

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS
ATMOSFÉRICAS

**O CONCEITO DE ESPAÇO E A EVOLUÇÃO DAS DISTÂNCIAS
ASTRONÔMICAS:**

CONSTRUÇÃO DE UM MATERIAL DIDÁTICO

Danilo Miranda Rodrigues

São Paulo

2017

O CONCEITO DE ESPAÇO E A EVOLUÇÃO DAS DISTÂNCIAS

ASTRONÔMICAS:

CONSTRUÇÃO DE UM MATERIAL DIDÁTICO

“VERSÃO CORRIGIDA. O original encontra-se disponível na unidade”

Danilo Miranda Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Astronomia, da Universidade de São Paulo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Astronomia.

Área de Concentração:
História da Astronomia e da Cosmologia.

Orientador: Prof. Dr.
Ramachrisna Teixeira

São Paulo

2017

Dedico este trabalho a todos os professores, mestres e divulgadores de ciências por espalharem a semente do encantamento e da admiração em uma sociedade que se esqueceu do valor da educação.

Em especial, às memórias de Carl Sagan e Isaac Asimov, ainda vivos em seus livros, que por primeiro me ensinaram a contemplar a grandeza do Universo e a pequenez da raça humana.

“Onde estiver o teu tesouro,
ali estará o teu coração”

(Mt 6:21)

Agradecimentos

São muitas pessoas a quem devo agradecer e que, de certa forma, são coautores deste trabalho. Penso que para citar todos seria necessária uma citação muito mais longa e, por isso, me desculpo de antemão. Primeiramente devo agradecer à minha esposa Denise por ter convivido comigo durante o árduo processo de produção deste trabalho e ter suportado tantas noites de trabalho às claras.

Agradeço a todos gestores, diretores e coordenadores com quem convivi durante minha vida profissional. Todos eles, de alguma forma, exerceram influência sobre minhas concepções pedagógicas e, conseqüentemente, sobre este trabalho. Muitos se mostraram solícitos acerca de minhas ausências durante os anos para participar de congressos e simpósios de Astronomia. De modo particular agradeço à senhora Myriam Tricate, coordenadora nacional do Projeto das Escolas Associadas da UNESCO no Brasil, não apenas pelos anos de convívio, mas particularmente pelo apoio financeiro à minha participação na assembleia geral da International Astronomical Union, no ano de 2015, onde pude apresentar parte deste trabalho, enquanto encontrava-se em sua inicial de desenvolvimento. Também sou grato à Sociedade Astronômica Brasileira por ter me acolhido como membro enquanto desenvolvemos esta pesquisa e pelos dois anos consecutivos em que suas portas se encontraram abertas para minhas comunicações orais, recebidas com entusiasmo e gestos incentivo por parte da maioria de seus membros.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, deixo meu orgulho e gratidão por ter sido, e me sentido, parte desta comunidade. Muitos foram os professores e colegas de turma que me ensinaram e inspiraram. De modo particular, faço questão de citar o professor Amâncio Friaça, certamente uma das pessoas mais sábias e cultas com quem já tive aulas. Suas reflexões sobre Astrobiologia moldaram profundamente muitas de minhas concepções e de meus ideais. Acredito que, de todo este ciclo que se encerra, nada me trouxe maior satisfação do que ter sido orientando do professor Ramachrisna Teixeira, a quem dedico minha profunda gratidão, durante a graduação foi meu professor de “Astronomia de Posição” e, durante esta orientação, mais do que aos muitos conceitos ensinados em nossas conversas no observatório Abrahão de Moraes, devo-lhe agradecer por ter acreditado neste trabalho enquanto não passava de um projeto e por ter se tornado verdadeiramente um amigo. Também não posso deixar de agradecer à professora Izabel, querida amiga pela leitura e do texto e constante apoio.

Por fim, agradeço a Deus pois, por razões que transcendem a ciência, tenho certeza que guia e sustenta constantemente meus passos.

Então, eis que Deus respondeu a Jó do meio de um tufão e indagou:

“Quem é este que busca turvar os meus desígnios com palavras sem conhecimento?

Agora, pois, prepara-te como homem; porquanto Eu te questionarei, e tu me responderás!

Onde estavas tu, quando Eu lançava os alicerces da terra? Conta-me, se é que tens verdadeiro entendimento?

Quem determinou os limites das dimensões da terra? Talvez tenhas essa resposta! Ou quem estendeu sobre a face da terra o cordel, a linha de medir?

E quanto aos seus fundamentos, sobre o que foram assentados? E quem colocou a angular, a pedra fundamental.

E tu, Jó, já deste ordens à manhã ou determinaste à alvorada o seu lugar, a fim de que ela apanhasse a terra pelas pontas e sacudisse dela os perversos?

Jó, já foste até as nascentes do mar, ou já passeaste pelas obscuras profundezas do oceano?

As portas do Sheol, do mundo dos mortos, já lhe foram mostradas? Observaste os portais das densas trevas da morte?

Tens alguma ideia do quanto são imensas as áreas de toda a terra? Dizes-me, se de fato sabes algo sobre tudo isso?

E mais, como se vai ao lugar onde habita a luz? E onde se localiza a residência das trevas? Conseguiria tu conduzi-las cada qual ao devido lugar a que pertencem? Conheces o caminho para a moradia delas? Ora, por certo tu o sabes bem, afinal já eras nascido e os teus dias são numerosos!

Porventura a chuva tem pai? Quem é o genitor das gotas de orvalho?

Podes amarrar as maravilhosas constelações estelares; atar a Plêiade ou soltar os laços de Órion?

Podes fazer surgir no tempo certo a Alva, a estrela da manhã, ou guiar a Ursa e suas estrelas filhas?

Conheces as leis do Universo ou podes estabelecer o seu domínio sobre a terra?

Porventura és tu que envias os relâmpagos, e eles te respondem: ‘Eis que aqui estamos’?”

(Trechos do livro de Jó- capítulo 38)

RESUMO

O conceito de espaço é um dos mais fundamentais da natureza e tem sido, ao longo da história da ciência, objeto de estudo de diversos filósofos, físicos e também astrônomos. Do ponto de vista epistemológico, este conceito foi de grande importância para algumas das mais famosas visões cosmológicas: desde a concepção aristotélica, passando pela gravitação newtoniana até a formulação da teoria geral da relatividade. Por outro lado, reconstruir a evolução das medidas de distâncias astronômicas é uma forma de abordar a própria história da Astronomia. Essa história é repleta de construções, desconstruções e mudanças de paradigmas. Tal dinamismo é um elemento instigante e motivador, mas estranhamente não se reflete, na maioria dos casos, nos livros didáticos e nas aulas de ciências como um todo. Este trabalho consiste na elaboração e na aplicação de um material didático composto por atividades e oficinas que, utilizando as muitas formas de abordar pedagogicamente o conceito de espaço, buscam estimular alunos e até mesmo professores a refletir sobre como nos relacionamos com a natureza por meio da ciência. As atividades, construídas e aplicadas, ao longo de dois anos, a alunos do nono ano do Ensino Fundamental e do primeiro ano do Ensino Médio, foram divididas segundo dois objetivos específicos. As primeiras exploraram algumas questões ainda em aberto estudadas pela física de partículas e a grande controvérsia existente durante séculos que marcou a transição da visão Geocêntrica para a Heliocêntrica no século XVI. Tais questões foram elaboradas no sentido de ressaltar o quão dinâmico é o nosso entendimento sobre a natureza. A segunda parte do trabalho de campo consistiu na elaboração e na aplicação de oficinas de determinação de distâncias astronômicas por métodos consagrados ao longo da história da ciência. O relato dos alunos e a avaliação dos resultados das oficinas nos mostraram que, de fato, os famosos experimentos reconstruídos pelos alunos durante as oficinas levaram a resultados próximos dos valores conhecidos pela literatura e, muito mais importante, revelaram o caráter dinâmico e evolutivo do conhecimento científico.

Palavras-chave: Conceito de espaço, ensino, ciências, história da Astronomia.

ABSTRACT

The concept of space is one of the most fundamental of the nature and it has been, throughout the history of science, an object of study by several philosophers, physicists and astronomers. From the epistemological point of view, this concept has been of great importance for some of the most famous cosmological visions: from the Aristotelian conception, through Newtonian gravitation until the formulation of the General Theory of Relativity. On the other hand, reconstructing the evolution of measurements of astronomical distances is a way of approaching the history of astronomy itself. This story is full of constructions, deconstructions and paradigmatic changes. Such dynamism, despite being an exciting and motivating element, has not been reflected in textbooks and in science classes as a whole. This work consists in the elaboration and application of a didactic material composed by activities and workshops that, considering the plenty of approaches for the concept of space in the pedagogical context, seeks to stimulate students and even teachers to reflect on how we relate to nature through science. The activities were prepared and applied over two years to students from the last year of elementary school, and first year in high school, those activities were grouped according to two specific objectives. The first one intended to explore some “open questions” studied by particle physics and the great controversy over the centuries that marked the transition from the Geocentric to the Heliocentric view in the sixteenth century. Both questions wished to emphasize how dynamic our understanding of nature is. The second part of the fieldwork consisted of the elaboration and application of workshops to determine some astronomical distances by methods well established throughout the history of science. The students' reports and the evaluation of the workshops' results showed that, in fact, the famous experiments reconstructed by them during the workshops led to results close to the values known by the specific literature and, more importantly, revealed the dynamic and evolutionary character of the scientific knowledge.

Keywords: concept of space, teaching, science, history of Astronomy

Sumário

Introdução e apresentação.....	7
1. Diversidade de concepções sobre o espaço físico.....	12
1.1 O espaço newtoniano enquanto “palco”	13
1.2 Considerações Pré-Newtonianas sobre o espaço Físico.....	15
1.2.1 O valor pedagógico da ciência Aristotélica.....	17
1.2.2. Um curioso paradoxo acerca do espaço físico.....	19
1.3 O início do século XX traz um novo paradigma.....	21
1.4 Partículas Elementares e o vácuo quântico.....	24
2: A evolução das medidas do espaço enquanto expansão de horizontes.....	27
2.1 A primeira grande medida astronômica,,.....	28
2.2 A escala do Sistema Solar.....	31
2.3 Além do Sistema Solar.....	35
3: Algumas considerações epistemológicas	41
3.1 Problematizando o conceito de espaço.....	41
3.2 Primeiro Diálogo.....	45
3.3 Segundo Diálogo.....	47
3.4 O anarquismo epistemológico de Feyerabend.....	50
3.5 Perspectivas Futuras.....	54
4. Construção de oficinas sobre o espaço e medidas astronômicas.....	56
4.1 O contexto da proposta pedagógica.....	56
4.2 Oficina Inaugura: Nosso lugar no Universo.....	58
4.2.1 Aplicação da oficina e resultados	60
4.3 Tópicos de Astronomia relacionados com a experiência.....	62

4.4 Determinação da medida da unidade astronômica	63
4.4.1 Primeira Aula: Cálculos Introdutórios.....	63
4.4.2 Utilizando o software Stellarium.....	65
4.4.3 Terceira Parte: Determinando o valor da Unidade Astronômica.....	67
4.5.1 Análise de resultados.....	74
4.5.2 A relação Período-Luminosidade.....	75
Considerações finais.....	80
Referências Bibliográficas.....	82
Créditos de Figuras.....	85
Anexo I: Esboço inicial do “caderno do professor”	86
Anexo II: Valores do módulo de distância de algumas estrelas.....	124
Anexo III: Variação da magnitude aparente da estrela X-Cygnii em função do tempo.....	126
Anexo IV: Cálculo da idade do Universo considerando geometria plana.....	127

INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO

Por quais motivos este trabalho se propõe a explorar o conceito de espaço no ensino de Astronomia? Este certamente não está entre os temas mais abordados pelas revistas de Astronomia, nem mesmo pelos livros didáticos e paradidáticos relacionados à educação formal, também não figura entre os assuntos de maior interesse direto pelo público em geral. Sendo assim, torna-se imperativo justificar a escolha de tão incomum e esquecido tema, por parte daqueles que lidam direta ou indiretamente com o ensino de ciências.

Nas últimas décadas, diversas propostas de inserção de novos conteúdos no ensino de ciências surgiram no Brasil e também no exterior. Tais propostas são fruto de uma necessária reflexão acerca dos conteúdos curriculares e do papel da escola na sociedade contemporânea. Algumas perguntas surgem nos ambientes acadêmicos e também escolares: ensinar o quê? Ensinar para quê? No que tange ao ensino, os componentes curriculares deveriam propor uma postura reflexiva por parte dos estudantes (Brasil, 2002), apresentando as ciências enquanto empreendimentos humanos, compostas por momentos de crises epistemológicas, revoluções científicas e mudanças de paradigmas, de modo que não sejam interpretadas como um corpo de conhecimentos completo e estático.

Por outro lado, existem diversos fatores que desestimulam o interesse dos alunos pela Ciência enquanto componente curricular, entre os quais podemos citar a descrição caricaturada e idealizada de seus famosos personagens do passado, cujas contribuições são apresentadas de forma a não incentivar os postulantes a se tornarem pesquisadores e cientistas que poderiam vir a fornecer concretas contribuições a esse ramo do conhecimento (Martins, 2000). A inserção de tópicos de cosmologia no Ensino Médio e até mesmo Fundamental pode exercer importante papel transformador, ao apresentar uma Astronomia mais dinâmica nas escolas, onde uma postura reflexiva dos alunos se faz necessária e a prática escolar não pode ser interpretada como um simples depósito de verdades, mas antes um diálogo sobre a relação do ser humano com a natureza. Nesse contexto, mais importante que a memorização de conceitos ou a operação de relações matemáticas é a apresentação e a reflexão sobre as diversas interpretações acerca dos conceitos fundamentais da natureza. Portanto, filosofia e história da natureza não podem deixar de estar presentes nesta discussão. Tal inserção é inclusive proposta pelos PCN de Astronomia, pois, no Ensino Médio, **“valorizam-se mais os conhecimentos abstratos, priorizando as rupturas no processo de desenvolvimento das Ciências,**

além da compreensão e a utilização dos conhecimentos científicos”.
(Brasil, 2002)

Em minha prática docente, pude observar a constante preocupação dos alunos com as definições operacionais dos objetos de estudo da Ciência. O atual currículo de Física para o Ensino Médio, contemplado pelos PCN, concentra-se principalmente nos temas desenvolvidos entre os séculos XVI e XVIII, em que a conhecida “Mecânica Newtoniana” exerceu papel pioneiro e paradigmático, uma vez que, no trabalho original de Newton podemos inferir o primado das noções de espaço e tempo no desenvolvimento de suas conclusões ulteriores. Não podemos deixar de perceber que, em sua obra-prima, Newton não apresenta uma definição precisa desses dois conceitos, mas apenas noções intuitivas. Tais noções foram fortemente repensadas com o advento da Teoria da Relatividade e da Cosmologia contemporânea, posteriormente desenvolvida como uma de suas importantes aplicações conceituais. Por outro lado, nas salas de aula, esses conceitos newtonianos encontram-se aparentemente enraizados no imaginário coletivo, assim como os subseqüentes tópicos curriculares, de forma que voltamos ao cenário descrito inicialmente, de uma Ciência completa e desinteressante.

Desde a primeira vez que li sua obra, fui muito influenciado pela epistemologia de Thomas S. Kuhn, cujo trabalho de maior repercussão delinea um processo cíclico pelo qual a Ciência passa em seu processo de evolução. É tema central o conceito de Paradigma, já que apresenta, em suas palavras, que “Considero ‘paradigmas’ as realizações científicas universalmente reconhecidas que, durante algum tempo, fornecem problemas e soluções modelares para uma comunidade de praticantes de uma Ciência” (Kuhn, 1976, pag.13). Dessa forma, paradigmas são teorias científicas aceitas quase sem restrições por seus praticantes. Neste período, o papel dos cientistas é o de aplicar tais paradigmas vigentes a um conjunto sempre novo de problemas que surgem em suas atividades. Essa prática de melhoria e aperfeiçoamento de um modelo teórico aceito é chamada pelo autor de Ciência Normal. Em certos contextos, porém, surgem anomalias entre os dados experimentais e o então Paradigma, o que nos leva a citar novamente sua obra original sobre tal período:

“Necessitamos estudar detalhadamente o modo pelo qual as anomalias ou violações de expectativa atraem a crescente atenção de uma comunidade científica, bem como a maneira pela qual o fracasso repetido na tentativa de ajustar uma anomalia pode induzir à emergência de uma crise”. (Kuhn, 1976, pag.14)

Quando o paradigma não se mostra capaz de solucionar tal anomalia, a Ciência entra em um período de crise, em que surgem novas teorias que

reivindicam para si a condição de não apenas resolver a conhecida anomalia, como também de explicar outras que ainda surgirão. Entre tais teorias, uma acaba emergindo com sucesso dos períodos de crise, tornando-se um novo paradigma, que passará novamente por períodos de Ciência Normal e de crise.

Percebemos rapidamente como a concepção epistemológica de Kuhn salienta o dinamismo presente da Ciência e, conseqüentemente, é valiosa para a educação. Outras visões epistemológicas também, se apresentadas nas salas de aula, podem contribuir para um exercício de maior reflexão sobre as leis da natureza. Buscamos, portanto, um tema que possa ser ricamente explorado dentro deste viés.

O conceito de espaço tem sido objeto de estudo não apenas da Ciência, mas também da Filosofia, desde a antiguidade, e, seguindo na linguagem utilizada por Thomas Kuhn, também passou pelos diversos períodos de Ciência Normal, seguidos por outros de crises. Podemos citar como parte da evolução desse conceito algumas concepções que vão desde Parmênides e Zenão, passando pela visão cosmológica de Aristóteles, incluindo as conhecidas interpretações intuitivas de Newton, chegando ao debate atual sobre a existência do bóson de Higgs, das ondas gravitacionais e a diferenciação entre os conceitos de vácuo e vazio, nos quais a presença de espaço implica na existência de matéria. (Horvath, et al. 2007)

O intuito principal deste trabalho é contribuir para que o debate histórico e social em torno do conceito de espaço torne-se mais presente no ambiente escolar, em oposição à atual exposição dogmática e operacional. Tal mudança epistemológica vai de encontro a outros trabalhos em ensino de Ciências que, influenciados pela pedagogia Freiriana, difundem a crítica a uma educação bancária, uma vez que um conceito tão rico em debates não pode ser reduzido a uma definição instrumentalizada. (Freire, 1968). Nossa pesquisa se concentrou naquele que talvez seja o conceito mais fundamental da natureza, juntamente com o conceito de **tempo**, e, por conseguinte, também de salutar relevância à Astronomia. Nos valem do adjetivo “fundamental” em sua mais forte definição, o conceito de espaço é fundamental por servir de fundamento, de base e sustento para a posterior definição de alguns conceitos básicos como velocidade e aceleração. Se muitas definições na Física dependem do que seja espaço, é inevitável que, se olharmos para o mesmo de diferentes formas, teremos olhares diferentes para a natureza como um todo e essa variedade de maneiras como podemos observá-la é de grande riqueza para o ensino de Astronomia.

Porém, verificamos que esse conceito não é discutido claramente nos livros didáticos, onde ainda se ensina o paradigma Newtoniano como a definitiva descrição do universo físico. A ausência de tópicos de história e filosofia da

ciência transmite a falsa impressão de “estabilidade” e “calmaria” na área das pesquisas científicas acarretando, segundo vários autores que serão citados ao longo deste trabalho, em apatia e desinteresse por parte de muitos estudantes por importantes temas de Astronomia, especialmente após o ingresso dos mesmos no ensino médio. Daí surge uma demanda com a qual nos comprometemos a contribuir, que consiste em explorar as muitas visões alternativas sobre este tema e criar possibilidades para que as mesmas se insiram na educação formal, auxiliando professores e alunos a refletir e, eventualmente, perceber que a concepção usualmente aceita sobre “verdade” na ciência é muito mais complexa e problemática do que pode aparentar. Um artigo acadêmico com o qual tive contato durante minha graduação em Física influenciou muito minhas concepções sobre espaço e, certamente, contribuiu para a idealização desta dissertação foi escrito por Luiz O.Q. Peduzzi, e é intitulado “Física aristotélica: Por que não considerá-la no ensino de mecânica?”.

Neste artigo (PEDUZZI, 2013), o autor faz uma síntese da cosmovisão aristotélica e explica como muitos dos fenômenos cinemáticos estudados no Ensino Médio são explicados, de maneira muito plausível, por este paradigma. A leitura deste artigo me fez refletir: Por que a gravitação newtoniana está presente nos componentes curriculares e a explicação aristotélica não? Ou até mesmo, existem outras explicações razoáveis para a queda dos corpos? A gravitação universal de Newton é apresentada nos manuais didáticos por parte de seus autores em um verdadeiro realismo ingênuo. Tal modelo funcionou muito bem durante 300 anos, mas houve um paradigma anterior que perdurou durante aproximadamente 2000 anos e, uma revolução científica que ocorreu na virada do século XIX para o século XX trouxe um novo paradigma em seu lugar. Portanto, é necessário que problematizemos esta escolha e, para isso, precisamos envolver história e filosofia da ciência nas aulas de gravitação e também de outros assuntos de Astronomia estudados na educação básica. Não pretendemos abordar este tema apenas do ponto de vista epistemológico, mas também reconstruir as principais medidas espaciais para a Astronomia. A determinação de distâncias e comprimentos em larga escala é possivelmente o mais importante empreendimento desta ciência e vem, ao longo dos últimos séculos, passando por avanços significativos e inimagináveis em um passado recente, alterando irreversivelmente nossa relação com o cosmos.

No capítulo inicial, fazemos uma brevíssima reconstrução das principais concepções de espaço presentes na história da ciência e na forma como este conceito foi sendo estudado e investigado ao longo do tempo, com principal destaque nas concepções de Aristóteles, Newton e Einstein (não necessariamente nesta ordem). Buscamos ainda neste capítulo levantar

questões filosóficas sobre o tema que acreditamos que possam ser utilizadas pelos professores para provocar maior reflexão nas salas de aula.

