A geologia possui diferentes ramos que estudam os processos e seus respectivos registros geológicos. Podemos citar:

- Petrologia: analisa as rochas e os processos formadores de rocha.
- Geologia Estrutural: estuda as estruturas deformacionais e os mecanismos de deformação das rochas.
- Paleontologia: investiga os fósseis e a evolução da vida.
- Estratigrafia: investiga a distribuição temporal do registro geológico

Em geral, a estratigrafia dedica-se principalmente ao estudo das rochas estratificadas (sedimentares) porque o registro do tempo geológico teve início com esse tipo de rocha, mas a estratigrafia também estuda os diversos métodos datação dos eventos geológicos não se restringindo às rochas sedimentares. A estratigrafia também é responsável pela normatização da nomenclatura utilizada para designar grupos de rochas.

Nicolaus Steno (1638-1686) contribuiu de forma essencial no entendimento de como se dá o empilhamento das camadas de rochas sedimentares. Ele estabeleceu três princípios que até hoje continuam sendo a base da estratigrafia. São eles:

- (a) Princípio da superposição: Em qualquer sucessão de estratos de rochas¹¹, o estrato mais antigo posiciona-se mais abaixo, com os estratos sucessivamente mais jovens, posicionando-se acima.
- (b) Princípio da horizontalidade original: Devido ao fato das partículas sedimentares de um fluido acomodarem-se sob a influência da gravidade, a maior parte das estratificações deve ser horizontal. Estratos inclinados, portanto, devem ter sofrido perturbação posterior.
- (c) Princípio da continuidade lateral: Estratos, originalmente, se estendem em todas as direções até que sua espessura chegue a zero, ou então, até encontrarem os limites de sua área original ou bacia de deposição.

Além dos princípios estabelecidos por Steno, dois outros princípios, postulados por James Hutton, podem ser aplicados para auxiliar no entendimento da sequência de empilhamento das rochas. São eles:

- (a) Princípio das relações de corte: Uma rocha ígnea intrusiva que corta uma outra camada de rocha deve ser mais jovem que esta camada de rocha.
- (b) Princípio das inclusões: Uma rocha que inclui fragmentos de uma outra rocha deve ser mais jovem que a rocha que originou estes fragmentos.



Figura 1.2: Estratificação Cruzada de Rocha (Foto Wikipedia)

Os princípios estabelecidos por Steno e Hutton esclarecem como as rochas sedimentares são depositadas, porém não garantem que duas camadas de rocha com a mesma litologia, aflorando em duas áreas geográficas distintas, tenham ou não a mesma idade. Para que essas correlações temporais entre camadas de rochas sejam possíveis, outros princípios devem ser aplicados. Dessa forma, dois novos princípios, utilizando fósseis como ferramentas, se somaram aos princípios da estratigrafia. São eles:

- (a) Princípio da sucessão faunística: Grupos de fósseis ocorrem no tempo geológico em uma ordem determinada que reflete a evolução da vida na Terra. Fósseis mais antigos posicionam-se nos estratos mais inferiores e assim sucessivamente. A idade de uma rocha pode ser inferida com base no seu conteúdo fossilífero.¹²
- (b) Princípio da correlação fóssil: Fósseis sucedem-se no tempo geológico em idades determinadas, assim, as camadas contendo fósseis podem ser correla-

¹¹Desde que não tenha sofrido deformação

¹²Esse princípio, inicialmente utilizado como um instrumento prático, foi posteriormente explicado pela teoria da evolução de Darwin. Uma vez que existe uma evolução biológica irreversível através dos tempos geológicos, os fósseis devem se ordenar no tempo segundo uma escala evolucionária.



Figura 1.3: Estratificação de Rocha.(Foto Wikipedia)

cionadas temporalmente.

Antes de Charles Darwin começar sua viagem histórica com o *HSM Beagle* que zarpou em 27 de outubro de 1831, quando coletaria o material para escrever seu famoso livro *A Origem das Espécies*, a existência de antigos sinais de vida nas rochas já era conhecida. Embora os fósseis fossem reconhecidos desde a Grécia Antiga, por muito tempo foram vistos como brincadeiras da natureza até o resnacimento, quando Leonardo da Vinci (1452-1519) os interpretou como formas de vidas passadas. William Smith (1769-1839)¹³, um engenheiro britânico, foi o primeiro a reconhecer que o conteúdo fossilífero de camadas, às vezes de mesmo tipo de rocha, variava sistematicamente das mais antigas para as mais jovens. O mesmo fato foi logo constatado em outras partes do mundo, e acabou gerando o princípio da sucessão faunística que passou a ser aplicado à datação relativa e à correlação estratigráfica de rochas sedimentares.

Com a ajuda dos chamados fósseis-guia ou fóssil-índice encontrados nas rochas sedimentares é possível datar afloramentos e consequentemente correlacioná-los com outros localizados em regiões muito distantes. São considerados

¹³O seu trabalho mais famoso é *The Map That Changed the World*, um mapa geológico detalhado da Inglaterra, do País de Gales e de uma parte da Escócia.



Figura 1.4: Trilobita, fósil guia do período cambriano (Foto de Wikipedia)

fósseis-guia aquelas espécies que apresentaram uma rápida evolução¹⁴ e uma ampla distribuição geográfica.



Figura 1.5: Trilobita no interior de rocha (Foto de Wikipedia).

A escala de tempo envolvida nos processos geológico é muito diferente da escala humana. Esse fato retardou o desenvolvimento dos métodos de datação. O debate acerca da escala do tempo geológico e o desenvolvimento de uma concepção

¹⁴Curto intervalo de tempo entre o aparecimento e a extinção da espécie

de tempo profundo¹⁵ durou aproximadamente um século.

As principais teorias que fundamentaram a estratigrafia moderna foram as do uniformitarismo e do catastrofismo. O uniformitarismo afirma que os processos geológicos atuais, ocorrendo nas mesmas taxas observadas hoje e da mesma forma, são responsáveis por todas as características geológicas da Terra. De acordo com o uniformitarismo, os processos presentes explicam todos os acontecimentos passados. James Hutton primeiro propôs a doutrina da uniformidade em sua publicação intitulada *Teoria da Terra* (1785). Sir Charles Lyell endossou o uniformitarismo em sua obra intitulada *Princípios de Geologia* (1830). O uniformitarismo é fundamental para a coluna geológica de Lyell. O catastrofismo é a ideia de que muitas das características da crosta terrestre (camadas geológicas, erosão, fósseis de várias camadas, etc) se formaram como resultado de atividade cataclísmica passada. Em outras palavras, a superfície da Terra tem sido marcada por calamidades naturais catastróficas. Diversos períodos marcados por extinção de grande parte do conteúdo fóssilífero são conhecidos na história da Terra e levaram ao desenvolvimento, inicialmente por Georges Cuvier (1769-1832)¹⁶, da teoria do catastrofismo.

A construção do conceito de tempo longo originou-se com a formulação inicial da teoria do uniformitarismo por James Hutton em 1792. Antes de Hutton a noção de intervalo de tempo dominante era aquela dada pelo estudo criterioso de relatos bíblicos e de outros textos sagrados.

A descoberta do decaimento radioativo natural do urânio, em 1896, por Becquerel (1852-1908)¹⁷, físico francês, abriu uma nova janela para a ciência. Em

¹⁵Uma vastidão de tempo muito maior do que aquela que conhecemos e que podemos conceber que foge aos nossos padrões de referência

¹⁶Cuvier trabalhou no Museu de História Natural de Paris dedicando-se especialmente ao estudo dos vertebrados. No seu estudo, deparou-se com alguns fósseis de dimensões extraordinárias, muito maiores do que as espécies atuais. Para explicar as suas dimensões e o seu desaparecimento (extinção), Cuvier propôs que a Terra sofria de poderosas convulsões periódicas. Nestas ocorreriam extinções de muitos animais, e seriam seguidas por períodos de calma, onde se produziria uma nova criação.

¹⁷É muito comum a ideia que essa descoberta foi acidental. A história não é bem assim. Dificilmente se poderia afirmar que Becquerel descobriu a radioatividade; e aquilo que ele de fato

1905, Ernest Rutherford(1871-1937) fez a primeira sugestão clara para o uso da radioatividade para medir diretamente o tempo geológico. Em um curto período de tempo, Bertram Borden Boltwood(1870-1927), químico da universidade de Yale, publicou uma lista de idades geológicas, baseadas em radioatividade.

O método da datação radiotiva não era conhecido em 1846, época que Kelvin fez a divulgação de seus cálculos sobre a idade da Terra. Só os métodos de datação relativa (escala relativa de tempo) eram conhecidos. Esses métodos foram os primeiros a serem desenvolvidos, pois não dependiam de desenvolvimento tecnológico e sim do entendimento de processos geológicos básicos e do registro desses processos. Os princípios que permitem a datação relativa são extremamente simples e sua aplicação é quase sempre possível em campo quando mais de uma rocha ocorre em um mesmo afloramento. A datação relativa permite estabelecer a sucessão temporal das rochas de uma região, formando uma coluna estratigráfica.

O diversos métodos citados nessa seção são empregados principalmente no estudo de unidades litoestratigráficas. Eles foram desenvolvidos e aprimorados ao longo de vários anos e são utilizados modernamente. Na época do debate com Kelvin muitos desses métodos já eram conhecidos e aplicados¹⁸. Baseados em suas observações, os geólogos acreditavam que a Terra era muito antiga sem no entanto quantificar essa antiguidade. O argumento de Kelvin se tornou muito forte justamente por ser baseado em princípios físicos, gerar um valor para a idade da Terra e devido à autoridade da figura de Kelvin.

1.3 A teoria da evolução e a idade da Terra.

Nessa seção, a principal referência utilizada foi o texto de J. M. Amabis e G. R. Martho [12] e no trabalho de Carlos Marques da Silva da universidade de Lisboa [13, 14].

Atualmente não existem mais dúvidas de que os seres vivos descendem de

descobriu não foi fruto do acaso. Para detalhes ver [10, 11]

¹⁸A datação radiotiva ainda não era conhecida

ancestrais comuns. Desde o aparecimento da vida, os seres vivos vêm se diversificando. Surgem novas espécies e outras se extinguem. Esse processo de diversificação dos seres vivos, dando origem a novas espécies, denomina-se evolução orgânica. Esse conceito culminou com a teoria proposta por Charles Darwin e Alfred Russel Wallace (1823-1913) no século XIX. Evolução é o processo constante de mudança que transforma a vida na Terra desde o seu princípio mais simples até à sua diversidade existente. [12]

As idéias de Darwin sobre a evolução das espécies foram publicadas no ano de 1859, sob o título *A origem das espécies através da seleção natural*. Darwin discute as ideias sobre a evolução, apresenta farto material como exemplos e propõe um mecanismo básico para o processo de evolução. Pode-se resumir os pontos principais da teoria através dos seguintes princípios básicos:

- (a) Todo organismo produz uma grande quantidade de células reprodutoras, mas apenas algumas geram indivíduos que chegam a idade adulta.
- (b) O número de indivíduos de uma espécie mantém-se quase constante no decorrer das gerações. Como nascem muito mais indivíduos do que os que atingem a maturidade, a taxa de mortalidade deve ser muito grande.
- (c) Os indivíduos de uma espécie apresentam variações de caracteres. Algumas dessas variações permitirão maior ou menor sucesso na luta pela sobrevivência. Assim, os membros que apresentarem variações que lhes permitam melhor adaptação às condições ambientes serão naturalmente selecionados e transmitirão essas características para as novas gerações.

Antes de sua viagem de cinco anos ao redor do mundo a bordo do navio *Beagle*, Darwin não acreditava na evolução. Isso pode ser verificado em uma das passagens de seu livro *A origem das Espécies* em que Darwin afirma:

“Vejo-me, contudo, após os estudos mais profundos e uma apreciação desapassionada e imparcial, forçado a sustentar que a opinião defendida até há pouco pela maioria dos naturalistas, opinião que eu próprio

partilhei, isto é, de que cada espécie foi objeto de uma criação independente, é absolutamente errônea.”

Os seres vivos que habitam a Terra atualmente são o resultado de cerca de 3,5 a 4 bilhões de anos de evolução. As observações de Darwin durante 20 anos antes da publicação da *origem das espécies* não foram suficientes para que qualquer modificação de alguma espécie pudesse ser constatada. Embora Darwin não tenha apresentado provas concretas para a evolução ou da origem das espécies, ele deixou claro que diversos fatos biológicos, até então inexplicáveis, seriam esclarecidos admitindo-se a evolução. Darwin via a seleção natural como um processo que operava de acordo com as leis naturais. Ele reconhecia que o conceito era viável se tivesse havido tempo suficiente para que atuasse de forma progressiva. Baseado no que Charles Lyell tinha apresentado no seu livro *Princípios da Geologia*, Darwin acreditava numa Terra antiga. Por isso, na primeira edição de *A Origem das Espécies* (1859), Darwin apenas ilustrou a vasta extensão do tempo geológico. Ele estimou em 300 milhões de anos a idade da crosta terrestre na primeira edição de seu livro. A dimensão do tempo foi fruto da análise dos processo erosivo causado pelas águas do rio Weald na costa sudeste da Inglaterra. Darwin não tinha a intenção de calcular a idade da Terra. Este cálculo deveria ser interpretado, na visão de Darwin, como uma aproximação grosseira. Entretanto, essa estimativa provocou uma reação imediata e lançou um debate científico sobre a idade da Terra. Darwin acreditava que a defesa convincente de uma Terra extremamente antiga por Lyell ajudaria a ilustrar a vasta extensão do tempo geológico. Os cálculos foram questionados posteriormente e Darwin na segunda edição do referido livro, acrescentou uma nota sugerindo que o tempo necessário para a erosão desnudar o Weald deveria ser reduzido pela metade ou mesmo para um terço. Em 1860, John Phillips (1800-1874) apresentou argumentos indicando que a desnudação do Weald provavelmente se deu ao longo de 1.3 milhões de anos, e concluiu que provavelmente apenas 95 milhões de anos teriam passado desde o início do período Cambriano. Considerando os volumes de massas sedimentares, velocidades de sedimentação e conteúdos fósseis foi possível determinar a idade relativa das formações e avaliar a sua antiguidade. Essa foi a primeira tentativa importante para calcular o tempo geológico a partir da taxa de acumulação

de camadas. 95 milhões de anos era uma pequena fração do tempo que Darwin acreditava ser necessário para sua teoria se sustentar.

Em resposta às críticas de Phillips e outros cientistas da época, Darwin retirou qualquer referência aos cálculos da formação do Weald da terceira edição (1861). Nesse momento, Darwin achava que tinha resolvido a situação problemática da idade da Terra. Sua teoria porém, se apoiava numa Terra antiga. Ele estava confiante que seria demonstrado que o mundo tinha uma idade superior à postulada por Phillips. [13]

Alguns anos mais tarde, entretanto, H. C. Fleeming Jenkin (1833-1885) apresentou uma resenha crítica da *Origem das espécies*. Darwin considerou-a uma das mais valiosas críticas à sua teoria. Jenkin apresentou duas importantes objeções:

- (a) a impossibilidade de que uma variação presente num indivíduo se perpetuasse numa comunidade de indivíduos normais.¹⁹
- (b) a inadequação do tempo geológico para a ocorrência da evolução. Ele chamou atenção para o fato que num mundo finito aquecido por um Sol finito, a quantidade de energia disponível teria que ser limitada. Sua explicação estava de acordo com a segunda lei da termodinâmica segundo a qual toda transformação de energia tem de dissipar uma parte desta energia e torná-la inútil para transformações futuras. Em termos geológicos, ele argumentava que estes fatos significavam que a Terra esgotaria a sua energia, e que portanto as forças de transformação geológicas do presente teriam que ser menos poderosas do que as do passado. Em consequência dessa observação, não seria possível usar as taxas atuais de mudanças geológicas como um guia para a idade da Terra. Para determinação da idade do mundo (idade da Terra) deveriam ser utilizados métodos mais precisos de cálculo, ou seja, os métodos da Física.

A crítica de Jenkin à teoria de Darwin invocando a segunda lei da termodinâmica não era originalmente sua. Esse argumento tinha sido apresentado cinco

¹⁹Essa questão foi resolvida com a descoberta da genética mendeliana.

anos antes por seu amigo William Thomson (Kelvin) e um dos maiores físicos do século XIX. Kelvin e Rudolf Clausius (1822-1888) formularam a segunda lei da termodinâmica. Kelvin usou-a para desenvolver uma estimativa da idade do Sol e da Terra.

A segunda lei da termodinâmica diz que o calor flui naturalmente de um corpo mais quente para um mais frio, e não ao contrário. Kelvin concluiu que o Sol e a Terra teriam que arrefecer a menos que tivessem uma fonte externa de calor e que eventualmente a Terra se tornaria demasiado fria para sustentar a vida. Kelvin estimou o tempo de vida do Sol, e por extensão da Terra, da seguinte maneira. Ele calculou a energia gravitacional de um objeto com massa e raio iguais aos do Sol e dividiu o resultado pela taxa através da qual o Sol dissipa energia. Este cálculo deu um tempo de vida solar de somente 30 milhões de anos. A estimativa correspondente para a energia química era de um tempo muito mais curto, pois os processos químicos liberam pouca energia.²⁰

Como acreditava que Darwin estava errado quanto a idade da Terra, Kelvin acreditava que Darwin também estava errado na sua estimativa do tempo disponível para a operação da seleção natural.

Darwin ficou tão abalado pela análise de Kelvin e por sua autoridade em assuntos teóricos que nas últimas edições da *Origem das Espécies* eliminou qualquer menção às escalas temporais específicas. Darwin viu números crescentes de geólogos interpretarem seus dados de acordo com os limites cronológicos de Kelvin. Na edição final da *Origem das Espécies*, Darwin fez seu último comentário sobre o tópico [13]:

“Com respeito ao lapso de tempo não ter sido suficiente desde a consolidação de nosso planeta para a quantidade presumida de mudança orgânica, e esta objeção, defendida por Sir William Thomson, é provavelmente uma das mais graves avançadas até hoje, eu só posso responder, primeiro, que não conhecemos a medida em anos da taxa da mudança das espécies, e segundo, que muitos filósofos ainda estão re-

²⁰Detalhes desse cálculo de Kelvin serão apresentados no capítulo 2

lutantes em admitir que sabemos o suficiente a respeito da constituição do universo e do interior do nosso globo para especular com segurança sobre a sua duração passada.”

Durante os dez últimos anos da vida de Darwin, a geologia adaptou-se predominantemente à cronologia de Kelvin, enquanto a paleontologia acumulava evidências a favor da evolução gradual de novas espécies. Passariam mais de 20 anos depois da morte de Darwin até a descoberta da radioatividade lhe dar a resposta que esperava.

A teoria da evolução por seleção natural pressupõe a existência de tempo, de muito tempo, do tempo suficiente para as mudanças evolutivas gerarem a biodiversidade que atualmente conhecemos. Darwin supõe, em *A Origem das Espécies*, um tempo geológico imensamente extenso, aliada a uma visão uniformitarista do mundo natural, de acordo com a qual a Terra mudava gradualmente, ao longo de uma escala temporal muito vasta e seguindo processos idênticos aos que atualmente são observados. Essa posição de Darwin apoia-se principalmente na leitura da obra de Charles Lyell que era favorável ao uniformitarismo. De forma simplificada pode-se afirmar que o uniformitarismo se posicionava contrariamente ao catastrofismo, paradigma então prevalecente, que admitia que a Terra teria sido palco de grandes catástrofes originadas pelas intervenções divina. O uniformitarismo, embora não constituísse uma oposição radical ao catastrofismo, estabelecia que a história da Terra poderia ser explicada em termos de forças naturais e em decorrência de um desenvolvimento longo e progressivo, não ocorrendo dessa forma catástrofes universais²¹.

As diversas descobertas sobre o tempo geológico foram essenciais para o estabelecimento da teoria da evolução das espécies. As críticas que surgem após a estimativa do tempo geológico não comprometeram os fundamentos do principal livro de Darwin, que mesmo transcorrido 150 anos, mantém a robustez da sua publicação original. Os estudos geológicos mostraram a Darwin que o desenvolvimento da Terra poderia ser medido por processos muito mais lentos de

²¹Ocorrem catástrofes isoladas que não podem ser usadas para explicar a formação da Terra

transformação e que, conseqüentemente, a Terra seria muito mais antiga do que se supunha. Tal ideia estava plenamente de acordo com a teoria da evolução que pressupõe uma Terra muito antiga na qual as transformações ocorrem de maneira lenta e gradual. Acredita-se, por tal visão, que as transformações observadas atualmente se processam da mesma forma que no passado. Isso permite aplicar as taxas atuais de mudanças aos processos do passado e assim fazer previsões sobre as transformações ao longo do tempo.

Capítulo 2

A idade da Terra

2.1 A medida da idade da Terra ao longo da história

Numa visão moderna, a Terra primordial emerge de uma nuvem turbulenta gases, poeira e planetóides que circundam uma nova estrela (Sol). Nos 700 milhões de anos seguintes essa nuvem começou a se solidificar originando a Terra e se estabelece num tranquilo sistema solar. Tais acontecimentos ocorreram há 4,5 bilhões de anos. Antes dessa visão sobre a Idade da Terra, outras estimativas foram defendidas e aceitas durante vários anos [5].

A idade da Terra e do Universo possuem enorme importância nas teorias cosmológicas sendo também de intenso interesse popular. Diversas estimativas se acumularam desde princípios do século XVIII para tentar determinar a real idade da Terra [3–5].

Um século antes da controvérsia entre Kelvin, geólogos e os biólogos, existia pouca ou nenhuma discussão sobre o assunto. A principal referência para determinar a idade da Terra então eram as escrituras bíblicas. Muitos alegavam que lá estava claramente enunciado que a terra tem por volta de 6000 anos de idade [4,5].

A opinião quase unânime entre os primeiros cristãos era que a história humana a partir da criação de Adão até o nascimento de Cristo durou cerca de 5.500 anos. Essa era provavelmente também considerada a idade do mundo, com o

mesmo número de anos como o da história humana, porque seus escritos, em geral, não indicam qualquer distinção nítida entre a criação inicial do cosmos e da criação da raça humana. As crenças sobre a idade do mundo foram baseadas em várias linhas de evidência. A linha predominante de crença foi elaborada a partir do registro da criação de Deus do mundo em seis dias [4].