No segundo capítulo reconstruímos e evolução das medidas espaciais em Astronomia: a forma como, ao longo do tempo, fomos observando ou medindo distâncias e dimensões astronômicas progressivamente maiores. A reconstrução das medidas espaciais é uma síntese da evolução tecnológica e também das concepções cosmológicas. Até o capítulo dois não envolvemos nosso trabalho de campo junto a estudantes, mas apenas o fruto de nossos estudos teóricos, reflexões e um esforço intelectual no sentido de formar uma abordagem mais dinâmica a respeito do espaço e das medidas que encontramos na maioria dos manuais didáticos.

No terceiro capítulo, iniciamos nossa interação com alunos e a construção propriamente dita de um material didático que será entregue como o produto final associado a esta dissertação. Discutimos com alunos alguns aspectos conceituais e qualitativos do tema proposto. Em especial o famoso paradoxo proposto por Zenão de Eléia e um filme, Alexandria, exibido para os alunos com o intuito de ilustrar alguns aspectos epistemológicos na história da Astronomia. Por fim, no quarto e último capítulo, mostramos uma série de oficinas sobre distâncias e medidas astronômicas. Tais oficinas visaram permitir que pequenos grupos de alunos medissem distâncias progressivas: a começar pelo diâmetro da Terra, passando por distâncias no Sistema Solar, interestelares até, por fim, intergalácticas.

Não esperamos com este trabalho esgotar o tema, mas antes, incentivar principalmente professores e pesquisadores a refletir sobre o conceito de espaço, aparentemente tão simples e trivial, e outros conceitos físicos similares que compartilham de suas características e levar um maior número de reflexões para as salas de aula.

1. Diversidade de concepções sobre o espaço físico

“Os professores de ciências imaginam que o espírito começa como uma aula, que é sempre possível reconstruir uma cultura falha pela repetição da lição, que se pode fazer entender uma demonstração repetindo-a ponto a ponto. Não levam em conta que o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já construídos: não se trata, portanto, de adquirir uma cultura experimental, mas sim de mudar de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana”

Gaston Bachelard

A determinação das distâncias a que os astros celestes se encontram de nós é certamente um dos empreendimentos mais importantes e difíceis da Astronomia. Desde o surgimento desta ciência até o final do século XIX, imaginávamos que a luz viajasse em linha reta através do espaço preenchido por um elemento conhecido como éter. Atualmente somos capazes de compreender que a pergunta acerca da distância percorrida pela luz no vácuo não pode ser desvinculada de questões acerca da própria natureza e geometria espaço-temporal. Se observarmos o espaço como um “palco” vazio e estático, onde apenas a matéria “atua”, seremos levados a encarar a natureza de acordo com a concepção Newtoniana. Esta interpretação foi de grande impacto para a ciência e a levou a muitos avanços entre os séculos XVII e XIX apesar de deixar algumas perguntas sem respostas. A existência do espaço absoluto é uma delas, assim como o mecanismo de ação à distância e a relação entre matéria e campos gravitacionais. Apesar disso, a física Newtoniana, também conhecida como física “clássica”, trouxe grande otimismo às comunidades científicas, emergindo à época de sua formulação como um paradigma capaz de resolver em breve os últimos problemas conceituais na descrição da natureza. Com o advento do século XX, a teoria da Relatividade formulada por Albert Einstein, já em sua formulação de 1905, explicitou algumas limitações teóricas na concepção Newtoniana de espaço. Se olharmos para trás na história da Astronomia, outras interessantes concepções de espaço exerceram forte influência na ciência ao longo do tempo.

O espaço foi interpretado de, no mínimo, três maneiras radicalmente distintas, pelas três cosmovisões mais influentes e duradouras da Astronomia: a formulada por Aristóteles (384-322 a.C.), a gravitação universal de Newton (1643-1727) e a Relatividade Geral de Einstein (1879-1955). Evidentemente faremos aqui apenas um recorte histórico sobre o tema, existiram diversas outras

interessantes concepções que não serão citadas neste trabalho. O que pretendemos mostrar por meio destes exemplos é que, por mais paradoxal que possa parecer, as incertezas e limitações de cada um destes três modelos podem constituir o elemento mais estimulante e promissor do ensino de Astronomia e das outras ciências nas salas de aula.

1.1 O espaço Newtoniano enquanto “palco”

O conceito clássico de espaço físico é muito antigo, possui cerca de cinco séculos. Da maneira como foi formulado por Newton em seu “Principia” (NEWTON, 1990), é de natureza extremamente intuitiva para nós. O espaço Newtoniano é homogêneo, isotrópico e infinito, possui três dimensões e não interage com a matéria. Na mecânica clássica, a interação gravitacional ocorre entre corpos dotados de massa e é intermediada pelos campos gravitacionais. Uma vez conhecida a força entre dois corpos, podemos determinar suas respectivas equações de trajetórias através do espaço. Não podemos deixar de perceber que, em sua obra-prima, Newton não apresenta uma definição formal de seus conceitos mais fundamentais – espaço e tempo –, mas apenas noções intuitivas. Em suas próprias palavras, no livro 1, lemos que Newton não considera necessário definir formalmente tais conceitos:

“Não defino tempo, espaço, lugar e movimento, pois são bem conhecidos de todos. Devo apenas observar que as pessoas comuns não concebem estas quantidades com base em nenhuma outra ideia senão a relação que elas têm com os objetos sensíveis. Daí surgem certos preconceitos. Para eliminá-los, será conveniente distingui-las em absolutas e relativas, reais e aparentes”.

O que se sucede a partir daí não são definições, mas, sim, distinções, principalmente entre espaço absoluto e espaço relativo:

“1. O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração; o tempo relativo, aparente e comum, é alguma medida de duração perceptível e externa que é obtida através do movimento e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês, um ano. ”

“2. O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, mantém-se sempre semelhante e imóvel. O espaço relativo é certa medida ou dimensão móvel dos espaços absolutos, que os nossos sentidos determinam por sua posição em relação aos corpos, e que é comumente tomado pelo espaço imóvel; assim é a dimensão de um

espaço subterrâneo, aéreo ou celeste, determinada por sua posição com respeito à Terra. O espaço absoluto e o relativo são iguais na forma e na magnitude, mas nem sempre se mantêm numericamente os mesmos.

“3. O lugar é uma parte do espaço ocupada por um corpo e, de acordo com o espaço, é absoluto ou relativo. Estou falando de uma parte do espaço, e não da situação nem da superfície externa de um corpo. Pois os lugares dos sólidos idênticos são sempre idênticos, mas suas superfícies, em razão de suas formas dessemelhantes, muitas vezes são desiguais...”

Uma metáfora muito comumente empregada para descrever tais interações associa aos corpos em movimento as figuras de “bailarinos” em uma apresentação teatral (ROBILOTTA, 2013). De fato, neste “teatro” as massas são os atores que realizam os movimentos determinados pelo diretor da peça, neste caso, a lei da Gravitação Universal. O espaço absoluto assume o discreto papel de “palco” onde ocorre tal espetáculo. Durante aproximadamente 300 anos, esta visão clássica gozou de absoluto prestígio e credibilidade entre os físicos e astrônomos, permanecendo até hoje a explicação mais prática para a maioria dos fenômenos físicos ao nosso redor. Estamos atualmente de tal forma habituados com esta concepção que podemos, ingenuamente, considerá-la simples e até trivial, especialmente no contexto do ensino de Astronomia na educação formal.

A suposta trivialidade deste tema não passa de uma quimera, os professores de Física estão de tal maneira acostumados a abordar o conceito de espaço Newtoniano nas aulas que devemos chamar a atenção para o risco deste complexo tema ser abordado de forma superficial e conseqüentemente ser assimilado de forma estéril pelos estudantes. O professor Robilotta, em um interessante artigo (ROBILOTTA, 1988), ressalta este perigo de maneira mais abrangente:

“O conhecimento englobado pela Física forma um corpo articulado de modo complexo, e parte da dificuldade de se ensinar essa disciplina advém do fato de não reconhecermos ou considerarmos essa complexidade em toda a sua extensão. Ao tratarmos de modo simplificado um corpo de conhecimento que é muito complicado e repleto de sutilezas, podemos acabar por fazer com que ele se torne ininteligível aos estudantes”.

A formulação Newtoniana, longe de ser trivial e intuitiva, absorveu uma série de conclusões obtidas a partir de concepções teológicas Judaico-Cristãs, por um viés mais religioso do que científico. A ideia de um espaço absoluto enquanto linear e infinito surgiu inicialmente em Israel e sua existência era considerada uma natural conseqüência da existência de Deus, eterno e

onipresente. (JAMMER, 1973) O espaço físico, Kalan para os judeus, era a própria extensão da presença divina. Esta estruturação da natureza foi adotada por Newton, não apenas por sua estética e simplicidade, mas também por fazer parte importante de sua crença religiosa. Segundo Jammer: “Todas as realizações e descobertas de Newton no campo da Física estavam, a seu ver, subordinadas à concepção filosófica do espaço absoluto”. A existência do espaço absoluto Newtoniano sofreu duras críticas por parte de Leibniz (cuja controvérsia com Newton tornou-se famosa) e Huygens, principalmente por suas implicações metafísicas; o alcance inicial destas críticas foi mínimo, especialmente devido ao “extraordinário sucesso da mecânica Newtoniana na Física e na Astronomia”. (JAMMER, 1970)

Sua realidade será seriamente questionada na virada do século XIX para o século XX, a partir do desenvolvimento das geometrias não-Euclidianas em que a tridimensionalidade do espaço físico será posta em cheque. Por fim, encerramos esta secção novamente com a analogia entre a Física Clássica e uma peça teatral, em que o espaço é apenas o palco onde partículas se movem, guiadas pelos campos gravitacionais e eletromagnéticos. Veremos posteriormente que, no contexto da Física Moderna, o palco pode tornar-se diretor e diretores podem até não existir.

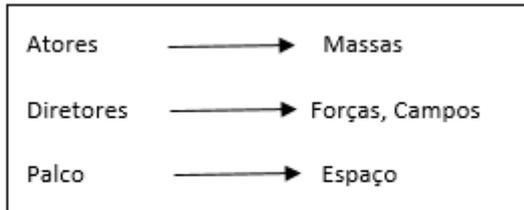


Figura 1: resumo esquemático da gravitação clássica segundo Robilotta

1.2 Considerações Pré-Newtonianas sobre o espaço Físico

Antes de contrapormos a concepção clássica de espaço com sua formulação moderna, faremos uma breve digressão no intuito de justificar como o tema é merecedor de reflexão mais profunda do que uma análise inicial poderia sugerir. Diversos pensadores gregos do período clássico realizaram importantes reflexões sobre o tema, muitas delas encontram-se praticamente esquecidas atualmente, mas que, se discutidas nas salas de aula, podem ser objeto de interessantes reflexões. O famoso pitagórico chamado Árqitas, segundo Simplicio, perguntou certa vez se alguém que estivesse na extremidade do mundo conseguiria estender o braço. Lucrécio talvez tenha sido o mais eminente defensor da infinitude do espaço:

“A favor da infinitude do espaço, Lucrécio acrescenta outro argumento que revela um importante aspecto físico da teoria atomista: se o espaço não fosse infinito, no decorrer da eternidade passada, toda a matéria teria se amontoado em uma massa no fundo do espaço e não existiria mais nada. Esse comentário mostra claramente que Lucrécio, na esteira de Epicuro, concebia o espaço como dotado de uma direção privilegiada, a vertical. Os átomos percorreriam o espaço nesta direção, em linhas.” (JAMMER, 1970)

Platão também desenvolveu uma complexa teoria do espaço, na qual uma forma de matéria é associada ao espaço vazio. É interessante observarmos que: “Platão formulou uma teoria corpuscular da natureza da matéria com forte conteúdo matemático-geométrico, em grande medida similar às nossas atuais. Também, na sua obra, Timeu, se ocupou da natureza do Universo e o movimento dos astros, revelando o mesmo espírito na procura por regularidade e ordem. É interessante observar que no platonismo o Universo teve uma origem, e, portanto, tem uma idade, já que foi criado por uma causa externa ou divindade”. (HORVATH, et al, 2007)

Existem muitas outras definições de espaço, desenvolvidas por Filósofos, Matemáticos e Astrônomos gregos do período clássico. Para não fugirmos do objetivo deste trabalho, focar-nos-emos apenas naquela que é considerada a mais influente e duradoura concepção formulada nesse período. Nos referimos à concepção de Aristóteles de Estagira, enraizada na sociedade europeia até a primeira metade do século XVII, evidentemente que com algumas modificações realizadas ao longo deste intervalo de mais de 1800 anos. Seu tratado que aborda mais extensamente o tema é o conhecido livro “Física”, onde o conceito central é o de “lugar”. O espaço é concebido apenas como “a soma de todos os lugares ocupados pelos corpos e lugar é a parte do espaço cujos limites coincidem com os do corpo que o ocupa”.

É importante observarmos a imediata eficácia da cosmovisão aristotélica em explicar fenômenos cinemáticos simples, como a queda dos corpos, por meio do conceito de lugar, segundo o qual, existe uma ordem no cosmos e o centro deste cosmos coincide com o centro da Terra. Sua teoria baseada nos quatro elementos imperfeitos (formulada inicialmente por Empédocles, sem a inclusão do quinto elemento) explica por que objetos sólidos caem em queda livre, enquanto o ar e o fogo sobem nas mesmas circunstâncias. A trajetória retilínea realizada por estes corpos apresenta uma explicação coerente dentro do corpo da teoria aristotélica. Analogamente, corpos além da órbita lunar deveriam realizar movimentos circulares ao redor da Terra. Por quê? Porque, segundo Aristóteles, estes corpos são formados por um elemento perfeito, o éter, o que implicaria a realização de um movimento perfeito, ou seja, plenamente simétrico,

circular, ao contrário dos corpos corruptíveis, localizados no interior da órbita lunar, que se movem na direção radial com relação ao centro da Terra.

Aristóteles também chegou à curiosa conclusão da impossibilidade do vácuo na natureza (ao contrário dos Pitagóricos que defendiam sua existência) por considerar que a velocidade dos corpos em movimento seja inversamente proporcional à resistência oferecida pelo meio. A possibilidade do vácuo levaria à aceitação de que qualquer corpo em movimento no vácuo possuiria velocidade infinita, uma clara contradição dentro do Aristotelismo.

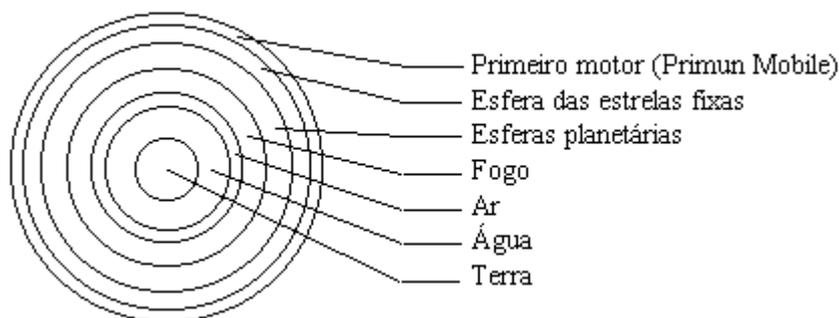


Figura 2: Ordenamento do cosmo em Aristóteles

1.2.1 O valor pedagógico da ciência Aristotélica

Não podemos chamar as explicações Aristotélicas de incoerentes, irracionais ou fantasiosas, em certos aspectos a explicação Newtoniana para os mesmos fenômenos também lança mão de argumentos igualmente obscuros, como ação à distância ou o espaço absoluto. Apesar disso, a grande maioria dos livros didáticos não faz nenhuma menção à ciência Aristotélica, mesmo com seu enorme potencial pedagógico; seguimos, neste trabalho, as argumentações de Peduzzi (PEDUZZI, 2013) a favor da utilização da ciência aristotélica nas aulas de Física e generalizamos seus argumentos também para o ensino de Astronomia:

“Além do seu valor didático junto a certas ideias intuitivas do estudante sobre o relacionamento entre força e movimento, a física aristotélica apresenta-se como um referencial indispensável para a compreensão da física medieval e da revolução na mecânica ocorrida no século XVII”.

Acreditamos que Peduzzi tenha tocado no ponto de maior importância: faz-se necessária uma introdução à visão aristotélica para que a revolução científica iniciada por Copérnico e Galileu não seja ensinada de forma caricaturada e descontextualizada. O reconhecimento do valor lógico e intuitivo

do trabalho de Aristóteles torna possível entendermos a grandeza de Galileu enquanto astrônomo. Ao abordar em sala de aula a revolução científica, ou mesmo o Heliocentrismo nas aulas sobre gravitação universal, cabe ao professor realizar a devida contextualização, mesmo que superficial, sobre o período e a mentalidade geral com a qual Galileu lidou, aceitamos que uma longa exposição do conflito deste célebre cientista com a Igreja Católica fuja do objetivo das aulas de Física, mas grande parte dos obstáculos encontrados por ele estavam relacionados à cosmovisão Aristotélica, uma visão de mundo complexa, coerente e satisfatória, apesar de incompleta quando confrontada com os sentidos. Ainda segundo Peduzzi:

“Entende-se, assim, as razões das explicações teleológicas em Aristóteles, que envolvem não apenas seres vivos (uma semente germina e se desenvolve a fim de se tornar uma planta, ou uma árvore), mas também elementos inanimados (o fogo se dirige para cima com o propósito de alcançar o seu lugar natural – uma camada esférica próxima e dentro da órbita lunar). A história da mecânica mostra a evolução do conceito de força. Sem a física e a cosmologia aristotélica, esta história, e tudo o que ela representa, não tem sentido e nem mesmo pode ser contada”. (PEDUZZI, 2013)

O autor considera que a evolução histórica da mecânica, recontada a partir do importante século XVII, ficaria no mínimo comprometida, se não anacrônica, sem uma breve, mas cuidadosa, introdução ao paradigma que será confrontado nesse período. Podemos citar a falta de reflexão acerca do heliocentrismo. A quase totalidade dos alunos observados entende o paradigma Copernicano, mas encontra dificuldades para compreender a revolução iniciada por Copérnico e especialmente o impacto das descobertas de Galileu. Não vamos citar aqui o famoso julgamento ao qual o mesmo foi submetido, mas apenas salientar que uma visão geocêntrica é extremamente intuitiva e aparentemente confirmada pelos sentidos e o que ele produziu de maior impacto, do ponto de vista científico, foram críticas à cosmologia aristotélica. Por acreditar naquilo que racionalmente se mostrava verdadeiro, Galileu teve de abrir mão da natureza que aparentemente se revelava pelos sentidos, empreendimento extremamente difícil para um cientista. Tal atitude é metaforicamente contada por um de seus mais famosos personagens ao enaltecer o feito de Copérnico e Aristarco:

“Você se admira que haja tão poucos seguidores da opinião pitagórica (de que a Terra se mova) enquanto eu fico atônito de que tenha existido até hoje quem a tenha abraçado e seguido. Nem posso deixar de admirar fortemente a assombrosa perspicácia daqueles que assumiram esta opinião e a aceitaram como verdadeira; eles, através da pura força do seu intelecto, violentaram os seus sentidos de forma a preferir o que lhes dizia a razão sobre o que a experiência sensível claramente lhes mostrava ser de forma contrária. Pois os argumentos contra a rotação da Terra... são, como vimos, muito plausíveis e o

fato de que os ptolomaicos e aristotélicos e todos os seus discípulos os tomaram como conclusivos, é realmente um forte argumento de sua efetividade. Mas as experiências que abertamente contradizem o movimento anual são realmente tão maiores na sua força aparente que, eu repito, não há limites para a minha perplexidade quando eu penso como Aristarco e Copérnico foram capazes de fazer com que a razão conquistasse os sentidos, de modo que, em desafio a estes, aquela se tornou senhora de suas crenças”.

(Galileu; citado de ZANETIC, 2006)

1.2.2. Um curioso paradoxo acerca do espaço físico

Conforme citado previamente, faz parte de nossos objetivos resgatar antigos questionamentos sobre a natureza do espaço e verificar a possibilidade de trazê-los para o ensino de Astronomia; ao percorrermos este empreendimento, deparamo-nos com alguns dos famosos paradoxos formulados por Zenão de Eleia (490-430 a.C.). Muitos de seus paradoxos abordam a mesma problemática, com pequenas variações de contexto, por isso focaremos apenas na formulação do paradoxo de “Aquiles” ou paradoxo da “corrida entre Aquiles e a tartaruga”, segundo o qual é impossível para um corredor mais rápido alcançar seu adversário em vantagem. Sabemos pela experiência se tratar de um argumento falso, mas se observarmos que Zenão, assim como seu mestre Parmênides, buscava atacar o conhecimento proveniente dos sentidos, somos obrigados a aceitar que não é tarefa trivial refutar sua lógica. O argumento de Zenão parte da questão acerca da continuidade do espaço: Se podemos dividir continuamente a distância que separa, por exemplo, dois corredores, chegaremos à conclusão que existe uma distância infinita entre ambos, inviabilizando uma eventual ultrapassagem, por maior que seja a diferença entre suas velocidades. Aristóteles tenta solucionar esse paradoxo, buscando inviabilizar (aparentemente sem muito sucesso) a lógica utilizada por Zenão:

“O argumento de Zenão parte de uma suposição falsa, de que é impossível cobrir o que é infinito ou entrar em contato com um número infinito de coisas, uma a uma, em um tempo finito. O ponto é que há duas maneiras pelas quais a distância e o tempo, e em geral qualquer contínuo, são descritos como infinitos: eles podem ser infinitamente divisíveis ou infinito em extensão. Assim, mesmo sendo impossível num tempo finito entrar em contato com coisas que são infinitas em quantidade, é possível fazer isso com coisas que são infinitamente divisíveis, já que o tempo também é infinito dessa maneira. Portanto, a conclusão é que leva tempo infinito, e não finito, para cobrir uma distância infinita, e leva um número infinito de agoras, e não um número finito, para se entrar em contato com um número infinito de coisas”.