A maioria dos estudiosos do século XVII, interessados nas questões sobre a Terra, não considerava uma estimativa de 6.000 anos de história como uma restrição em seus estudos científicos. Eles assumiram a validade dos valores para a idade da Terra obtidos por estudiosos da bíblia e consideraram os cálculos como fruto da melhor informação sagrada e secular e dos métodos disponíveis. Com poucas exceções, eles não perceberam nenhuma evidência convincente para desafiar tal idade. A maioria das descobertas no reino da natureza era condizente com uma curta história da Terra, sem qualquer constrangimento. No entanto, a idade da Terra começou a ser questionada com os avanços no estudo de fósseis e estratos de rochas. A Terra não seria percebida como muito mais velha até que foi reconhecido que houve várias sucessões de populações animais e vegetais através do tempo e que essas populações se tornaram preservadas em sedimentos depositados lentamente que endureciam em estratos rochosos. Isso, como vimos anteriormente, só foi possível com os avanços no entendimento da natureza de fósseis e da estratificação de rochas. A provável idade da Terra foi calculada a partir de determinações das espessuras de depósitos de rochas sedimentares e as estimativas das taxas de sedimentação e/ou erosão.

No século XIX os geólogos estavam convencidos de que a Terra era bastante antiga. Porém não existiam métodos confiáveis para a determinação de um valor representativo da idade da Terra. Como a escala de tempo geológico tomou forma, algumas discussões sobre a idade da Terra incluía estimativas dos comprimentos relativos das várias épocas e períodos. A maioria dos geólogos considerava que a Terra tinha provavelmente milhões de anos, mas as expressões imprecisas como “inconcebivelmente vasto” eram comuns.

Em 1890 Kelvin usou dados mais precisos de condução de calor e radiação

para melhorar o cálculo da taxa de resfriamento da Terra, concluindo que a Terra tinha entre 20 e 400 milhões de anos de idade. O grande prestígio deste físico inglês fez com que seus cálculos matemáticos, a partir de premissas termodinâmicas, arrasassem todos que defendiam um tempo muito mais dilatado para explicar as grandes transformações geológicas através de ações cuja lentidão era uma evidência. Diante dessa estimativa baseada na ciências exatas, os naturalistas viam-se coagidos a reformular as suas concepções e, entre eles, por exemplo, Darwin não conseguia encaixar a evolução das espécies numa parcela de tempo tão reduzida.

Determinar a idade da Terra foi tema de intensas discussões a partir do início do século XVIII. Essa busca motivou o desenvolvimento de vários métodos e teorias de interessados de diversos grupos daquele momento da história. Nesse capítulo mostro o modelo de Helmholtz para o Sol¹ e analiso as principais estimativas científicas para a idade da Terra. Em especial destaco as estimativas feita por Kelvin a partir de 1846, descrevendo detalhadamente seu raciocínio, as influências que ele sofreu e o efeito que seus cálculos produziram em outras teorias científicas da época.

2.2 O experimento imaginário de Newton

Newton (1643-1727) apresentou no *Principia* um experimento imaginário para mostrar que um corpo como a Terra feito de ferro em fusão, demoraria 50 mil anos para esfriar. Para tanto, ele estimou o tempo que um globo de ferro, com uma polegada (2,54 cm) de diâmetro, ao rubro exposto ao ar levaria para esfriar. Argumentou então que o “calor” retido é proporcional ao volume do globo e o calor irradiado é proporcional à área exposta. Concluiu que o tempo de resfriamento seria proporcional ao diâmetro do globo. Em seu experimento imaginário, o tempo aproximado para o globo de uma polegada ($2,54 \text{ cm} = 2,54 \times 10^{-2} \text{ m}$) esfriar desde o rubro até a temperatura ambiente era de uma hora. Utilizando a proporcionalidade entre o diâmetro e o tempo de resfriamento, concluiu que para

¹Modelo que foi adotado por Kelvin a partir de 1861

um globo com o diâmetro da Terra $12800 \text{ km} = 12,8 \times 10^6 \text{ m}$, o tempo de resfriamento seria [5]:

$$T \approx \frac{12,8 \times 10^6}{2,54 \times 10^{-2}} \text{ horas} \approx 50.000 \text{ anos}$$

Para verificar a precisão dessa suposição de Newton, podemos utilizar a lei da radiação de Stefan de 1878. Todos os corpos irradiam energia continuamente na forma de ondas eletromagnéticas. Essa radiação é gerada pela aceleração de cargas elétricas. Sabemos que temperatura corresponde ao movimento aleatório das moléculas que estão constantemente alterando suas direções de movimento, isto é, acelerando. Assim, as cargas elétricas das moléculas também aceleram. Logo, qualquer corpo emite radiação eletromagnética devido ao movimento térmico de suas moléculas. Essa radiação é denominada radiação térmica.

A taxa de emissão de energia de um corpo por meio da radiação térmica a partir de sua superfície é proporcional à quarta potência de sua temperatura superficial absoluta (Eq.2.1)

$$P = \sigma A e T^4 \quad (2.1)$$

Na Eq.(2.1), P significa a potência irradiada pelo corpo, ou seja, a energia irradiada por unidade de tempo. A é a área da superfície do corpo.

σ é a denominada constante de Stefan-Boltzmann. Seu valor é igual a

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4.$$

e é uma constante denominada emissividade que pode variar entre 0 (zero) e 1. O valor assumido por e dependerá das propriedades da superfície do corpo.

Para determinar o tempo de resfriamento de um corpo utilizando a lei de Stefan, podemos escrever $P = \frac{dQ}{dt}$, sendo Q a energia total irradiada pela superfície do corpo. Temos, então:

$$P = \frac{dQ}{dt} = \sigma A e T^4 \quad (2.2)$$

Tendo como objetivo determinar o tempo aproximado de resfriamento vamos admitir que a temperatura final do ambiente seja de zero Kelvin (0K). Embora isso não seja verdadeiro para um ambiente na Terra (uma sala de laboratório por exemplo), ela é quase verdadeira para o espaço e servirá ao nosso propósito de aproximação. Podemos utilizar a equação para cálculo de quantidade de calor sensível trocado por um corpo:

$$dQ = -mcdT \quad (2.3)$$

Na Eq.(2.3) m é a massa do objeto irradiando, c é o denominado calor específico do material que compõe o corpo. Combinando a Eq.(2.2) com a Eq.(2.3), obtemos:

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma AeT^4 \Rightarrow \frac{-mcdT}{dt} = \sigma AeT^4 \quad (2.4)$$

De onde obtemos:

$$-T^{-4}dT = \left(\frac{\sigma Ae}{mc}\right) dt \quad (2.5)$$

Integrando ambos os lados da Eq.(2.5), obtemos:

$$\int_{T_i}^{T_f} -T^{-4}dT = \int_0^t \left(\frac{\sigma Ae}{mc}\right) dt \quad (2.6)$$

Na Eq.(2.6) quando a temperatura muda de T_i para T_f , obtemos:

$$\frac{1}{3} \left(\frac{1}{(T_f)^3} - \frac{1}{(T_i)^3} \right) = \left(\frac{Ae\sigma}{mc} \right) t \quad (2.7)$$

A partir da Eq.(2.7) obtemos:

$$t = \left(\frac{1}{(T_f)^3} - \frac{1}{(T_i)^3} \right) \frac{mc}{3Ae\sigma} \quad (2.8)$$

Aplicando a Eq.(2.8) à pequena esfera metálica, com diâmetro $2,54 \times 10^{-2}$ m e densidade de $8,0 \times 10^3$ kg/m³ conseguiremos um tempo de resfriamento de 47 minutos.

Para determinarmos o tempo de resfriamento de um globo do tamanho da Terra feito inteiramente de ferro, vamos supor que a temperatura em todas as partes do globo seja a mesma em qualquer instante do período de resfriamento. A massa do globo de ferro equivalente à Terra será $M = 8,7 \times 10^{24}$ kg e a área de sua superfície será $A = 5,14 \times 10^{14}$ m². Substituindo na Eq.(2.8) obtemos como tempo de resfriamento algo em torno de 45.000 anos. A utilização da lei de Stefan nos conduz a um resultado muito próximo da conclusão de Newton para a idade da Terra. Porém, o tempo de resfriamento para uma tal esfera, com as propriedades descritas anteriormente, é muito maior do que os 50 mil anos da conclusão de Newton ou do que os 45 mil anos obtidos com a utilização da lei de Stefan, porque deve-se considerar o tempo para o calor ser conduzido do interior do sólido para a superfície enquanto o corpo esfria. Para solucionar tal questão deve-se aplicar a análise de Fourier que permite determinar a qualquer instante a taxa de variação de temperatura ponto a ponto em um sólido, assim como a temperatura efetiva em qualquer ponto desse sólido. Tal análise foi realizada mais tarde por Kelvin [3, 5].

2.3 Buffon testa o experimento de Newton

Buffon foi um dos mais produtivos cientistas do século 18. Interessado em determinar a idade da Terra ele solicitou que fossem construídas 10 esferas de ferro com diâmetros variando de 0,5 polegadas até 5 polegadas. Buffon então concluiu que se a Terra fosse composta de ferro fundido, ela levaria 42954 anos para resfriar abaixo do estado incandescente e 96670 anos para arrefecer à temperatura atual. Hoje sabemos que essa estimativa não é correta pois deixou de considerar diversos processos naturais. Porém, devemos lembrar que em meados do século 18 a alquimia ainda estava em voga e não havia nem uma teoria elementar de calor estabelecida. Buffon acreditava, e demonstrou, que a natureza era racional e poderia ser entendida através processos físicos. Ele também foi o primeiro a aplicar técnicas experimentais para o problema da idade da Terra. Um século se passou até Helmholtz e Kelvin, equipados com uma teoria física mais sofisticada e procedimentos experimentais, abordassem o problema novamente [5].

2.4 Helmholtz e a idade do Sol

Hermann Von Helmholtz foi o mais famoso filósofo natural alemão e cosmólogo de sua geração. Ele foi um dos primeiros a contribuir para o princípio geral da Conservação da Energia. Já em 1854 ele argumentou que a energia do Sol deve ser fornecida pela contração gravitacional, porque não se conhecia reação química que pudesse produzir tanta energia como a gerada pelo sol. Seus cálculos mostraram que se a fonte de energia do sol fosse um produto químico, como carvão, sua expectativa de vida seria de cerca de 5000 anos. Para ilustrar tal ideia, consideremos um pedaço de carvão mineral² e consideremos que seja possível misturar todo o oxigênio necessário para conseguir queima completa. Podemos então calcular quanto carvão é necessário para produzir a energia que o Sol emite por segundo, e quanto tempo uma quantidade de carvão tão grande quanto o Sol duraria. Para tanto, considere que:

- O carvão possui energia potencial de combustão de $3,0 \times 10^7$ J/kg.
- A energia emitida por toda superfície do sol é cerca de $3,6 \times 10^{26}$ J/s
- A massa total do sol $2,0 \times 10^{30}$ kg.

Com esses dados, a máxima expectativa de vida para o sol seria:

$$\frac{(3,0 \times 10^7) \times (2,0 \times 10^{30})}{3,6 \times 10^{26}} \approx 5.000 \text{ anos} \quad (2.9)$$

A resposta para carvão mineral, ou petróleo, ou mesmo hidrogênio puro, sempre resulta entre 5000 a 10000 anos. Um Sol movido a combustível normal não poderia durar mais do que a história humana escrita.

2.5 O modelo de Helmholtz para o Sol

Vejamos agora com detalhes o modelo do Sol de Helmholtz [15]

Considere uma protomassa esférica gasosa de raio R e massa $M(R)$ uniformemente distribuída numa região do espaço cujo volume é $(4/3)\pi^3 R^3$. Suponha

²O melhor combustível conhecido naquela época

também que uma casca esférica de massa dM é adicionada à massa $M(R)$. Seja r a distância radial entre a casca adicionada e o centro da distribuição esférica. A fim de anular a força de atração gravitacional que a protomassa exerce sobre a casca um agente externo deve fornecer uma força oposta dada por:

$$dF(r) = \frac{GM(R) dM}{r^2}, \quad (2.10)$$

onde $r > R > 0$. O trabalho mecânico realizado por esta força sobre a casca é

$$d^2W = dF(r) dr = \frac{GM(R) dM dr}{r^2}. \quad (2.11)$$

Note que $dr < 0$. Isto leva em conta o fato de que a força e o deslocamento são opostos. Se a casca é feita por contração de um raio de valor inicial κR , onde $\kappa \geq 1$, para um valor final R , o trabalho realizado pelo agente externo será

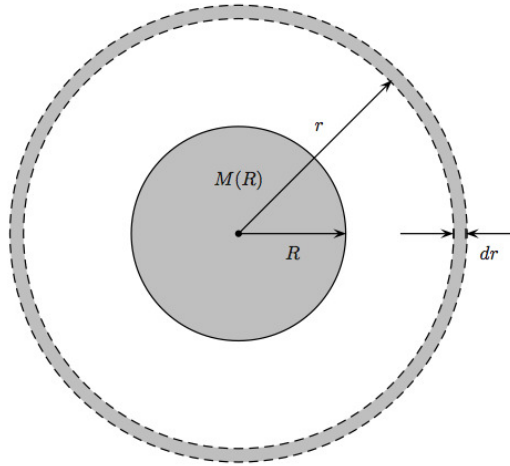


Figura 2.1: Modelo de Helmholtz para contração gravitacional do Sol.

$$\begin{aligned} dW(R) &= GM(R) dM \int_{\kappa R}^R \frac{dr}{r^2} \\ &= -\frac{GM(R) dM}{R} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Com o objetivo de construir uma esfera gasosa completa, devemos calcular o trabalho total

$$W = \int_0^{R_\odot} dW(R), \quad (2.13)$$

onde R_\odot no modelo de Helmholtz deve ser tomado como um valor estimado para o raio do sol. Assumindo que a relação

$$\frac{M(R)}{R^3} = \frac{M_\odot}{R_\odot^3}, \quad (2.14)$$

onde M_\odot no modelo de Helmholtz deve ser também tomado como uma estimativa da massa do sol, então podemos facilmente expressar $M(R)$ e dM como funções explícitas de R e escrever

$$dW = -3G \frac{M_\odot^2}{R_\odot^6} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right) R^4 dR. \quad (2.15)$$

Após a realização da integração obtemos

$$W = -\frac{3}{5} \frac{GM_\odot^2}{R_\odot} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right), \quad (2.16)$$

onde

$$M_\odot = \rho_\odot \frac{4\pi}{3} R_\odot^3, \quad (2.17)$$

Observe que o raio e a massa podem ser, em princípio, determinados com o uso da geometria e das leis de Kepler. Se a massa da casca foi trazida de muito longe, isto é, $\kappa \gg 1$, então

$$W = -\frac{3}{5} \frac{GM_\odot^2}{R_\odot}. \quad (2.18)$$

que foi o resultado obtido por Helmholtz. Usando os valores aproximados $R_\odot \approx 7 \times 10^8$ m, $M_\odot \approx 2 \times 10^{30}$ kg, obtemos

$$W \approx -2.3 \times 10^{41} \text{ J}. \quad (2.19)$$

Uma estimativa aproximada da idade do Sol no modelo de Helmholtz pode ser

obtida se dividirmos o valor absoluto de W pela taxa atual de energia emitida pelo sol, $P_{\odot} \approx 3.6 \times 10^{26} \text{ J/s}$. O resultado é aproximadamente 20 milhões de anos.

2.6 A energia associada ao campo gravitacional

A equação (2.16) pode ser também obtida de modo alternativo ao interpretar o trabalho realizado pela força externa como a energia armazenada no campo gravitacional. Começamos com a lei de Gauss para o campo gravitacional \mathbf{g}

$$\oint_{\mathcal{S}} \mathbf{g} \cdot d\mathbf{a} = -4\pi GM(\mathcal{R}), \quad (2.20)$$

onde \mathcal{S} é a fronteira da região e \mathcal{R} , o vetor normal unitário externo, $d\mathbf{a}$ é a medida de um elemento de área em \mathcal{S} , G é a constante gravitacional e $M(\mathcal{R})$ é a massa gravitacional cercada por \mathcal{S} . O sinal algébrico negativo se deve ao fato de $\mathbf{g} \cdot d\mathbf{a} < 0$ para todos os pontos na \mathcal{S} . Quando a distribuição de massa tem simetria esférica o fluxo do campo gravitacional é facilmente calculado por

$$\oint_{\mathcal{S}} \mathbf{g} \cdot d\mathbf{a} = -g(r)4\pi r^2, \quad (2.21)$$

onde r é a distância radial do ponto sobre \mathcal{S} até o centro da distribuição. Resulta de lei de Gauss que a intensidade do campo gravitacional é dada por

$$g(r) = \frac{GM(r)}{r^2}, \quad r > 0. \quad (2.22)$$

Para a massa gravitacional M uniformemente distribuída no interior da região esférica de raio R , é fácil mostrar que

$$M(r) = M \frac{r^3}{R^3}, \quad 0 < r \leq R. \quad (2.23)$$

segue-se que

$$\mathbf{g}(r) = \begin{cases} -\frac{GMr}{R^3}, & 0 \leq r \leq R, \\ -\frac{GM}{r^2}, & r \geq R. \end{cases} \quad (2.24)$$

Observe que o campo gravitacional é contínuo em $r = R$, portanto, a densidade de massa superficial da distribuição é zero, como podemos facilmente provar, fazendo uso novamente da lei de Gauss. A energia gravitacional é dada por

$$U_g = -\frac{1}{8\pi G} \int_{\mathcal{R}} \mathbf{g}^2 d^3x. \quad (2.25)$$

Observe que a energia do campo gravitacional é negativa. Usando o campo de energia gravitacional dado pela Eq. (2.24) e a simetria esférica podemos escrever

$$U_g = -\frac{1}{8\pi G} \frac{G^2 M^2}{R^6} \int_0^R r^2 4\pi r^2 dr - \frac{1}{8\pi G} G^2 M^2 \int_R^\infty \frac{1}{r^4} 4\pi r^2 dr. \quad (2.26)$$

Resolvendo as integrais obtemos

$$U_g = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}, \quad (2.27)$$

que interpretamos como a energia gravitacional associada com a esfera homogênea de massa M e raio R . Vamos aplicar este resultado para o modelo de contração gravitacional de Helmholtz. Suponhamos que inicialmente o raio do sol no modelo seja κ multiplicado por seu raio final. Assim a energia gravitacional inicial é

$$U_i = -\frac{3}{5} \frac{GM_\odot^2}{\kappa R_\odot}, \quad (2.28)$$

com $\kappa > 1$. A energia gravitacional final será

$$U_f = -\frac{3}{5} \frac{GM_\odot^2}{R_\odot}. \quad (2.29)$$

Portanto, a variação da energia gravitacional é dada por

$$\Delta U_g = U_f - U_i = -\frac{3}{5} \frac{GM_\odot^2}{R_\odot} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right). \quad (2.30)$$

Em particular, se $\kappa \gg 1$ teremos a Eq. (2.18). Segue-se então que podemos identificar a variação de energia gravitacional armazenada no campo ΔU_g com o trabalho W realizado pelo agente externo na formação da esfera homogênea. Além disso, na teoria clássica de campo, Eqs. (2.30) e (2.18) são mencionadas para representar energia própria ou energia de ligação de uma esfera homogênea. A energia de ligação é a energia que um agente externo de fornecer para levar esta esfera, casca após casca, para o infinito até que nada dessa esfera seja deixado para trás.

2.7 O teorema trabalho-energia e o modelo de Helmholtz

Outra maneira instrutiva de obtermos as Eqs. (2.18) or (2.30) é utilizar o teorema do trabalho-energia. A energia cinética da casca de massa dM é dada por

$$dK = \frac{1}{2} dM v_r^2(r), \quad (2.31)$$

onde $v_r(r)$ é a velocidade radial de uma casca a uma distância r do centro da protomassa esférica. A aceleração radial é dada por

$$a_r = \frac{dv_r}{dt} = \frac{dv_r}{dr} \frac{dr}{dt} = v_r \frac{dv_r}{dr}. \quad (2.32)$$

Nós podemos integrar formalmente a equação κR para uma distância radial arbitrária r e escrever

$$\frac{1}{2} v_r^2(r) - \frac{1}{2} v_r^2(\kappa R) = \int_{\kappa R}^r a_r(r') dr'. \quad (2.33)$$

É razoável supor $v(\kappa R) = 0$, logo

$$\frac{1}{2} v_r^2(r) = \int_{\kappa R}^r a_r(r') dr'. \quad (2.34)$$

Para determinar a aceleração radial $a_r(r)$, considere a Eq. (2.10). Considerando a relação dada pela Eq. (2.14) podemos reescrever a Eq. (2.10) da seguinte forma

$$dF(r) = -\frac{GM_{\odot}}{R_{\odot}^2} \frac{R^3}{R_{\odot}} \frac{dM}{r^2} = -g_{\odot} \frac{R^3}{R_{\odot}} \frac{dM}{r^2}. \quad (2.35)$$

Segue-se que a aceleração radial pode ser escrita como

$$a_r(r) = -g_{\odot} \frac{R^3}{R_{\odot}} \frac{1}{r^2}. \quad (2.36)$$

Podemos novamente integrar a Eq. (2.34) e obter a energia cinética por unidade de massa. O resultado é

$$\frac{1}{2} v_r^2(r) = \frac{dK}{dM} = g_{\odot} \frac{R^3}{R_{\odot} r} \left(1 - \frac{r}{\kappa R}\right). \quad (2.37)$$

Observe que a massa de uma casca arbitrária é conservada sendo dada por $dM = \rho(r)4\pi r^2 dr = \rho_{\odot}(R)4\pi R^2 dR$. Onde $r = R$,

$$\frac{1}{2} v_r^2(R) = g_{\odot} \frac{R^2}{R_{\odot}} \left(1 - \frac{1}{\kappa}\right). \quad (2.38)$$

Segue-se que

$$dK = \frac{1}{2} dM v_r(R) = g_{\odot} \frac{R^2}{R_{\odot}} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa}\right) \rho(R)4\pi R^2 dR. \quad (2.39)$$

Lembrando que

$$\rho(R) = \frac{M(R)}{(4/3)\pi R^3}, \quad (2.40)$$

fazemos uso da Eq. (2.14) e substituindo esta relação na Eq. (2.39) obtemos

$$dK = 3g_{\odot} \frac{R^4}{R_{\odot}^4} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa}\right) M_{\odot} dR. \quad (2.41)$$

A variação total da energia cinética é

$$\Delta K = 3g_{\odot} \frac{M_{\odot}}{R_{\odot}^4} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa}\right) \int_0^{R_{\odot}} R^4 dR = \frac{3}{5} g_{\odot} M_{\odot} R_{\odot} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa}\right). \quad (2.42)$$

Ou, se preferirmos

$$\Delta K = \frac{3}{5} \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}} \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right). \quad (2.43)$$

Pelo teorema do trabalho-energia, Eq. (2.43) não corresponderia ao trabalho realizado pela força gravitacional devido à protomassa em todas as cascas pelo agente externo introduzido na seção precedente. Este trabalho é menos o trabalho realizado pelo agente externo.