(PESSOA, 2009)

O que nos chamou a atenção no paradoxo foi a atualidade de seus questionamentos, nas duas primeiras décadas do século XXI, a Cosmologia e a Física de Partículas tem avançado consideravelmente no entendimento das partículas consideradas “fundamentais” na natureza. Como exemplo, podemos citar a descoberta de um importante Bóson em 2013, previsto por Peter Higgs em 1964, e a descoberta das ondas gravitacionais em 2016, previstas por Albert Einstein. Tais descobertas trazem à tona a pergunta elegantemente instigada por Zenão em seu paradoxo há aproximadamente 2500 anos atrás. Com a descrição do Modelo Padrão, descobrimos, enfim, as partículas mais elementares da natureza? Conseguiremos fazer isso em breve? O espaço físico é, afinal de contas, de natureza contínua ou discreta?

Vejamos alguns comentários presentes em livros de Física moderna, comumente utilizados em cursos de graduação em Física e em Astronomia

“Por exemplo, na década de 30, prótons e nêutrons eram considerados partículas elementares, constituintes básicos dos núcleos atômicos, enquanto que, atualmente, eles são considerados como aglomerados de quarks”.

(ROBILOTTA, 2013)

“Quais são os constituintes fundamentais da matéria? Ainda não podemos dizer que existe uma resposta definitiva, contudo avançamos bastante”.

(YOUNG, 2010)

Sem nos valermos de noções básicas de cálculo integral, uma análise acerca do paradoxo de Zenão pode nos levar a considerar duas possibilidades:

i) O espaço físico é de natureza contínua:

Neste caso encontraremos dificuldade em refutar a lógica de Zenão, seremos obrigados a admitir que uma distância que inicialmente separe dois competidores possa ser continuamente dividida e que, como essa divisão não terá um fim, o competidor que inicialmente se encontra na dianteira não poderá ser ultrapassado.

ii) O espaço físico é de natureza discreta:

Neste caso, o espaço não pode ser infinitamente divisível, devendo necessariamente existir uma distância mínima mensurável na natureza. Para refutar essa hipótese, Zenão formula outro interessante paradoxo, conhecido como paradoxo do “estádio” (PESSOA, 2008).

Evidentemente não estamos aqui defendendo os argumentos de Zenão, que, como citamos anteriormente, podem ser refutados com argumentos básicos de cálculo. O que exporemos no próximo capítulo é uma possível utilização de seus paradoxos nas salas de aula, com o intuito de estimular controversas e, conseqüentemente, reflexões sobre a importante questão acerca da continuidade do espaço.

1.3 O início do século XX traz um novo paradigma

As grandes revoluções científicas do início do século XX finalmente tornaram necessária uma reinterpretação do conceito clássico de espaço. Com o advento da teoria da relatividade geral, as interações gravitacionais não são explicadas em termos de forças trocadas diretamente por corpos dotados de massa, mas como o efeito da curvatura da estrutura do espaço-tempo quadridimensional, causada pela presença de massa. Nesta nova concepção, o espaço não pode ser encarado apenas como um “palco” sobre o qual atuam as massas regidas pelos campos, conforme a metáfora utilizada anteriormente. Apenas dois anos após a formulação de sua Relatividade Geral, em 1917, Albert Einstein formula seu modelo cosmológico, atribuindo ao Universo as propriedades de homogeneidade e isotropia em larga escala. Muitos historiadores atribuem a este acontecimento o nascimento da cosmologia moderna enquanto ciência. No período de praticamente um século desde esse acontecimento, a cosmologia trouxe importantes contribuições ao tema discutido neste trabalho, uma vez que certos questionamentos, já formulados pelos gregos antigos, dialogam com recentes descobertas no ramo da Cosmologia.

Com a mecânica quântica, é na estrutura microscópica do espaço onde observamos maiores divergências com relação à sua concepção clássica. O estudo da Física de partículas goza de estatuto semelhante à cosmologia, mas, neste caso, deriva da teoria quântica de campos. O interesse deste trabalho por temas relacionados à Física de Partículas se deve por acreditarmos que a pesquisa desenvolvida nesta área nas últimas décadas pode, se introduzida por meio de uma adequada transposição didática, ser explorada nas salas de aula por apresentar discussões férteis sobre a estrutura microscópica do espaço físico. Abaixo apresentamos algumas questões sobre o tema deste trabalho, que foram amplamente exploradas, seja pelos antigos filósofos gregos ou pela

gravitação clássica que, de diversas formas, fazem parte das modernas pesquisas em Cosmologia e Física de Partículas. Importantes questionamento sobre o conceito de espaço:

Q₁) Por que as coisas caem?

Q₂) Qual o tamanho do Universo?

Q₃) Quais são as menores estruturas existentes na natureza?

Q₄) O que é o vácuo?

Essas questões foram escolhidas por terem sido alvo de estudo em diversos períodos da história da ciência. Evidentemente que a Astronomia do século XX estava muito mais madura, inclusive do ponto de vista tecnológico, com o desenvolvimento dos grandes telescópios, do que a ciência do século XVII, em que o modelo Heliocêntrico ainda amadurecia enquanto paradigma astronômico. O problema da queda dos corpos, da forma como é explicado no interior da Relatividade Geral, exclui a existência de força trocada entre os corpos e a substitui por uma deformação na estrutura do espaço-tempo, causada pela gravidade. Entretanto, do ponto de vista prático, continuamos a nos valer do conceito clássico de campo gravitacional para explicar este movimento e calcular a aceleração dos corpos em queda livre na maior parte dos casos. Seria impensável a Newton ou a qualquer de seus contemporâneos uma reflexão acerca do movimento dos corpos a velocidades relativísticas (a velocidade da luz foi determinada por Ole Roemer em 22/08/1667). Esta afirmação é extraída diretamente de Einstein em um comentário repleto de respeito e admiração por Newton, extraído de suas Notas Autobiográficas:

“Perdoe-me Newton; você descobriu o único caminho que, em sua época, era possível para um homem do mais alto intelecto e capacidade criativa. Os conceitos que você criou continuam a nortear o nosso pensamento em física, embora hoje saibamos que terão de ser substituídos por outros, mais afastados da esfera da experiência imediata, se almejarmos compreender mais profundamente as relações entre as coisas”.

Nas palavras de Jammer (1970), lemos que:

“O espaço, tal como concebido por Newton, revelou-se uma ilusão, embora, para efeitos práticos, uma ilusão muito fecunda. Tão fecunda que os conceitos de espaço e tempo absolutos permanecerão para sempre no pano de fundo de nossa experiência cotidiana”.

O paradigma relativístico altera a noção de dimensionalidade do espaço físico aceita até então. Da forma como Newton define os conceitos de espaço e tempo, não existe relação de causalidade entre ambos, o espaço, dotado de tridimensionalidade, é independente do tempo, linear e uniforme. Já na relatividade, uma estranha e nada intuitiva definição de *continuum* substitui a concepção clássica. Na relatividade não existe separação entre as estruturas do espaço e do tempo. O espaço, até então considerado um “palco” imóvel sobre o qual as massas trocam forças gravitacionais, agora é considerado deformável. Tal explicação ganha força especialmente após o famoso eclipse solar observado na cidade de Sobral (CE), em 1919, por uma expedição chefiada pelo astrônomo inglês Stanley Eddington. Da mesma forma que, segundo a teoria da Relatividade, a ação gravitacional é responsável por distorções na geometria do espaço, também altera o fluxo temporal para referenciais acelerados.

Outra mudança epistemológica característica da Astronomia no século XX envolve o chamado “problema da fronteira” do Universo físico. A esse respeito, a Física do século XVII ainda fazia eco da cosmologia Ptolomaica, na qual se considerava a existência de uma camada de “estrelas fixas” encerrando a esfera celeste. Apenas no século XX esta questão ganhará importância no debate acadêmico. Em 1929, Edwin Hubble verifica, através de observações telescópicas realizadas no observatório de Monte Wilson a existência de outras galáxias. Mais tarde foi capaz de medir o deslocamento de raias espectrais e verificar que a velocidade de recessão dessas galáxias era proporcional às distâncias das mesmas até nós. Após refinamentos da escala de distância, os resultados de Hubble farão com que o recente modelo do big-bang, postulado pelo belga Geórgie Lemaitre passasse a gozar de importante corroboração experimental. O modelo padrão do big-bang tem se mostrado compatível com os importantes avanços observacionais desde então, especialmente com a descoberta da radiação cósmica de fundo, prevista por G.Gamow e seus colaboradores. Quando levado ao debate no ambiente escolar, este modelo suscita importantes reflexões uma vez que, como veremos melhor no próximo capítulo, muitos alunos se surpreendem com a informação de que a expansão do Universo presente é verificada observacionalmente, muitos julgam ser o Universo infinito e eterno (capítulo 3). Também emerge neste debate o antigo problema da fronteira. Se o Universo está em expansão, o mesmo possui dimensões finitas, portanto, o que existe além de seus limites? Essa pergunta ainda não possui uma resposta conclusiva, mas instiga uma série de questionamentos profundos, não apenas de natureza científica.

1.4 Partículas Elementares e o vácuo quântico

Para concluirmos este capítulo, devemos considerar os modernos avanços científicos e como os mesmos dialogam com a questão da elementaridade da matéria. Ao expormos o tema nas salas de aula, não podemos deixar o paradoxo de Zenão sem uma resposta mais conclusiva.

“Os paradoxos de Zenão são ainda tema de discussão hoje em dia. Uma atitude muito natural, por exemplo em relação ao Aquiles, é dizer que a conclusão de Zenão é um absurdo, pois não corresponde à realidade, e que, portanto, o paradoxo deve ser rejeitado. Seguindo esta linha, Diógenes, o Cínico (413-323 AEC), respondeu ao paradoxo simplesmente se levantando e andando! Mas essa constatação não resolve os paradoxos”.

(PESSOA, 2008)

A mecânica quântica e seus desdobramentos na segunda metade do século XX trouxeram importantes avanços sobre o tema, especialmente após o surgimento dos grandes aceleradores de partículas; particularmente o LHC (Large Hadron Collider) recebeu grande repercussão na mídia internacional após a detecção de uma partícula conhecida como Bóson de Higgs em 2014. No início do século XX, as partículas consideradas elementares se limitavam aos prótons, nêutrons e elétrons. Atualmente, tanto prótons quanto nêutrons fazem parte de uma classe de partículas conhecida como hádrons, que são constituídos por quarks. Além dos hádrons, existem os léptons (onde se inclui o elétron).

“Tanto do ponto de vista teórico como experimental, o conceito de elementaridade tem-se mostrado relativo, no sentido de que uma partícula pode ser enxergada como elementar a baixas energias e como composta a altas energias... O limite da resolução que podemos atingir marca o limite conhecido da elementaridade, e a procura por uma teoria mais fundamental ainda constitui a tentativa de achar o limite absoluto para a composição da matéria, não meramente aquele que possa ser medido no laboratório”.

(HORVATH, 2007)

Os autores citados acima expressam que os atuais avanços tecnológicos ainda não nos permitem afirmar se a matéria é realmente contínua, ou que os quarks sejam as menores partículas existentes na natureza. Apesar de ser objeto de investigação dos filósofos pitagóricos e de Zenão há aproximadamente 2500 anos, essa questão ainda continua aberta.

Outra questão importante nessa discussão, pouquíssimo explorada no ensino de Física ou de Astronomia, diz respeito à possibilidade do vácuo na

natureza. Os defensores do atomismo de Demócrito acreditavam na existência do vácuo a preencher os espaços entre os átomos, já o aristotelismo defendia que a natureza “abomina” o vácuo, especialmente porque a existência do vácuo supostamente possibilitaria viagens à velocidade infinita, o que seria uma hipótese sem nenhuma plausibilidade. Ao longo da Idade Média, o aristotelismo foi aceito sem grandes questionamentos, prevalecendo a visão que nega a existência do vácuo na natureza. Somente no início do século XX, com a publicação da teoria especial da relatividade em 1905, Einstein considera “desnecessária” a hipótese de que exista um meio a preencher o espaço entre a Terra e o Sol, considerando que as ondas eletromagnéticas se propaguem através do espaço vazio. Já na formulação da relatividade geral, formulada após 10 anos, o mesmo Einstein demonstra os primeiros sinais de contradição, uma vez que sua teoria supõe a existência de um meio preenchendo o espaço físico:

“Embora isso não transparecesse nos artigos publicados por Einstein, ele comentou a questão em cartas a algumas pessoas. Em 1916, escreveu a Lorentz: ‘Eu concordo com você que a teoria da relatividade geral admite uma hipótese do éter, assim como a teoria da relatividade especial’. Um de seus amigos, Paul Ehrenfest, começou a ficar confuso, pois já não sabia mais se Einstein aceitava ou não o éter. Ehrenfest pediu-lhe que deixasse clara sua posição”.

(MARTINS, 2006)

Para aumentar a controvérsia a esse respeito, a mecânica quântica diferencia os conceitos de vácuo e vazio à luz do princípio da incerteza de Heisenberg. Em uma de suas formulações, o princípio da incerteza pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\Delta E \cdot \Delta t > h/2\pi \quad (1)$$

Podemos interpretar essa equação como indicativa da existência de uma flutuação mínima no estado energético de um sistema físico, o que nos impossibilita afirmar que qualquer região do universo possua certamente energia nula. Esta flutuação possibilita a constante criação de pares de partículas com energia ΔE , e posterior aniquilamento após um intervalo de tempo Δt . A existência destes pares de partículas já foi confirmada experimentalmente diversas vezes. Uma das demonstrações mais claras é obtida através do “efeito Casimir”. Este fenômeno é observado quando duas placas metálicas paralelas são aproximadas, sem que aja contato entre ambas. No interior da região, a densidade de partículas criadas e aniquiladas torna-se menor do que na região exterior, conseqüentemente o número de colisões de partículas contra as placas torna-se maior na região de fora, gerando uma força de atração entre as placas,

que não é de origem eletromagnética nem gravitacional. Ao longo deste trabalho, proporemos formas de abordar tais conceitos no contexto do ensino de Ciências e de Astronomia, em que muitas concepções são simplificadas e conseqüentemente ensinadas de forma errônea. A questão da existência do vácuo ou a existência de partículas fundamentais são temas de debates epistemológicos e esforços científicos há séculos, mas, quando expostos nas salas de aula, a riqueza do debate se perde, muitas vezes em nome da simplicidade. Mais importante para o ensino de Astronomia do que uma simples atualização dos conceitos, consideramos que seja a inserção da evolução das ideias e dos conceitos Astronômicos. Tanto o paradigma aristotélico quanto a Física Moderna oferecem interessantes alternativas à visão de espaço Newtoniana que devem fazer parte das aulas e dos livros didáticos.

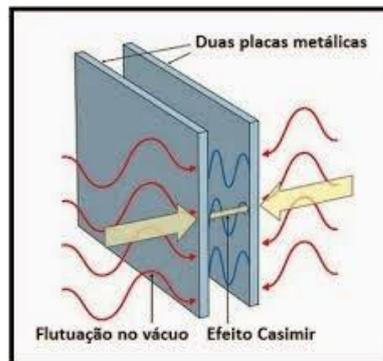


Figura 3: Verificação experimental do efeito Casimir.

2: A evolução das medidas do espaço enquanto expansão de horizontes

“A história da Astronomia é a história do recuo dos horizontes”

(Edwin P. Hubble)

O conceito de espaço pode ser explorado de diversas formas, tanto em termos de abrangência como em termos de profundidade com que imergimos no tema. Ao longo deste trabalho, buscamos abordá-lo em duas frentes. Por um lado, alguns aspectos epistemológicos foram resgatados com o intuito de provocar maior reflexão sobre o tema, conforme descrito nos capítulos precedentes. Por outro lado, elaboramos diversas atividades em forma de oficinas para que professores e alunos possam efetivamente determinar algumas importantes medidas especiais de particular relevância ao ensino de Astronomia.

Faremos a seguir uma breve reconstrução da evolução histórica das principais medidas de distâncias e dimensões astronômicas com o intuito de melhor contextualizar a realização destas atividades, que serão desenvolvidas no próximo capítulo. Procuramos por meio deste trabalho de pesquisa histórica confirmar nossa impressão acerca da íntima relação existente entre concepções cosmológicas e avanços tecnológicos. A citação inicial deste capítulo, atribuída a Edwin P. Hubble, é uma expressão desta crença: “na medida que pudemos observar mais longe no espaço, o Universo se revelou bem mais vasto do que imaginávamos. Conseqüentemente, nossa concepção acerca do Cosmos como um todo e de nossa relação com o resto da natureza foram constantemente atualizadas e os horizontes conhecidos foram recuando. O atual entendimento que possuímos acerca de todo o Universo observável é fruto de um longo processo de amadurecimento. Diversos autores destacam o papel das questões cosmológicas na nossa própria identidade e que nos questionarmos acerca da origem e natureza do cosmos é algo que fazemos desde nossa aurora na Terra”.

“A presença universal de uma preocupação com a origem do universo mostra que esse é um elemento importante do pensamento humano. Possuir alguma concepção sobre o universo parece ser importante para que possamos nos situar no mundo, compreender nosso papel nele”.

(MARTINS, 2012)

“De fato, todas as culturas de que temos registro, passadas e presentes, tentaram de alguma forma entender não só nossas origens, mas também a origem do mundo onde vivemos. Dos mitos de criação do mundo de culturas pré-científicas às teorias cosmológicas modernas, a questão de por que existe algo ao invés de nada, ou, em outras palavras, ‘por que o mundo existe’ inspirou tanto o religioso quanto o ateu”.

(GLEISER, 2008)

Acreditamos que reconstruir esta evolução nas salas de aula seja de imenso valor pedagógico e que este trabalho tenha o dever de contribuir concretamente para que os professores tenham ferramentas para trabalhar alguns importantes episódios históricos com seus alunos. A evolução das medidas do espaço começa com nossos antepassados primitivos, que não dispunham de meios para determinar o formato da Terra e sequer especular concretamente sobre medidas e dimensões astronômicas. Naturalmente emergiram alguns modelos cosmogônicos relacionados com a concepção de Terra plana como consequência desta limitação.

2.1 A primeira grande medida astronômica

A determinação das medidas astronômicas de outros astros somente foi possível após a determinação do “tamanho” do próprio planeta em que vivemos. Podemos afirmar que a estimativa do valor do raio da Terra, realizada por Eratóstenes de Cirene (276-194 a.C.) é um dos mais célebres episódios da história da ciência, especialmente porque as dimensões do Sol e da Terra e a Lua já haviam sido determinadas por Aristarco de Samos (310-230 a.C.) apenas de forma relativa, isto é, em função das dimensões do nosso planeta. Uma vez que Eratóstenes obteve um resultado muito satisfatório para o diâmetro da Terra, foi possível conhecer os diâmetros do Sol e da Lua de forma absoluta. Muitos livros didáticos abordam este episódio, mas se limitam a descrever o arranjo experimental e os resultados obtidos pelo famoso sábio de Alexandria. Acreditamos que essa abordagem tenha seu valor, mas que desperdiça uma grande oportunidade de tratar o tema de forma interdisciplinar, assim como de promover discussões e debates nas salas de aula. A título de exposição das questões que pretendemos ressaltar, extrairemos fragmentos de um livro de história da Astronomia escrito pelo célebre autor de ficção científica Isaac Asimov. Nesta obra, o autor inicialmente oferece alguns dados geográficos considerados pelos gregos contemporâneos de Eratóstenes:

“Em 600 a.C., o império assírio acabara de ruir. Ao tempo de seu fastígio, estendeu-se do Egito à Babilônia, por uma extensão máxima de 2250

quilômetros. Seria sucedido em breve pelo império Persa, cobrindo desde Cirenaica até a Caxemira, a um comprimento de 4800 quilômetros”.

(ASIMOV, 1968)

Esta breve contextualização nos lembra do limite das dimensões espaciais conhecidas por este povo e ilustra a ruptura epistemológica causada pelo famoso experimento, que não apenas foi responsável por determinar o raio da Terra, mas, antes, por fornecer argumentos convincentes a favor de sua esfericidade.

“Por certo, homem algum, nos tempos antigos, por mais que viajasse, nunca teria chegado ao fim da Terra. Quando muito, teria alcançado as plagas de um oceano, cujos limites estavam além do horizonte. Se embarcasse numa nau e se fizesse ao largo, também jamais chegaria aos extremos do mundo. Quer dizer que não havia fim? A resposta a essa pergunta dependia da forma que se atribuísse à Terra”.

Estas dimensões nos dão uma noção inicial do tamanho do mundo conhecido por este povo, as primeiras especulações sobre o formato da Terra consideravam que nosso planeta possui formato plano, mas o que haveria em sua borda? Esta era apenas uma das muitas questões que ficavam sem respostas nos modelos anteriores. Anaximandro (610-546 a.C.) sugeria uma Terra cilíndrica enquanto Aristóteles forneceu importantes argumentos que defendiam sua crença em um mundo esférico, como a observação de que os navios “caem” no horizonte quando se afastam da costa ou a sombra circular da Terra que se projeta sobre a Lua. Nesse contexto, podemos dizer que o experimento de Eratóstenes marcou a transição da investigação especulativa para a primeira medição direta do tamanho da Terra. Possivelmente guiado por um manuscrito contido na grande biblioteca de Alexandria, Eratóstenes obteve a informação de que no dia 21 de junho, por volta do meio-dia quando o Sol se encontrava no ponto mais alto do céu, algo muito particular acontecia com um grande poço localizado no centro da cidade chamada Siena (atual Assuã), somente nesta data e horário, o mesmo não formava nenhuma sombra no chão!