2.8 O balanço de energia e tempo de contração

Se considerarmos o Sol como um sistema termodinâmico em estado de (aproximadamente) equilíbrio devemos levar em conta a energia térmica interna que denominamos por E_{thermal} . Se por uma questão de simplicidade negligenciamos as perdas devido à radiação de corpo negro o conteúdo de energia solar que observamos será

$$E = E_{\text{thermal}} + W_{\text{b}}, \quad (2.44)$$

onde $W_{\text{b}} = -\frac{3}{5} \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}}$ é a energia de ligação no modelo de Helmholtz. O teorema virial da mecânica clássica [16] afirma que para um sistema de auto-interação no qual os elementos internos interagem através de uma lei de força que depende da n -ésima potência da distância relativa entre dois elementos arbitrários i e j , sendo $F_{ij} \sim r_{ij}^n$, as médias de tempo de sua energia cinética interna e potencial energético próprio estão relacionados através de

$$\langle K \rangle = \frac{n+1}{2} \langle U \rangle. \quad (2.45)$$

Se identificarmos $\langle K \rangle$ com a energia térmica interna e a energia potencial própria com a energia de ligação, e atribuirmos $n = -2$, podemos escrever

$$2E_{\text{thermal}} + W_{\text{b}} = 0. \quad (2.46)$$

Segue-se que a energia do Sol é

$$E = \frac{1}{2} W_b = -1.2 \times 10^{41} \text{ J.} \quad (2.47)$$

O sinal de menos significa que nossa estrela se encontra num estado limite. No entanto, se nesse modelo voltarmos no tempo, podemos supor que a nuvem de gás estava imóvel e desmontada. Portanto, a energia total da nuvem de gás no início do processo de contração foi zero e pela conservação da energia deve permanecer zero após a formação final da protomassa e do Sol. Alguma coisa está faltando. O que está faltando é a parte da energia gerada pela contração gravitacional que é irradiada de distância. O balanço de energia deve ser

$$E_{\text{thermal}} + W_b + Q_{\text{rad}} = 0 \quad (2.48)$$

O processo de contração gravitacional gerou $Q_{\text{rad}} = +1.2 \times 10^{41}$ Joules que foi emitida como radiação. Se dividirmos esta quantidade pela saída atual de energia do Sol obtemos uma duração, o tempo de contração que Kelvin-Helmholtz associaram com o modelo de Helmholtz

$$T_{\text{K-H}} = \frac{1.2 \times 10^{41} \text{ J}}{3.6 \times 10^{26} \text{ J/s}} \approx 1.1 \times 10^7 \text{ s,} \quad (2.49)$$

que é cerca de 10 milhões de anos. Astrofísicos interpretam o tempo de contração de Kelvin-Helmholtz não como a idade de uma estrela, mas como uma indicação de seu tempo de viagem de um estado completamente desmontado para um em que a estrela se encontra na sequência principal, alimentado por combustível nuclear. Em um modelo de sequência mais complexa, mas ainda pré-principal, *i.e.*, a fase da vida das estrelas onde os processos nucleares ainda estão desativados ou não são relevantes [17], uma fração da energia irradiada seria usado para transformar os átomos na nuvem (principalmente hidrogênio e hélio) em um plasma quente. Para mais detalhes sobre sequência pré-principal de uma estrela ver, por exemplo [17, 18].

2.9 Kelvin, a teoria meteórica e a idade do Sol.

Para Kelvin a luminosidade do Sol era produzida através da conversão da energia gravitacional em calor. Em 1862, publicou o primeiro de uma série de documentos importantes sobre a idade da Terra. Neste trabalho inicial, ele avaliou a história térmica do sol. Ele sustentava que o Sol se originou de uma coalizão de corpos menores que se aglutinaram pela gravidade mútua gerando calor. Ele argumentava que a fonte primária de energia disponível para o Sol era a energia gravitacional dos meteoros primordiais a partir dos quais teria se formado o Sol. Dada a falta de mecanismos conhecidos que podem compensar a perda de energia solar por radiação ao longo de sua história, Kelvin concluiu que o Sol devia estar em processo de resfriamento. A partir de estimativas da temperatura e outras propriedades térmicas do Sol com base na sua composição química conhecida, nas medições da taxa na qual o calor é irradiado a partir de sua superfície e nas estimativas da quantidade total de calor original do Sol produzido por coalizão de pequenos corpos, Kelvin calculou que o Sol não tinha iluminado a Terra por 100 milhões anos. Foi com grande autoridade e eloquência que Kelvin declarou em 1862 [1, 3, 19]:

“O fato de que alguma versão da teoria meteórica é certamente a verdadeira e completa explicação do calor solar dificilmente pode ser questionado, quando as seguintes razões são consideradas: (1) Nenhuma outra explicação natural, exceto a da ação química, pode ser concebida. (2) A teoria química é deveras insuficiente, pois a ação química mais energéticas que conhecemos, tendo lugar entre substâncias que correspondessem a toda a massa solar, gerariam calor apenas durante 3000 anos. (3) Não há dificuldade em contabilizar 20.000.000 anos de calor pela teoria meteórica.”

Kelvin primeiro estabeleceu a idade do Sol, e posteriormente a idade da Terra. Assim como Helmholtz, rejeitou rapidamente a teoria da energia química, porque através dela os valores obtidos para a idade do Sol seriam menores que 10000 anos. Em seguida, ele investigou a física de sua hipótese meteórica. Nesse caso, Kelvin assumiu que a energia do Sol é fornecida a uma taxa constante

pelo bombardeio de meteoros. Para testar essa hipótese, ele calculou a energia cinética transferida no impacto de 1 libra³ de matéria caindo sobre o Sol com a velocidade de escape do Sol. Para um cálculo rápido e utilizando unidades do Sistema Internacional podemos observar que 1 kg de massa com velocidade de 624 km/s = $6,24 \times 10^5$ m/s, possui energia cinética de: [5]

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times (6,24 \times 10^5)^2 = 1,94 \times 10^{11} \text{ J}$$

A seguir, um simples cálculo mostrou que cerca de 1/5000 da massa do Sol num período de 6000 anos seria suficiente para dar conta da energia fornecida por ele. Pode-se demonstrar tal afirmação considerando que a taxa de emissão de energia do Sol é $3,6 \times 10^{26}$ J/s. Assim, em 6000 anos o Sol libera $6000 \times 3,15 \times 10^7 \times 3,6 \times 10^{26} \text{ J} = 6,38 \times 10^{37} \text{ J}$. Dividindo esse valor pela energia cinética de 1 kg de massa que caiu sobre o Sol como calculado anteriormente, obtemos:

$$\frac{6,38 \times 10^{37}}{1,94 \times 10^{11}} = 3,3 \times 10^{26} \text{ kg}$$

Essa massa corresponde a

$$\frac{3,3 \times 10^{26}}{2 \times 10^{30}} = 1/6000 \text{ da massa do Sol}$$

Porém, por volta de 1861 Kelvin rejeitou a teoria meteórica porque:

1. Não foi encontrada nenhuma evidência espectroscópica de objetos mais rápido do que cerca de 1/20 da velocidade de escape do Sol em suas proximidades.
2. Não se detectou alteração no período de translação da Terra devido aos acréscimos de massa do Sol.

Através de um cálculo sofisticado, Kelvin mostrou o efeito no período de translação da Terra devido dos acréscimos de massa do Sol. Ele descobriu que para cada 2000 anos deveria ocorrer uma variação de aproximadamente 1/8 de ano.

³1 libra = 0,45359237 kg

Finalmente, Kelvin argumentou que tal discrepância teria sido encontrada e portanto, rejeitou a teoria meteórica e aceitou a teoria de Helmholtz da contração gravitacional como a única alternativa viável para explicar a energia emitida pelo Sol [3, 5].

2.10 Kelvin, o modelo de Helmholtz e a idade do Sol

Nesta seção seguimos a referência [20].

Como detalhado na seção anterior, antes de voltar sua atenção para o problema da idade da Terra, Kelvin tinha interesse pela origem do calor irradiado pelo Sol. Kelvin que já havia aplicado a teoria da condução do calor de Fourier [21] a um sol modelado por uma esfera sólida em processo de resfriamento e concluíra que deste modo não haveria energia suficiente para manter a sua temperatura superficial por muito tempo. Convencido também de que a energia solar não poderia ser de origem química, Kelvin adota a proposta de John J. Waterson (1811-1883) e James P. Joule (1818-1889) que consistia em atribuir a origem do calor do Sol ao impacto de meteoros. Kelvin refinou a idéia em mais de uma ocasião. No entanto, a constatação de que o aumento da massa do Sol em razão dos impactos levaria em um intervalo de tempo de 6 000 anos a uma variação não observada do período orbital da Terra de um mês e meio, aproximadamente, levou-o a abandonar a hipótese meteórica. Em 1862, em um artigo publicado em uma revista popular, Kelvin expõe a sua última e mais elaborada versão sobre a origem do calor solar [19]. Nela, a teoria meteórica inicial de Kelvin é substituída pela teoria de Helmholtz da contração gravitacional [19]

“A forma de teoria meteórica que agora parece ser a mais provável e que foi discutida pela primeira vez com base nos princípios termodinâmicos verdadeiros por Helmholtz consiste em supor que o Sol e o seu calor originaram-se de uma coalizão de corpos menores caindo conjuntamente em razão da sua gravitação mútua e gerando, como deve ser em concordância com a grande lei demonstrada por Joule um equivalente exato em calor ao movimento perdido na colisão”.

Em 1856, o renomado físico alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) propusera um modelo simples para a formação do Sol cujos ingredientes principais era a contração gravitacional de uma nuvem de matéria gasosa em razão da atração gravitacional de uma protomassa inicial esférica e uniforme [22]. Como a protomassa era inicialmente formada não estava em questão, mas podemos pensar em algum tipo de instabilidade de uma nuvem muito rarefeita de matéria. O resultado obtido por Helmholtz em valor absoluto é 20 milhões de anos como vimos anteriormente.

Adotando a idéia de Helmholtz, mas levando em conta alguns aspectos que não estavam presentes no modelo original do físico alemão, como por exemplo, uma densidade de massa esfericamente simétrica, mas dependente da distância radial ao centro do Sol, Kelvin conclui que [19]: “O Sol não iluminou a Terra por 100 000 000 de anos, e quase certamente não o fez por 500 000 000 de anos”. A aceitação do modelo de contração de Helmholtz por parte de Kelvin ocorreu gradualmente. No início Kelvin pensava que sua teoria meteórica e a teoria gravitacional de Helmholtz seriam complementares, mas acabou aceitando a teoria de Helmholtz. Kelvin calculou a idade do Sol utilizando dois métodos para o decréscimo de sua densidade: um linear e um exponencial. Com método linear, determinou que a idade do Sol era 20 milhões de anos. Já com o método exponencial determinou 60 milhões de anos para a idade de nossa estrela. O modelo de Kelvin previa que a taxa de encolhimento gravitacional era muito próxima daquela calculada por Helmholtz [3, 5]. Kelvin então volta-se para a determinação da idade da Terra.

2.11 Kelvin estima a idade da Terra

Kelvin era conhecedor do trabalho de Joseph Fourier. Este realizou alguns estudos sobre condução de calor encontrando uma maneira de determinar a qualquer instante a taxa de variação de temperatura ponto a ponto em um sólido, assim como a temperatura efetiva em qualquer ponto desse sólido. Com base nesse trabalho, Kelvin estava convencido de que a Terra havia experimentado um contínuo período de resfriamento a partir de um estado inicialmente quente e úmido até a

condição atual. Na visão de Kelvin, uma pista para determinar a idade da Terra estava na observação de que quanto mais funda é determinada escavação mais quente a Terra fica. Desse forma, Kelvin acredita que o calor está fluindo de dentro para fora do planeta. Ocorre uma fuga constante de energia que é irre recuperável. A tendência natural seria um esgotamento de nossos sistemas naturais de energia, raciocínio que levou Kelvin à segunda lei da termodinâmica em 1851. Essa lei constituiu uma das bases do tratamento científico do calor e do trabalho. Em essência, as leis da termodinâmica afirmavam: A energia não se perde (primeira lei), mas uma determinada porção tampouco está disponível para se converter em trabalho (segunda lei).

Em seus cálculos, Kelvin parte da suposição de que, no início, a Terra era parte do sol e estava à mesma temperatura que este e vem se resfriando de forma contínua e uniforme desde então. Num primeiro momento ele usou seu cálculos para estimar por quanto tempo a Terra e o sistema solar poderiam permanecer no estado atual. Então, em um artigo publicado em 1842, Kelvin considerou a possibilidade de realizar o cálculo do intervalo de tempo para que a Terra chegasse ao estado atual a partir de uma temperatura igual a do sol. Parecia possível calcular a idade da Terra com algum grau de exatidão científica. Em 1846 Kelvin comunicou seu cálculo da idade da Terra baseado em princípios científicos. O tempo requerido para a Terra atingir a temperatura presente foi por volta de 100 milhões de anos. Considerando suas aproximações, admitiu que tal valor deveria estar entre 20 milhões e 400 milhões de anos. Em outro artigo sobre resfriamento secular da Terra publicado em 1862, Kelvin faz as seguintes hipóteses:

- (a) A maior parte do calor da Terra foi originalmente produzida por energia gravitacional.
- (b) A Terra esfriou a partir de uma temperatura próxima de $3700\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a temperatura atual de cerca de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ muito rapidamente, provavelmente um valor entre 40 000 e 50 000 anos.
- (c) A temperatura média na superfície da Terra não foi alterada significativamente desde então.

- (d) O interior da Terra é sólido e portanto somente o processo de condução de calor é relevante.
- (e) Em todas as partes da Terra constatou-se que com aumento da profundidade na superfície ocorria um aumento de temperatura. Esse fato implica numa contínua perda de calor por condução.
- (f) Uma vez que a camada superior da Terra não se torna mais quente de ano para ano, deve haver uma perda secular de calor de toda a Terra.

Para Kelvin, calcular a idade da Terra era determinar a partir das leis físicas, as leis da termodinâmica e da condução do calor de Fourier [21], qual a *duração geológica terrestre definida como a duração a partir da formação de uma crosta rígida*. No modelo de Kelvin, a fonte primária do calor produzido pela Terra se deve à energia gravitacional, ou por impacto de meteoros sobre um núcleo frio ou por colisão entre duas massas aproximadamente iguais. O mecanismo específico não é relevante para a determinação da idade geológica da Terra. O importante é que o resultado final seja uma esfera de matéria em estado de fusão. Porém, no modelo de Kelvin, o ponto de partida é uma esfera de rocha recém solidificada com temperatura uniforme, envolta por uma crosta fina de espessura muito menor do que o raio da Terra. Como então a Terra teria passado do estado primordial de matéria derretida para o de uma esfera sólida com temperatura inicial T_0 uniforme? Kelvin propõe três mecanismos distintos para que a Terra possa atingir este estágio [2,23]. No primeiro, a rocha expande-se após solidificar-se formando uma crosta envolvendo o interior da Terra ainda em estado de fusão. No entanto, um interior líquido era incompatível com as evidências físicas e astronômicas da rigidez da Terra. No segundo, levando em conta que a rocha sólida é mais densa do que a rocha derretida, pedaços de rocha próximos à superfície ao solidificarem-se mergulham em direção ao centro da Terra criando um núcleo sólido com uma estrutura intersticial preenchida com matéria derretida, mas capaz de suportar a crosta. O terceiro é o seu preferido: a matéria rochosa em estado de fusão ao esfriar-se próximo à superfície afunda em direção ao centro criando correntes de

convecção que terminam por termalizar todo o globo até que este atinge uma temperatura uniforme T_0 e solidificação começa. A Terra solidifica-se do centro para a superfície e na época em que a crosta se forma, a Terra já é uma esfera sólida com temperatura uniforme em todos os pontos do seu interior. Mas esta Terra sólida perde calor, pois em todos os sítios em que foi possível fazer medições, por exemplo nas minas, constatou-se um aumento da temperatura à medida em que a profundidade a partir da superfície aumentava, enquanto que a temperatura média na superfície terrestre não se altera significativamente. No interior da Terra sólida, agora o único mecanismo de propagação para o calor é o da condução. Uma vez que a camada superior da Terra não se torna mais quente de ano para ano, deve haver uma perda secular de calor por parte da Terra. Os parâmetros físicos que Kelvin necessitava eram: (a) o gradiente de temperatura na superfície da Terra; (b) o calor específico e, (c) o coeficiente de condução térmica da crosta terrestre. Como o processo de resfriamento por condução ocorre nas principalmente camadas superficiais, isto é, na crosta terrestre, vale a aproximação unidimensional.

Kelvin dominava com maestria a teoria do calor de Fourier⁴ e a aplicou ao problema. Para refazer o cálculo de Kelvin (em notação atual) comecemos por escrever a equação unidimensional que controla a evolução do campo de temperatura⁵:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad (2.50)$$

onde, no caso, x é coordenada associada com a profundidade da Terra, Figura 2.3, e D é o coeficiente de difusão térmica do meio que se supõe ser uniforme. A solução da Eq.(2.50) pelo método da transformada de Fourier é dada por [24]:

$$T(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{D\pi t}} \int_{-\infty}^{+\infty} dy T(y, 0) e^{-(x-y)^2/(4Dt)}, \quad (2.51)$$

⁴A frase de seu amigo pessoal e colaborador P. G. Tait (1831-1901) nos diz tudo: *Fourier fez Kelvin!* [7].

⁵Para detalhes da dedução da referida equação, ver apêndice A

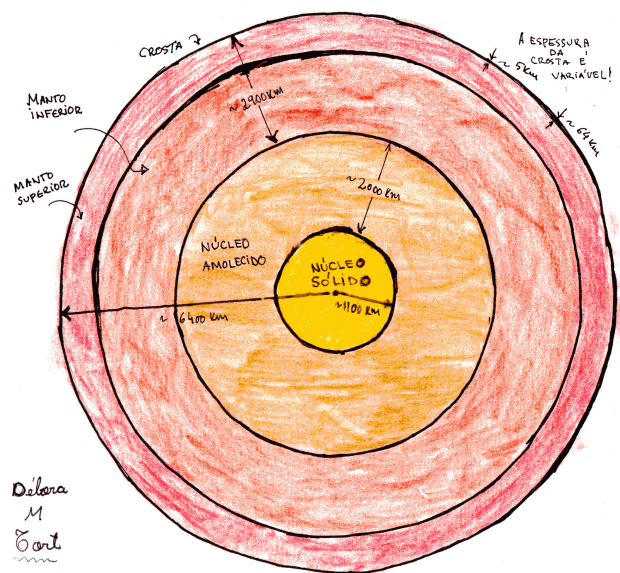


Figura 2.2: A estrutura interna da Terra. (Trabalho escolar de Débora M. Tort, 10 anos) .

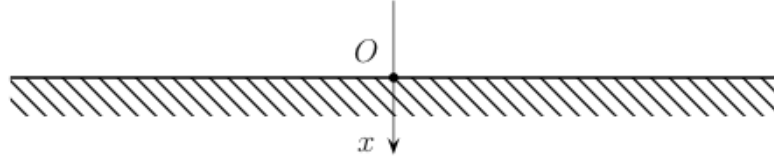


Figura 2.3: O problema de Kelvin.

onde y é uma variável muda de integração e $T(x, 0)$ é a distribuição inicial do campo de temperaturas. O problema de Kelvin é definido pela Eq. (2.51) e as condições de contorno:

$$T(x, t) = \begin{cases} 0, & x = 0; \quad \forall t, \\ T_0, & x \rightarrow \infty; \quad \forall t. \end{cases} \quad (2.52)$$

conjuntamente com a distribuição inicial de temperatura:

$$T(x, 0) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ T_0, & x > 0. \end{cases} \quad (2.53)$$

Em princípio podemos inserir a Eq. (2.53) na Eq. (2.51) e escrever:

$$T(x, t) = \frac{T_0}{2\sqrt{D\pi t}} \int_0^{+\infty} dy e^{-(x-y)^2/(4Dt)}. \quad (2.54)$$

Mas esta solução não satisfaz a condição de contorno $T(0, t) = 0$, embora satisfaça a condição $T(x, t) = T_0$ quando $x \rightarrow \infty$. Para verificar isto fazemos a transformação de variáveis:

$$y - x = 2\sqrt{Dt} z, \quad dy = 2\sqrt{Dt} dz. \quad (2.55)$$

Substituindo em (2.54) temos:

$$T(x, t) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} dz e^{-z^2}. \quad (2.56)$$

Fazendo $x = 0$

$$T(0, t) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} dz e^{-z^2}. \quad (2.57)$$

Como esta a integral vale $\sqrt{\pi}/2$, obtemos

$$T(0, t) = \frac{T_0}{2} \neq 0. \quad (2.58)$$

Por outro lado, se fizermos $x \rightarrow \infty$, temos:

$$T(\infty, t) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dz e^{-z^2}. \quad (2.59)$$

a integral vale $\sqrt{\pi}$, e neste caso obtemos a condição de contorno correta no limite $x \rightarrow \infty$. É necessário construir uma solução que seja solução da equação unidimensional do calor e satisfaça as condições impostas por Kelvin em seu modelo. Com esta finalidade em mente, observemos que para $x > 0$, a Eq. (2.56) — ou a Eq.(2.54) — satisfaz a equação unidimensional do calor. De fato, escrevendo por conveniência $T(x, t) = T^+(x, t)$ e fazendo uso da fórmula de Leibniz (veja o Apêndice B) obtemos:

$$\frac{\partial T^+(x, t)}{\partial t} = -\frac{T_0 x}{4\sqrt{\pi Dt}} \frac{e^{-x^2/(4Dt)}}{t}, \quad (2.60)$$

e

$$\frac{\partial T^+(x, t)}{\partial x} = +\frac{T_0 x}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/(4Dt)}. \quad (2.61)$$

Segue também derivando esta última equação em relação a x que:

$$\frac{\partial^2 T^+(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{1}{4} \frac{T_0}{\sqrt{\pi Dt}} \frac{x}{Dt} e^{-x^2/(4Dt)}. \quad (2.62)$$

Substituindo na equação unidimensional do calor verificamos a identidade dese-

jada. Considere agora $x < 0$ e a distribuição de temperatura inicial auxiliar:

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_0, & x < 0; \\ 0, & x > 0. \end{cases} \quad (2.63)$$

é fácil verificar que:

$$T^-(x, t) = \frac{T_0}{2\sqrt{D\pi t}} \int_{-\infty}^0 dy e^{-(x-y)^2/(4Dt)}, \quad (2.64)$$

é a solução da equação unidimensional do calor no eixo negativo. Para provar que $T^-(x, t)$ é a solução apropriada para $x < 0$ podemos proceder como antes. Definindo primeiramente a nova variável $y = -\tilde{y}$, e $dy = -d\tilde{y}$, podemos escrever:

$$T^-(x, t) = \frac{T_0}{2\sqrt{D\pi t}} \int_0^{\infty} d\tilde{y} e^{-(x+\tilde{y})^2/(4Dt)}. \quad (2.65)$$

Agora definimos:

$$x + \tilde{y} = 2\sqrt{Dt} z, \quad d\tilde{y} = 2\sqrt{Dt} dz. \quad (2.66)$$

Segue então que:

$$T^-(x, t) = \frac{T_0}{2\sqrt{D\pi t}} \int_x^{+\infty} dy e^{-z^2/(4Dt)}. \quad (2.67)$$

Usando a fórmula de Leibniz mais uma vez obtemos:

$$\frac{\partial T^-(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial T^+(x, t)}{\partial t} = \frac{T_0 x}{4\sqrt{\pi Dt}} \frac{e^{-x^2/(4Dt)}}{t}, \quad (2.68)$$

e.

$$\frac{\partial T^-(x, t)}{\partial x} = -\frac{\partial T^+(x, t)}{\partial x} = -\frac{T_0 x}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/(4Dt)}. \quad (2.69)$$

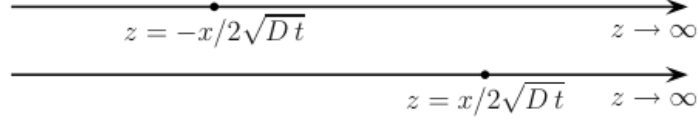


Figura 2.4: Domínios de integração para a Eq. (2.73) .