Na mesma data, ele constatou que o fenômeno não acontecia em Alexandria, objetos dispostos verticalmente apresentavam sombra. Esta comparação lhe permitiu concluir que a Terra não era plana, pois se assim o fosse, para um dado instante, ou nenhum objeto apresentaria sombra, ou todos a apresentariam. Com o auxílio de uma estaca fincada verticalmente, verificou que em Alexandria, nesta mesma ocasião, a direção em que o Sol se encontrava apresentava um ângulo mínimo de aproximadamente $7,2^\circ$ com relação à vertical local. A distância entre Alexandria e Siena já era conhecida (colocar no rodapé:

esta distância provavelmente foi recalculada a pedido de Eratóstenes com o intuito de refinar seus cálculos) como aproximadamente 804 km. Supondo uma Terra esférica, os dados obtidos permitiriam calcular seu comprimento por meio de conceitos geométricos elementares. A seguinte proporção foi obtida por ele:



A esfera de Eratóstenes apresentou os seguintes valores aproximados de comprimento (C), raio R e área superficial (A):

$$C = 40200 \text{ km}$$

$$R = 6.401 \text{ km}$$

$$A = 514.618.380 \text{ km}^2$$

A medida da área superficial obtida por ele foi aproximadamente 6 vezes maior que as medidas estimadas previamente por seus contemporâneos. Seus valores não foram bem aceitos, os gregos definitivamente não estavam preparados para lidar com um planeta tão grande! Esta medida foi estimada novamente diversas vezes, nas quais, no máximo, os cálculos indicavam metade da área calculada pelo sábio de Cirene. Estas novas determinações receberam maior credibilidade e pouquíssima contestação durante toda Idade Média. Atualmente sabemos que o raio da Terra vale aproximadamente 6400 km de modo que o valor obtido por Eratóstenes foi o que mais se aproximou da medida correta. É digno de admiração que o raio terrestre obtido por ele apresente um erro de aproximadamente 1%, mesmo o experimento tendo sido realizado 23 séculos atrás. Esta breve reconstrução do experimento explora uma importante questão que pretendemos elucidar: a determinação do diâmetro terrestre abriu caminho para que outros cientistas pudessem expandir nossa visão sobre o tamanho do mundo e recuassem os horizontes conhecidos. Aristarco de Samos obteve valores para as dimensões e distâncias, respectivamente da Lua e do Sol em relação à Terra, seus valores foram calculados em relação ao diâmetro terrestre. Graças ao experimento de Eratóstenes, seus valores tornaram-se conhecidos de forma absoluta:

	Medidas de Aristarco	Medidas atuais
Diâmetro da Lua	$0,35 D_{Terra}$	$0,27 D_{Terra}$
Distância Terra–Lua	$40 D_{Terra}$	$30 D_{Terra}$
Distância Terra–Sol	$19 d_{Terra, Lua}$	$380 d_{Terra, Lua}$
Diâmetro do Sol	$6,7 D_{Terra}$	$109 D_{Terra}$

Figura 4: Resultados de Aristarco comparados com valores atuais, segundo Langhi.

Apesar do valor de seus argumentos, este experimento permaneceu sem o devido crédito durante todo o período da Idade Média, especialmente pela discrepância com as estimativas até então realizadas sobre o tamanho da Terra e por não haver ainda nenhum suporte tecnológico que corroborasse suas medidas. Tal comprovação somente ocorreu com o advento das grandes navegações, no século XVI:

“Foi somente em 1522, com o regresso do único navio remanescente da frota de Magalhães, que o verdadeiro tamanho da Terra ficou estabelecido, com a desforra de Eratóstenes”.

(ASIMOV, 1968)

As medidas citadas na tabela acima permaneceram as únicas a possuírem alguma estimativa, com maior ou menor grau de precisão, até o século XVI. Durante este longo intervalo de tempo, permaneceram ocultas a nós as medidas dos outros errantes e demais dimensões do Sistema Solar.

2.2 A escala do Sistema Solar

O experimento realizado por Eratóstenes, com a contribuição dos cálculos realizados por Aristarco de Samos, permitiu que as dimensões da Terra, Lua e Sol fossem estimadas, bem como suas distâncias relativas. O mesmo não pôde ser feito com relação aos outros errantes, durante um período de aproximadamente 2000 anos, poucas contribuições no sentido de determinar as distâncias relacionadas a outros astros celestes chegaram até nós. De grande importância será a contribuição dada por Johannes Kepler (1571 – 1630), especialmente ao divulgar sua terceira lei ou, como é citada nos livros didáticos, a lei harmônica:

“Os cubos dos semieixos maiores das órbitas planetárias são diretamente proporcionais aos quadrados dos períodos siderais”.

Chamamos de período sideral de um planeta o intervalo de tempo para que ele complete uma revolução ao redor do Sol, tomando como referencial as estrelas fixas. Chamamos de período sinódico de um planeta seu período sideral aparente ou intervalo de tempo para que o mesmo complete uma revolução ao redor do Sol tomando a Terra como referencial.

Não nos preocupamos neste trabalho em efetuar as deduções matemáticas da lei harmônica, bastante divulgada na literatura específica, uma vez que estamos reconstruindo a evolução das medidas do espaço e, historicamente, esta lei não foi demonstrada por Kepler, mas apenas por Newton. Kepler intuiu sua terceira lei, obteve empiricamente seu resultado a partir dos dados herdados de Tycho Brahe (1546-1601). Em uma linguagem mais poética, o célebre romancista Edgar Allan Poe¹, através de seus personagens, cita que Kepler “adivinhou” sua terceira lei:

“Não teria, especialmente, dado certo trabalho a esses fanáticos o determinar por qual de suas duas estradas foi atingida a mais importante e a mais sublime de todas as suas verdades – a verdade, o fato da *gravitação*? Newton deduziu-o das leis de Kepler ... Sim, Kepler *adivinhou* essas leis vitais – isto é, *imaginou-as*. Se lhe tivessem pedido que indicasse por qual estrada, se a *dedutiva* ou a *indutiva*, as havia ele atingido, sua resposta deveria ter sido: ‘Nada sei a respeito de *estradas*, mas *conheço* o mecanismo do Universo. Aqui está ele. Apoderei-me dele com *minha alma*. Alcancei-o simplesmente por meio da *intuição*’ Sim! Kepler era essencialmente um *teórico*”

(POE, 1966, p. 456-61)

A 3ª lei de Kepler relacionou os períodos siderais dos diversos planetas conhecidos, que podiam ser determinados a partir da observação de seus períodos sinódicos² (equação 2) com os semieixos maiores de suas órbitas, que podem ser aproximados por seus raios orbitais médios. Tal aproximação, acreditamos que seja interessante do ponto de vista didático, especialmente quando abordada nas salas de aula. Isso não exclui a importância que

¹ A leitura de Poe foi vastamente divulgada pelo físico João Zanetic em seus artigos (ref. Bibliográficas) e reproduzimos, a seguir, alguns trechos do conto “Heureka” que já foram brilhantemente discutidos por ele.

² * Os períodos sinódicos são aqueles observados diretamente, a equação (2) permite a determinação do período sideral de um planeta do Sistema Solar a partir do conhecimento de seu período sinódico e do período orbital da Terra.

consideramos existir em uma discussão realizada nas salas de aula sobre a questão: Quais planetas possuem trajetórias mais aproximadamente circulares?

$$\frac{R_i^3}{T_i^2} = \frac{R_e^3}{T_e^2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{S} = \left(\frac{1}{P_i} - \frac{1}{P_e} \right) \quad (3)$$

A lei harmônica, que será deduzida formalmente por Newton a partir de sua gravitação universal, ainda não tornou possível determinar o valor de nenhuma distância planetária até o Sol, mas permitiu que seus valores relativos sejam conhecidos. O valor da distância média entre a Terra e o Sol, conhecido como Unidade Astronômica (a.u.)³ permaneceu desconhecido, mas sua determinação tornaria enfim conhecidos todos os raios orbitais do Sistema Solar. A determinação da unidade astronômica tornou-se no século XVII o empreendimento astronômico de maior importância e mais valiosos esforços. Após observar um trânsito de Mercúrio em 1677, o astrônomo Edmond Halley propôs um método para encontrar seu valor por meio do fenômeno da paralaxe. O método elaborado por Halley supõe a observação de um trânsito planetário, fenômeno relativamente raro, e o mesmo já não estaria vivo para aplicá-lo, uma vez que o próximo trânsito seria de Vênus, apenas em 1761.

“Sabendo que não estaria vivo para orquestrar a cooperação global para ver o trânsito de Vênus, um fato que lamentou até mesmo em seu leito de morte, enquanto segurava uma taça de vinho em suas mãos, tudo o que Halley poderia fazer era confiar nas gerações futuras e esperar que as pessoas se lembrassem das suas instruções apresentadas com meio século de antecipação⁴”.

As palavras abaixo foram proferidas por Halley em seu leito de morte e expressam sua crença na possibilidade de determinar a escala do Sistema Solar por meio da observação de um trânsito, tal crença se confirmará verdadeira em 1769:

“De fato, eu gostaria que muitas observações desse mesmo fenômeno fossem feitas por diferentes pessoas, em lugares distintos. Portanto, faço uma

³ A sigla a.u (astronomical unit) foi padronizada pela União Astronômica Internacional em 2012.

⁴ Trechos extraídos de um belíssimo livro escrito pela historiadora Andrea Wulf.

vez mais essa recomendação aos astrônomos curiosos que terão a oportunidade de observar essas coisas”.

Ao observarem simultaneamente Vênus atravessar na frente do disco solar, dois observadores em diferentes latitudes observarão o planeta cruzar o Sol em diferentes alturas relativas, esta diferença é causada pelo fenômeno da paralaxe. A abertura angular devido a esta variação será chamada de 2θ , por motivo de simplicidade.

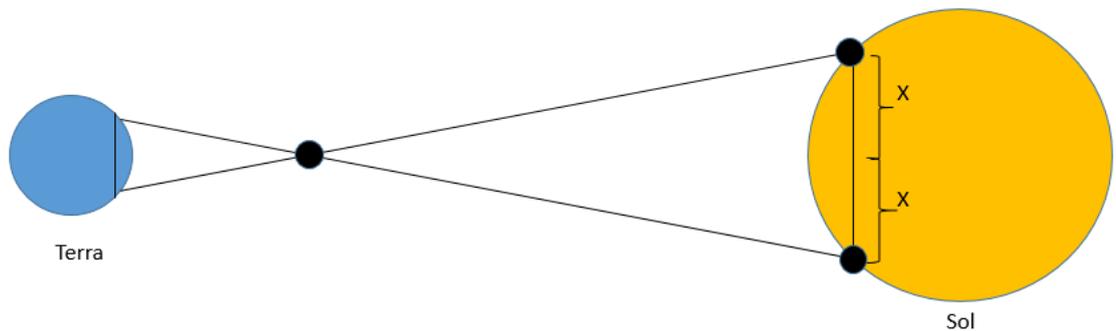


Figura 5

A figura abaixo mostra que, se determinarmos de maneira independente os valores de θ , e da distância X , definida pelo segmento de reta que une as projeções de Vênus, segundo os dois observadores, sobre a superfície do Sol, podemos determinar o valor da unidade astronômica. O método proposto por Halley, que será explorado ao longo deste trabalho, permite que tais grandezas sejam obtidas em uma configuração de trânsito de Mercúrio ou Vênus.

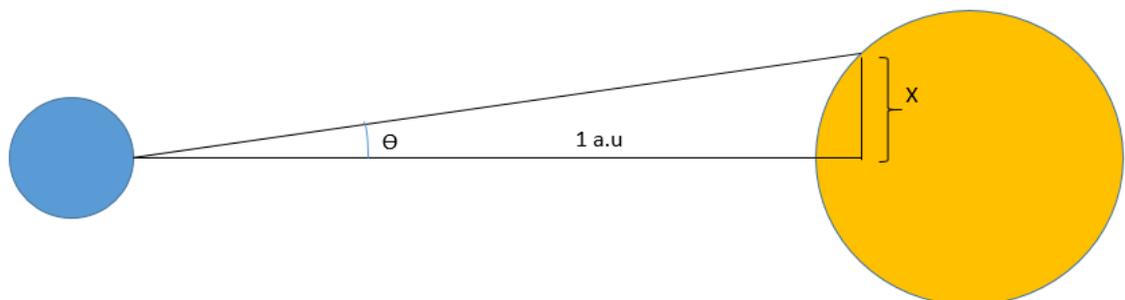


Figura 6

Os trânsitos de Vênus ocorrem em um intervalo de tempo peculiar: A cada 88 anos ocorrem dois trânsitos, separados por um intervalo de 7 anos. Diversas expedições, oriundas de países como Inglaterra, França, Rússia, foram realizadas para observação do trânsito de 1761. Um desconhecido fenômeno de difração luminosa, conhecido como “efeito gota negra”, ocorre nos instantes em que Vênus inicia e termina seu trânsito à frente do disco solar. Isso tornou todas as observações realizadas muito pouco confiáveis por gerar incertezas quanto aos exatos instantes de início e término do fenômeno. Com a chegada do trânsito de 1769, os astrônomos estavam mais preparados para lidar com as dificuldades práticas, de modo que as observações foram bem-sucedidas; diversos astrônomos, como o francês Chappe d’Auteroche, o sueco Pehr Wargentin, os britânicos Nevil Maskelyne e James Cook, conseguiram observar o trânsito das mais diversas partes do globo terrestre. A combinação de seus resultados permitiu que a escala do Sistema Solar se tornasse conhecida com imprecisão menor do que um por cento, o valor da unidade astronômica foi estimado em aproximadamente 150.000.000 km, em um dos maiores esforços coletivos já realizados ao longo da história da Ciência⁵.

2.3 Além do Sistema Solar

As bem-sucedidas observações do trânsito de 1768 nos levaram a conhecer a escala do Sistema Solar, a determinar com precisão as diversas órbitas planetárias e expandir este conhecimento para os diversos asteroides, cometas e demais corpos do Sistema Solar. Por outro lado, as distâncias estelares ainda não podiam ser seriamente investigadas. O fenômeno da paralaxe, tão importante no experimento idealizado por Halley, num primeiro momento não se revelou presente nos movimentos estelares. Esta ausência de paralaxe anual foi utilizada por opositores de Copérnico que defendiam o sistema Ptolomaico. Somente o desenvolvimento dos grandes telescópios no século XIX tornou possível medir tais paralaxes. As estrelas, mesmo as mais próximas do Sol, encontram-se a distâncias imensas, inimagináveis até o século anterior. Ainda nas palavras de Asimov:

“Se o Sistema Solar fosse tudo a existir no Universo, o problema essencial concernente às suas dimensões teria sido solucionado por volta de 1700. Entretanto, o Sistema Solar não é tudo que há no Universo. É preciso considerar as estrelas. Em 1700, era ainda possível acreditar que houvesse uma sólida

⁵ O valor da unidade astronômica já havia sido calculado por Giovanni Domenico Cassini, (1625-1712) seu valor obtido foi aproximadamente 140.000.000 de quilômetros.

abóboda limitando o Universo, e que a mesma estaria (possivelmente) não muito além dos confins do Sistema Solar. Assim, por exemplo, os pontos de vista de Kepler não se distanciavam muito desta concepção. As mensurações através de paralaxe, do gênero das que haviam revelado a escala do Sistema Solar, no século XVII, embora não tivessem qualquer utilidade em relação às estrelas nem por isso desprestigiaram o ponto de vista do 'céu sólido' ou firmamento. A separação entre duas estrelas vizinhas jamais variava em termos comensuráveis, fosse qual fosse o observatório na Terra a efetuar as medições" (ASIMOV, 1968).

A primeira paralaxe estelar foi medida por Friedrich Bessel em 1838, observando a estrela 61-Cygni. O ângulo de paralaxe medido foi de apenas 0,31 segundos de grau. O resultado obtido para esta distância estelar foi de 1×10^{14} km, as modernas medições apenas atualizaram este valor, corrigindo-o para $1,08 \times 10^{14}$ km. Comparando o brilho das demais estrelas com o brilho de Sirius e, considerando que o brilho de um astro seja inversamente proporcional ao quadrado de sua distância até nós, um famoso contemporâneo de Bessel, conhecido na Inglaterra por William Herschel, já havia criado uma unidade de distâncias conhecida como "siriômetro"⁶ que estimava o valor das diversas distâncias estelares em função da distância de Sirius à Terra (assumindo que todas estrelas possuam o mesmo brilho intrínseco). A comparação entre as magnitudes aparentes de 61-Cygni e Sirius somada ao já conhecido valor da distância de 61-Cygni tornou possível uma primeira estimativa das demais distâncias estelares, ao converter os valores das distâncias em "siriômetros" para quilômetros e, conseqüentemente, estimar a medida do diâmetro da Via-Láctea. Este episódio possui uma curiosa semelhança com a medida da circunferência da Terra realizada por Eratóstenes:

"Eratóstenes ficara chocado quando mediu a distância ao Sol, e Bessel fora abalado pela distância até as estrelas mais próximas, mas o tamanho da Via-Láctea era de fato atordoante. E, ao mesmo tempo, os astrônomos percebiam que mesmo a vastidão da Via-Láctea era insignificante quando comparada à presumível infinidade do Universo. Não nos surpreende que alguns cientistas começassem a se perguntar o que estava acontecendo no espaço além da Via-Láctea. Seria ela completamente vazia ou povoada por outros objetos".

(SINGH, 2010)

⁶ Uma distância estelar fornecida em "siriômetros" equivale a quantas vezes tal estrela se encontra mais longe da Terra quando comparada à estrela Sirius.

Esses importantes episódios nos mostram que, historicamente, as distâncias astronômicas têm se revelado sistematicamente maiores do que as nossas mais generosas estimativas, hoje sabemos que os valores encontrados inicialmente por Herschel, apesar do espanto causado inicialmente, foram subestimados. A medida do diâmetro da Via-Láctea, estimado em 10 mil anos-luz foi corrigida para um valor 10 vezes maior. O impressionante resultado do diâmetro da Via-Láctea levantou imediatamente a questão acerca da existência de estruturas ainda maiores ou mais distantes e direcionou astrônomos do mundo inteiro aos enigmáticos objetos conhecidos como nebulosas. Seriam elas compostas por nuvens de gás e poeira contidas na galáxia ou talvez objetos imensamente brilhantes e proporcionalmente mais distantes? Esta controvérsia acerca das nebulosas foi objeto de um importante episódio conhecido como “o grande debate”.

Se o Universo se resumisse à nossa galáxia, seu tamanho teria sido determinado no início do século XX. A tecnologia então empregada nos grandes telescópios já tornava possível recalcular as dimensões da galáxia com precisões a cada vez maiores. O grande debate se desenrolou em 1920 ao redor da natureza das nebulosas. De um lado, havia astrônomos que, representados pelo jovem Harlow Shapley, consideravam as nebulosas aglomerados estelares internos à Via Láctea, rodeados por nuvens de gás e poeira. Do outro lado da questão, estavam os astrônomos que, representados por Heber Curtis, defendiam que as nebulosas são vastos aglomerados estelares, separados de nós por imensas distâncias. O debate entre Shapley e Curtis foi promovido pela Academia Nacional de Ciências de Washington e foi importante no sentido de divulgar a questão, que permaneceu em aberto naquele momento. Ambos expuseram seus argumentos sem provas conclusivas. A controvérsia envolveu uma questão ainda mais importante para nossos propósitos: a busca pelas reais dimensões do Cosmos. A polêmica foi finalmente resolvida pelo grande astrônomo norte-americano Edwin P. Hubble, que detectou uma estrela de brilho variável na nebulosa M-31, no ano de 1923, por meio de observações no telescópio Hooker, de 100 polegadas, no observatório de Monte Wilson. O método de obtenção da distância utilizado por Hubble, válido para aquelas estrelas conhecidas como “variáveis cefeidas” havia sido formulado por Henrietta Leavitt em 1912. Leavitt obteve uma relação empírica entre a magnitude absoluta e o período de variação do brilho de 25 cefeidas nas nuvens de Magalhães, tal relação pode ser linearizada quando convertida para escala logarítmica. Esta relação conhecida como “Período-Luminosidade” é aplicada ainda atualmente. Hubble, em suas observações no observatório de Monte Wilson, localizou uma estrela variável cefeida na nebulosa M-31. Por meio da relação encontrada por Leavitt, mediu inicialmente o período de variação de seu brilho e assim obteve a

magnitude absoluta da mesma. Sua magnitude aparente é medida a partir da Terra e, portanto, foi determinada independentemente por ele. Com a conhecida relação abaixo (módulo de distância), Hubble determinou finalmente a distância⁷ em que M-31, a nebulosa de Andrômeda, se encontra do Sistema Solar.

$$m - M = 5\log(d) - 5 \quad (4)$$

Seu resultado surpreendeu a comunidade científica internacional, a nebulosa aparentemente se encontrava a 900 mil anos-luz da Terra, o que corresponde aproximadamente a 10 vezes o comprimento da Via-Láctea. O resultado obtido por Hubble trouxe importantes luzes sobre a compreensão do Universo em larga escala, demonstrando que existem enormes vazios entre as aglomerações estelares, seus resultados levariam a estimar a densidade de matéria bariônica no Universo em apenas 1 grama a cada volume equivalente a 1000 Terras. Até então, não se imaginava um Universo tão grande, nem tão vazio:

“Com uma única observação, captada em uma única chapa fotográfica, Hubble tinha mudado nossa visão do Universo e nos forçara a reavaliar nossa posição dentro dele. Nossa minúscula Terra agora parecia mais insignificante do que nunca, apenas um entre muitos planetas, orbitando uma entre muitas estrelas, dentro de uma entre muitas galáxias”. (SINGH, 2010) A solução do grande debate rendeu muitas homenagens a Hubble, mas essa ainda não seria sua descoberta científica de maior impacto. O aperfeiçoamento das técnicas espectroscópicas que acompanhou a evolução dos telescópios ao longo do século XX permitiu que Willian e Margareth Huggins detectassem a ocorrência de efeito Doppler na radiação vinda da estrela Sirius, observando deslocamentos espectrais nas linhas de absorção. O primeiro a observar este efeito em uma nebulosa foi Vestu Slipher em 1912. Até o ano de 1917, ele havia verificado 25 galáxias e, destas, 21 estavam se afastando⁸ do Sistema Solar. Muitos astrônomos acreditavam, até então, que as galáxias se encontravam imóveis ou que, no máximo, apresentassem uma distribuição aleatória de velocidades, este resultado se mostrava um tanto perturbador. Com a ajuda do talentoso fotógrafo astronômico Milton Humason e trabalhando no limite da tecnologia do observatório de Monte Wilson, Hubble encontrou uma relação linear entre a velocidade de afastamento e a distância em que as diversas galáxias se

⁷ A distância deve ser fornecida em parsecs.

⁸ O movimento de aproximação das quatro galáxias se deve à interação gravitacional existente no “Grupo Local”, fenômeno este que se sobrepõe à expansão do universo.

encontram do Sistema Solar. Se as velocidades de afastamento são proporcionais às distâncias, em um instante do passado, as diversas aglomerações estelares se encontravam sobre um único ponto. Em 1929, os Hubble e Humason já haviam confirmado o movimento de recessão em 46 galáxias. Esta descoberta foi imediatamente considerada uma corroboração do modelo do big-bang proposto por Georges Lemaitre apenas dois anos antes. Embora o próprio Hubble se recusasse a especular sobre as implicações de seus resultados, muito menos era adepto a tomar partido nas muitas controvérsias cosmológicas, especialmente entre os modelos do big-bang e do Universo Estacionário. Os resultados de Hubble implicavam a existência de um instante inicial, a partir do qual se iniciou o processo de expansão do Universo. No ano de 1931, ele publica a versão estendida de sua pesquisa, aumentando sua amostragem de aglomerados estelares e diminuindo sua margem de erros; fica claro, então, que as galáxias se movem pelo espaço obedecendo à relação empírica conhecida como “Lei de Hubble”.

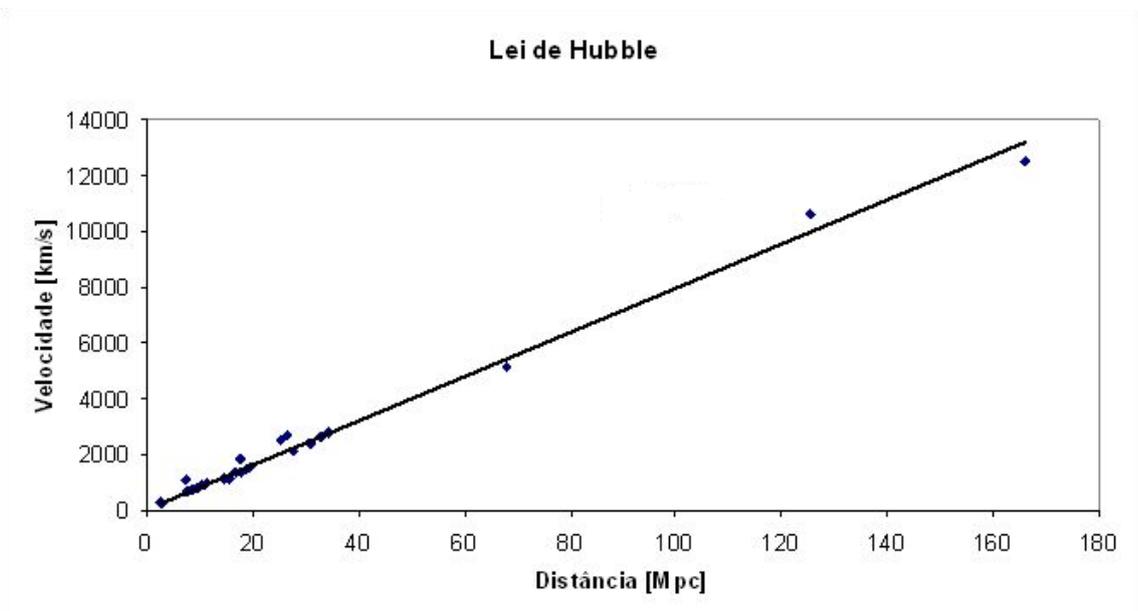


Figura 7: Velocidade de recessão das galáxias segundo a lei de Hubble.

$$V = H_0 \cdot d \tag{5}$$

A partir desta relação, onde H_0 é usualmente considerado aproximadamente igual a $71 \text{ km s}^{-1} / \text{Mpc}$, podemos estimar a idade do Universo:

$$\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 \cdot d} = \frac{1}{H_0} \quad (6)$$

A idade do Universo foi inicialmente estimada entre 12 e 17 bilhões de anos, posteriormente, com o aumento na precisão do valor da constante de Hubble H_0 , seu valor foi corrigido para 13,8 bilhões⁹. A lei de Hubble nos permitiu estimar distâncias galácticas a partir de seus espectros. Nas últimas décadas, tem sido utilizada para explorar as estruturas mais distantes do Universo e repensar o nosso lugar nele.

Nestes dois capítulos iniciais buscamos dar um panorama geral dos conceitos que serão explorados em nossas atividades pedagógicas. De variadas maneiras, eles dialogam com o tema deste trabalho, conforme reconstrução realizada até este ponto. Iniciaremos no capítulo 3 a descrição e o desenvolvimento do trabalho realizado em um ambiente escolar em que confirmaremos ou não nossas impressões sobre a forma e a intensidade com que o conceito de espaço e a história da evolução das medidas espaciais podem contribuir no ensino de Astronomia e, de forma mais geral, de ciências como um todo.

⁹ Uma estimativa mais precisa da idade do universo leva em consideração a desaceleração causada pela gravidade. Nesta estimativa temos que $\Delta t = 2H_0/3$ (anexo IV).

3: Algumas considerações epistemológicas

Oinos — Mas eu sonhei que nesta existência ficaria imediatamente conhecedor de todas as coisas e tornar-me-ia, assim, imediatamente feliz por conhecer tudo.

Agathos — Ah! A felicidade não está no conhecimento, mas na aquisição do conhecimento! Sabendo para sempre, seremos para sempre venturosos; saber tudo, porém, seria diabólica maldição.

(Edgar Allan Poe)

3.1. Problematizando o conceito de espaço

As atividades propostas neste trabalho foram aplicadas, durante um ano letivo, a três turmas do primeiro ano do Ensino Médio no Instituto Germinare.¹⁰ Sou professor de Física nesta instituição, fato este que tornou viável a aplicação de tais propostas ao longo do planejamento pedagógico anual. Sugerimos que, se outros professores considerarem importante a aplicação destas atividades em suas respectivas turmas, busquem inseri-las harmônica e oportunamente no decorrer do ano letivo, adaptando seu calendário de forma a tornar suas inserções o mais natural possível. Com o intuito de gerar reflexões sobre o conceito de espaço, optamos por iniciar esta proposta com uma abordagem apenas qualitativa, que problematize a natureza do espaço físico com os alunos e, conseqüentemente, torne legítima uma posterior investigação mais ampla a respeito do assunto. Valemo-nos de um importante episódio de história da Ciência que gerou uma famosa reflexão sobre a natureza do espaço físico: o mais famoso dos paradoxos de Zenão. A corrida entre Aquiles e a tartaruga confunde noções cotidianas de espaço e tempo. Como ponto de partida, problematizar esta questão por meio da história da ciência, como descrito por Robilotta, é exatamente nosso propósito.

“No ensino da Física, um papel possível para a história seria o de constituí-la como uma fonte de visões alternativas do universo, passíveis de serem contrastadas com a versão oficial, ensinada nas escolas. O reconhecimento da existência de soluções alternativas a um dado problema promove o desenvolvimento de uma postura crítica, porque leva a pessoa a optar. Para optar, é preciso haver critérios. A não unicidade de critérios leva cada

¹⁰ Nesse colégio, uma iniciativa da empresa JBS, são oferecidas anualmente 90 vagas de ingresso no 6º ano do Ensino Fundamental sem cobrança de qualquer mensalidade até o término do 3º ano do Ensino Médio.

um a se posicionar, forçando uma postura menos passiva frente ao conhecimento”.

(ROBILOTTA, 1988)

Para mostrar o quão antigo é o questionamento sobre a natureza microscópica da matéria, os alunos foram convidados inicialmente a ler um capítulo do famoso livro “O mundo de Sofia¹¹”, onde o modelo atômico de Demócrito de Abdera é exposto. Posteriormente, o paradoxo da corrida lhes é apresentado. Podemos nos perguntar: Qual a relação entre o atomismo de Demócrito e o paradoxo de Zenão¹²? Segundo o modelo de Demócrito, a estrutura microscópica da matéria se resumiria apenas à existência de diferentes tipos de átomos e do vazio entre eles. A crença na natureza discreta da matéria supõe a existência de estruturas indivisíveis no universo e é onde situamos o atomismo de Demócrito. O paradoxo de Zenão ataca esta lógica e, partindo do pressuposto da natureza discreta do espaço físico, tem por conclusão uma contradição, uma realidade paradoxal na qual o movimento é apenas uma ilusão e, em uma hipotética corrida entre dois competidores, aquele que assumir a dianteira jamais será alcançado, independentemente da diferença entre suas velocidades, o que é evidentemente uma conclusão errada.

Não é simples, do ponto de vista lógico, conciliar o atomismo com o paradoxo da corrida; ao final desta atividade, pedimos para que os alunos expusessem seus pontos de vista sobre a natureza do espaço. Se existem partículas realmente fundamentais (de natureza discreta) ou se é possível dividir continuamente o espaço em dimensões sempre menores, sem que esbarremos em dimensões mínimas (a natureza contínua do espaço). O intuito desta atividade foi confirmar nossas impressões iniciais, segundo as quais existem questões fundamentais sobre o espaço muito pouco exploradas no ensino regular e que estão na gênese de diversas outras questões com potencial para serem exploradas. Após um contato inicial com o modelo de Demócrito e com o paradoxo da corrida, realizamos um brevíssimo diálogo com a turma sobre algumas das importantes descobertas da mecânica quântica, a partir da década de 60, quando a hipótese dos quarks formadores dos núcleons ganhou muitos adeptos. Por fim, foi perguntado aos alunos se eles acreditam que o espaço possui natureza contínua ou discreta e se será possível que existam estruturas

¹¹ Romance escrito por Jostein Gaarder em 1991.

¹² Apesar de Zenão de Eleia ter formulado mais de 40 paradoxos, referir-nos-emos ao paradoxo da corrida como “O paradoxo de Zenão” apenas por não utilizarmos nenhum outro deles ao longo desta dissertação.

ainda menores do que os quarks. Separamos abaixo algumas respostas muito recorrentes:

“Será apenas questão de tempo até os cientistas encontrarem entidades menores do que os quarks, pois para encontrá-las precisam de uma tecnologia que apenas será desenvolvida no futuro. Eu considero que o espaço é discreto pois, por mais que existam partículas menores que os quarks, uma hora tem que parar de diminuir”.

“Mesmo acreditando que existam partículas menores que os quarks, considero o espaço discreto, ou seja, acredito que exista uma partícula elementar, indivisível”.

“Alguma coisa tem que formar os quarks, não consigo imaginar algo indivisível”.

“Eu considero que, em algum momento, a menor e indivisível estrutura do universo será encontrada, ou seja, que o espaço físico seja de natureza discreta porque, na minha opinião, tem que existir algo indivisível e imutável que componha tudo”.

“Acredito que, com o passar do tempo e depois de muitas pesquisas, encontraremos a menor parte do Universo, acredito, portanto, que o Universo seja discreto”.

“A verdade científica é algo temporário e, conforme a tecnologia vai avançando, as pesquisas vão descobrindo mais coisas. Eu considero que o espaço seja de natureza contínua”.

“A tecnologia é algo que vem avançando cada vez mais rapidamente, portanto, eu diria que é uma questão de tempo (e pouco) até encontrarmos partículas menores. Porém, temos que pensar que uma hora esta divisão terá um fim, não será infinita a descoberta de partículas menores e não sabemos, nem temos como, quando essa hora irá chegar”.

No total, foram entrevistados 73 alunos, destes 37 demonstraram acreditar em uma natureza contínua do espaço, enquanto os outros 36 responderam crer em uma estrutura discreta indivisível. Apesar deste inesperado “empate”, as respostas oferecidas nos permitiram tirar conclusões muito mais profundas. De formas distintas de expressão, muitos alunos descreveram que “acreditam na ciência” no que se refere à tentativa de encontrar as partículas verdadeiramente elementares. Traduzindo tais respostas para a linguagem epistemológica, diríamos que estes alunos acreditam na capacidade

da ciência contemporânea em “resolver quebra-cabeças”¹³. Pareceu-nos também que seus pontos de vista, em geral, se aproximam da crença Popperiana, segundo a qual a ciência progride ao se aproximar constantemente mais de uma compreensão plena da realidade, mesmo que tal compreensão permaneça continuamente incompleta. Não recebemos nenhuma resposta como “a natureza é intrinsecamente caótica” ou “esta pergunta não faz nenhum sentido”. É natural considerarmos que, tanto pela idade quanto pela maturidade, as respostas obtidas foram permeadas por uma grande dose do chamado “realismo ingênuo”. Um dos aspectos que julgamos mais motivadores desta proposta foi fornecer aos alunos, conforme citação do professor Robilotta na primeira página deste capítulo, visões alternativas de universo por meio da história. Não partilhamos da crença no realismo ingênuo, visão já muito criticado ao longo do século XX, mas o conceito de espaço constitui uma fonte riquíssima de visões alternativas e controversas de mundo.

Antes de iniciarmos algumas atividades práticas de oficinas de medidas, propusemo-nos a refletir um pouco mais com os alunos e estender o diálogo sobre a evolução do conhecimento científico, particularmente no campo da Astronomia. A partir das posições acerca da natureza microscópica do espaço descrita até aqui, passamos para uma questão macroscópica: os “sistemas de mundos”. Após algumas aulas expositivas sobre o tema da Gravitação Universal, em que constaram algumas discussões sobre Copérnico, Tycho Brahe e as leis de Kepler, seguimos o conteúdo sugerido pelos conhecidos livros didáticos, também exibimos durante as aulas o filme “Alexandria”¹⁴. Não gostaríamos de entrar no julgamento das questões religiosas expostas durante o filme, não apenas por se distanciarem do objetivo deste trabalho, mas também por considerarmos que falem dados seguros que nos levem a dar credibilidade ou não ao viés apresentado pelo diretor. A utilização do referido filme para fins pedagógicos é interessante no sentido de contextualizar historicamente a transição do Geocentrismo para o Heliocentrismo e, uma vez que estes dois pontos de vista são expostos de uma forma interessante no enredo, o mesmo pode ser uma ferramenta para os professores de Física e de Ciências. Sugerimos que os docentes assistam ao filme e, eventualmente, decidam pela exibição da obra a seus alunos, tomando o cuidado necessário com algumas ressalvas históricas, ou, até mesmo, convidando algum professor de História para um bate-papo com a turma, também, podemos encontrar alguns erros conceituais no filme, mas irrelevantes para os nossos propósitos.

¹³ Esta expressão é utilizada tal qual empregada por Thomas Kuhn.

¹⁴ Título Original: *Ágora*, dirigido por Alejandro Amenábar, lançado no ano de 2009.

A discussão sobre o filme realizada com os alunos consistiu em abordar particularmente três cenas distintas; os diálogos entre as personagens foram reproduzidos em uma folha para, em seguida, apresentarmos algumas perguntas aos alunos, no sentido de conhecê-los um pouco mais, particularmente em seus credos epistemológicos, na forma com a qual consideram que a ciência interage com a natureza.

3.2 Primeiro Diálogo

O enredo se inicia no contexto de uma hipotética aula ministrada pela célebre filósofa Hipátia¹⁵ na grande biblioteca de Alexandria quando ela faz o seguinte questionamento a seus alunos:

“Muitos tolos se perguntaram por que as estrelas não caem do céu. Mas, vocês, instruídos pelos sábios, sabem que as estrelas não se movem para cima e para baixo. Apenas gravitam¹⁶ de leste para oeste segundo a rota mais perfeita já criada: o círculo. Como o círculo reina no céu, as estrelas nunca caem e nunca cairão. Mas o que acontece aqui na Terra? Aqui os corpos caem, mas não em movimentos circulares, e sim, lineares! Agora eu vos pergunto: Qual mistério imaginam existir nas profundezas da Terra para que, cada pessoa, animal ou objeto permaneça aqui na Terra e não se perca pelos ares? ”

Após a reprodução desse diálogo foram feitas as seguintes “provocações”:

(P.1) Como você responderia a esta pergunta se ela lhe fosse formulada hoje?

(P.2) Muitas explicações distintas para a causa da queda dos corpos já foram formuladas ao longo do tempo. Cite ao menos duas delas.

A discussão sobre a pergunta nos deu oportunidade de expor uma questão importante do ponto de vista epistemológico: a totalidade dos alunos buscou respondê-la com base na gravitação Newtoniana, mas a gravitação Newtoniana explica completamente a existência da força gravitacional? Não, ela se fundamenta na hipótese de que existe uma força atrativa entre qualquer par de corpos dotados de massa, segundo a expressão que reproduzimos abaixo, bem conhecida das salas de aula:

¹⁵ Hipátia ou Hipácia, importante filósofa, viveu em Alexandria entre 351 a 415 d.C.

¹⁶ Provavelmente o verbo “gravitar” não era usado antes do século XVI, caracterizando-se um descuido do roteirista.

$$F = \frac{GMm}{d^2} \quad (7)$$

É importante que os professores lembrem seus alunos que a expressão Newtoniana não resolve o “mistério existente nas profundezas da Terra”, mas apenas o equaciona. A temática explorada em (P.2) nos serviu de oportunidade para lembrar a turma que existem explicações para a queda dos corpos que divergem da gravitação Newtoniana. No capítulo inicial desta dissertação, citamos três diferentes explicações para o fenômeno. Consideramos a resposta dentro da visão cosmológica de Aristóteles, da Gravitação Universal de Newton e da teoria da relatividade de Einstein. Curioso é que apenas a gravitação Newtoniana aparece no currículo regular, particularmente no Ensino Médio. Quais seriam os critérios utilizados para tal escolha? Sabemos que a interpretação Aristotélica, apesar de ultrapassada, explica com particular elegância e com boa precisão este fenômeno, também é a explicação que perdurou por um número maior de gerações até hoje. Curioso é que também não podemos considerar a gravitação de Newton uma explicação completa, uma vez que, tendo sido substituída pela Relatividade quando confrontada com fenômenos físicos relacionados com intensos campos gravitacionais ou velocidades próximas à da luz, não pode ser mais considerada uma explicação final para o fenômeno, e sim apenas um modelo que descreve muito bem a natureza em alguns contextos, mas em outros, não.

Nas salas de aula, porém, tal limitação não é explicitada e as leis de Newton são muitas vezes descritas como explicação definitiva, neste exemplo, para a queda dos corpos, apesar de muitos autores defenderem uma maior inserção de Física Moderna no ensino (REIS, 2002). A escolha dos livros didáticos, e também dos PCN, pela inserção apenas da gravitação de Newton não leva em conta o modelo mais simples, nem o mais recente, nem aquele considerado correto por mais tempo, mas sim uma tradição propedêutica de mais de 60 anos, focada nos aspectos técnicos e práticos da ciência, em detrimento daqueles reflexivos e lúdicos. Tal tradição persiste em nossa educação após os períodos de ditadura militar e guerra fria, apesar das numerosas revoluções culturais e sociais vividas desde esses tempos; em certo sentido, é como se a educação se recusasse a acompanhar as mudanças ocorridas nas últimas décadas, a partir das quais o papel do professor, dos alunos e da própria escola já não são exatamente os mesmos. Não negamos que a gravitação de Newton seja importante e deva estar sim presente nos currículos escolares, não só por seu valor intuitivo, por se aplicar à maioria dos fenômenos cotidianos ou por seu valor histórico. O que criticamos é a ausência de explicações alternativas para este fenômeno.

3.3 Segundo Diálogo

Apresentamos agora a segunda cena recortada do filme, com o intuito de levantar uma importante questão de natureza epistemológica:

Hipátia: “Estive pensando em algo que me disse no dia em que criticou o mecanismo celeste, chamando-o de arbitrário”.

Orestes: “Na verdade, eu criticava Ptolomeu por complicar tudo com os epiciclos, mas talvez seja meu pensamento simplista”.

Hipátia: “O céu deveria ser simples! E se houvesse uma explicação mais simples para os errantes?”

Personagem Oculto: “Existe, mas é tão absurda, tão antiga que ninguém acredita... Aristarco argumentou que a Terra se move. O estranho comportamento dos errantes é apenas uma ilusão de óptica causada pelo nosso movimento em combinação com o deles ao redor do Sol”

Após a reprodução dessa cena, solicitamos que os alunos respondessem às seguintes provocações:

(P.3) Comente a frase atribuída ao personagem Orestes:

“Ptolomeu não é perfeito, mas funciona¹⁷”

(P.4) Se diversas explicações para os mesmos fenômenos são formuladas ao longo do tempo, como ter certeza se atualmente a ciência oferece respostas que não serão negadas no futuro?