Segue também, derivando esta última equação em relação a x , que:

$$\frac{\partial^2 T^-(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 T^+(x, t)}{\partial x^2} = +\frac{1}{4} \frac{T_0}{\sqrt{\pi Dt}} \frac{x}{Dt} e^{-x^2/(4Dt)}. \quad (2.70)$$

Substituindo na equação unidimensional do calor obtemos novamente a identidade desejada. Portanto, $T^+(x, t)$ e $T^-(x, t)$ são soluções válidas da equação do calor, e mais ainda, a combinação linear:

$$T(x, t) = T^+(x, t) - T^-(x, t), \quad (2.71)$$

satisfaz a equação unidimensional do calor e é a solução do problema de Kelvin, pois:

$$T(0, t) = T^+(0, t) - T^-(0, t) = 0, \quad (2.72)$$

como pode ser facilmente verificado, e no limite $x \rightarrow \infty$, a solução $T^-(x, t)$ é nula e, como vimos antes, $T^+(x, t) = T_0$. Portanto, a solução do problema de Kelvin é dada explicitamente por:

$$T(x, t) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi}} \left(\int_{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{+\infty} dz e^{-z^2} - \int_{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{+\infty} dz e^{-z^2} \right), \quad (2.73)$$

ou ainda (veja a Figura 2.4):

$$T(x, t) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} dz e^{-z^2}. \quad (2.74)$$

Como o integrando é uma função par, obtemos finalmente:

$$\begin{aligned} T(x, t) &= \frac{2T_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} dz e^{-z^2} \\ &= T_0 \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \end{aligned} \quad (2.75)$$

onde o símbolo erf indica a função erro. A Eq. (2.75) é a solução do modelo de Kelvin para o resfriamento da Terra a partir de uma temperatura inicial T_0 em notação moderna. A partir desta solução podemos calcular o gradiente de temperatura na superfície da Terra e inserir os dados experimentais. De fato, o gradiente da Eq. (2.75) também pode ser calculado com a fórmula de Leibniz para a derivada de uma integral, veja o Apêndice anexo, e o resultado é:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \frac{T_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt}. \quad (2.76)$$

Em $x = 0$, o gradiente se lê:

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} \equiv G(0, t) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi Dt}}. \quad (2.77)$$

Identificando neste fórmula t com a idade da Terra, $t \rightarrow \Delta t_{\text{Terra}}$, temos:

$$\Delta t_{\text{Terra}} = \frac{T_0^2}{G^2(0, \Delta t_{\text{Terra}}) \pi D}. \quad (2.78)$$

Os dados que Kelvin utilizou eram: $D = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 400 \text{ pés}^2/\text{ano}$, $G(0, \Delta t_{\text{Terra}}) = 0,037 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m} = 37 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km} = \frac{1}{50} \text{ }^\circ\text{F}/\text{pé}$. Com estes dados, se $T_0 = 10\,000 \text{ }^\circ\text{F}$, então $\Delta t_{\text{Terra}} = 200$ milhões de anos, e se $T_0 = 7000 \text{ }^\circ\text{F}$, se-

gue que $\Delta t_{\text{Terra}} = 97$ milhões de anos. Para visualizar melhor a solução definimos o comprimento de penetração λ_p para $t = \Delta t_{\text{Terra}}$, como o valor de x tal que quando $x = \lambda_p$, o gradiente vale $1/e$ do valor do gradiente na superfície $x = 0$. Neste caso, vemos que:

$$\lambda_p = 2\sqrt{D \Delta t_{\text{Terra}}}. \quad (2.79)$$

Na Figura 2.5 mostra-se os gráficos das razões $T(x, \Delta t_{\text{Terra}})/T_0$, e $G(x, \Delta t_{\text{Terra}})/G(0, \Delta t_{\text{Terra}})$. Pode-se ver também que a aproximação unidimensional de Kelvin fica plenamente justificada.

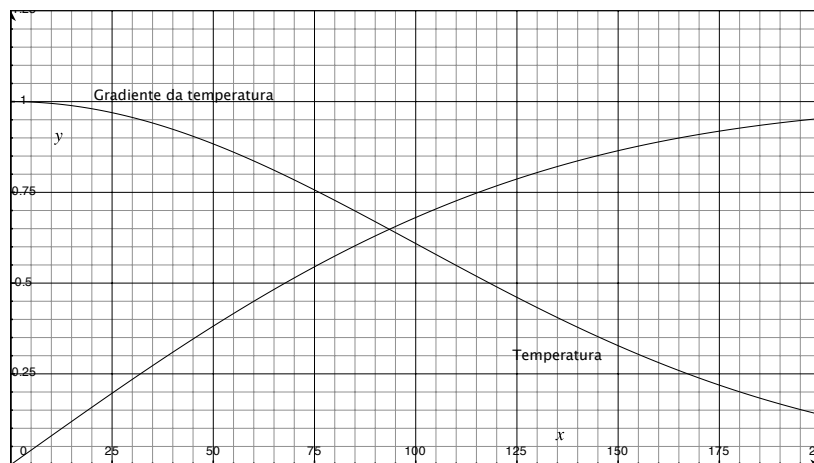


Figura 2.5: A Figura mostra os gráficos das funções e^{-x^2/λ_p^2} e $\text{erf}(x/\lambda_p)$, para $\Delta t_{\text{Terra}} = 97$ milhões de anos e $D = 1,2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Nesse caso $\lambda_p \approx 142 \text{ km}$. As curvas representam o gradiente de temperatura e a temperatura adimensionais como funções da profundidade da Terra medida em km.

Este cálculo sustenta o forte ataque que Kelvin lança contra os uniformitaristas. Em 1868, em um encontro da Geological Society de Glasgow, Kelvin afirma:

“Uma grande reforma na especulação geológica parece agora ter-se tornado necessária.”

Um ano mais tarde, em 1869, Thomas H. Huxley (1825-1895), darwinista convicto e presidente da Geological Society de Londres responde ao ataque, mas

contra a matemática de Kelvin não tem condições de apresentar argumentos convincentes. Aos poucos, o resultado de Kelvin impõe-se entre os geólogos que só manifestam-se contrariados quando revisões posteriores do resultado reduziram mais ainda a idade da Terra.

2.12 A crítica de John Perry

A autoridade científica de Kelvin era enorme e o desconhecimento de métodos matemáticos avançados por parte dos geólogos e evolucionistas também. Consequentemente, estes últimos ficaram sem argumentos quantitativos para fazer frente à abordagem de Kelvin, embora pudessem apresentar argumentos qualitativos em contrário. Mas, em 1895, três anos após sua publicação, os resultados de Kelvin receberam a primeira crítica quantitativa séria. Eles foram criticados por seu antigo assistente e aluno, John Perry (1850-1920) que chamou a atenção para o fato de que o único ponto fraco no cálculo Kelvin era seu modelo da Terra [25–28].

“Tenho dito repetidamente que inútil esperar que Lord Kelvin tenha cometido um erro de cálculo [...] Mas as maiores autoridades da geologia e da paleontologia estão satisfeitas com as evidências apresentadas por suas respectivas ciências que indicam uma idade muito maior do que os 100 milhões de anos de Lord Kelvin, e se elas estiverem corretas, deve haver algo errado com as condições de Lord Kelvin”.

Ou seja, Perry não questiona os métodos de Kelvin fundamentados na teoria do calor de Fourier, mas sim os parâmetros e o modelo da Terra empregados por este. Perry propõe então que examinemos os efeitos nos resultados finais de uma fina camada esférica envolvendo a Terra constituída por um material distinto da esfera semi-sólida do modelo de Kelvin. Refazendo o cálculo de Kelvin fazendo uso dos mesmos métodos, isto é, da teoria do calor de Fourier, Perry obtém a seguinte relação entre a idade da Terra calculada por ele, Δt_{Terra}^{Perry} , e a idade da Terra calculada por Kelvin:

$$\Delta t_{Terra}^{Perry} = \Delta t_{Terra}^{Kelvin} \left(\frac{D_{camada}}{D_{esfera}} \right)^2, \quad (2.80)$$

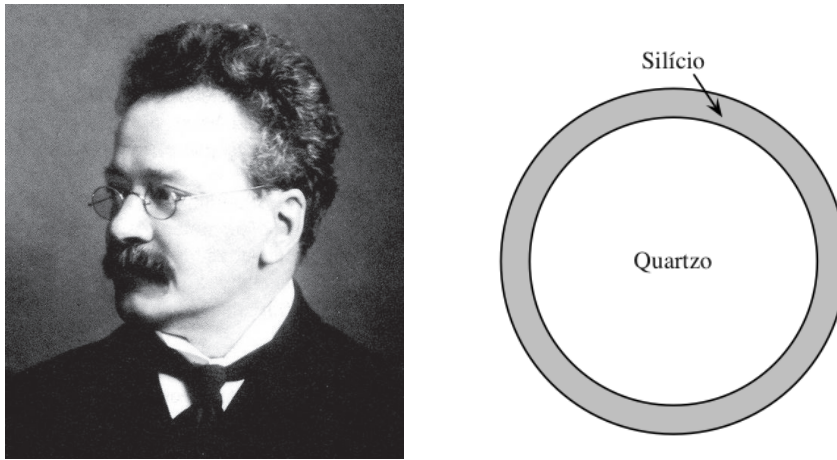


Figura 2.6: John Perry (1850-1920) e uma ilustração de seu argumento.

onde D_{camada} e D_{esfera} são, respectivamente, as constantes de difusão da camada externa e da esfera interior. Se, por exemplo, considerarmos a camada externa feita de óxidos de silício, $D_{\text{camada}} \approx 8,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, e a esfera interior feita de quartzo, $D_{\text{camada}} \approx 1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, teríamos;

$$\left(\frac{D_{\text{camada}}}{D_{\text{esfera}}} \right)^2 \approx 3. \quad (2.81)$$

Dependendo da estimativa da temperatura inicial, a idade da Terra estaria entre 300 e 600 milhões de anos. Eventualmente, a Terra poderia ser ainda mais antiga. O grande mérito do cálculo de Perry foi mostrar como o resultado final depende do modelo que se faz da Terra e poderíamos pensar que houvesse dado um novo alento aos partidários das grandes durações temporais. Infelizmente, a repercussão da crítica de Perry não foi a que esperaríamos. Para uma análise mais detalhada da contribuição de Perry ao debate veja [28].

2.13 A solução moderna para determinação da Idade da Terra

Esta seção foi baseada na leitura dos trabalhos das referências [29–34]

Modernamente o método utilizado para determinar a idade da Terra é a denominada datação radiométrica⁶ das rochas. Esse método se tornou possível devido ao fenômeno da radioatividade⁷ que foi descoberto⁸ pelo físico francês Henri Becquerel, em 1896. Supostamente, Becquerel guardou chapas cobertas com urânio na gaveta de uma secretária, ao lado de chapas fotográficas embrulhadas em papel escuro. Como Paris esteve encoberta por nuvens durante alguns dias, Becquerel não pode energizar as suas chapas fotográficas expondo-as ao Sol como pretendia. Ao revelar as chapas, ficou surpreso ao encontrar imagens fortes dos seus cristais de urânio. Ele então realizou diversos estudos e verificou que sais de urânio emitiam radiação semelhante à dos raios-X, impressionando chapas fotográficas. Tinha acabado de descobrir a radioatividade natural, oriunda da transformação nuclear do urânio.

A relevância da descoberta de Becquerel tornou-se aparente em 1903, quando Pierre Curie(1859-1906)⁹ anunciou que os sais de rádio libertavam calor continuamente. O aspecto mais extraordinário da descoberta foi que o rádio emitia calor sem arrefecer, mesmo à temperatura ambiente. A radiação do rádio revelou uma fonte de energia até então desconhecida. Em 1905, Ernest Rutherford(1871-1937), depois de definir a estrutura do átomo, fez a primeira sugestão clara para o uso de radioatividade como uma ferramenta para medir o tempo geológico diretamente. Pouco tempo depois, em 1907, B.B. Boltwood (1870-1927)¹⁰ professor de radioquímica da universidade de Yale, publicou uma lista de idades geológicas

⁶Datação radiométrica é a medida da quantidade de tempo passado por meio de análises de minerais e rochas.

⁷Radioatividade é o processo de desintegração espontânea de alguns tipos de átomos que ocorrem na natureza. Verifica-se em laboratório que a taxa média da desintegração radioativa espontânea não é afetada nem por aquecimento, resfriamento ou mesmo trocas referentes a pressão e estado químico.

⁸É muito comum a ideia que essa descoberta foi acidental. A história não é bem assim. Difícilmente se poderia afirmar que Becquerel descobriu a radioatividade; e aquilo que ele de fato descobriu não foi fruto do acaso. Para detalhes ver [10]

⁹Recebeu o Nobel de Física de 1903, juntamente com a sua mulher Marie Curie, outra famosa física em reconhecimento pelos extraordinários serviços que ambos prestaram através das suas pesquisas conjuntas sobre os fenômenos da radiação.

¹⁰Químico e físico norte-americano. Foi membro da Faculdade de Yale durante três anos, até abrir uma firma de consultadoria formada por engenheiros de minas e químicos. Tendo sempre demonstrado interesse pela radioatividade, desenvolveu, entre outros, um método de determinação da idade das rochas através da medição da taxa de chumbo e urânio.

com base na radioatividade. Os próximos 40 anos foi um período de desenvolvimento da investigação sobre a natureza e o comportamento dos átomos, levando ao desenvolvimento da fissão nuclear e fusão como fonte de energia. Um subproduto desta pesquisa atômica tem sido o desenvolvimento e aperfeiçoamento contínuo dos vários métodos e técnicas utilizadas para medir a idade dos materiais da Terra. Datações precisas são realizadas desde 1950¹¹.

A idade da Terra foi calculada pelo método absoluto e indica que o nosso planeta tem 4,56 bilhões de anos, portanto bem mais velho do que os estudiosos antigos imaginavam. Porém o registro mais antigo do planeta, determinado em cristais contidos em rocha, tem 4,4 bilhões (Austrália). A Terra está em constante mudança. Sua crosta está continuamente sendo criada, modificada e destruída. Como resultado, rochas que registram a história embrionária do planeta não foram encontradas e provavelmente não existem mais. Portanto, a idade da Terra não pode ser obtida diretamente de material terrestre. Por esse motivo, para determinar a idade da Terra, os cientistas presumem que todos os corpos do Sistema Solar se formaram na mesma época, inclusive os meteoritos (provenientes do cinturão de asteróides). Sendo assim, como os meteoritos são corpos extraterrestres que caem na superfície da Terra, eles podem ser datados e sua idade é a mesma da formação do planeta, ou seja, 4,56 bilhões de anos. Esta idade foi determinada, pela primeira vez, por Claire Patterson em 1956, usando os isótopos de chumbo (Pb).

As rochas mais antigas encontradas até agora na Terra datam de cerca de 3,8 a 3,9 bilhões de anos¹². Algumas dessas rochas são sedimentares e incluem minerais de 4,1 a 4,2 bilhões de anos. Embora estes valores não computem a idade para a Terra, eles estabelecem um limite inferior pois a Terra deve ser pelo menos tão antiga quanto qualquer formação sobre ela.

A datação radiométrica continua a ser a forma predominante que os cientistas usam para estabelecer períodos de tempo. Diversas técnicas de datação radioativa foram testadas e ajustadas durante os últimos 50 anos. Cerca de quarenta diferentes técnicas de datação são utilizados até hoje numa grande variedade de materiais,

¹¹Para detalhes, veja Apêndice C

¹²Obtido por diferentes métodos de datação

e os resultados obtidos para uma mesma amostra usando estas técnicas são muito próximos. Possíveis problemas de contaminação das amostras existem, mas a investigação cuidadosa tem levado a procedimentos de preparação que minimizam tal possibilidade. Centenas de milhares de medições são feitas diariamente com excelente precisão. Mesmo assim, a pesquisa continua a refinar e melhorar os métodos da datação radiométrica.

Capítulo 3

Atividade para o Ensino Médio

3.1 O problema da idade da Terra: uma proposta para o novo Ensino Médio

A educação no Brasil vem passando por diversas transformações nas últimas décadas. Embora as mudanças práticas sejam lentas, existem várias propostas que visam repensar os objetivos da educação e do ensino. Tais discussões começaram a partir do surgimento da Lei de Diretrizes e Bases para o Ensino [36]. Posteriormente foram publicados os PCNs [37] e os PCNs+ [38]. Dirigidos aos professores, os PCNs+ buscaram aprofundar, através de exemplos e estratégias de trabalho, a proposta inicial que foi apresentada nos Parâmetros Curriculares para o Ensino Médio (PCN). Foi o resultado de um trabalho longo, envolvendo professores das diferentes disciplinas da área de Ciências e Matemática, buscando investigar e explicitar os vínculos e semelhanças entre os processos de ensino e aprendizagem a serem desenvolvidos em todas as disciplinas da área intitulada CIÊNCIA DA NATUREZA E MATEMÁTICA (Física, Química, Biologia e Matemática).

Em 1996, a LDB já apontava para os novos rumos que a educação deveria trilhar. A mudança mais expressiva trata do novo caráter do Ensino Médio. Na realidade até o surgimento da LDB, o Ensino Médio possuía uma natureza estritamente propedêutica (preparação do jovem para o Ensino Superior) ou era voltado para formação profissionalizante.

No caso do ensino propedêutico, o Ensino Médio se caracterizava por uma divisão disciplinar do aprendizado cujo objetivo educacional aparece como uma listas de tópicos que a escola deveria tratar. Assim o domínio de cada disciplina era requisito necessário e suficiente para o prosseguimento dos estudos. Só na etapa seguinte (ensino superior) os conhecimentos disciplinares adquiririam, de fato, amplitude cultural ou sentido prático. Esse caráter do Ensino Médio ainda persiste hoje. Muitas escolas tentam se adaptar aos novos tempos, mas as mudanças são lentas. Existe uma enorme resistência por parte dos donos de escola. Muitos se agarram à receitas que funcionavam no passado e se lamentam que elas não funcionam mais. Acambam concordando com algumas mudanças desde que não comprometam o andamento dos conteúdos ministrados. Em muitos casos deixam por conta do professor realizar as mudanças sem nenhum tipo de investimento ou apoio.

No caso do ensino profissionalizante, a característica principal era, e ainda em muitos casos é, a preparação do jovem para fazeres práticos voltados para atividades no mercado de trabalho nas mais diversas áreas como atividades industriais, produtivas ou de serviços. Prioriza-se uma especialização de nível técnico em detrimento de uma formação cultural mais ampla.

Dessa forma, o Ensino Médio não possuía uma finalidade para aqueles que não tivessem a intenção, ou condições, de ingressar nas instituições de Ensino Superior. Tendo como objetivo último o sucesso no vestibular, o Ensino Médio de então atendia as expectativas de uma pequena parcela da população. O sucesso das escolas de Ensino Médio foi, e ainda é em menor escala, medido pela capacidade de aprovar no vestibular. Também não existia uma finalidade no Ensino Médio para quem não tivesse interesse pelos cursos técnicos oferecidos cujas opções eram limitadas. Muitas escolas ofereciam as duas versões num curso único. O aluno terminava o ensino médio para prestar exame vestibular e simultaneamente fazia um curso técnico.

Hoje o novo caráter do Ensino Médio visa a formação de jovens independentemente do caminho que ele irá seguir após o término de sua formação. Pode-se

mesmo afirmar que esse novo Ensino Médio deve ser capaz de ajudar esse jovem nas escolhas que ele fará. Pretende formar o cidadão e não só informá-lo. Nesse sentido, o novo Ensino Médio deve completar a educação básica. Segundo os PCN+, ele deve preparar para a vida, qualificar para a cidadania e capacitar para o aprendizado permanente, em eventual prosseguimento dos estudos ou diretamente no mundo do trabalho. É o período em que os jovens devem adquirir instrumentos para suas vidas, para saber raciocinar, compreender causas e razões do mundo que o cerca, para exercer seus direitos, para atuar, para transformar, enfim, para viver. Desse novo ponto de vista, o ensino de ciências, e da física em particular, deve passar por transformações que o façam atender a esse novo objetivo. Porém, para completar a formação geral do estudante nessa fase é necessária uma ação articulada no interior de cada área e no conjunto das áreas. Isso significa que não é mais possível o trabalho solitário no interior de cada disciplina. Dessa forma, para criar condições que possam propiciar uma ação mais integrada foi elaborada uma organização do conhecimento por grandes áreas. Essa organização **não** pretende descaracterizar cada disciplina. Trata-se de estabelecer objetivos e estratégias de ação mais convergentes para um conjunto de disciplinas que tenham características comuns. Definem-se então, três áreas de conhecimento que podem permitir maior articulação das competências e conteúdos das diferentes disciplinas. São elas:

- **Linguagens e Códigos** (Português, Língua estrangeira, Artes, Educação Física, Informática e demais formas de expressão).
- **Ciências da Natureza e Matemática** (Biologia, Física, Química e Matemática).
- **Ciências Humanas** (História, Geografia e demais áreas das Ciências Humanas).

É importante notar que nessa busca por um conhecimento mais integrado, mais articulado, cada área não pode ser considerada como domínio de conhecimento isolado das demais áreas. A Física, por exemplo, pertence à área de Ciências da Natureza, mas seu ensino deve também contemplar as dimensões de linguagem e

conteúdo humano-social. Essa é uma das faces da interdisciplinaridade desejada. Desse ponto de vista, os produtos que nasceram da presente pesquisa contemplam essa face da interdisciplinaridade. Ao investigarmos diversas teorias sobre a idade da Terra, encontramos a oportunidade para perceber o caráter humano e social no processo de desenvolvimento da ciência. Estabelecemos relações da física com outras áreas próximas como a biologia e a geologia mostrando que nenhum conhecimento se desenvolve isoladamente. Cria-se a oportunidade de, a um só tempo, compreender e investigar fenômenos físicos, biológicos e geológicos e suas inter-relações. Resalta-se o quanto existe de humano na construção do conhecimento científico. Particularmente, a controvérsia entre físicos, geólogos e biólogos sobre a idade da Terra no século 19, mostra que a emoção e interesses nem sempre claros podem dirigir o curso da ciência tanto quanto a lógica e a experimentação. Nada poderia ser mais humano.