O que queremos ressaltar com tais perguntas? Principalmente que os alunos busquem refletir um pouco mais sobre a relação entre a ciência e a natureza, sobre o conceito de verdade nas investigações científicas e filosóficas. Ao longo do século XX, diversas correntes de pensamento filosófico se manifestaram sobre a relação entre a ciência e a compreensão da natureza; dentre elas, uma das correntes de maior repercussão foi o falseacionismo, inaugurado por Karl Popper. Reproduzimos abaixo uma explicação desse movimento:

“O progresso da ciência – como o falsificacionista o vê – pode ser resumido conforme se segue. A ciência começa com problemas, problemas estes associados à explicação do comportamento de alguns aspectos do mundo ou universo. Hipóteses falsificáveis são propostas pelos cientistas como

¹⁷ Esta frase se encontra em outra cena em que Orestes e Hipátia dialogam.

soluções para o problema. As hipóteses conjecturadas são então criticadas e testadas. Algumas serão rapidamente eliminadas. Outras podem se revelar mais bem-sucedidas. Estas devem ser submetidas a críticas e testes ainda mais rigorosos. Nunca se pode dizer de uma teoria que ela é verdadeira, por mais que ela tenha superado testes rigorosos, mas pode-se auspiciosamente dizer que uma teoria corrente é superior a suas predecessoras no sentido de que ela é capaz de superar os testes que falsificaram aquelas predecessoras.”

(CHALMERS, 1993)

Observamos que, na epistemologia Popperiana, a ciência passa constantemente por um mecanismo de autocorreção, as hipóteses que se revelam incompatíveis com a experiência direta da natureza devem ser substituídas por outras que, mesmo temporariamente, sobrevivam a este crivo.

Essa breve digressão nos leva a problematizar a frase atribuída ao personagem Orestes, o modelo dos epiciclos formulado por Claudius Ptolomeu não foi adotado ingenuamente pelos astrônomos europeus durante a Idade Média, era consensual que o mesmo carecia de simplicidade estética e não era crido como definitiva representação da natureza. Por vezes, a formulação de leis científicas não é acompanhada da pretensão de explicar o funcionamento da natureza como poderíamos imaginar num primeiro momento. Em suma, a maneira como os cientistas interpretam as leis da física costuma se classificar em um dos grupos abaixo:

Realismo: Esta visão defende que existem muitas realidades inobserváveis na natureza e que é objetivo da ciência a tentativa de conhecê-las. Nesta crença, a natureza possui uma “arquitetura” e um “modo de funcionamento” mesmo que sejam compreendidos de forma incompleta e limitada pela ciência.

Instrumentalismo: Esta visão ressalta a importância do empirismo, defendendo que o papel das leis científicas se limita a gerar previsões corretas acerca dos fenômenos naturais, sem o compromisso ontológico com realidades inobserváveis. O instrumentalismo atribui uma importância apenas operacional aos conceitos cuja existência não pode ser provada diretamente pela observação.

De uma maneira objetiva, se imaginarmos um hipotético cientista medieval cuja visão de mundo se aproxima mais da visão realista, o mesmo se perguntaria se os mecanismos propostos por Ptolomeu realmente correspondem aos verdadeiros movimentos dos errantes. Já um cientista instrumentalista desse período não se incomodaria com essa questão, uma vez que o modelo de Ptolomeu se ajusta consideravelmente aos movimentos planetários observados

no céu. Podemos dizer que a frase: “Ptolomeu não é perfeito, mas funciona” é de caráter profundamente instrumentalista.

“Com Ptolomeu, o que realmente acontece é o divórcio entre a Astronomia matemática e a Astronomia física. A partir de Ptolomeu, enquanto os filósofos e os cosmólogos continuavam insistindo no movimento circular uniforme das esferas celestes por razões físicas, os astrônomos matemáticos respondiam que a única coisa que lhes interessava era elaborar modelos geométricos que pudessem prever corretamente a posição dos astros, não se preocupando com a realidade desses modelos” (LUCIE, 1987)

“Copérnico não questiona a adequação empírica do modelo. Pelo contrário, admite que as teorias planetárias dos ptolomaicos e outros são ‘consistentes com os dados numéricos’. Tampouco acredita que esses dados precisem de correção...Copérnico julgava ser o sistema ptolomaico empiricamente adequado, ele o criticava por razões teóricas” (FEYERABEND, 2010).

Vejamos abaixo a resposta fornecida por um dos alunos à (P.3):

“A principal obra de Ptolomeu, Almagesto, apresenta um sistema geocêntrico, com a Terra no centro do Universo e os outros corpos orbitando-a de forma complicada, por meio de epiciclos, sendo desagradável para alguns devido à sua complexidade. Sendo os círculos considerados perfeitos, a frase de Orestes se refere ao propósito de prever posições dos planetas, que, funcionando, continuou sendo utilizada por um longo período, predizendo as posições o movimento dos planetas com precisão considerável”

A relação que se estabelece entre os modelos teóricos e a observação da natureza é colocada de maneira mais geral na pergunta (P.4). Dessa vez, procuramos generalizar o exemplo ilustrado pela cosmovisão Ptolomaica para a atividade científica em geral. Podemos afirmar que a ciência caminha linearmente para uma maior compreensão da natureza? O próprio filme explora um importante contraexemplo: o sistema heliocêntrico foi inicialmente proposto por Aristarco de Samos no século III a.C. e, após um período de aproximadamente 2 mil anos de geocentrismo, foi retomado por Copérnico em um cenário que, graças ao esforço de Galileu, lhe trouxe sustentação teórica. Esse conhecidíssimo exemplo nos leva a questionar a tese de que a ciência caminha linearmente para uma maior compreensão da natureza por um acúmulo de novos conhecimentos. Um dos filósofos que mais se dedicaram a estudar esse problema, ilustrando-o e corroborando sua particular visão de mundo foi o austríaco Paul Feyerabend, quem julgamos pertinente trazer à questão, pois sua epistemologia traz importantes luzes para a pergunta (P.4).

3.4 O anarquismo epistemológico de Feyerabend

O que mais nos chama à atenção nas diversas considerações de Feyerabend é sua concepção de “Anarquismo Epistemológico”, especialmente pelo fato de o autor ressaltar que a ciência não evolui simplesmente pela indução Baconiana ou pelo falseacionismo Popperiano. Antes, a ciência sequer segue um único princípio metodológico, como podemos observar diversas vezes ao longo de sua mais famosa e polemica obra intitulada “Against Method”:

“O aprendizado não vai da observação para a teoria, mas sempre envolve ambos os elementos. A experiência surge com pressupostos teóricos, e não antes deles, e uma experiência sem teoria é tão incompreensível quanto o é uma teoria sem experiência...Tudo o que podemos dizer é que os cientistas procedem de muitas maneiras diferentes, que regras de método, se explicitamente mencionadas, ou não são obedecidas de modo algum ou funcionam na maior parte dos casos como regras práticas de obedecer, e resultados importantes surgem da confluência de realizações produzidas por tendências separadas e frequentemente conflitantes. A ideia de que o conhecimento científico é, de algum modo, peculiarmente positivo e isento de diferenças de opinião não passa de uma quimera”.¹⁸ (FEYERABEND, 1977)

De fato, a disseminação de que a ciência obedece um método científico, restringe o exercício de criticismo e constante reflexão, que acreditamos dever ser uma pratica constantemente estimulada nas salas de aula. “Não existe coisa alguma mais danosa ao avanço da ciência que a ilusão de que ela marcha para frente pelo acréscimo de fatos novos” (ALVES, 2000).

Feyerabend utiliza, na maior parte de “Against method”, o exemplo da transição do Geocentrismo para o Heliocentrismo para corroborar seu ponto de vista, tratando de investigar historicamente o episódio vivido por Galileu Galilei, negando o princípio da indução ao afirmar que “uma teoria pode ser inconsistente com a evidência não porque seja incorreta, mas porque a evidência está contaminada”. Tanto a obra de Feyerabend quanto o filme “Alexandria” nos lembram Aristarco de Samos, cujo modelo Heliocêntrico foi abandonado em um período em que a cosmovisão Aristotélica parecia harmonizar-se mais com as observações astronômicas.

“As ideias fundamentais de certo ramo do conhecimento nunca são determinadas somente pelos fatos daquele mesmo ramo. E, com isso, não quero apenas dizer que, dado qualquer conjunto de fatos, sempre existe uma variedade de teorias que concordam com aquele conjunto: ao contrário, o que quero dizer

¹⁸ Utilizamos a versão do livro traduzida para o português, publicada pela editora Unesp.

é que mesmo a rival rejeitada de uma teoria que é extremamente confirmada e ‘cientificamente sólida’ pode sobreviver à teoria bem-sucedida: a pesquisa pode retirar evidência dela e transferir para a rival desacreditada...assim, a queda livre dos corpos pesados por muito tempo deu suporte à ideia de que a Terra era imóvel...Galileu substituiu a lei aristotélica do movimento por sua própria lei altamente especulativa e foi obrigado a transferir a evidência a favor de Aristóteles para sua própria visão”. (FEYERABEND, 2010)

Os alunos não foram introduzidos à epistemologia Feyerabendiana, mas, ao serem confrontados com a pergunta (P.4), estão diante de um de seus aspectos centrais: de que forma se situam aquelas visões de mundo consideradas “ultrapassadas” dentro da ciência? Elas ainda apresentam alguma importância? Os cientistas realmente lidam com fatos? Abaixo reproduzimos algumas respostas:

“Penso que, até o ponto em que chegamos, conseguimos realmente descobrir a real verdade sobre a maioria das coisas, mas não duvido que seja provado o contrário no futuro, já que os antigos descobriram uma série de ‘verdades’ que não se revelaram verdades no fim das contas. Porém, pode ser que haja coisas sobre as quais nunca conseguiremos saber a verdade e tenhamos apenas hipóteses e teorias”

“Não é possível ter certeza, pois atualmente estamos no nosso limite tecnológico e científico, mas isso não significa que não iremos descobrir novas coisas. No futuro, a tecnologia estará muito mais avançada e é perfeitamente possível que descubramos novas fontes que respondam perguntas atuais ou novas”

“Atualmente não há como ter certeza de que a ciência oferece todas as respostas, mas, com os avanços tecnológicos, a possibilidade de entender melhor o que acontece no cosmos aumenta, o que nos leva a crer que tenhamos algumas respostas certas”

Ao analisarmos as respostas acima, que sintetizam o pensamento comum desses alunos, deparamo-nos com algumas advertências feitas por Feyerabend. As respostas denotam uma crença comum, segundo a qual a veracidade ou não de uma hipótese será julgada pela tecnologia ou por nossa capacidade de extrair respostas da natureza que confirmem ou não nossa hipótese inicial. O autor ressalta que o exemplo de Galileu serve para refutar esse senso comum. A mesma observação da natureza (os corpos caem em linha reta) serviu como argumento para corroborar a visão Geocêntrica em um período e para corroborar o Heliocentrismo de Copérnico em outro. Em um livro sobre esse tema, o escritor brasileiro Rubem Alves (2000) intitula um de seus capítulos como “Pescadores

e anzóis”. Em sua analogia, os cientistas exercem o papel de pescadores que, em seu exercício de pesca optam por utilizar redes dos mais variados tamanhos, grandes ou pequenas:

“O pescador faz sua rede com fios, o cientista faz sua rede com palavras...Galileu, ao propor a matemática como a linguagem a ser usada para traduzir a natureza, na realidade construiu uma rede cujas malhas deixam passar cheiros, sons, cores, sensações táteis – por razões óbvias: estes não eram os peixes que Galileu queria. No seu aquário só podiam sobreviver relações matemáticas. Por isto, sua rede só segurava objetos matematizáveis... *Teorias são enunciados acerca do comportamento dos objetos do interesse do cientista.* Daí termos teorias relativas ao universo, aos átomos, às combinações entre os elementos, à vida, à sociedade, às emoções, à educação: cada uma delas é um conjunto de conhecimentos acerca dos hábitos comportamentais das entidades a serem caçadas, sem o que o cientista não poderá preparar-lhes armadilhas. Um cientista é uma pessoa que sabe usar as redes teóricas para apanhar as entidades que lhe interessam”.

Esse trecho ilustra que o avanço científico depende intrinsecamente das perguntas que podemos fazer à natureza, de quais modelos podem ou não ser falsificáveis. Existem diversos episódios que nos mostram como alguns conceitos teóricos foram aceitos e negados em diferentes períodos. As razões que levaram Aristarco de Samos a defender um modelo Heliocêntrico diferem daquelas apresentadas por Galileu. O atomismo moderno, inaugurado pelo modelo atômico de Dalton¹⁹ é outro exemplo paradigmático, pois se distancia muito do atomismo de Demócrito. A epistemologia de Feyerabend lança importantes luzes sobre o conceito de espaço ao nos lembrar que mesmo hipóteses aparentemente refutadas são importantes para a ciência e merecem ser estudadas. O autor considera que a própria história nos deixa esse aprendizado e que a ciência não progride seguindo especificamente uma metodologia, mas, ao contrário, progride exatamente por não seguir apenas uma única. Assim, o autor inaugura as concepções de “anarquismo epistemológico” e “pluralismo metodológico”. A epistemologia de Feyerabend é um antídoto contra a visão conhecida como “realismo ingênuo” que possibilita levar o leitor a relativizar algumas questões aparentemente fundamentais e sólidas.

“Não há uma única regra, ainda que plausível e solidamente fundamentada na epistemologia, que não seja violada em algum momento”.

(FEYERABEND, 1977)

¹⁹ Tal cronologia é adotada pela totalidade dos livros didáticos analisados pelo autor.

Concluindo esta etapa, um último diálogo no filme nos chamou a atenção e também foi transcrito para uma breve discussão com os alunos:

Hipátia: “Por que os errantes mudam seu brilho tão de repente? E o que é pior, por que o Sol muda de tamanho do verão para o inverno?”.

Aspasius: “Porque talvez esteja mais perto algumas vezes e mais longe outras”

Sobre o tema das estações do ano, existe uma vastíssima quantidade de trabalhos acadêmicos que o exploram das mais variadas formas. Apesar de esse não ser o tema do nosso trabalho, acreditamos ser nosso dever aproveitar a ocasião para discutir com os alunos o que aparentemente é um erro conceitual propagado pelo filme, que provavelmente se originou de uma falta de cuidado da parte do roteirista. Verificamos, no diálogo transcrito acima, que os personagens associam o fenômeno das estações do ano à variação na distância entre a Terra e o Sol. Na verdade, ao longo dessa narrativa, que não deixa de ser apenas um romance baseado na biografia de uma filósofa, Hipátia é levada a concluir que a Terra orbita em torno do Sol segundo uma trajetória elíptica, entre outros motivos, porque o Sol muda de tamanho angular do verão para o inverno. Muitos livros e artigos têm ressaltado a associação errônea entre as estações do ano e a variação na distância entre a Terra e o Sol (CANIATO, 1990). Tal associação, felizmente, não tem sido mais disseminada nos livros didáticos nas últimas duas décadas, por isso, ficamos infelizmente surpresos ao vê-la sutilmente presente nesse filme e enfatizamos com os alunos sua falácia por meio de duas explicações:

(E.1) A variação no diâmetro angular do Sol é de aproximadamente 3 minutos de arco, ou equivalente a $0,05^\circ$. Tal variação é imperceptível ao olho nu.

(E.2) Esse fenômeno não está associado e, por acaso, sequer coincide com as estações do ano, ou seja, no verão a distância entre os astros não é mínima, assim como no inverno seu valor não é máximo. São fenômenos distintos que não podem ser confundidos ou sequer conectados.

(E.3) Como Alexandria está no hemisfério norte e o periélio ocorre em janeiro, verão no hemisfério sul, Hipátia, ou qualquer outro, jamais poderia ter concluído, mesmo que sendo capaz de observar um aumento de tamanho do Sol, que o verão era consequência da maior proximidade entre Sol e Terra.

Após reproduzir esta cena com a turma, formulamos a seguinte questão: *Seria possível que Hipátia ou qualquer um de seus contemporâneos pudessem efetivamente verificar que a distância entre o Sol e a Terra varia entre o inverno e o verão?*

Entendemos que esse tema merece uma maior e mais profunda reflexão, buscamos nessa oficina simplesmente aproveitar a ocasião para evitar a proliferação de um erro, acreditamos que o filme tenha se mostrado uma oportunidade rica para ressaltar também esta questão. Não apresentamos aqui um relato mais detalhado das respostas, pois os alunos as elaboraram logo após a exposição dos conceitos e, uma avaliação do aprendizado e da assimilação do mesmo pode ser, e tem sido, realizada por outros trabalhos em ensino de Astronomia. Transcrevemos abaixo algumas respostas:

“Não, isso não seria possível, pois a distância entre a Terra e o Sol varia de forma insignificante. A órbita da Terra é quase um círculo perfeito e, no máximo, seria perceptível uma pequena variação no brilho do Sol”.

“Não seria possível verificar esta variação por não haver uma tecnologia suficiente para tal. O que ela poderia fazer era criar uma teoria e esperar que alguém a comprovasse futuramente”.

“Definitivamente não, hoje sabemos que a órbita da Terra é praticamente circular. O que dá origem às estações do ano é a inclinação do eixo da Terra em relação ao Sol. Ela faz com que os raios solares incidam de forma diferente ao longo do ano”.

3.5 Perspectivas Futuras:

A título de conclusão deste capítulo, buscamos nele descrever uma importante e necessária etapa de nosso trabalho de campo, em que procuramos instigar os alunos a um esforço intelectual, a refletir acerca de algumas questões, dentre elas, algumas em aberto sobre a natureza do conceito de espaço. Neste capítulo, descrevemos algumas questões sobre sua natureza mínima enquanto, no próximo, abordaremos sua medida em larga escala. Dentro da literatura especializada, as concepções epistemológicas de Feyerabend serviram como fundamento para as provocações apresentadas após a exposição do filme. Uma vez que esse autor defende o valor dos modelos considerados “ultrapassados” para a ciência, os mesmos devem ser conhecidos e estudados, além disso, a ciência é apenas uma entre muitas outras tradições. Levar alunos, e quem sabe até professores, a relativizar o papel da ciência, acreditamos que não diminua em nada o valor da mesma na educação, mas pelo contrário. Entender que a ciência é um empreendimento limitado é uma maneira de humanizá-la, de mostrar que a memorização de seus aspectos operacionais não esgota seu valor pedagógico. Estudar Astronomia deve ser, antes de tudo, um convite ao encantamento com o Universo.

Encerramos este capítulo com uma referência a um famoso diálogo escrito pelo romancista estadunidense Edgar Allan Poe, já citada no início deste capítulo. Em sua obra intitulada “Eureka”, o autor cita (POE, 1966) que, o aprendizado é muito mais rico do que o saber: “felicidade não está no conhecimento, mas na aquisição de conhecimento”.²⁰

²⁰ Adaptação da frase de abertura deste capítulo.

4 Construção de oficinas sobre o espaço e medidas astronômicas

4.1 O contexto da proposta pedagógica

Após algumas discussões de natureza conceitual e epistemológica descritas no capítulo anterior, passamos ao estágio mais amplo e detalhado desta proposta: a construção de oficinas sobre medidas espaciais e distâncias astronômicas, com o intuito de produzirmos um material que possa ser explorado por professores das disciplinas de ciências da natureza. O eixo principal desta proposta busca abordar distâncias e medidas astronômicas crescentes, que permitam a reconstrução da gradual evolução do nosso conhecimento acerca do cosmos. Diversos autores (ASIMOV, 19678- SAGAN, 1994) na literatura desse gênero exploram essa reconstrução de modo fascinante: com o passar do tempo, à medida que o ser humano tornou-se capaz de medir distâncias maiores, mudanças irreversíveis ocorreram na forma como compreendemos a organização e as dimensões do Universo Físico. Aumentamos nossa compreensão acerca do lugar que ocupamos no cosmos e do real impacto que podemos causar no mesmo. Infelizmente, acreditamos que essa compreensão não tem sido adequadamente transmitida nas salas de aula e, nesse sentido, esperamos contribuir para o preenchimento desta lacuna no ensino de Astronomia:

“... uma grande parcela de alunos do ensino público da rede estadual deixa a sala de aula sem o prévio conhecimento de assuntos na área de Astronomia, conteúdos que fazem parte do eixo temático Terra e Universo, confirmando assim a existência da distorção entre o que se ensina e o que é proposto pelos PCN”.

(Dias – 2008)

Para uma melhor aplicação destas atividades, buscamos organizá-las em ordem crescente das dimensões astronômicas envolvidas. Antes de nos propormos a criar atividades inéditas, tentamos explorar alguns experimentos astronômicos já realizados com sucesso em diferentes contextos e que, eventualmente, propiciem a assimilação dos conteúdos associados ao recorte que estamos descrevendo.

Existem diversos manuais de experimentos astronômicos disponíveis e aplicados no ensino em geral. O que acreditamos ser uma deficiência é exatamente a não existência de um trabalho holístico, que atue como uma interface entre aspectos quantitativos e reflexivos sobre o espaço, medidas de dimensões e distâncias astronômicas com aspectos pedagógicos acerca da viabilidade de explorar tais conceitos na educação formal brasileira. O produto final deste trabalho, cujo esboço encontra-se como um anexo a esta dissertação, não consiste apenas em uma análise sobre a aplicação de uma proposta, mas, antes, na construção de um caderno de atividades, com uma variedade de oficinas com suas possibilidades de aplicação. Muitos dos experimentos

descritos foram trabalhados com grupos de alunos, conforme será descrito. A primeira oficina retomou a questão da mais importante dentre as medidas astronômicas: as dimensões do planeta em que habitamos. Muitos trabalhos esplêndidos²¹ já foram realizados e não temos a pretensão de ser originais nesta etapa, o que fizemos foi uma adaptação no sentido de tornar a medida do raio terrestre um empreendimento ainda mais simples e acessível. Após realizar, na primeira parte desta oficina, uma estimativa acerca do tamanho da Terra, buscamos na segunda etapa criar um método para determinar a distância em que o Sol e os demais planetas do Sistema Solar se encontram de nós. Posteriormente, lançamo-nos às distâncias estelares e, abordando o conceito de paralaxe, construímos uma atividade para estimar algumas distâncias estelares. Na quarta oficina, o desafio consistiu em estimar distâncias maiores, entre aglomerados estelares em outras galáxias e o Sistema Solar; para tal empreendimento, valemo-nos de uma importante relação descoberta no século XX, por Henrietta Leavitt, conforme descrito no segundo capítulo. Um quadro resumido dessa sequência de atividades encontra-se abaixo. A seguir, passaremos a descrever mais detalhadamente a construção e a aplicação das mesmas com os alunos do Instituto Germinare.

As oficinas foram organizadas de acordo com a divisão descrita abaixo:

Oficina	Título	Objetivo	Resumo
1	Nosso Lugar no Universo	Determinar as dimensões da Terra	Explorar o famoso experimento de Eratóstenes para estimar o raio da Terra
2	A escala do Sistema Solar	Determinar o valor da Unidade Astronômica	Explorar o método proposto por Halley para calibrar a medida dos diversos raios orbitais no Sistema Solar
3	Distâncias Estelares	Obter estimativas de algumas distâncias estelares	Utilizando o conceito de paralaxe, esta atividade consiste em determinar a distância entre a Terra e algumas estrelas
4	Escala de Magnitudes	Estimar distâncias entre galáxias	Por meio da famosa relação "Período-Luminosidade" propomos uma forma estimar a ordem de grandeza da distância em que se encontram algumas galáxias

Tabela 1: Lista de oficinas realizadas em ambiente escolar

²¹ Gostaríamos de reverenciar particularmente o "Projeto Eratóstenes" por seu grau de originalidade e pela quantidade de membros que se comprometeram com a proposta.

4.2 Oficina Inaugura: Nosso lugar no Universo

Iniciamos aqui a descrição das oficinas sobre distâncias astronômicas, estas atividades foram, como descrito previamente, propostas para um grupo de alunos que se encontravam no último ano do Ensino Fundamental, após nossa verificação prévia de que os pré-requisitos matemáticos necessários tinham sido devidamente apresentados pelos professores da referida disciplina. Alguns conceitos trigonométricos e geométricos básicos foram explorados durante sua realização, como a definição de tangente e o teorema de Pitágoras. Fisicamente, esta atividade também proporcionou a oportunidade de trabalhar o princípio da propagação retilínea da luz, usualmente abordado ao longo do Ensino Médio, nas aulas regulares de óptica geométrica. A aplicação desta, e também das outras atividades, deixou claro para nós a importância de o professor acompanhar a realização das mesmas. Não partilhamos dos princípios empregados por muitos materiais e muito disseminados nas décadas passadas, que visam elaborar atividades que prescindam da figura do “mestre” como um mediador na relação entre os alunos e o conhecimento. Pelo contrário, esta atividade se mostrou suficientemente complexa ao ponto de exigir a constante intervenção do professor no sentido de direcionar os alunos para o pleno cumprimento da mesma.

Consideramos que, como oficina inaugural, seria fundamental abordar aquela que é certamente uma das mais importantes medidas astronômicas: a determinação da circunferência da Terra. Como poderemos explorar o conhecimento desses alunos sobre dimensões astronômicas se os mesmos não possuírem um bom conhecimento acerca do tamanho do nosso planeta? A realização desta oficina foi inspirada no famoso experimento de Eratóstenes, citado no segundo capítulo deste trabalho, e foi dividida em duas partes: na primeira, seguimos uma atividade proposta no livro do astrônomo Rodolfo Caniato (1990) e já realizada por diversos colegas: a construção de um gnomon com os alunos, a determinação das direções dos quatro pontos cardeais e, por fim, a obtenção de uma estimativa da medida da latitude local. A realização dessa primeira etapa supôs a tomada de diversas medidas da posição da sombra da haste fincada verticalmente no solo.

Os alunos tiveram participação importante na escolha do local onde a mesma seria fincada, inclusive tomando o cuidado de escolher uma localidade onde fosse possível tomar medidas tanto no período da manhã como também na parte da tarde. O professor explicou previamente para a turma como deveríamos esperar que variasse o comprimento da sombra de uma haste vertical ao longo de um dia; aproveitamos a oportunidade para explicar que meio-dia dos nossos relógios não coincide com a passagem meridiana do Sol, ou seja, com o meio do dia. Uma medida do comprimento da sombra foi realizada durante o período da manhã. Em seguida, uma circunferência com centro na haste, cujo raio coincide com o comprimento da sombra, foi desenhada sobre o chão²². Ao

²² Imagens encontram-se em anexo.

longo da tarde, por diversas vezes, alguns alunos foram designados para verificar em qual instante a sombra da haste voltaria a tocar a superfície do círculo desenhado sobre o solo.²³ Se os dois instantes em que a sombra da haste “toca” a circunferência desenhada sobre o chão forem determinados com precisão, a atividade pode ser levada ao seu término sem maiores dificuldades. O restante pode ser resumido a, seguindo o roteiro proposto para os alunos, determinar a direção Norte-Sol e os quatro pontos cardeais e, por fim, realizar uma estimativa da latitude local. Para o sucesso desta parte final, os alunos receberam uma tabela com os valores do ângulo de *declinação* do Sol ao longo do ano.

A estimativa da latitude local revelou-se um pouco mais complicada devido à utilização da declinação do Sol. Por um lado, isso introduz um conceito novo e nos leva a ensinar Astronomia, mas por outro, a dificuldade extra de compreensão pode afastar alunos. Para facilitar essa tarefa, deixamos como sugestão aos professores que esta atividade seja realizada preferencialmente nos dias 21/3 ou 23/9, ou bem próximo, quando a declinação do Sol é nula.

A segunda parte consistiu na elaboração de um método de estimativa para o raio da Terra que nos remetesse ao famoso episódio de Eratóstenes. Como citado anteriormente, o “Projeto Eratóstenes” foi uma iniciativa pioneira, mais vasta e profunda na realização desse empreendimento, uma vez que contou com o compartilhamento de informações entre diversas escolas. Para os nossos propósitos, necessitávamos de algo mais simples e que, apesar de não reproduzir o famoso experimento com a mesma riqueza de informações, se mostrasse útil do ponto de vista pedagógico. A quantidade de atividades que fazem parte desta proposta também é um fator limitante, não pretendemos realizar um experimento em sua totalidade de caminhos e possibilidades, mas uma sequência de atividades que, embora de natureza simples, abordem escalas progressivas de distância e expressem alguns conceitos que se revelaram importantes ao longo da evolução histórica das medidas astronômicas.

Da mesma forma que Eratóstenes supostamente conhecia a distância entre Alexandria e Siena (ASIMOV, 1968) e obteve a privilegiada informação sobre a incidência perpendicular dos raios solares sobre Siena no dia 21/6 (solstício de verão), assumimos com os alunos que a distância entre nossa localização e a linha do Equador possa ser calculada. Os alunos foram divididos em pequenos grupos e, em seguida, receberam um mapa do Brasil com sua respectiva escala, de modo a determinarem esta distância simplesmente por meio de uma régua. Também abordamos, antes da realização desta segunda parte, a duração dos dias e das noites ao longo do ano, particularmente para um observador afastado da linha do Equador. Para esse observador, existem duas datas ao longo do ano em que os dias possuem a mesma duração que as noites (desprezando efeitos atmosféricos e o raio aparente do Sol). Com essas

²³ Os detalhes deste arranjo experimental encontram-se no produto final, anexo a esta dissertação.

considerações pontuais, construímos com nossos alunos, um contexto análogo àquele conhecido por Eratóstenes, em que a cidade de Alexandria é substituída pela nossa posição no mapa (cidade de São Paulo). Os alunos foram convidados a realizar a seguinte sequência:

1. Determinar a distância entre São Paulo e um ponto do mapa, atravessado pela linha do Equador, que permaneça na mesma longitude desta cidade.
2. Considerando a esfericidade de nosso planeta e o ângulo de latitude de São Paulo, calcular o raio da Terra.

Uma outra possibilidade de abordar, de forma simples, esse experimento, é utilizar o software Stellarium, sobre o qual nos deteremos em mais detalhes na próxima oficina, para adaptar o experimento de Eratóstenes. Esta versão encontra-se disponível no produto em anexo a esta dissertação. Apesar de esse experimento ser simples do ponto de vista conceitual, sua realização nos revelou algumas questões de ordem práticas dignas de menção. Além disso, alguns aspectos teóricos foram assimilados com diferentes graus de dificuldade pelos alunos.

4.2.1 Aplicação da oficina e resultados ²⁴

Esta atividade foi aplicada nos anos de 2015 e 2016 e, ao todo, participaram de sua realização 112 alunos que se dividiram em grupos de três ou quatro componentes. A primeira parte foi realizada ao longo de um dia letivo: na parte da manhã, os grupos escolheram livremente um local, no interior do espaço escolar, para construir o gnomon e realizar as primeiras medidas. Durante o período da tarde, os alunos obtiveram autorização para, esporadicamente, se ausentarem de suas aulas para se dirigirem ao experimento e tomar as medidas complementares. A realização desta atividade supõe que cada grupo determine os dois instantes ao longo de um dia em que a sombra da haste possui comprimentos iguais (uma medida no período da manhã e outra no período da tarde). Com a divisão dos alunos nesses pequenos grupos, foram formados 28 grupos diferentes. Cada grupo, ao final da etapa inicial foi convidado a fornecer seu resultado para a latitude local. O colégio localiza-se na cidade de São Paulo, cuja latitude é bem conhecida. Seu valor em graus, oferecido pela literatura, será utilizado para inferir o valor do resultado de cada equipe. Abaixo colocamos os resultados obtidos em um histograma de frequência.

²⁴ As medidas na parte da manhã foram feitas aproximadamente às nove horas enquanto as medidas vespertinas foram realizadas aproximadamente às 15 horas

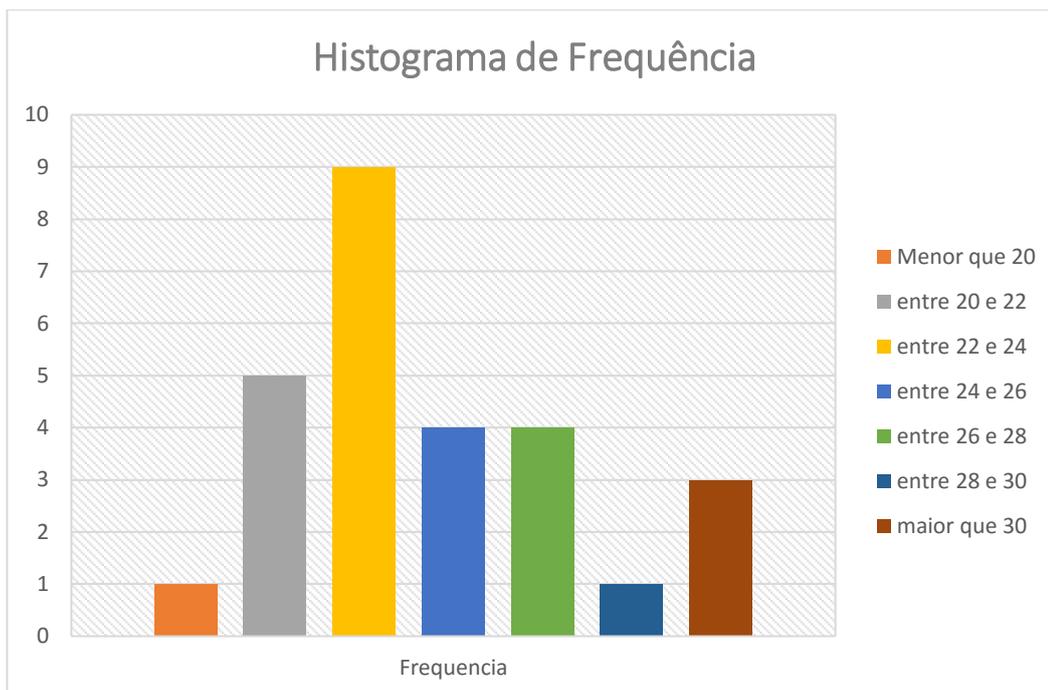


Figura 8: histograma de frequência (eixo x = latitude, eixo y = número de alunos)

A média dos resultados, cujo valor foi $\phi_{med} = 25^\circ$, pode ser considerada próxima de seu valor (literatura), $\phi_{SP} = 23,5^\circ$ apesar de alguns resultados terem, particularmente, se distanciados mais do valor verdadeiro. Uma série de erros sistemáticos devem ser levados em consideração para explicarmos tais distanciamentos: os grupos apresentaram graus muito variados de compreensão da proposta, nível de concentração e cuidado na tomada dos dados. Alguns, durante o período da tarde, se atrasaram na medição da posição da sombra da haste vertical, o que comprometeu seriamente seus valores para a determinação da latitude local. Por fim, apresentamos no gráfico abaixo os resultados individuais, calculamos o desvio-padrão associado à distribuição dos resultados e delineamos dois limites: um desvio-padrão acima e outro abaixo do valor médio. De um total de 28 resultados, observamos que 20 encontram-se no interior desse intervalo.

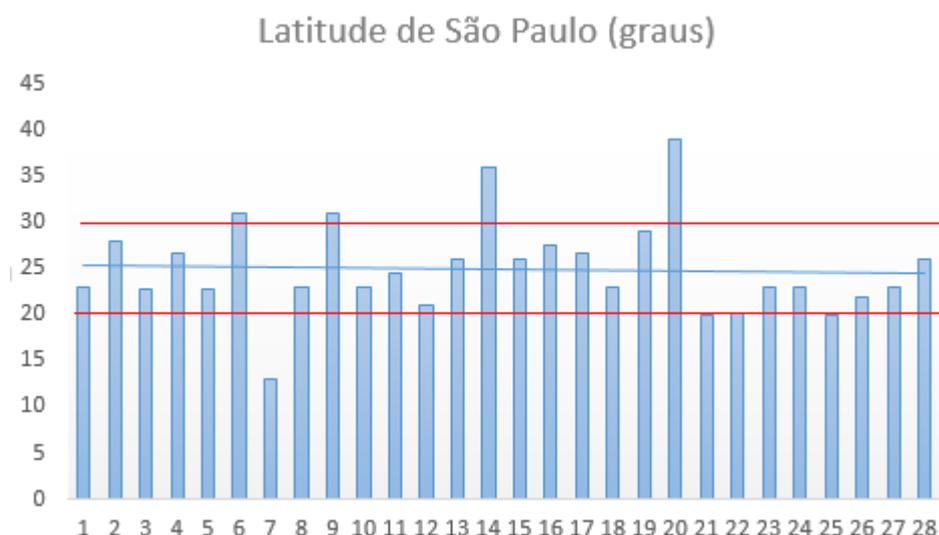


Figura 9: a linha azul representa o resultado médio, enquanto as linhas vermelhas definem o intervalo de um desvio-padrão.

Ao final desta atividade, realizamos com cada sala uma avaliação geral dos resultados, comparamos nosso valor médio com o valor verdadeiro e compartilhamos um pouco mais sobre as discrepâncias e dificuldades encontradas. Muitos grupos cometeram equívocos na determinação do instante, ao longo do período da tarde, em que a sombra da haste apresenta mesmo comprimento que a medida feita durante o período da manhã. Muitos imaginaram que os dois instantes em que a sombra possui mesmo comprimento fossem precisamente simétricos ao meio-dia do relógio e, apenas ao dirigirem-se ao experimento, se deram conta que estavam atrasados.

Por fim, conversamos um pouco sobre o valor do diâmetro terrestre. A maior parte dos alunos relatou ter dificuldades para conceber o tamanho de nosso planeta, apesar de saber que o mesmo seja grande, também demonstraram encantamento pela beleza e simplicidade do método proposto há cerca de 2500 anos por Eratóstenes. Após o término desta oficina, convidamos os alunos para a próxima etapa, a ser realizada no seguinte trimestre letivo, em que medidas ainda maiores do espaço podem ser, e foram, determinadas por outro método também muito simples e elegante.

4.3 Tópicos de Astronomia relacionados com a experiência:

A realização desta atividade permite a explicação de alguns conceitos de grande importância como os dias e as noites, conceito relacionado com a variação da posição do Sol ao longo do dia. As estações do ano estão associadas com o ângulo de declinação do Sol e com a necessidade da realização desse experimento nas proximidades dos equinócios. Também envolve conceitos do dia a dia de todos nós como as direções cardeais, meridiano, tempo solar verdadeiro e médio, entre tantos outros.

4.4 Determinação da medida da Unidade Astronômica

A determinação das dimensões da Terra serviu, tanto historicamente, quanto para nossos propósitos didáticos, como ponto de partida para medidas espaciais maiores. Desde Aristarco de Samos (SINGH, 2010), possuímos métodos para determinação do diâmetro Lunar e de sua distância à Terra com relativa precisão (cap.3). A distância até o Sol, por outro lado, a unidade astronômica, permaneceu desconhecida até o século XVIII. Em nossa sequência de atividades, recontamos parte desta verdadeira odisséia para a determinação do valor da Unidade Astronômica. O primeiro método proposto com sucesso para esta finalidade é de autoria de Edmund Halley e serviu como inspiração para esta sequência de atividades, cuja realização completa ocupou três aulas:

4.4.1 Primeira Aula: Cálculos Introdutórios

A ocorrência dos fenômenos conhecidos como “trânsitos planetários” consiste em uma oportunidade singular para a determinação da distância entre a Terra e o Sol e, em outras palavras, calibrar o valor da Unidade Astronômica. Para isso, os alunos foram convidados a formar pares que, em nossa atividade, representarão pares de Astrônomos que farão observações de um mesmo trânsito de Vênus²⁵ a partir de localizações distintas da Terra para, posteriormente, cruzar suas informações. Os membros da dupla escolheram, com o auxílio da internet, uma das datas em que ocorreram trânsitos de Vênus; cada um deles deveria “viajar” para diferentes cidades com a missão de obter imagens do fenômeno. Nesta etapa inicial, de posse da medida do raio da Terra e com os valores de ambas as latitudes, os alunos devem calcular a distância entre suas localidades²⁶.

²⁵ Os trânsitos de Mercúrio são muito mais difíceis de fornecer valores mensuráveis devido ao reduzido tamanho angular do mesmo.

²⁶ Esta gerou alguns erros, pois algumas duplas buscaram na internet a distância entre as duas cidades, tal medida não é calculada ao longo de uma linha reta, mas ao longo da superfície do nosso planeta.

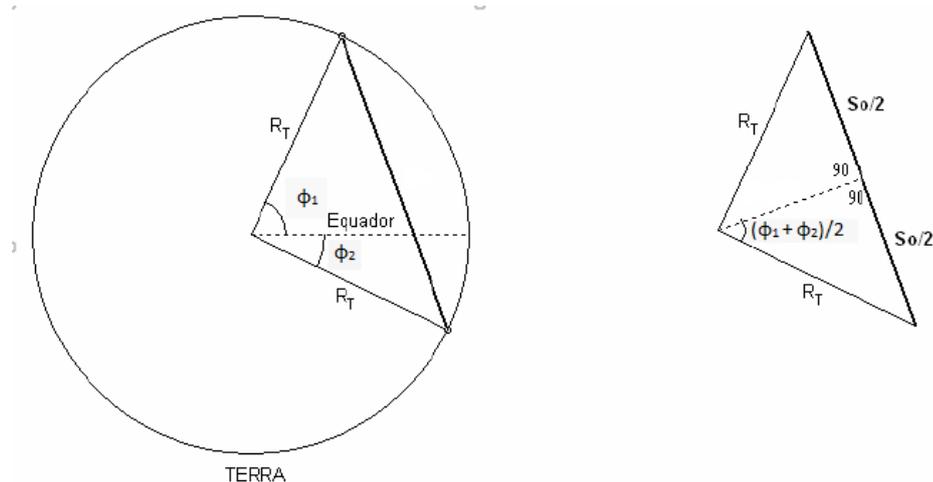


Figura 10: Determinação da distância entre dois pontos da superfície terrestre

Uma vez determinada esta distância, que chamaremos de S_0 , passamos para o cálculo da projeção desta medida sobre a superfície Solar, para isso fornecemos para os alunos uma tabela com o período orbital dos planetas e sugerimos que utilizassem a terceira lei de Kepler, como ilustrado²⁷ nas imagens abaixo.

Planeta	Período em anos terrestres
Mercúrio	0,24
Vênus	0,61
Terra	1,0
Marte	1,9
Júpiter	12
Saturno	29
Urano	84
Netuno	165
Plutão	248

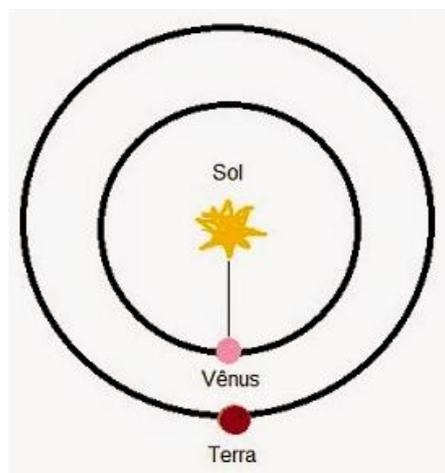


Figura 11.A: Tabela de períodos orbitais

Figura 11.B: Transito de Vênus visto de perspectiva

²⁷ A resolução completa deste problema encontra-se no anexo XX.

Com esta tabela de períodos orbitais, já conhecida no século XVII, a aplicação da terceira lei de Kepler permite estabelecer uma proporção entre os raios orbitais de Vênus e da Terra, adotada inicialmente como uma unidade astronômica e cujo valor pretendemos determinar. Com isso, e com o auxílio da figura abaixo, podemos determinar a projeção da distância entre os dois observadores sobre a superfície solar, que chamaremos de $2X$.