Tendo em foco as habilidades que o novo Ensino Médio pretende desenvolver no estudante, o produto dessa pesquisa certamente contempla:

- (a) Desenvolver a capacidade de investigação física: observar, classificar, organizar, sistematizar. Fazer hipóteses, testar.
- (b) Conhecer e utilizar conceitos físicos. Reconhecer a relação entre diferentes grandezas ou relações de causa e efeito, como meios para estabelecer previsões. Compreender e utilizar leis e teorias Físicas.
- (c) Identificar regularidades, reconhecer a existência de transformações e conservações, assim como de invariantes. Saber utilizar princípios básicos de conservação.
- (d) Reconhecer, utilizar, interpretar e propor modelos explicativos ou representativos para fenômenos ou sistemas naturais.
- (e) Diante de situações físicas, identificar parâmetros relevantes, quantificar grandezas e relacioná-las. Investigar situações problemas: identificar a situação física, utilizar modelos, generalizar de uma a outra situação, prever, avaliar, analisar previsões.

- (f) Articular o conhecimento físico com conhecimentos de outras áreas do saber científico.
- (g) Compreender enunciados que envolvam códigos, símbolos e a nomenclatura de grandezas físicas.
- (h) Expressar-se corretamente utilizando a linguagem física adequada e elementos de sua representação simbólica. Apresentar de forma clara e objetiva o conhecimento apreendido, através de tal linguagem.
- (i) Compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época.
- (j) Reconhecer o papel da Física no sistema produtivo, compreendendo a evolução dos meios tecnológicos e sua relação dinâmica com a evolução do conhecimento científico.

Tendo em conta que os tópicos citados são, dentre outras, recomendações dos PCNs, esperamos que o projeto resultante dessa pesquisa possa contribuir com a melhoria do ensino de física no ensino médio. Não é pretensão ter aqui um projeto definitivo, mas tentar mostrar como uma investigação científica de um tópico específico pode ser direcionada e aplicada no Novo Ensino Médio visando atender expectativas para a plena formação do cidadão.

3.2 Introdução à atividade

Esta proposta tem como objetivo apresentar uma sequência de ensino investigativa, para tratar a questão da determinação da idade da Terra. Tal proposta visa gerar na estrutura cognitiva do aluno de ensino médio a ocorrência de uma aprendizagem significativa de David Ausubel (1918-2008) [35] e estimular processos para o uso do argumento, de acordo com referencial de Toulmin (1922-2009) [39], por parte de quem aprende.

A antiguidade da Terra geralmente é apresentada como um postulado de 4,5 bilhões de anos. Dessa forma, perde-se a riquíssima história até chegarmos nesse número. Se ao trabalhar essa questão perdermos a referência de como se desenvolveram os conceitos e as ideias, incorremos numa séria distorção do como a ciência se desenvolve.

A discussão proposta leva o estudante a entrar em contato com uma das questões mais fundamentais dentro do campo de ciências e da mente humana. Tratar o estudo de tal questão através de uma perspectiva investigativa com o estímulo permanente aos argumentos, pode dar ao aprendiz, além de um significado rico dentro de sua própria ideia de mundo, uma noção mais verdadeira do como a ciência se desenvolve. Essa busca propicia o contato com diversas facetas do desenvolvimento das ciências.

Assim, a proposta aqui apresentada pretende ser uma alternativa para o estudo da idade da Terra e que poderá gerar para os alunos uma aprendizagem realmente significativa.

3.3 Referencial teórico

A proposta que será apresentada possui como um de seus referenciais a teoria de Ausubel e Novak [35, 40] sobre aprendizagem significativa. Segundo Moreira [41], tal teoria focaliza primordialmente a Aprendizagem Cognitiva, que resulta no armazenamento organizado das informações na mente do ser que aprende. O complexo organizado, que é o conjunto total de ideias de certo indivíduo e sua organização¹, é conhecido como estrutura cognitiva.

Para Ausubel [35] o principal no processo de ensino é que a aprendizagem seja significativa. Isto é, aquilo que se pretende aprender/ensinar precisa fazer algum sentido para o aluno. Isso acontece quando a nova informação ancora-se nos conceitos relevantes já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz [41].

¹ou o conteúdo e a organização de suas ideias em uma área particular do conhecimento

Para Ausubel, o mais importante fator cognitivo a ser considerado no processo instrucional é a estrutura cognitiva do aprendiz no momento da aprendizagem [41].

Ausubel discordou da opinião bastante generalizada de que ao ensino de tipo expositivo se associa uma aprendizagem receptiva, memorizada ou mecânica, enquanto que o ensino pela descoberta corresponde sempre a uma aprendizagem dinâmica, significativa ou compreendida. Em sua opinião, o ensino expositivo não leva necessariamente a uma aprendizagem de tipo memorizado ou mecânico e, embora reconheça vantagens no ensino por descoberta, crê, no entanto, tratar-se de um ensino muito moroso e pouco econômico, pelo que propõe aquilo a que chama de ensino por descoberta guiada, estratégia segundo a qual o professor funciona como organizador do processo de ensino aprendizagem, não deixando que o ensino aconteça tanto ao sabor e ao ritmo dos interesses dos alunos [43]. Nesse contexto, o subsunçor é uma estrutura específica a qual uma nova informação pode se integrar ao cérebro humano, que é altamente organizado e detentor de uma hierarquia conceitual que armazena experiências prévias do aprendiz. Uma grande questão levantada pela teoria de Ausubel diz respeito a origem dos subsunçores. Se eles não estiverem presentes para viabilizar a Aprendizagem Significativa, como é possível criá-los? Segundo Ausubel [35] a Aprendizagem Mecânica é necessária e inevitável no caso de conceitos inteiramente novos para o aprendiz, mas posteriormente ela passará a se transformar em significativa. Quando um indivíduo adquire informações em uma área completamente nova ocorre a aprendizagem mecânica até que alguns elementos de conhecimento, relevantes a novas informações na mesma área, existam na estrutura cognitiva e possam servir de subsunçores ainda que pouco elaborados. À medida que a aprendizagem vai se tornando significativa os subsunçores se tornam mais elaborados e prontos para ancorar novos conhecimentos.

De acordo com Moreira e Masini [41] a estrutura cognitiva pode ser influenciada de duas maneiras:

- (a) Substantivamente: através de apresentação ao aprendiz de conceitos e princípios unificadores e inclusivos, com maior poder explanatório e propriedades inte-

gradadoras;

- (b) Programaticamente: pelo emprego de métodos adequados de apresentação do conteúdo e utilização de princípios programáticos apropriados na organização sequencial da matéria de ensino.

Para que haja essa influência substantiva, Ausubel sugere os organizadores prévios, que são materiais introdutórios apresentados antes do material a ser aprendido em si. Os organizadores prévios são apresentados num nível mais alto de abstração. Para Ausubel, a principal função do organizador prévio é a de servir de ponte entre o que o aluno já sabe e o que ele deve saber, a fim de que o material possa ser aprendido de forma significativa.

Uma vez que o problema organizacional substantivo (identificação dos conceitos organizadores básicos de uma dada disciplina) está resolvido, a atenção pode ser dirigida para os problemas organizacionais programáticos envolvidos na apresentação das unidades componentes. Aqui, por hipótese, vários princípios relativos à programação eficiente do conteúdo são aplicáveis, independentes da área de conhecimento [41].

A aprendizagem significativa processa-se quando o material novo, ideias e informações que apresentam uma estrutura lógica interagem com os conteúdos relevantes e inclusivos, claros e disponíveis na estrutura cognitiva, sendo por eles assimilados, contribuindo para sua diferenciação, elaboração e estabilidade [41, 42]

A proposta a seguir objetiva também resgatar a ideia de ciência como desenvolvimento humano. É importante que no planejamento das atividades as incertezas da ciência enquanto atividade humana sejam evidenciadas. Para tanto é preciso uma nova perspectiva nos papéis do professor e do aluno no processo ensino-aprendizagem. Aquele deixa de ser um mero transmissor de conhecimento enquanto este deixa de ser o elemento puramente passivo. O professor torna-se um guia, um mediador do processo de investigações, e o aluno participa ativamente desse processo procurando respostas para questões propostas. Essa proposta de

ensino deve ser tal que leve os alunos a construir seu conteúdo conceitual participando do processo de construção e dando oportunidade de aprenderem a argumentar e exercitar a razão, em vez de fornecer-lhes respostas definitivas ou impor-lhes seus próprios pontos de vista transmitindo uma visão fechada de ciência. Como afirma Sutton(1998)

“Se restabelecemos a autoria humana e readmitirmos a incerteza e a possibilidade de argumento, podemos auxiliar estudantes a adquirir uma ideia de ciência não fabricada”

Como pretendo desenvolver uma sequência de ensino investigativa, considero também outros aspectos para o planejamento da atividade. De acordo com Carvalho [44], oito pontos são fundamentais para o planejamento de uma sequência didática investigativa (SEIs).

- (a) *A participação ativa do aluno*: O aluno é construtor de seu próprio conhecimento
- (b) *A importância da interação aluno-aluno*: Os alunos, na discussão com seus pares, refletem, levantam e testam suas hipóteses.
- (c) *O papel do professor como elaborador de questões*: Ele tem de dar sentido nas diversas explicações dos alunos sobre a resolução do problema trabalhado.
- (d) *A criação de um ambiente encorajador*
- (e) *O ensino a partir do conhecimento que o aluno traz para a sala de aula* Criando espaço para a discussão em grupos pequenos teremos a oportunidade de perceber os conceitos espontâneos que passam a ser tratadas como hipóteses para serem testadas.
- (f) *O conteúdo (problema) deve ser significativo para o aluno*
- (g) *A relação ciência, tecnologia e sociedade*

(h) *A passagem da linguagem cotidiana para a linguagem científica* É preciso saber levar os alunos da linguagem comum, utilizada no dia a dia da sala de aula, à linguagem científica.

Destacando o último aspecto considerado pela autora, acrescento a necessidade de também aprender escrever ciência. O diálogo e a escrita são atividades complementares. Enquanto o diálogo é importante para gerar, clarificar, compartilhar e distribuir ideias entre os alunos, o uso da escrita se apresenta como instrumento de aprendizagem que realça a construção pessoal de conhecimento. O discurso oral é divergente, altamente flexível, e requer pequeno esforço de participantes enquanto eles exploram ideias coletivamente, mas o discurso escrito é convergente, mais focalizado e demanda maior esforço do escritor [45].

Deve-se considerar para o desenvolvimento da sequência de ensino investigativa, a possibilidade do uso de diversos recursos além da aula expositiva. Utilizar de recursos audiovisuais no ensino de ciências é estimulante e pode auxiliar o processo ensino-aprendizagem, como cita Arroio [46]

“...a apresentação de um audiovisual é saudável, pois altera a rotina da sala de aula e permite diversificar as atividades ali realizadas. Portanto, o produto audiovisual pode ser utilizado como motivador da aprendizagem e organizador do ensino na sala de aula.”

A atividade proposta apresentada tem como um de seus objetivos contribuir significativamente para a formação do cidadão. Desse ponto de vista é importante estimular os processos de argumentação, uma vez que ser capaz de argumentar é elemento fundamental para alguém exercer sua cidadania de forma plena. Dessa forma, tendo como base o referencial de argumentação de Toulmin, a metodologia utilizada cria um ambiente favorável para estimular a capacidade de argumentação do aprendiz.

De acordo com Monteiro e Teixeira [47], o estímulo à observação, a participação e a livre manifestação de ideias são atitudes que devem ser asseguradas para que os alunos possam construir seus argumentos segundo características de argumentação

científica. Segundo Toulmin [39] podemos produzir argumentos de muitos tipos que apresentam semelhanças básicas e revelam estágios distintos e que tem início na apresentação de um problema. Para Toulmin, argumentar é um processo no qual são realizadas afirmações e inferidas conclusões. Neste processo existem formas de proporcionar suporte e justificativas para as conclusões com base em dados, fatos e evidências acumuladas. O modelo de argumentação criado por Toulmin apresenta os seguintes conceitos principais:

- (a) Dados: existem os fatos, os quais se incluem no argumento para manter a sua afirmação. É teoricamente a verdade que está por detrás da afirmação.
- (b) Afirmação: esta é a conclusão cujos méritos serão estabelecidos.
- (c) Garantias: existem as razões (regras, princípios, etc) que são propostas para justificar as conexões entre os dados e o conhecimento, ou conclusão.
- (d) Justificativa: liga os dados à afirmação (conclusão), mostrando a relevância dos dados.
- (e) Conhecimento básico: fornece um suporte adicional à justificativa.
- (f) Reforço: existem hipóteses básicas, geralmente levantadas em comum acordo, as quais fornecem a justificativa para garantias particulares. Permite argumentar contra os contra-argumentos que poderão questionar a veracidade.
- (g) Conclusão: é uma afirmação que se supõe ser aceita com base em premissas demonstradas como verdadeiras.

O modelo de Toulmin é uma ferramenta poderosa para identificar a estrutura de argumentos científicos. Este modelo pode mostrar o papel das evidências na elaboração de afirmações, relacionando dados e conclusões através de justificativas de caráter hipotético. Também pode realçar as limitações de uma dada teoria, bem como sua sustentação em outras teorias. O uso de qualificadores modais ou de refutações pode indicar uma compreensão clara do papel dos modelos na ciência e a capacidade de ponderar diante de diferentes teorias a partir das evidências apresentadas por cada uma delas. Se os alunos puderem entrar

em contato com argumentos completos, prestando atenção nestas sutilezas, possivelmente estarão compreendendo uma importante faceta do conhecimento científico [48].

Alexandre [49], apresentaram novas categorias para identificar e analisar os componentes dos argumentos contidos em enunciados de alunos em situações de ensino e aprendizagem de ciências. A principal ampliação, proposta por estes autores, em relação aos componentes do modelo de Toulmin, para a análise da argumentação de alunos em situações de resolução de problemas experimentais de ciências foi à criação de subcategorias específicas em relação ao elemento denominado dado. O dado, em relação à natureza (teórica ou experimental) de sua procedência, pode ser caracterizado como um dado fornecido (por exemplo, dados fornecidos pelo professor, livro texto, roteiro do experimento) ou como um dado obtido. Este último ainda poderia ser classificado como um dado empírico (por exemplo, dados que procedem de uma experiência no laboratório) ou como dado hipotético.

Seguindo o modelo de Toulmin pode-se concluir que justificar corresponde à expectativa de apresentação de razões de suporte para ligar o dado com a conclusão. Nesse caso, a resposta consistirá em referir os dados ou a informação na qual a afirmação se baseou. A conclusão é assim dimensionada como um raciocínio e, pressupondo este a aplicação de uma regra, a conclusão será justificada não só em função dos referidos dados como, ainda, a partir de algo que autoriza ou avaliza que o trânsito dos dados para a conclusão se processe, ou seja, de uma regra da passagem, ou garantia. Em seu livro “Os usos do argumento”, Toulmin mostra que nem sempre usamos os argumentos para defender formalmente uma asserção direta e há uma grande variabilidade entre as funções possíveis de um argumento, mas seu estudo versa sobre “os argumentos justificatórios apresentados como apoios de asserções”.

Deanna Kuhn [50] afirma que

“um argumento em suporte a uma afirmação é vazio se não houver a consideração ou a possibilidade de considerarmos uma alternativa ao que está sendo afirmado”

Assim, ao considerar a função especial das refutações como necessárias para uma estrutura completa dos argumentos, Kuhn integra os argumentos e contra-argumentos, dando uma perspectiva dinâmica ao processo argumentativo. Ainda nesse sentido é importante distinguir entre *condições de refutação e refutação de provas*. Toulmin denomina *condições de refutação* como o reconhecimento de exceções ou restrições que se aplicam à conclusão, determinando assim a circunstância em que tal conclusão seria inválida. A *refutação* reflete uma ideia que se opõe à outra.

Em relação às perspectivas da argumentação para o ensino, a Kuhn considera o pensamento enquanto processo argumentativo é de uma natureza imprescindível para a educação, uma vez que é na argumentação que encontramos as formas mais significativas de pensamento presentes na vida das pessoas comuns. Aprender a argumentar é, de certa forma, aprender a pensar. Mais ainda, aprender ciências seria aproximar as formas de pensamento das pessoas à forma argumentativa pela qual a ciência é construída e debatida entre seus membros. Dessa maneira, a proposta seguinte aborda o papel do professor e sua responsabilidade na criação de um ambiente favorável para que os alunos se sintam a vontade para expor seus pensamentos e argumentos.

Desse ponto de vista, e acreditando que a discussão sobre a determinação da idade da Terra **não** deve ser tratada como um postulado junto aos alunos e sim como algo que nasce de anos de pesquisas e hipóteses científicas, proponho uma atividade que utilizará organizadores prévios para se ancorar na estrutura cognitiva do aprendiz a fim de promover uma aprendizagem significativa. Dessa forma, como será explicitado, a atividade apresentada a seguir considera aspectos metodológico para o desenvolvimento de uma SEI que possa gerar a ocorrência de uma aprendizagem significativa e o estímulo à argumentação.

3.4 A atividade

3.4.1 Introdução

Na proposta a seguir sugiro que através de uma sequência ensino por investigação o estudo sobre como se determinou a idade da Terra possa ser vinculado à estrutura cognitiva do aluno como conhecimento significativo. Pretendo também mostrar ao aprendiz que ciência é uma atividade humana. No caso particular da idade da Terra, tenta-se mostrar que seu desenvolvimento foi obra do trabalho árduo de cientistas de diversas áreas apoiado no conhecimento produzido e discutido ao longo de anos. A proposta considera que alguns temas de ciência, mesmo que fora da grade tradicional de ensino, já foram trabalhados com os alunos ainda que de forma tradicional, a saber:

- Em biologia, a teoria da evolução das espécies de Darwin, ressaltando os aspectos iniciais do desenvolvimento de tal teoria.
- Em geografia, as teorias e o processos para explicar a formação da Terra.
- Em física, os princípios da calorimetria, termodinâmica e cálculos sobre restrição de um corpo (Apêndice D)

Os temas previamente citados funcionam como subsunçores para o desenvolvimento da atividade apresentada a seguir, na qual a discussão estará centrada na determinação da idade da terra defendida por grupos de cientistas em meados do século 19 e início do 20. Nesse sentido, queremos que a partir do conhecimento prévio dos temas supracitados, os alunos possam participar do processo de investigação da determinação da idade da Terra tendo como apoio um conhecimento científico pré estabelecido.

3.4.2 Objetivos da atividade

O objetivo dessa proposta é apresentar uma sequência de ensino investigativa para a discussão sobre a determinação da idade da Terra resgatando diversos elementos do processo histórico. Reconhecendo a importância da prática da argumentação para os processos de ensino-aprendizagem no ensino de ciências,

pretendo nesse contexto estimular o processo argumentativo em sala de aula. O tema em questão desperta naturalmente a curiosidade humana. Nessa proposta pretendo conduzir o aprendiz de maneira que os aspectos humanos no desenvolver da ciência sejam evidenciados e que sua capacidade de argumentação seja estimulada. Considero que apresentar a idade da Terra como um simples número (4,5 bilhões de anos), certamente minimiza a possibilidade de gerar uma aprendizagem significativa para o aluno, uma vez que tal informação se torna sem significado. O aluno pode passar a acreditar que se trata de mais um número da ciência. Isso representa muito pouco dentro das questões que envolvem a determinação da idade da Terra. Representa perder a oportunidade de mostrar como a ciência se desenvolve além de deixar várias perguntas sem resposta. Quero com essa proposta criar um caminho alternativo que deixe mais claro as dificuldades encontradas até que uma ideia científica se estabeleça tentando despertar no aluno sentimentos possivelmente experimentados por Darwin, Charles Lyell, James Ussher e Kelvin, entre outros, ao defenderem suas posições sobre a idade da Terra.

3.4.3 Materiais para a proposta

No desenvolvimento da nossa proposta utilizarei textos extraídos de obras científicas, vídeos de uso público disponíveis em sites de internet e outros desenvolvidos por canais de TV. Esses materiais abordam aspectos do tema que quero tratar e conduzam para o foco pretendido da discussão, ou seja, a determinação da idade da Terra ao longo da história da ciência. No meu referencial teórico, esses materiais funcionam como organizadores prévios.

3.5 Desenvolvimento da Atividade: Fase 1

3.5.1 Apresentação do Problema

Na presente proposta, o problema que quero discutir é introduzido de maneira gradual. Começo dividindo a turma em pequenos grupos para que a interação aluno-aluno seja favorecida e com isso criar um ambiente encorajador de exposição de ideias e apresento um dos episódios da série “Como Nasceu Nosso Planeta - O

nascimento da Terra Parte 1” do canal de TV History Channel ². O vídeo funcionará como um organizador prévio visto que ajudará a fazer a ligação entre conceitos já conhecidos (termodinâmica e teoria da evolução) e aquilo que pretendemos que os estudantes aprendam (como se determinou a idade da Terra). Mesmo que os valores atuais para a idade da terra sejam abordados nessa fase inicial, quero conduzir a discussão através do processo pelo qual esse valor foi obtido. Levei em conta que muitos materiais áudio visuais podem abordar aspectos interessantes da ciência, porém podem tirar o foco da presente proposta.

A seguir, lanço a pergunta clássica sobre qual a idade da Terra para logo em seguida estabelecer a questão foco da nossa proposta: como tal valor (4,5 bilhões de anos) foi obtido? Dessa forma introduzo condições para que os alunos iniciem uma discussão em torno do tema. Com essa introdução crio um espaço para que eles possam se expressar e possivelmente começar a perceber como são os caminhos pelos quais a ciência se desenvolve. Tal percepção certamente não é fácil, de modo que é fundamental ressaltar aspectos sobre desenvolvimento de teorias científicas, como por exemplo, o período de tempo para que determinadas ideias sejam aceitas.

Após essas observações, dirijo questões que poderão conduzir os alunos para a discussão sobre como se determinou a idade da Terra. Nesse ponto são colocadas questões para os alunos, tais como:

- Qual a idade da Terra?
- Como surgiram os primeiros valores para a idade da Terra?
- Essa primeira noção da idade da Terra apresentava um suporte científico?
- Quem determinou o valor hoje aceito para a idade da Terra?
- como foi feita essa determinação?

Nessa abordagem inicial, outras questões poderão surgir. Considero que nessa fase muitas perguntas ainda ficarão sem resposta, visto que o objetivo inicial é

²disponível no site www.youtube.com em 06 de setembro de 2011

estimular a curiosidade sobre o problema que será tratado. Coloca-se o aprendiz na posição dos pensadores do século XVII para que na sequência sejam fornecidos elementos que permitam encontrar respostas dentro de uma perspectiva mais próxima de como a ciência se desenvolve.

3.5.2 Primeiras ideias

O nosso próximo passo no desenvolvimento da proposta é apresentar elementos sobre as primeiras tentativas para calcular a idade da Terra. Para tanto, vamos propor aos alunos a leitura do texto 1 “idade da Terra: primeiras ideias” (apêndice A), a partir do qual levanto algumas questões que conduzirão o aluno através da investigação guiada. No nosso referencial, esse texto funciona como mais um organizador prévio.

Questões iniciais para o texto 1

Após leitura do texto 1 (apêndice A), proponho aos alunos algumas questões.

- Para cada pesquisador citado no texto 1, identifique qual é sua conclusão sobre a idade da Terra e em que dados ela se baseia.
- Proponha uma justificativa que relacione os dados utilizados e a conclusão de cada pesquisador citado no texto.

Tais questões devem estimular a percepção de que muitas ideias sobre a idade da Terra surgiram ao longo dos anos e que tais propostas quase sempre eram incompatíveis. Evitarei dar a resposta pronta para o aluno. Ele deve ser guiado para essa percepção. Estimulo a discussão de ideias dentro dos grupos num primeiro momento e a seguir peço que cada um escreva seus argumentos.

Comentários sobre questões para o texto 1

Outras questões poderão ser acrescentadas à essa fase. O objetivo inicial é criar um ambiente para que as dificuldades da determinação da idade da Terra sejam percebidas. Desse modo o aluno poderá começar a perceber o aspecto humano da ciência e iniciar a desconstrução da ideia de ciência fabricada. Pode ser mais fácil

para os alunos perceberem as respostas à primeira questão quando expressas por valores claros e apontados no texto (Hutton não apresenta um valor). Algum aluno poderá argumentar que o texto bíblico não constitui um dado. Porém, para Ussher esse era um dado e parte central de seu argumento. As justificativas poderão oferecer maior dificuldade para os alunos. Nesse é importante que as justificativas estejam bem claras para o professor. Usando o referencial de argumentação de Stephen Toulmin [39], pode-se afirmar que Ussher justifica sua conclusão pela veracidade do texto bíblico. A justificativa de Buffon apoia-se na ideia de que a Terra estaria incandescente no momento de sua formação e que seu interior seria composto de ferro, entre outros elementos, e que por essa razão teria um tempo de resfriamento parecido com esse metal. A justificativa de Hutton constitui a base do uniformitarismo, ou seja, as leis da física e da química atuam hoje na natureza da mesma forma que no passado e dessa forma o tempo de erosão das rochas seria o mesmo observado nas pedras da muralha de Adriano.

3.6 Desenvolvimento da Atividade: fase 2

Após essa primeira fase, proponho dar sequência à atividade introduzindo novos elementos para a investigação em curso. Dessa forma, apresento aos alunos o segundo texto dessa atividade (veja apêndice B) [51]. Esse segundo texto funciona como um complemento das ideias trabalhadas até aqui. Através de uma linguagem de fácil entendimento, Isaac Asimov [51] nos conduz por novas tentativas para determinar a idade da Terra. Ele reforça e complementa ideias já expostas, além de acrescentar novos dados para a questão foco da proposta. Após leitura do segundo texto, novas perguntas poderão ser introduzidas. Mais uma vez irei estimular a prática da argumentação. O modelo seguido aqui é o mesmo utilizado com o primeiro texto (fase 1). Ressalto a importância de estimular os alunos a perceberem os dados e as justificativas. É importante também estimular a prática da escrita. As respostas serão orais num primeiro momento. A seguir peço que cada aluno elabore suas próprias respostas. Observe que esse segundo texto é essencialmente um complemento das ideias iniciais com novos detalhes. Embora tenhamos avançado pouco na discussão conseguiremos reforçar a prática da argumentação e o caráter humano do desenvolvimento da ciência. Um dos aspectos humanos que

pode ser destacado nesse segundo momento é que as tentativas foram feitas ao longo de vários anos. Desde de 1570 com Bernard Palissy (1510-1589) até 1715 com Edmund Halley.

3.7 Desenvolvimento da Atividade: fase 3

Nosso próximo passo na proposta será aprofundar nossa discussão mostrando que em determinado momento os métodos para determinação da idade da Terra adquiriram uma base científica mais robusta com a participação de cientistas de diversas áreas. Algumas tentativas saíram do campo qualitativo para o quantitativo. Dentre essas as principais foram as defesas de Charles Lyell (1797-1875), Charles Darwin(1809-1882) e William Thomson (1824-1907) também conhecido como Lorde Kelvin. Para essa etapa proponho que cada grupo prepare um material audiovisual para exibição futura. Uma dessas apresentações deve mostrar as ideias de Darwin sobre a evolução da espécie tendo foco no intervalo de tempo para que as transformações sugeridas por Darwin pudessem operar. Os outros materiais devem mostrar a visão de Lyell e sua teoria do uniformitarismo e as ideias de Thomson sobre a questão. Dados sobre as três teorias citadas são fundamentais para essa fase da proposta. Para tanto, vou entregar a tarefa de pesquisa e apresentação dessas linhas de pensamento para os grupos formados no início da atividade. É importante que os alunos possam ter elementos para perceberem as divergências entre as teorias. Após as apresentações podemos propor novas questões para que as contradições das teorias sejam evidenciadas.

- (a) Identifique os dados utilizados por Darwin, Lyell e Thomsom para determinar a idade da Terra.
- (b) Identifique as justificativas utilizadas para as conclusões de Darwin, Lyell e Thomsom.
- (c) Identifique se as conclusões são complementares ou contraditórias.
- (d) Qual conclusão apresenta base matemática?
- (e) Você considera que a base matemática confere maior confiabilidade para uma conclusão?

- (f) Qual conclusão lhe parece mais convincente? Justifique.
- (g) Identifique alguma condição de refutação para algum dos argumentos anteriores.

Em relação às questões anteriores, para perceber os cálculos de Thomson os alunos poderão encontrar dificuldades (veja apêndice D). Por outro lado, Darwin e Lyell baseiam suas conclusões, respectivamente, na transformação das espécies e na lentidão das mudanças. Seus argumentos defendem que tais processos requerem muito tempo não expresso em valores. Conhecimentos prévios que eram isolados podem agora se relacionar na tentativa de explicar um mesmo fato.

3.8 Desenvolvimento da Atividade: fase 4

Como fechamento das ideias abordadas nas apresentações, ofereço o texto de Hal Hellman [4] aos alunos. Esse material é faz um resumo de todas as ideias trabalhadas até aqui e deixa evidente as contradições entre as diversas teorias trabalhadas na atividade. O texto ainda apresenta uma introdução para a solução moderna do problema em discussão. Desse modo, partimos para a fase final da proposta pedindo que cada grupo elabore uma apresentação na qual seja abordada o método moderno para resolver o problema em questão. Para iniciar essa nova fase sugiro apresentar o texto de Isaac Asimov [51] **“Como finalmente se determinou a Idade da Terra?”**. As apresentações serão realizadas em data previamente combinada com cada grupo. Ao final das apresentações peço que cada aluno desenvolva um redação cujo tema será: Quem disse que a Terra tem 4,5 bilhões de anos? O objetivo é avaliar através das redações o quanto significativa foi a aprendizagem.

3.9 Conclusão

A sequência de ensino investigativa apresentada leva para a sala de aula diversos aspectos do desenvolvimento da ciência. Utilizando recursos audio-visuais e textos de fácil entendimento resgata aspectos históricos e as incertezas envolvidos

na determinação da Idade da Terra. A sequência apresentada também desmonta a ideia de ciência fabricada à medida que oferece a oportunidade para o aluno perceber as diversas linhas de pensamento em torno do tema. Por último cria um ambiente favorável para que o aprendiz participe ativamente do processo e favorece a prática da argumentação. Por tudo isso, acredito que a sequência apresentada pode cumprir seu objetivo principal de conduzir à uma aprendizagem significativa.

Apêndice A

Dedução da equação que governa a difusão de calor em uma dimensão

Considere uma porção de um meio condutor de calor de condutividade térmica k medida no Sistema Internacional de Unidades em $W.m^{-1}.K^{-1}$. Suponha que esta porção esteja limitada por dois planos paralelos π_1 e π_2 separados por uma distância Δx (medida em metros no S.I). O plano π_1 intercepta o eixo cartesiano OX em $x - \frac{\Delta x}{2}$, e o plano π_2 em $x + \frac{\Delta x}{2}$. Um terceiro plano que denotaremos por σ intercepta o eixo OX em x .

Vamos supor que o fluxo de calor seja unidimensional, ao longo do eixo OX , conseqüentemente o campo de temperatura será uma função somente de x e do tempo t :

$$T = T(x, t), x \in (-\infty, +\infty), t \in [0, \infty) \quad (\text{A.1})$$

A lei de condução de calor de Fourier neste caso se lê:

$$\frac{dQ}{dt} = -k \frac{dT}{dx} A, \quad (\text{A.2})$$

onde A é uma medida de área conveniente no plano π_1 (e π_2). A equação A.2 é nosso ponto de partida. A quantidade de calor que passa através de uma seção do plano π_1 de área A no intervalo de tempo Δt é:

$$Q_1 = k \frac{\partial T}{\partial x} \left(x - \frac{\Delta x}{2}, t \right) A \Delta t \quad (\text{A.3})$$

A condutividade térmica k em geral é uma função da temperatura, mas na nosse demonstração admitiremos k constante. A quantidade de calor que passa por uma seção reta do plano π_2 de área A é:

$$Q_2 = k \frac{\partial T}{\partial x} \left(x + \frac{\Delta x}{2}, t \right) A \Delta t \quad (\text{A.4})$$

A quantidade de calor líquida entregue ou retirada ao meio delimitado pelas duas seções de plano é:

$$Q_2 - Q_1 = \Delta Q = \Delta m c \Delta T \quad (\text{A.5})$$

onde c é o calor específico do meio medido em $J kg^{-1} K$ e $\Delta m = \delta A \Delta x$, onde δ é a densidade do meio medida em $kg.m^{-3}$. A densidade do meio é uniforme. A variação de temperatura ΔT se escreve:

$$\Delta T = T(x, t + \Delta t) - T(x, t) \quad (\text{A.6})$$

isto é, a variação de temperatura é medida sobre o plano σ equidistante de π_1 e π_2 . Segue que:

$$\delta c A \Delta x [T(x, t + \Delta t) - T(x, t)] = k \left[\frac{\partial T}{\partial x} \left(x + \frac{\Delta x}{2}, t \right) - \frac{\partial T}{\partial x} \left(x - \frac{\Delta x}{2}, t \right) \right] A \Delta t \quad (\text{A.7})$$

ou

$$\frac{[T(x, t + \Delta t) - T(x, t)]}{\Delta t} = \frac{k}{\delta c} \frac{\left[\frac{dT}{dx} \left(x + \frac{\Delta x}{2}, t \right) - \frac{dT}{dx} \left(x - \frac{\Delta x}{2}, t \right) \right]}{\Delta x} \quad (\text{A.8})$$

No limite $\Delta t \rightarrow 0, \Delta x \rightarrow 0$: (supondo que existem)

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (\text{A.9})$$

Apêndice B

A fórmula de Leibniz

O teorema ou fórmula de Leibniz para a diferenciação de uma integral se lê [52]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_{u(x)}^{v(x)} f(x, z) dz \\ = f(x, v(x)) \frac{dv(x)}{dx} - f(x, u(x)) \frac{du(x)}{dx} + \int_{u(x)}^{v(x)} \frac{\partial f}{\partial x}(x, z) dz. \end{aligned}$$

Apêndice C

Radiotividade e a idade da Terra

Radiotividade é um processo no qual um núcleo com Z prótons e N neutrons pode se transformar em outro núcleo com Z e N diferentes. Esta transformação é chamada desintegração nuclear, sendo acompanhada por emissão de radiação. Por este motivo, estes núcleos instáveis são chamados radioativos.

Existem duas maneiras principais de um núcleo se desintegrar:

1. emissão de uma partícula alfa (α): conjunto de dois prótons e dois neutrons, isto é, um núcleo do átomo de hélio.
2. emissão de uma partícula beta (β): emissão de elétron.

No caso da partícula β um elétron sai do núcleo com uma grande velocidade. Este elétron origina-se no núcleo quando um neutron (carga 0) se desintegra transformando-se em um próton, um elétron e um neutrino (que é uma partícula sem massa e sem carga muito difícil de ser detectada) O próton permanece no núcleo e o elétron é ejetado. O número de massa A é definido como a soma do número de prótons e neutrons; portanto a emissão de uma partícula beta não muda o número de massa do nuclídeo que desintegrou. No entanto o número de prótons do núcleo (número atômico Z) aumentou e como é o número de prótons que caracteriza um dado elemento, quando um nuclídeo emite um partícula beta ele se transforma em um nuclídeo de outro elemento. Considerando um certo nuclídeo radioativo pode-se afirmar que o processo de desintegração ocorrerá. Se um nuclídeo é muito instável existe uma chance maior de que ele se desintegre antes de um

outro nuclídeo que seja mais estável. Observando somente um nuclídeo radioativo não se pode falar em probabilidades, no entanto, se observarmos um grande número de átomos com um dado nuclídeo poderemos contar quantos se desintegram no primeiro segundo, quantos no segundo seguinte e assim por diante. O que se constata, fazendo esta experiência, é que para um dado nuclídeo, uma dada fração dos átomos radioativos sempre decairá em um dado tempo. Por exemplo para cada intervalo de tempo de trinta anos o número de átomos radioativos do elemento Cs 137 será a metade. Suponha que em um tempo inicial se tenha N_0 átomos radioativos de Cs 137, passados 30 anos teremos $\frac{N_0}{2}$ átomos radioativos, passados mais trinta anos teremos a metade de $\frac{N_0}{2}$ átomos radioativos, ou seja, $\frac{N_0}{4}$ e assim por diante. Esse tempo necessário para que a metade dos átomos tenham se desintegrado é chamado **meia-vida** do nuclídeo em questão. Para o caso do Cs-137 sua meia-vida é de trinta anos. A tabela C.1 mostra a meia-vida de alguns elementos.

Nuclídeo	Meia-Vida ($T_{\frac{1}{2}}$) em anos
Cs 137	30
U 238	$4,5 \times 10^9$
U 235	$7,1 \times 10^8$
Co 60	5,6
Th 232	$1,39 \times 10^{10}$

Tabela C.1: MEIA-VIDA DE ALGUNS ELEMENTOS

Na década de 50 a precisão dos métodos laboratoriais permitiu generalizar o uso das datações radiométricas.

A lei de decaimento radioativo indica que o número de átomos que se desintegra por unidade de tempo é proporcional ao número de átomos presentes no estado inicial, ou seja [29, 32]

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (\text{C.1})$$

Na Eq.(C.1) λ representa uma constante de decaimento.

Se realizarmos a integral da Eq.(C.1), obtemos:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt$$
$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{C.2})$$

Na Eq.(C.2) N_0 representa o número de átomos radioativos no estado inicial e N é o número de átomos radioativos no estado atual. O número de átomos radiogênicos (gerados pelo processo de decaimento) designa-se por NR , tal que,

$$N_0 = N + NR \quad (\text{C.3})$$

Podemos reescrever a Eq.(C.3)

$$NR = N(e^{\lambda t} - 1) \quad (\text{C.4})$$

A partir da Eq.(C.4), que pode ser reescrita

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{NR}{N} \right) \quad (\text{C.5})$$

pode-se calcular o intervalo de tempo para uma amostra de rocha.

O intervalo de tempo denominado meia-vida $T_{\frac{1}{2}}$ ¹ relaciona-se com a constante de decaimento λ por :

¹ Também denominado *período de desintegração*. É o intervalo de tempo para desintegrar metade da massa de um isótopo.

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (\text{C.6})$$

A idéia de usar o decaimento radioativo como um relógio que conta eras, possibilitou aos geólogos a ampliação da escala de tempo na qual podiam basear suas pesquisas. As séries radioativas já haviam sido descobertas e sabiam-se quais os produtos finais do decaimento dos elementos como tório e urânio que são encontrados em vários minerais. Sabendo a relação entre a quantidade destes minerais nas rochas e a de seus produtos radioativos, pode-se fazer uma estimativa da idade da rocha.

C.1 O método rubídio estrôncio [29,32]

Diversos pares de elementos podem ser utilizados para datação radiométrica. A tabela C.2 mostra alguns desses pares e suas respectivas vidas médias.

Pai	Filho	λ	Meia Vida em anos
^{14}C	^{14}N	$1,21 \times 10^{-4}$	5730
^{87}Rb	^{87}Sr	$1,42 \times 10^{-11}$	$4,88 \times 10^9$
^{40}K	^{40}Ca	$4,962 \times 10^{-10}$	$1,40 \times 10^9$
^{232}Th	^{208}Pb	$4,9475 \times 10^{-11}$	14×10^9
^{234}U	^{230}Th	$2,794 \times 10^{-6}$	248×10^3
^{235}U	^{207}Pb	$9,8485 \times 10^{-10}$	704×10^6
^{238}U	^{206}Pb	$1,55125 \times 10^{-4}$	$4,468 \times 10^9$

Tabela C.2: Constantes de decaimento e valores de Meia Vida de um conjunto de pares de elementos utilizáveis em datação radiométrica

O Método Rubídio-Estrôncio permite a datação de rochas muito antigas, incluindo amostras de rochas lunares até rochas com poucos milhões de anos. É muito utilizado em geocronologia devido sua versatilidade. O Rb não é um elemento comum na natureza e não forma mineral isolado, ou seja, ocorre como impureza em minerais de potássio (K), aos quais se associa devido à semelhança de raios atômicos.

Os dois isótopos naturais do Rubídio são o ^{85}Rb e o ^{87}Rb , cujas abundâncias atômicas são de 72.8% e 27.2%, respectivamente. O ^{87}Rb é um isótopo radioativo denominado isótopo *pai* que decai gerando o isótopo *filho* ^{87}Sr através da emissão de partículas β da seguinte forma :



Neste caso, a formação de átomos radiogênicos de ^{87}Sr pode ser explicitada da forma seguinte :

$$N_{^{87}\text{Sr}} = N_{^{87}\text{Rb}} (e^{\lambda t} - 1) \quad (\text{C.8})$$

Considerando que os espectrômetros de massa medem com maior precisão razões entre dois elementos do que valores absolutos e que o isótopo ^{86}Sr não é radioativo nem radiogênico, já que a sua quantidade pode ser considerada constante, é preferível escrever a Eq.(C.8) sob a forma :

$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}} = \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}} (e^{\lambda t} - 1) \quad (\text{C.9})$$

Um problema existe, no entanto, no que diz respeito à fração real de ^{87}Sr na amostra original. Para eliminar esse problema, utiliza-se o *Método da Isócrona*. Para aplicar esse método, são necessárias várias amostras de rochas cogenéticas² e que contenham diferentes teores de *Rb*. Assim será possível construir o gráfico da isócrona (Fig.C.1) [34].

Supõe-se que, no tempo em que as amostras cogenéticas foram formadas (tempo zero inicial), as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ eram as mesmas para todas, mas era variável o conteúdo em *Rb*. Caso tivéssemos oportunidade de analisar estas amostras de rocha logo após a sua formação conseguiríamos plotá-las segundo uma linha horizontal no gráfico da figura C.1 que mostra a relação $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ como eixo das ordenadas e a razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ como abcissa. Com o passar do tempo, o conteúdo de ^{87}Rb deve decrescer gradualmente, pois é transformado em ^{87}Sr , o qual deverá aumentar proporcionalmente nas amostras. No diagrama da figura C.1

²Cogenéticas: que tiveram uma mesma origem.

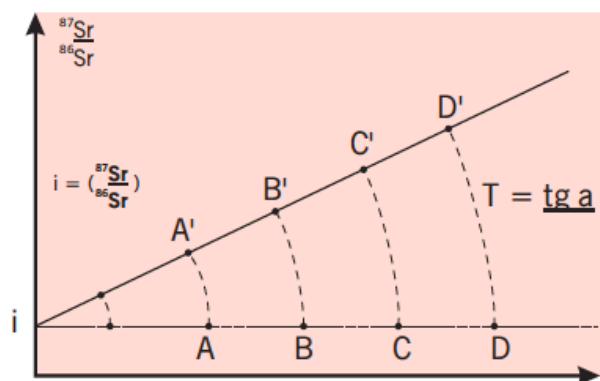


Figura C.1: Isócrona do método Rb/Sr. A, B, C e D = Amostras cogenéticas $\frac{87Rb}{86Sr}$

tal situação é acompanhada pelo deslocamento da linha $A - A'$, que irá reproduzir o comportamento atual das amostras cogenéticas ($B - B'$). A série de amostras continua a definir uma linha reta, cuja inclinação em relação à reta horizontal inicial deve aumentar sistematicamente com o tempo. A linha assim definida é a isócrona e sua inclinação atual indica a idade radiométrica da rocha. Além disso, o ponto onde a isócrona intercepta o eixo das ordenadas nos indica a razão $\frac{87Sr}{86Sr}$ inicial do sistema [34].

A razão isotópica inicial varia com a história geológica da unidade em estudo. As rochas provenientes do manto superior, por exemplo, possuem razões isotópicas iniciais Rb/Sr muito baixas. No extremo oposto temos a crosta continental caracterizada por razões Rb/Sr elevadas.

Existem ainda duas condições para que a medição da idade radiométrica seja significativa: a primeira é a de que os processos de alteração ou de metamorfismo não tenham afetado as razões isotópicas do mecanismo de decaimento utilizado na datação. A segunda é a de que todas as amostras utilizadas possuam a mesma razão isotópica inicial.

Esta última condição é de mais fácil realização nas rochas ígneas³ do que nas

³rochas que resultam do arrefecimento do magma

rochas metamórficas⁴ ou sedimentares⁵, uma vez que aquelas cristalizam a partir de um magma único. No que diz respeito às rochas metamórficas esta condição pode também verificar-se desde que o metamorfismo tenha sido suficientemente intenso para tornar homogênea as razões isotópicas. Nas rochas sedimentares, o fato de os seus elementos poderem provir de fontes distintas torna impossível a datação direta da idade da sedimentação.

As idades relativas obtidas a partir do estudo das colunas sedimentares constituem, contudo, a principal fonte de informação da estratigrafia. Sua calibragem exige a necessidade de se obterem datações radiométricas indiretas, usualmente, a partir da datação das rochas ígneas que se encontram intercaladas nas sequências sedimentares ou as intruem, o que fornece limites inferiores das idades dos horizontes sedimentares intruídos.

O meio mais direto para calcular a idade da Terra é utilizando idades isócronas de pares (Pb/Pb), derivadas a partir de amostras terrestres e de meteoritos. Esse processo requer a medição de três isótopos de Pb (^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb ou ^{204}Pb). Um gráfico é construído relacionando as razões $\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$ versus $\frac{^{207}Pb}{^{204}Pb}$ ⁶. O gráfico da Fig.C.2 mostra a isócrona Pb-Pb para amostras terrestres e de meteoritos que foram utilizados para determinar a atual idade de nosso planeta.

Considerando que o sistema solar se formou a partir de um conjunto comum de matéria, que foi uniformemente distribuído em termos de razões de isótopos de Pb, pode-se concluir que, em seguida, as parcelas iniciais para todos os objetos componentes da matéria cairiam em um único ponto. Com o tempo, as quantidades de ^{206}Pb e ^{207}Pb irão mudar em algumas amostras, uma vez que estes isótopos são produtos finais do decaimento do urânio (^{238}U decai para ^{206}Pb e ^{235}U decai para ^{207}Pb). Isso gera os pontos de dados que permitem separar um do outro. Quanto maior a razão $\frac{U}{Pb}$ de uma rocha, mais os valores das razões $\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$ e $\frac{^{207}Pb}{^{204}Pb}$ irão mudar com o tempo. Se na origem do sistema solar também houve uma

⁴rochas que foram alteradas pelo fogo

⁵rochas produzidas por depósito lento de materiais

⁶Espectrômetros de massa medem com maior precisão razões entre dois elementos do que valores absolutos

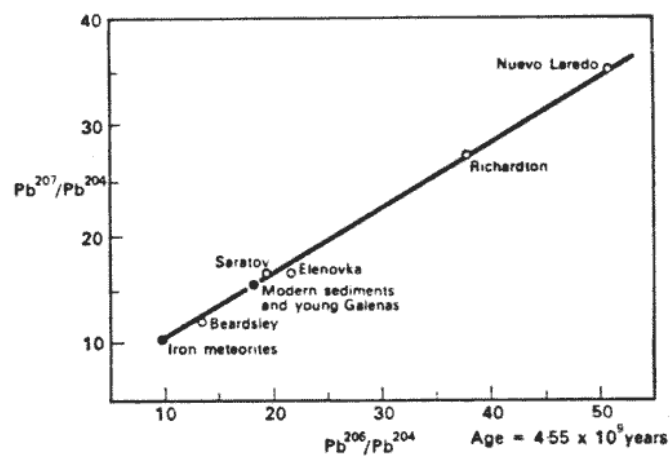


Figura C.2: Isócrona do método Pb/Pb para amostras terrestres e de meteoritos. Figura original de <http://www.talkorigins.org>

distribuição uniforme das razões de isótopos de urânio, então os pontos de dados sempre cairão em uma única linha. A partir da inclinação da isócrona podemos calcular o intervalo de tempo que se passou desde que a matéria primordial foi separada em objetos individuais⁷.

⁷Para detalhes sobre datação isócrona, consultar <http://www.talkorigins.org/faqs/isochron-dating.html> Acesso em outubro de 2011

Apêndice D

Texto 1: Primeiras ideias sobre a Idade da Terra

A idade da Terra foi exaustivamente discutida ao longo dos séculos. Durante muitos anos os debates estiveram dominados por uma interpretação literal da Bíblia. Estava claramente anunciado que a Terra tem cerca de 6000 anos. O bispo irlandês do século XVII, James Ussher, utilizando relatos históricos, ciclos astronômicos e as diversas gerações a partir de Adão e Eva e concluiu que a Terra foi criada em 23 de outubro de 4004 a.C. Durante 200 anos esse número apareceu nas edições inglesas subsequentes da Bíblia.

Muitos naturalistas pioneiros eram clérigos e por essa razão davam apoio às ideias de Ussher. Podemos citar, por exemplo, o teólogo, astrônomo e matemático William Whiston (1667-1752) que usou seu conhecimento científico para calcular que o dilúvio bíblico, ao qual Noé sobrevivera, tinha começado na quarta-feira 28 de novembro do mesmo ano de 4004 a.C. Outra consequência dessa leitura das escrituras bíblicas era que cataclismos e catástrofes eram considerados as principais formas de formação das características topográficas e terrestres. Acreditava-se que os efeitos desses eventos explicava a aparência torturada de muitas partes da Terra. Nessa era intensamente cristã, Georges Louis Leclerc, o conde de Buffon (1707-1788) foi possivelmente um dos primeiros que tentou alargar a idade da Terra para além dos limites estabelecidos na Bíblia. Calculando o tempo de resfriamento da Terra a partir de massas primitivas em estado de fusão, ele chegou

à estimativa de 75000 anos. Outro entre os primeiros pesquisadores em busca da idade da Terra foi Benoit de Maillet (1656-1738) que baseou seus cálculos em um declínio observado no nível do mar. Através de suas observações, de Maillet chegou a duas premissas que eram necessárias para uma idade aproximada para a Terra: 1) em algum ponto no tempo, a superfície da Terra foi totalmente coberta pelo oceano, e 2) que o nível do mar diminuiu em uma constante taxa ao longo do tempo. Benoit estimou que o mar estava recuando a uma taxa de três centímetros por século. Tendo em conta estes números, determinou que a Terra deveria ter pelo menos 2 bilhões de anos. Em 1770 James Hutton, fundador do uniformitarismo em geologia, observou que a muralha romana de Adriano, construída no século II, necessitou de 1500 anos para que fossem identificadas alterações em sua estrutura. Dessa forma concluiu que a idade da Terra (sem citar números) deveria ser muito maior do que as propostas até então para pudessem ocorrer os lentos processos de formação e erosão das rochas.

Apêndice E

Texto 2: Qual a idade da Terra?

¹ Agora que entendemos a medição do tempo, pensemos numa questão sobre a Terra que envolva o tempo: Qual a idade da Terra? Temos certeza de que a Terra existe há pelo menos 5 mil anos, pois temos registros escritos que remontam a 3000 a.C, quando os sumérios inventaram a escrita. Dispomos de artefatos, ou seja, objetos feitos pelo homem, como cerâmicas e estatuetas, de épocas ainda mais antigas. Até por volta de 1800, quase ninguém em nossa tradição ocidental acreditava que a Terra tivesse mais que 6 mil anos de idade. A eventual crença nesse fato provinha de interpretações das palavras da Bíblia, que constituíam a verdade divina; mas tratava-se de fé, não de evidência científica. É claro que alguns, muito poucos, reuniram provas e chegaram a conclusões bem diferentes daquelas apresentadas pela Bíblia. Parecia a tais pensadores que as forças da natureza (a chuva, o vento, as ondas que batiam) estavam lentamente alterando a superfície da Terra. Essas forças podiam ser responsáveis por muito da aparência atual do planeta, mas só se tivessem atuado por um longo tempo (por bem mais do que 6 mil anos). Um dos que pensaram nisso, por volta de 1570, foi o erudito francês Bernard Palissy (c. 1510-1589). Aqueles que aceitavam que a Terra tinha 6 mil anos não negavam a existência de alterações, mas atribuíam-nas todas à lenda do Dilúvio de Noé. Palissy, por se recusar a acreditar que tal inundação mundial houvesse ocorrido e sugerir que a aparência da Terra se devia a mudanças lentas em longos períodos de tempo, foi queimado como herege em 1589. Tratava-

¹Tradução do texto original de Isaac Asimov [51]

se de uma má época para os que pensavam por si sós. Em 1681, o pastor inglês Thomas Burnet (c. 1635-1715) escreveu um livro em que apoiava a história do Dilúvio; contudo, em 1692, num outro trabalho, questionou a história de Adão e Eva, o que lhe arruinou a carreira. Em 1749, o naturalista francês Georges Louis de Buffon (1707-1788), iniciou a elaboração de uma grande enciclopédia, na qual tentou explicar o mundo em termos naturalistas. Segundo sua estimativa, a Terra, para ter chegado ao estado atual, tinha pelo menos 75 mil anos. A afirmação causou-lhe problemas, e ele teve de retirá-la, a exemplo de Galileu. Contudo, é impossível fazer as pessoas pararem de pensar, e atingiu-se o ponto crítico em 1795, quando o geólogo escocês James Hutton (1726-1797), escreveu um livro chamado *The Theory of the Earth (A Teoria da Terra)*, no qual cuidadosamente relacionou todas as evidências em favor do conceito das mudanças graduais num longo tempo. Durante o meio século seguinte mais ou menos, os cientistas acabaram aceitando a teoria de Hutton (chamada uniformitarismo) da mudança lenta e constante. Mas tal teoria não exclui catástrofes ocasionais, como gigantescas erupções vulcânicas. Então, os cientistas começaram a considerar as mudanças que estavam ocorrendo na Terra naquele instante, determinando a velocidade com que ocorriam. Presumindo que as mudanças se deram sempre no mesmo ritmo, era possível estimar desde quanto tempo vinham acontecendo para deixar a Terra em seu estado presente. O primeiro a tentar tal cálculo foi Edmund Halley, que também descobriu por que o vento sopra. Em 1715, considerando a salinidade do mar, ele concluiu que o sal devia ter sido carregado para lá pelos rios, que dissolviam pequenas quantidades de sal da terra que atravessavam. Além disso, verificou que o calor do sol podia evaporar a água do mar, mas não o sal, de modo que toda chuva que cai em consequência é água fresca, a qual, ao alimentar os rios e voltar ao mar, leva ainda mais sal para o oceano. Supondo que a água do oceano fosse fresca de início e calculando a quantidade de sal que os rios lhe trazem a cada ano, descobriríamos desde quanto tempo o fenômeno vinha ocorrendo para que o oceano estivesse tão salgado quanto hoje. O raciocínio parece bom, mas apresenta incertezas. Em primeiro lugar, talvez a água do oceano não fosse fresca de início, já contendo um pouco de sal. Além disso, não se sabe de fato qual a quantidade de sal que entra no oceano trazida pelos rios a cada ano. Na época de Halley, não se conhecia praticamente nada dos rios fora da Europa. Ha-

via também a possibilidade de a quantidade total de sal levada para o oceano hoje ser menor, ou maior, do que aquela verificada em épocas passadas, sem falar nos processos para remover o sal do oceano. A evaporação comum não é capaz disso mas, às vezes, braços rasos do oceano estreitam-se e secam, deixando para trás grandes minas de sal. Halley levou em conta tais incertezas e, por fim, concluiu que, para os oceanos serem tão salgados quanto hoje, a Terra devia ter cerca de 1 bilhão de anos de idade. Tratava-se de um número tão grande que ninguém o levou a sério na época. Era quase 13 mil vezes maior do que aquele estimado por Buffon cerca de três quartos de século antes, mas a situação na Inglaterra estava mais branda, e Halley não sofreu perseguições. Outra maneira de calcular a idade da Terra dependia do ritmo da sedimentação. Os rios, lagos e oceanos do mundo tiveram lama e lodo depositados em seu fundo, os quais formaram sedimentos (derivado da palavra latina para estabelecimento). Conforme se depositavam mais sedimentos, o peso das camadas superiores comprimia as inferiores, que foram se transformando em rochas sedimentar. Era possível estimar o ritmo da sedimentação no presente e, presumindo que o processo ocorreu sempre na mesma velocidade, calcular quanto tempo foi necessário para produzir rocha sedimentar com as espessuras encontradas na Terra. Concluiu-se que a Terra tinha mais de meio bilhão de anos. Tratava-se de estimativas grosseiras; sugeriam, mas não garantiam. Era preciso algum tipo de variação totalmente regular, existente desde o início da Terra e que pudesse ser medida facilmente. Na época de Halley ou Hutton, ninguém conseguiu imaginar qual seria essa variação, e a descoberta, quando por fim aconteceu, um século depois de Hutton, foi totalmente por acaso.

Apêndice F

Texto 3: Lorde Kelvin contra geólogos e biólogos

A idade da Terra¹

O ponto em questão era a idade da Terra. Um século antes, pouca discussão havia sobre o assunto. Estava claramente enunciado nas Escrituras, alegavam muitos, que a Terra tem por volta de 6 mil anos. A voz mais conhecida era a do bispo irlandês do século XVII, James Ussher. Usando uma complexa combinação de cronologia bíblica (principalmente contando as ocorrências de “Fulano gerou Sicrano”), relatos históricos e ciclos astronômicos, Ussher refinou as antigas estimativas e, em meados da década de 1650, chegou ao resultado de 4004 a.C. como a data da Criação. Durante 200 anos esse número apareceu nas edições inglesas subsequentes da Bíblia.

Muito da ciência na época de Ussher dava apoio a essas idéias, e, de fato, muitos dos pioneiros naturalistas eram também clérigos. Um bom exemplo é William Whiston (1667-1752), teólogo, matemático e astrônomo inglês. Ele foi um dos primeiros a introduzir experimentos em suas aulas em Londres, mas, além disso, também usou seu próprio conhecimento científico para calcular que o Dilúvio bíblico ao qual Noé sobrevivera tinha começado na quarta-feira 28 de novembro, no mesmo ano que Ussher havia especificado. Muitas outras estimativas desse tipo foram feitas na época por ele e seus colegas clérigos.

¹ Texto de Hal Hellman. [4]

Outra consequência dessa leitura das escrituras era que cata-clismos e catástrofes, tais como o Dilúvio do tempo de Noé, eram considerados o principal modo de formação das características topográficas terrestres. Acreditava-se que o efeito dessas catástrofes explicava a aparência torturada de muitas partes da Terra. De acordo com o catastrofismo, a Terra é ao mesmo tempo jovem e imutável (deixando-se de lado algumas convulsões menores como erupções vulcânicas e terremotos). Mas havia um problema: algumas das novas observações e teorias começaram a contradizer essas idéias baseadas na Bíblia. Buffon, que você já encontrou no Capítulo 4, foi possivelmente o primeiro naquela era intensamente cristã que tentou alargar esses limites para mais de 6 mil anos (isto é, para antes de 4004 a.C).

Calculando o tempo de resfriamento da Terra a partir de uma massa primitiva em estado de fusão, ele chegou à estimativa de 75 mil anos. Mais importante que esse número, que ele mais tarde aumentou consideravelmente, e mais importante ainda que a natureza contraditória desses resultados, foi a pressuposição de que a natureza era racional e revelaria seus segredos àqueles que aprendessem a ler e entender sua linguagem. Outro dos primeiros pesquisadores em busca da idade da Terra foi o francês Benoit de Maillet (1656-1738). Um naturalista amador, ele baseou seus cálculos em um declínio observado do nível do mar. E muito interessante que ele tenha chegado ao número de 2 bilhões de anos, que está muito mais perto dos números modernos.

Para se proteger de represálias, de Maillet apresentou suas descobertas em uma história baseada numa série de conversas fictícias entre um missionário francês e um filósofo indiano chamado Telliamed (de Maillet escrito de trás para diante). Mesmo assim — lembrando-se talvez do tratamento dado a Galileu — ele relutou em publicar, e seu relato não chegou ao prelo senão em 1748, dez anos após sua morte, tendo pouco impacto na discussão.

Houve outras tentativas de determinar a verdadeira idade da Terra, e, na época de Thomson, um imenso número de estimativas tinham sido apresentadas, baseadas numa ampla variedade de métodos. A refutação mais eficaz e digna de crédito da idéia cristã de uma Terra jovem moldada por catástrofes foi a do respeitado geólogo britânico, Sir Charles Lyell (1797-1875). Lyell afirmou que o catastrofismo não era necessário e que os traços topográficos da Terra podiam ser explicados por forças que continuam atuando. Ele acreditava, de fato, que tudo

o que se vê na Terra é o resultado de forças e agentes ordinários, atuando todos de uma maneira uniforme. Sua teoria foi, portanto, chamada “uniformitarismo”. O uniformitarismo significava que o passado poderia ser explicado por termos do que vemos ocorrendo hoje.

Da perspectiva contemporânea, a característica mais importante da teoria uniformitarista é que não havia mais necessidade de catástrofes como o Dilúvio, ou de quaisquer outras influências sobrenaturais. Se Lyell estivesse certo, a leitura literal da Bíblia não era mais um caminho defensável para a ciência. Contudo, sua doutrina também exigia que essas forças tivessem estado agindo por um tempo ilimitado!

Na metade do século XIX, o uniformitarismo (um rótulo, ironicamente, cunhado pelo catastrofista William Whewell) tinha se tornado a doutrina geológica dominante na Inglaterra. Embora os teólogos não estivessem contentes com a doutrina uniformitarista, a estabilidade é para a maioria de nós uma situação mais confortável do que a idéia de que poderíamos ser todos varridos do mapa a qualquer momento. Newton e Leibniz discutindo o papel de Deus na estabilidade do sistema solar. No início do século XIX, o matemático francês Laplace finalmente mostrou que Deus não precisava ficar agindo como um consertador de relógios, e que o sistema, por si só, era bastante estável. Muitas pessoas deram um profundo suspiro de alívio.

Embora Laplace considerasse essa estabilidade como decorrente apenas de um arranjo fortuito, uma questão de boa sorte, muitos outros discordaram, julgando que ela fornecia uma prova clara da presença da mão de Deus. Thomson foi um deles. Ao mesmo tempo, observações do cometa de Encke pareciam indicar que há algum tipo de meio resistente no espaço interplanetário. Isso sugeriu a Thomson o esgotamento final de todo o sistema, o que combinava bem com outro trabalho no qual ele estava profundamente interessado e que reunia diversos aspectos de seus múltiplos interesses.

A linha de raciocínio de Kelvin

Desde seus dias de estudante, Thomson tinha um lugar especial reservado em seu coração para o assunto do calor. Ele sabia sem dúvida que Leibniz havia sido, antes, um importante defensor de uma Terra inicialmente em estado de fusão, e que Newton tinha estudado a perda de calor e o resfriamento dos corpos. Aos 18 anos de idade, Thomson já havia publicado um artigo sobre o “Movimento uniforme do calor em corpos sólidos homogêneos e sua conexão com a teoria matemática da eletricidade”. O título é significativo, pois mostra que ele não apenas estava interessado nos problemas do calor e seu movimento através de corpos sólidos, mas já estava tentando aplicar ao problema da condução de calor os métodos matemáticos que tinham se mostrado tão bem-sucedidos no tratamento dos movimentos mecânicos e da eletricidade. Para uma pessoa do tipo prático, o conhecimento matemático de Thomson era notável. Por exemplo, ele conhecia o trabalho de Joseph Fourier, que tinha feito alguns estudos matemáticos pioneiros sobre condução de calor. Usando o cálculo de Leibniz e Newton, Fourier havia encontrado uma maneira de determinar a qualquer instante a taxa de variação de temperatura ponto a ponto na superfície de um sólido, assim como a temperatura efetiva em qualquer ponto desse sólido. Thomson ficou fascinado com o método, e escreveu mais tarde que, embora fosse ainda um estudante na época, “em duas semanas eu já o tinha dominado, tinha percorrido de ponta a ponta”. Embora Thomson mais tarde viesse a se referir ao trabalho de Fourier como “um grande poema matemático”, este serviu a um propósito mais prosaico, pois ajudou a convencê-lo de que a Terra havia experimentado um contínuo resfriamento desde um estado inicialmente quente e fluido até sua presente condição. Algum tempo antes, o físico francês Sadi Carnot, influenciado pela enorme importância da máquina a vapor, tinha mostrado que calor e trabalho podem ser convertidos um no outro. Essa importante idéia recebeu, contudo, pouca atenção, até que Thomson, em 1849, examinou-a mais detalhadamente e deu um considerável passo à frente. Thomson estava convencido de que uma certa porção do calor fornecido não está disponível para a geração de trabalho, o que era um fator importante a considerar no projeto dessas máquinas. Mas, além disso, ele ampliou o foco de atenção de modo a incluir o papel desempenhado por esses fenômenos na ativi-

dade da Terra. Em sua cabeça, uma tentadora pista para a determinação da idade da Terra residia em uma observação comumente feita na escavação de incontáveis minas e poços: quanto mais fundo se cava, mais quente a Terra fica. Embora seja possível explicar o fenômeno de outras maneiras, Thomson acreditava que isso revela que o calor está fluindo para fora a partir do interior do planeta. Na concepção de Thomson, há uma fuga constante de energia térmica da Terra e, assim como na máquina a vapor, essa energia é basicamente irrecuperável. Uma tal dissipação de energia implicava um esgotamento de nossos sistemas naturais e tornou-se, num artigo que ele apresentou em 1851, a segunda lei da termodinâmica, um dos pilares mais sólidos do tratamento científico do calor e do trabalho. A primeira e a segunda lei afirmavam, aproximadamente: Nenhuma energia jamais se perde (primeira lei), mas Uma certa porção tampouco está disponível para converter-se em trabalho (segunda lei). A segunda lei proporcionou um salto quântico na compreensão científica de todo tipo de máquinas físicas. Ela mostrou finalmente, por exemplo, por que máquinas de movimento perpétuo são impossíveis. Ela também nos informa, disse Thomson, que máquinas naturais — tais como o Sol, a Terra, e outras partes do sistema solar — devem também esgotar-se um dia. Em seus cálculos, ele partiu da suposição de que a Terra fazia inicialmente parte do Sol, estava originalmente à mesma temperatura que este, e vem se resfriando de forma contínua e uniforme desde então. No início, Thomson usou seus cálculos para estimar por quanto tempo a Terra e o sistema solar poderiam permanecer aproximadamente em seu estado presente. Então, em um artigo de 1842, ele considerou a possibilidade de realizar o cálculo para trás em vez de para a frente. De repente, parecia possível calcular a idade da Terra com algum grau de exatidão científica. Reconhecendo certos pontos fracos em sua abordagem, Thomson começou a refiná-la e a desenvolver melhor suas idéias nos anos seguintes. Em 1846, no mesmo ano de sua designação para a Universidade de Glasgow, ele comunicou seu cálculo da idade da Terra com base em princípios físicos. Todos se sentaram e prestaram atenção. O tempo requerido para a Terra atingir as temperaturas presentes, ele afirmou, foi por volta de 100 milhões de anos. Admitindo que o número era na verdade uma aproximação, devido a suas suposições simplificadoras, ele ampliou o leque para algo entre 20 milhões e 400 milhões de anos.

O Debate

Mas se Thomson estivesse correto, diversas teorias de importância se tornariam então inexequíveis. Os geólogos, por exemplo, olhavam ao redor e viam uma Terra torturada, que clamava por uma história estendendo-se bilhões de anos para trás. A teoria da evolução de Darwin, ainda lutando para afirmar-se, também requeria uma pré-história muito mais longa do que a permitida pelos números de Thomson. Em consequência disso, Thomson jamais aceitou a teoria evolucionária.

Em nossa época, Thomson tem sido apontado pelos criacionistas como exemplo da aceitação de seu credo por um cientista de primeira linha. Mas fazer isso é deturpar em muito a história da ciência. Embora Thomson tenha rejeitado a evolução de Darwin, ele não foi de modo algum um criacionista; ou seja, ele não se alinhou com os literalismos religiosos, e suas objeções não eram de modo algum semelhantes aos ataques religiosos à evolução que continuam a infestar o mundo da ciência biológica.

Mesmo calcando aos pés muitas das idéias científicas dominantes, Thomson nunca se sentiu sozinho em sua posição. James Prescott Joule, que tinha feito um sólido trabalho ao demonstrar o equivalente mecânico do calor, foi um de seus defensores. Em uma carta a Thomson, datada de maio de 1861, Joule escreveu: “Estou contente por você ter-se disposto a desmascarar algumas das tolices que têm sido lançadas ao público ultimamente. Não que Darwin tenha tanta culpa, porque acredito que ele não tencionava publicar nenhuma teoria acabada, mas apenas queria apontar dificuldades a serem resolvidas ...Parece que hoje em dia o público não se interessa por nada que não seja chocante. Nada os agrada mais que ... filósofos que encontram uma ligação entre a humanidade e um macaco ou gorila.”

Por volta de 1869, Thomson tinha se alinhado com aqueles que ele denominava os “verdadeiros geólogos”, querendo dizer com isso, é claro, aqueles que concordavam com sua escala de tempo. Quanto aos outros geólogos, e os biólogos, eles precisavam de ajuda. Foi por isso que Thomas Henry Huxley, nove anos depois de seu famoso debate com o Bispo Wilberforce, viu-se mais uma vez atuando como advogado público. Embora seja lembrado hoje como o buldogue de

Darwin, Huxley era um cientista ilustre por seus próprios méritos, que já exercera a presidência da Royal Society de Londres, e é essa a razão pela qual foi escolhido para a batalha contra Thomson.

Desta vez, contudo, o debate transcorreu em uma arena mais científica — a Sociedade Geológica de Londres. Houve outra diferença importante: Huxley estava terçando armas com um adversário muito mais capaz: Thomson, que incidentalmente tinha assistido ao anterior debate Wilberforce-Huxley. (Deve-se notar que o debate verbal entre Huxley e Thomson não decidiu absolutamente nada. Ele prosseguiu por escrito nos anos seguintes e atraiu também muitas outras contribuições. Vamos extrair material de todas essas fontes neste capítulo.)

A compreensão que Thomson tinha do trabalho de Darwin, e os argumentos de Huxley no debate, levaram-nos para águas bastante profundas — a saber, as origens da vida na Terra. A abordagem de Huxley pode ser resumida em seu discurso presidencial à Associação Britânica para o Progresso da Ciência (BAAS), no qual afirmou, “se me fosse dado olhar para além do abismo do tempo geologicamente registrado, para o período ainda mais remoto no qual a Terra se encontrava em condições físicas e químicas que ela é tão incapaz de ver novamente quanto um homem de chamar de volta sua infância, eu esperaria ser testemunha da evolução do protoplasma vivo a partir da matéria não viva”.

Thomson precipitou-se sobre essa consideração e utilizou-a em sua rejeição da teoria evolucionária; ele sustentou que a ciência nos havia dado “um vasto número de provas indutivas contra a hipótese da geração espontânea”. Isso foi um pouco injusto, pois a teoria evolucionária trata de muitas outras coisas além dos primeiros inícios da vida. Não obstante, a abordagem de Huxley às origens da vida foi uma declaração notável e sensata, que poderia se manter de pé ainda hoje.

Mas Thomson não queria saber de nada disso, e insistiu em que a vida deveria provir da vida. Sua explicação soa à primeira vista como aquela que é mais científica: “Se se puder encontrar uma solução provável, consistente com o curso ordinário da natureza, não devemos invocar um ato anormal de um poder criativo. O único outro caminho que ele podia imaginar era que “haveria incontáveis rochas meteóricas portadoras de sementes movendo-se através do espaço”, e que algumas dessas, atingindo a Terra, proporcionaram os começos necessários da

vida.

Huxley, em uma carta a um colega datada de 23 de agosto de 1871, respondeu: “Gosto muito do que vejo em Thomson. Ele é, mentalmente, como o cenário que vejo de minha janela, grande e maciço, mas muito carregado de névoa — o que favorece seu caráter pitoresco, mas não sua inteligibilidade”. Huxley também perguntou a outro colega, Joseph Dalton Hooker (um amigo de Darwin), “Que pensa você da criação de Thomson? ... Deus Todo-poderoso sentado como um garoto vadio à beira da praia e lançando aerólitos (com gérmenes), errando na maioria das vezes, mas ocasionalmente acertando um planeta.” Outra estocada contra Thomson veio na forma de versinhos numa publicação local:

De mundo a mundo Rodopiaram as sementes
Das quais surgiu o Jumento Britânico

(O Jumento Britânico [the British Ass] é aqui o apelido irreverente dado à BAAS, Associação Britânica para o progresso da ciência, na qual tanto Thomson como Huxley eram muito ativos.)

É claro que a afirmação de Thomson sobre meteoritos portadores de vida apenas faz recuar o problema; na verdade, não estamos hoje muito mais avançados em nosso entendimento da questão. Mesmo assim, é muito agradável ler em comunicações científicas recentes que uma equipe da Universidade de Stanford encontrou o que podem ser vestígios de vida antiga em um meteorito marciano que atingiu a Terra.

Na época dos debates, entretanto, Darwin e suas tropas estavam ainda sofrendo a pressão do trabalho de Thomson. Um ajuste que eles tentaram foi encurtar o tempo necessário para a evolução fazer seu trabalho. George Darwin, um dos filhos de Charles, que tinha se tornado um respeitável cientista por seus próprios méritos — e tinha anteriormente trabalhado com Thomson — tentou defender seu pai. Em uma carta a Thomson datada de 1878, ele escreveu: “Não consigo ver por que seria correta sua observação de que umas poucas centenas de milhões de anos não são suficientes para permitir a transmutação das espécies pela seleção natural. Quais são os possíveis dados que alguém poderia ter sobre a velocidade na qual

ela atua ou atuou?”.

Embora todos os oponentes de Thomson tenham aceitado a exatidão de seus cálculos, alguns sentiram que havia um outro problema que não estava sendo tratado adequadamente — as suposições eram demasiadas e os dados científicos sólidos não eram suficientes. Huxley escreveu mais tarde, “a matemática pode ser comparada a um moinho de excelente manufatura, que mói o material tão finamente quanto se queira, mas, não obstante, o que você obtém depende do que você põe lá dentro; e assim como o melhor moinho do mundo não irá produzir farinha de trigo a partir de vagem de ervilha, do mesmo modo páginas de fórmulas não produzirão um resultado definido a partir de dados vagos”. E ainda, “este parece ser um dos muitos casos em que a reconhecida exatidão dos procedimentos matemáticos consegue lançar [sobre o assunto] uma aparência de autoridade que é completamente inadmissível”.

Outro crítico, Fleeming Jenkin, sugeriu que um dos cálculos de Thomson “lembra muito aquilo que se conhece entre engenheiros como avaliar a metade e multiplicar por dois.” Suas objeções, que eram completamente válidas, tiveram contudo pouco efeito. Infelizmente eles tinham perdido de vista o ponto central de Thomson, que era que, se um limite qualquer fosse imposto à idade da Terra, o uniformitarismo estaria refutado. Thomson tinha o forte sentimento de que, enquanto os geólogos apoiassem o uniformitarismo, a geologia permaneceria uma ciência inexata, dependente de hipóteses e palpites.

Quanto ao debate propriamente dito, ele conseguira — como o debate anterior entre Huxley e Wilberforce — trazer a questão da idade da Terra ao foro público e gerar um grande interesse entre as pessoas. O resultado, no entanto, foi que tanto o apoio público como científico deslocaram-se ainda mais para o lado de Thomson.

Em 1894 — dois anos após a ascensão de Thomson à nobreza, como Lorde Kelvin —, Lorde Salisbury, presidente da BAAS, ainda sustentava que os números de Kelvin permaneciam como uma das “maiores objeções” à evolução darwiniana. Os geólogos e biólogos, ele acreditava, tinham “esbanjado seus milhões de anos

com a mão aberta do herdeiro pródigo que compensa, com a extravagância presente, a contenção forçada de sua juventude”.

Até mesmo Mark Twain teve sua participação. Mais ou menos por volta da virada do século, em um pequeno esboço chamado “Terá o mundo sido feito para o homem?”, ele escreveu: ”Alguns dos maiores cientistas, decifrando cuidadosamente as evidências fornecidas pela geologia, chegaram à convicção de que nosso mundo é prodigiosamente velho, e pode ser que eles estejam certos, mas Lorde Kelvin ... sente-se seguro de que ele não é tão velho como eles pensam. Como Lorde Kelvin é a autoridade máxima em ciência que hoje vive, penso que devemos nos render a ele e aceitar sua concepção”.

Embora possamos imaginar muito bem as frustrações dos oponentes de Thomson, e a despeito do que hoje pode soar como uma linguagem demasiado forte, os contendores conseguiram de algum modo coexistir e manter relações razoavelmente boas, até o final do século.

Contudo, à medida que o século se aproximava do fim, alguma coisa começou a acontecer. Até mesmo Kelvin, como ele agora se chamava, começou a se perguntar se não teria sido muito limitado em sua perspectiva. Por volta de 1894, ele estava pensando que talvez 4 bilhões de anos poderiam constituir um limite superior mais apropriado para a idade da Terra. A visão costumeira de Kelvin como um homem absolutamente inflexível pode ser demasiado severa. Mas então isso já não importava muito, pois os números iniciais tinham endurecido como pedra; e os cálculos de Kelvin sido usados por 30 anos como exemplos clássicos em aulas de física por estudantes de todo o mundo.

Sabemos hoje que os geólogos e os biólogos estavam corretos em suas alegações de uma Terra muito mais antiga do que Kelvin tinha inicialmente calculado. E irônico, contudo, que tenham sido necessários métodos inteiramente novos, desenvolvidos por físicos, para fornecer as provas de que ele estava errado. O que Kelvin não sabia, e que ninguém em sua época podia saber, é que há, na verdade, uma imensa fonte adicional de calor no interior da Terra.

Novas Descobertas

O começo do fim para os cálculos de Kelvin veio com a descoberta da radioatividade pelo físico francês Antoine Henri Becquerel em 1896. Embora alguns anos mais tenham se passado antes que o processo se tornasse claro, Pierre Curie e Albert Laborde mostraram em 1903 que, graças a essa radioatividade, o elemento rádio tinha a espantosa capacidade de irradiar calor continuamente. Como resultado, o material não se esfriava até a temperatura ambiente mais fria, que é como a maioria dos objetos quentes se comporta.

Descobriu-se, além disso, que os vários elementos radioativos não eram elementos independentes, mas podiam, de algum modo, descender uns dos outros. O rádio, por exemplo, descende do urânio, e o chumbo é o produto final estável da desintegração do urânio. Em 1907, Bertram Borden Boltwood, um químico e físico americano, sugeriu que, dado que conhecemos a velocidade de desintegração do minério de urânio em chumbo, se determinarmos a quantidade de chumbo em uma amostra particular de minério de urânio, será possível determinar a idade das rochas na qual o minério foi encontrado. Quanto maior for a porcentagem de chumbo no minério, mais antiga será a rocha.

O desenvolvimento subsequente de tais métodos produziu o conjunto muito mais acurado de datas de que dispomos hoje. A data mais antiga para uma amostra de rocha encontrada na Terra está por volta de 4,3 bilhões de anos. Parece sensato assumir que a Terra é mais velha que as mais velhas amostras de rocha. Quão mais velha? Evidências provenientes de meteoritos sugerem uma idade para a formação do sistema solar de mais ou menos 4,6 bilhões de anos. Pesquisas recentes usando outros equipamentos, como lasers e sondas de íons, têm até agora confirmado os cálculos anteriores.

Outras descobertas trouxeram à luz fatos sobre a Terra dos quais mal se poderia suspeitar nos dias de Kelvin. Sabemos, por exemplo, que o calor proveniente de diversas fontes — energia gravitacional e bombardeio por meteoritos, assim como radioatividade interna — causou e tem mantido um estado de fusão parcial

no interior da Terra. O resultado é um poderoso processo de convecção, uma mistura e sublevação de rocha fundida, além da condução de calor de dentro para fora com a qual Kelvin trabalhou. Houve também um processo de segregação química que ele não poderia ter conhecido. O resultado final de todos esses processos, que prosseguem ainda hoje, é uma fina crosta exterior de rocha, um manto rochoso de maior densidade, e um núcleo ainda mais pesado de ferro e níquel.

Além disso, os poderosos processos de convecção exercem, sobre as várias partes de nosso planeta, forças enormes que dobram, encobrem, rompem e levantam grandes áreas da superfície terrestre. O resultado é que não é provável que nenhuma das rochas mais primitivas tenha sobrevivido, e por essa razão nem mesmo as mais velhas das rochas datadas podem contar toda a história.

Mais recentemente, novas pesquisas vieram à luz, sugerindo que há ainda importantes forças adicionais em operação, que podem distorcer mais ainda os resultados científicos. Debra S. Stakes, uma geoquímica do Instituto de Pesquisa do Aquário da Baía de Monterey, afirma que “a maioria dos processos geológicos em seus estágios mais fundamentais poderiam ser biologicamente mediados, o que desafia nossos modelos de termodinâmica inorgânica em reações propulsoras. Micróbios têm sido encontrados vivendo a mais de quatro quilômetros de profundidade, em uma temperatura de 110 graus Celsius. A massa cumulativa desses organismos pode exceder a de toda matéria inorgânica que compõe nosso planeta. Parece mais e mais que micróbios vivendo a quilômetros de profundidade na crosta terrestre desempenharam um papel de importância, talvez mesmo o papel dominante, na criação e arranjo das rochas, solos, metais e minerais, assim como dos mares e gases”. Em outras palavras, temos ainda muito a aprender sobre as origens e as atividades da Terra.

Referências Bibliográficas

- [1] D. A. Young e R. F. Stearley, *The Bible, Rocks and Time: Geological evidence for the Age of the Earth*, IVP Academic, 2008
- [2] J.D. Burchfield: *Lord Kelvin nad the Age of the Earth* (New York: Science History Publications), 1975.
- [3] L. Badash: *The Age-of-the-Earth Debate*, Sci. Am. (262) 90-96 (August) 1989.
- [4] H. Hellman. *Grandes debates da Ciência. Dez das maiores contendas de todos os tempos.* cap-6, pp 141–158 Trad. J.O.A.Marques,Unesp,1999 (Tradução do original em inglês Great Feuds in Science. Ten of the liveliest disputes ever,1998)
- [5] A. Stinner: *Calculating the age of the Earth and the Sun Phys. Edu.* **37(4)** 296, 2002.
- [6] G. B. Dalrymple: *The Age of the Earth* (Stanford: Stanford University Press), 1991.
- [7] D. Lindley: *Degrees Kelvin* (Washington: Joseph Henry Press), 2004.
- [8] J. H. Popp: *Geologia Geral* Ltc, 2010
- [9] M. B. Soares: *Livro digital de paleontologia: a paleontologia na sala de aula.* Departamento de Paleontologia e Estratigrafia Universidade Federal do Rio Grande do Sul Disponível em: <http://www.ufrgs.br/paleodigital>. Acesso em: nov. 2011.
- [10] R. A. Martins: *Como Becquerel não descobriu a radiatividade.* Cad. Cat. Ens. Fís., Florianópolis, 7 (Número Especial): 27-45 , jun. 1990.
- [11] R. A. Martins: *Hipóteses e interpretação experimental: a conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel e Thompson.*

- Ciênc. educ. (Bauru) [online]. 2004, vol.10, n.3, pp. 501-516. ISSN 1516-7313.
- [12] J. M. Amabis e G. R. Martho: *Biologia das populações*. Ed. Moderna Ltda, vol3, 1997
- [13] C. M. Silva: *A Evolução dos Invertebrados, a (Paleo)Biodiversidade e a Geodiversidade*. In MATEUS, A. (coord.). Terra e Vida: as origens da diversidade. Lisboa: Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, pp. 4-10. 2008.
- [14] C. M. Silva: *Darwin, a geologia e o paradoxo da biodiversidade*. Disponível em: <http://paleoviva.fc.ul.pt/cmsbibliografia/cms081.pdf>. acesso: junho de 2011
- [15] A. C. Tort e F. Nogarol: *Another look at Helmholtz' model for the gravitational contraction of the Sun*, Eur. J. Phys. 32 (2011) 1679-1685.
- [16] V.D. Barger e M.G. Olsson; 1995 *Classical Mechanics: A Modern Perspective* 2nd ed, (New York: McGraw-Hill).
- [17] M. Schwarzschild 1958 *Structure and Evolution of the Stars* (New York: Dover).
- [18] R. Kippenhahn and A. Weigart ; 1990 *Stellar Structure and Evolution* (Berlin: Springer-Verlag).
- [19] W. Thomson (Lord Kelvin): *On the Age of the Sun's Heat*, Macmillan's Magazine **5** (March 5) 388-393, 1862.
- [20] A. C. Tort e F. Nogarol: *Reverendo o debate sobre a idade da Terra*, submetido para publicação na Revista Brasileira de Ensino de Física.
- [21] J. B. Fourier: *Théorie analytique de la chaleur*, (Paris: Académie des Sciences) 1822.
- [22] H. Helmholtz, 1856 *Philos. Mag.* **11** 489-578.
- [23] W.Thomson: *On the secular cooling of the Earth*, Trans. R. Soc. Edinburgh **23** 157-170, 1863.
- [24] E. Kreyszig 1993 *Advanced Engineering*, 7th edn, (New York: John Wiley).
- [25] J. Perry *On the age of the Earth*, Nature **51** 224-227, 1895.
- [26] J. Perry *On the age of the Earth*, Nature **51** 341-342, 1895.

- [27] J. Perry *On the age of the Earth*, Nature **51** 582-583, 1895.
- [28] P. England, P. Molnar, F. Richter: *John Perry's neglected critique of Kelvin's age for the Earth: a missed opportunity in geodynamics* , GSA Today **17** 4-9 2007.
- [29] F. D. Stacey: *Physics of the Earth*. Brookfield Press, Brisbane, Australia, 1992, pp 1-513.
- [30] G. B. Dalrymple, 1991. *The Age of the Earth*. California. Stanford University Press, ISBN 0-8047-1569-6.
- [31] G. Faure: *Principles of Isotope Geology (Second Edition)*. New York: John Wiley and Sons, ISBN 0-471-86412-9.
- [32] H. Brown. *The Age of the Solar System*. Scientific American 4 (196): 81-94. Abril, 1957
- [33] V. T. S. Martins e M. Babinski: *Geocronologia: O tempo registrado nas rochas*. Disponível em: <http://www.igc.usp.br/index.php?id=304>. Acesso em: set. 2011.
- [34] C. D. R. Carneiro; A. M. P. Mizusaki; F.F.M. Almeida: *A determinação da idade das rochas*. *Terra e Didática*, 1(1):6-35. www.ige.unicamp.br/terraedidatica/
- [35] D. P. Ausubel, (2000). "The Acquisition and Retention of Knowledge: A Cognitive View- Kluwer Academic Publishers - ISBN: 0792365054
- [36] BRASIL. Leis e Decretos. Lei de diretrizes e bases da educação nacional: lei n.9.394/1996. Brasília, 1996. Disponível em: www.portal.mec.gov.br/arquivos/pdf/ldb.pdf . Acesso em 04 out. 2011.
- [37] BRASIL. Secretaria de Educação Fundamental. Parâmetros curriculares nacionais: ciências naturais. Brasília, 1997. Disponível em: www.portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/. Acesso em: 04 out. 2011.
- [38] BRASIL. PCN+ Ensino Médio Orientações Educacionais Complementares aos PCNs /Física Disponível em: www.sbfisica.org.br/arquivos/PCNFIS.pdf. Acesso em: 04 out. 2011.
- [39] S. Toulmin *Os usos do argumento*. Trad. R. Guarany, Martins Fontes, São Paulo, 2001. (Tradução do original inglês *The uses of argument*, Cambridge: Cambridge University Press, 1958).

- [40] J. D. Novak e D. B. Gown: *Aprender a aprender*. (2a ed.), Lisboa: Plátano Edições Técnicas. 1999
- [41] M. A. Moreira e E. Masini: *Aprendizagem Significativa - A teoria de David Ausubel*. São Paulo: Editora Moraes. 1982.
- [42] M. A. Moreira: *Uma abordagem cognitivista ao ensino de física*. Porto Alegre: Editora da universidade, 1983
- [43] Tavres, J. I. Alarcão: *Desenvolvimento, aprendizagem, supervisão. O encorajamento do professor como um fator de desenvolvimento e aprendizagem*. Em Cruz, J.F., L.S. Almeida e O.F. Gonçalves (eds.) *Intervenção Psicológica na Educação*, Porto, A.P.L.P., 219-226. 1985.
- [44] A. M. P. Carvalho: *Ensino e aprendizagem de Ciências: Referenciais Teórico e Dados Empíricos das sequências de Ensino Investigativas*. Publicado em: LONGHINI, Marcos Daniel (org.) *O uno e o diverso na educação*. Uberlândia/MG: EDUFU, 2011
- [45] L. Rivard e S. Straw: *The effect of talk and writing on learning science: an exploratory study*. *Sci. Educ.* 2000;84:566-593.
- [46] A. Arroio e M. Giordan: *O vídeo educativo: aspectos da organização do ensino*. *Química Nova na Escola*, n. 24, p. 8-11, nov. 2006.
- [47] M. A. A. Monteiro e O. P. B. Teixeira: *O ensino de Física nas séries iniciais do ensino fundamental: um estudo das influências das experiências docentes em sua prática em sala de aula*. *Investigações em Ensino de Ciências*, v.9, n.1, 2004a.
- [48] M.C.V.M. Capecchi e A. M. P. Carvalho: *Interações discursivas na construção de explicações para fenômenos físicos em sala de aula*. *Atas do VII EPEF*, Florianópolis SC, 2000.
- [49] Jiménez Aleixandre, M.P.; Pérez, V. A.; CASTRO, C.R. *Argumentación en el laboratorio de Física*. *Atas do VI EPEF*, Florianópolis SC, 1998.
- [50] D. Kuhn: *Science as argument: Implications for teaching and learning scientific thinking*. *Science Education*, 77, p. 319-337, 1993.
- [51] I. Asimov: *111 questões sobre a terra e o espaço*. Trad. I. Moriya, Círculo do Livro, São Paulo, 1992. (Tradução do original inglês Asimov's Guide to Earth and Space, 1991)

- [52] M. Abramowitz e I. Stegun (editores): *Handbook of Mathematical Functions* (New York: Dover), 1965.