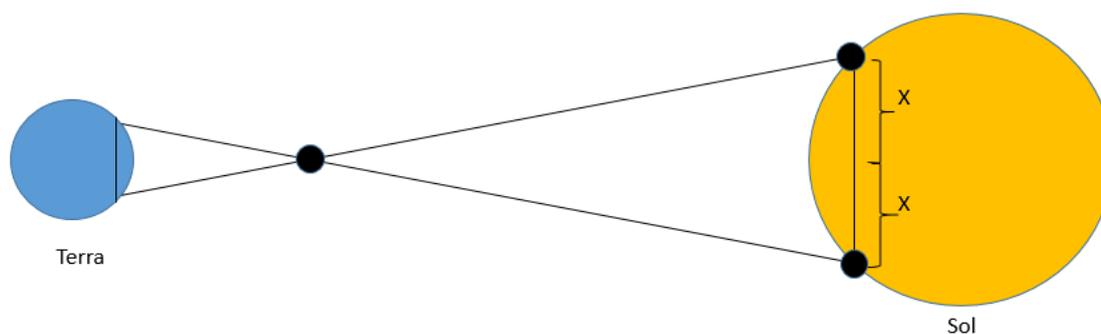


Figura 12: Variação angular de Vênus quando observado por duas latitudes distintas

Esta primeira aula pôde ser concluída sem maiores dificuldades, com a condição de contar constantemente com o direcionamento do professor, a maior dificuldade relatada não consistiu nos cálculos envolvidos, mas na sequência de etapas necessárias até chegarmos ao seu término.

4.4.2 Segunda Aula: Utilizando o software Stellarium

Esta segunda aula foi, segundo relatos de muitos alunos participantes, a que lhes mais chamou a atenção, isso revelou para nós o imenso potencial pedagógico do software Stellarium. Este programa tem sido utilizado por educadores e professores de diversas formas, mas, ao que nos constou, ainda não havia sido explorado em nenhuma atividade semelhante a esta. Uma vez que cada dupla é constituída por, ficticiamente, dois astrônomos com a missão de observar um mesmo trânsito de Vênus, a partir de localizações distintas, ambos deveriam apresentar ao final desta etapa suas observações do fenômeno por meio de imagens impressas do trânsito obtidas com o uso do Stellarium. Durante alguns minutos iniciais realizamos uma apresentação deste programa para as turmas, mostramos algumas de suas interessantes ferramentas que permitem alterar localização e horário / datas.

Posteriormente foi disponibilizado um computador para cada dupla, para que escolhessem um trânsito de Vênus, no passado ou no futuro, e imprimissem imagens do fenômeno observado a partir da posição de cada um dos membros,

localizados em latitudes distintas. No encontra-se um roteiro mais pormenorizado, no qual ressaltamos alguns cuidados que devem ser considerados pelos professores antes de realizar esta atividade com seus alunos. Abaixo, a título de exemplificação, trazemos duas imagens obtidas pelo Stellarium, referentes ao último trânsito de Vênus, em 2012. As localidades escolhidas foram Santo André e a cidade de Nuuk na Groenlândia, por estarem posicionadas na mesma longitude, com grande separação latitudinal.

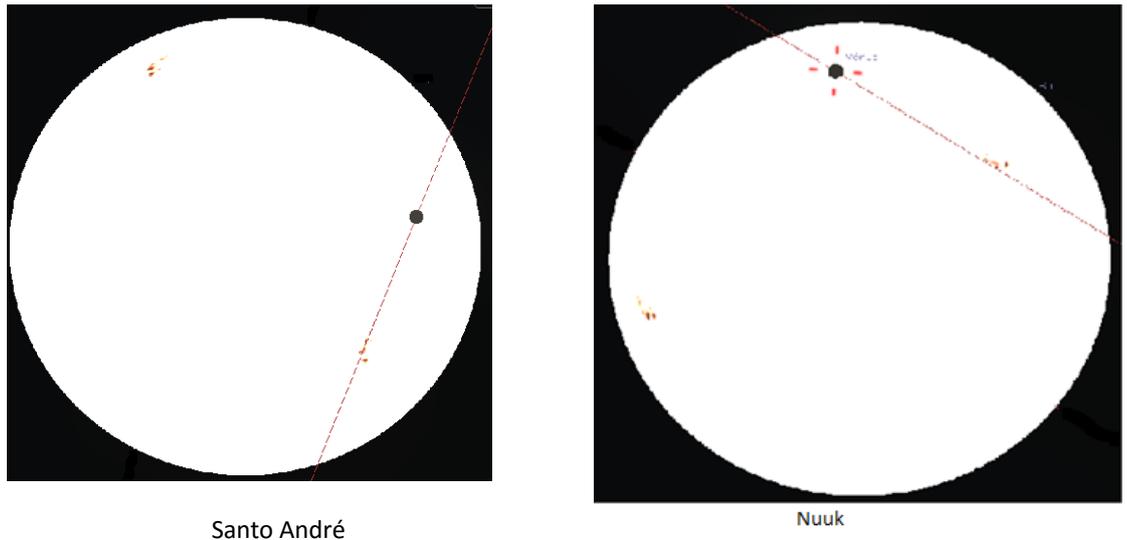


Figura 13: Observações do mesmo transito planetário, de Santo André e de Nuuk Groenlândia

Se observarmos atentamente as imagens acima, percebemos que elas contaram com um recurso deste software muito importante para esta atividade. Ao abrirmos o Stellarium, devemos procurar o ícone JANELAS DE OPÇÕES DO CÉU E DE VISUALIZAÇÃO para posteriormente ativar o ícone EXIBIR AS ÓRBITAS DOS PLANETAS.



Figura 14: exibição das orbitas planetárias no Stellarium.

4.4.3 Terceira Parte: Determinando o valor da Unidade Astronômica

De posse das imagens descritas acima, as duplas estão finalmente aptas a determinar o valor da unidade astronômica convertido para quilômetros. O movimento do planeta interior cruza o disco solar em distâncias diferentes em relação ao centro ou ao bordo solar para os dois observadores, esta variação é causada essencialmente pelo fenômeno da paralaxe diurna, e consiste exatamente no ângulo de paralaxe. Para a conclusão desta atividade, fornecemos aos grupos uma importante informação: o Sol possui diâmetro angular de aproximadamente 33 minutos de arco²⁸. Com essa informação, os alunos realizaram uma medida de proporção, comparando a diferença entre as posições em que Vênus cruza o disco solar para cada observador com o próprio diâmetro de nossa estrela. Após essas etapas, os valores de $\Delta\theta$ e $2X$ descritos na imagem 17 são conhecidos por métodos independentes e podem ser relacionados trigonometricamente, determinando o valor da distância entre a Terra e o Sol.

²⁸ Informação já conhecida pelos gregos aproximadamente no ano 300 a.C.

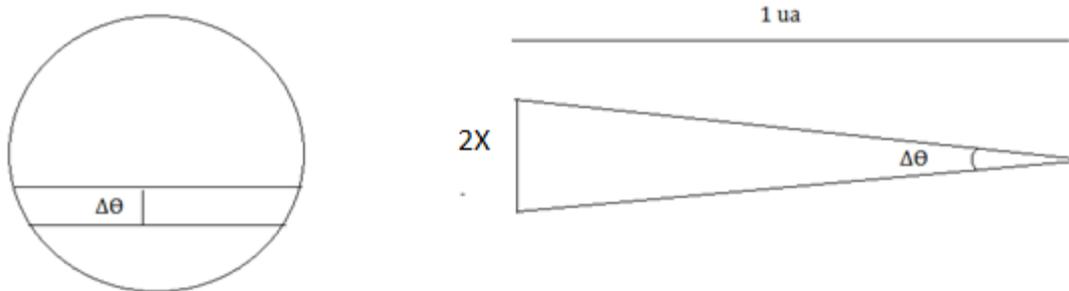


Figura 15: Determinação trigonométrica da unidade astronômica

Após a aplicação desta atividade, passamos para a etapa final: avaliar e comparar os resultados obtidos. Apesar das limitações da metodologia aplicada, alguns grupos se aproximaram consideravelmente do valor correto da unidade astronômica. Assim como na atividade inicial, não podemos desprezar alguns resultados que se afastaram muito do valor correto. Tais erros puderam ser facilmente identificados em uma correção inicial e envolveram desde algumas dificuldades básicas em interpretar a proposta da oficina a um nível de rigor na realização das medidas abaixo daquele necessário para a realização da mesma. Em linhas gerais, consideramos esperada tal divergência de valores, mas que, em sua maioria, se aproximaram do valor correto, conforme descrito pelo histograma dos resultados obtidos.



Figura 16: Distribuição dos resultados experimentais para a unidade astronômica

Se adotarmos o valor da Unidade Astronômica como 149,597 milhões de quilômetros, podemos imediatamente comparar com o valor médio dos

resultados e tomar algumas conclusões de caráter estatístico. A média aritmética dos valores calculados foi:

$$a.u_{med}^{29} = 149,06 \times 10^6 \text{ Km}$$

Isso equivale a um erro de 3,5%, se considerarmos por outro lado, este resultado do ponto de vista pedagógico, alguns valores se aproximaram muito do valor verdadeiro³⁰ e acreditamos que, mais importante do que diminuir esta margem de erros, é a oportunidade para que o professor auxilie os grupos, especialmente aqueles que obtiveram os resultados mais divergentes, a detectar as etapas de maior divergência. Nisto consiste o que acreditamos ser o maior potencial desta oficina. Observamos no gráfico abaixo a totalidade dos resultados, a partir da qual é possível perceber mais facilmente a dispersão dos resultados em relação ao valor médio da unidade astronômica. As oficinas foram realizadas de forma independente, não foram realizadas pelos mesmos grupos de alunos, uma avaliação mais profunda pode ser realizada, caso os professores por isso optem, se os mesmos grupos forem designados para realizar todos os experimentos durante um ano letivo.

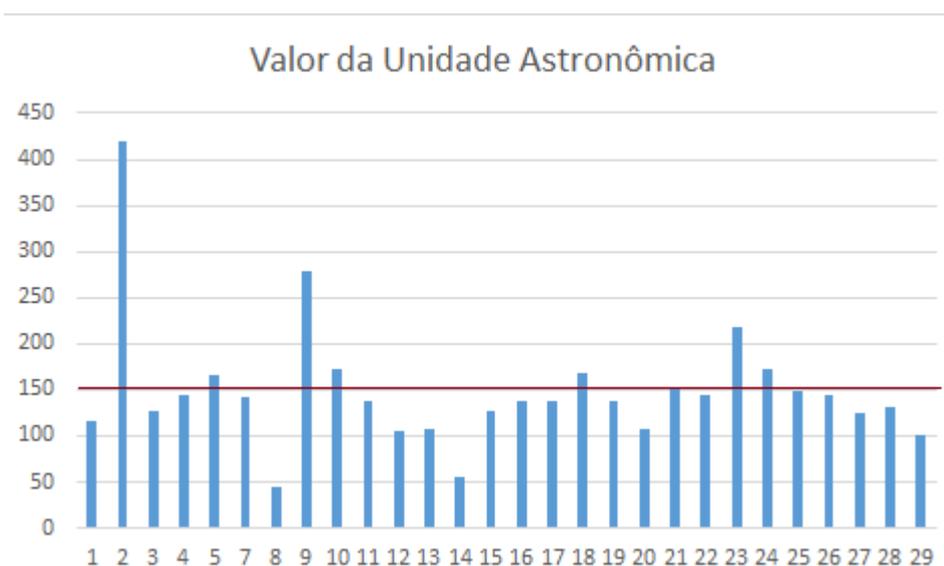


Figura 4: Resultados separados individualmente

A realização desta oficina se mostrou rica sob diversos aspectos: permitiu a visualização de importantes conceitos associados ao fenômeno dos trânsitos com o Stellarium, permitiu também que a unidade astronômica seja calculada com uma margem de erro pequena. Deu-nos, ainda, a oportunidade de

²⁹ Notação oficial adotada pela International Astronomical Union.

³⁰ Um dos grupos obteve o valor de 149,3 km para a medida da unidade astronômica.

contextualizar um importante período da história da Astronomia. Ao término dessa oficina, convidamos os alunos a se lançarem a distâncias maiores:

A partir da próxima oficina, buscamos desenvolver oficinas que envolvam distâncias maiores e, conseqüentemente, técnicas mais refinadas de medidas, a começar com a utilização do conceito de paralaxe.

4.4.4 Tópicos de Astronomia abordados:

A realização desta atividade foi ocasião para abordarmos alguns importantes conceitos astronômicos: a começar pelas leis de Kepler e pela definição da Unidade Astronômica. Também foi oportunidade para introduzir o conceito de paralaxe diurna e ilustrar o importante fenômeno dos trânsitos planetários por meio do software Stellarium.

4.5 Medindo distâncias estelares

Os movimentos estelares observamos possuem várias componentes, consequência da superposição dos movimentos intrínsecos das estrelas e aquele do observador. Por exemplo, um observador hipotético no centro da Terra não compartilha do movimento de rotação de nosso planeta. Transporta-lo para o centro do Sol, ou baricentro do Sistema Solar, equivale a eliminar o movimento de translação desse observador.

Claro que para estudarmos os movimentos estelares, intrínsecos, queremos e devemos eliminar aqueles do observador. Nesse sentido, por um lado, o movimento do observador pode até ser visto como um empecilho. Mas, por outro lado, o movimento do observador devido à translação da Terra, nos permite determinar a grandeza mais fundamental e essencial de toda a Astronomia, o deslocamento paralático estelar, ou simplesmente a paralaxe estelar. Essa grandeza, nos abre as portas para a determinação das distâncias além do Sistema Solar e mesmo não sendo ilimitada é ela que calibra todas as demais estratégias.

Imaginemos então um referencial no centro da Terra observando uma estrela qualquer, ao plotar um gráfico da posição dessa estrela ao longo do tempo ele obterá algo parecido com a figura abaixo, onde mostramos a variação de uma das coordenadas que definem a posição, a longitude celeste, ou longitude eclíptica (graus) de uma estrela qualquer em função do tempo (anos).

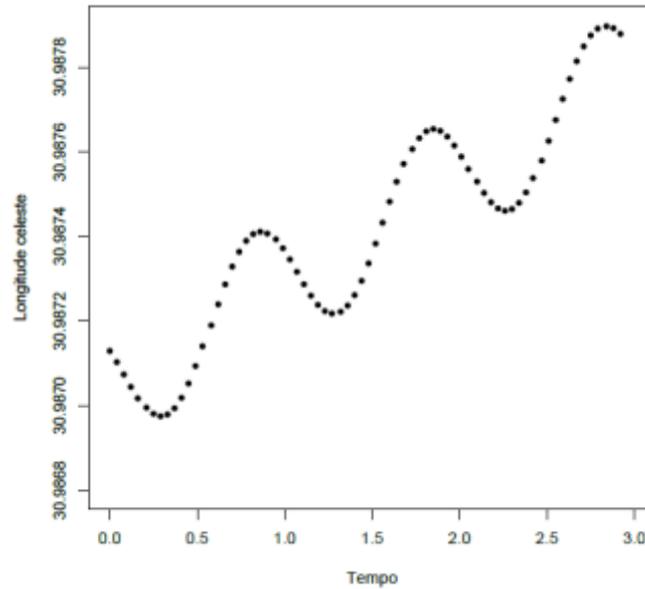


Figura 5: variação da longitude celeste de uma estrela em função do tempo

Não é difícil notar a superposição de dois movimentos: um movimento oscilatório com período de 1 ano que corresponde ao movimento do observador (translação da Terra) e outro, secular que corresponde ao movimento da estrela em relação ao baricentro do Sistema Solar.

Justamente, esse movimento oscilatório causado pela translação da Terra, corresponde a uma variação aparente da posição da estrela devido às constantes alterações do “ponto de observação”, exatamente como ocorre quando olhamos um lápis próximos ao nosso rosto, ora com um olho ora com outro. A amplitude desse movimento é a paralaxe estelar em geral representada pela letra π , mas não necessariamente. Como sabemos, o inverso da paralaxe, π^{-1} , nos dá a distância d em parsec: $d = \pi^{-1}$. 1 parsec (pc) corresponde à distância que se encontra uma estrela quando sua paralaxe é de 1”. Ou seja, a distância em que se encontra uma estrela a partir da qual o tamanho angular do semieixo maior da órbita da Terra ao redor do Sol é de 1”.

A componente secular do movimento visto na figura acima, contém o movimento de rotação galáctica presente tanto na estrela quanto no baricentro do Sistema Solar e os movimentos residuais tanto do baricentro do Sistema Solar quanto da estrela em relação ao movimento médio das estrelas na vizinhança solar, Padrão Local de Repouso. Esse movimento secular da estrela, recebe o nome de movimento próprio.

Na Figura abaixo, podemos observar como variam as coordenadas eclípticas em minutos de arco da estrela. O movimento oscilatório que forma essas laçadas, mas não necessariamente, corresponde à paralaxe enquanto que o movimento secular, percebido pelo deslocamento das laçadas é o movimento próprio da estrela.

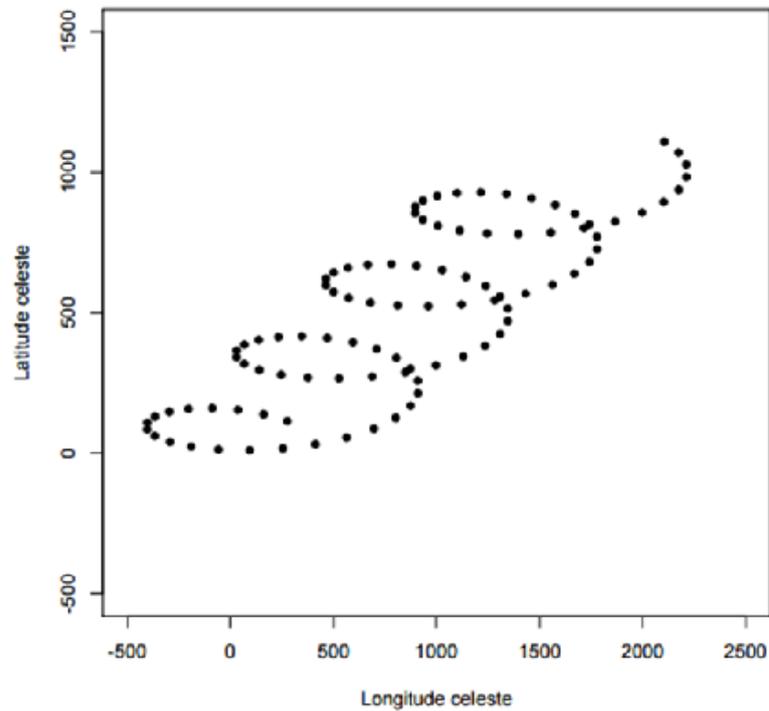


Figura 6: Movimento da estrela de Barnard

O movimento próprio da estrela pode ser obtido pelo ajuste de uma reta no gráfico de suas coordenadas em função do tempo. A subtração deste da curva acima, nos dá a chamada **elipse de paralaxe** mostrada na figura abaixo para algumas estrelas bem conhecidas. Como dito, o semieixo maior da elipse nos dá a paralaxe estelar e conseqüentemente a distância da estrela.

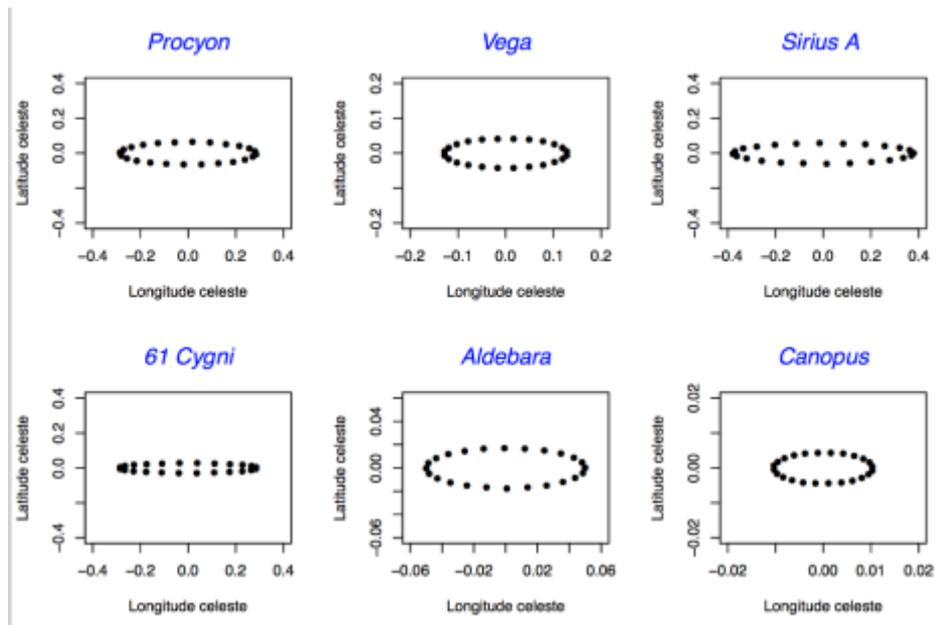


Figura 20: Paralaxe anual para diversas estrelas

Para esta oficina, foram escolhidas a estrela de Barnard (figura 21). Os alunos receberam uma figura como as mostradas acima e com régua mediram o semieixo maior da elipse e utilizando a escala das abcissas obtiveram a paralaxe estelar em segundos de arco, a partir da qual puderam determinar a distância da estrela. Para a determinação de seu movimento de paralaxe, podemos, com o auxílio de uma pequena régua, traçar duas retas paralelas limitando a região da elipse. A metade da distância entre as retas nos fornecerá o ângulo de paralaxe.

Estrela de Barnard

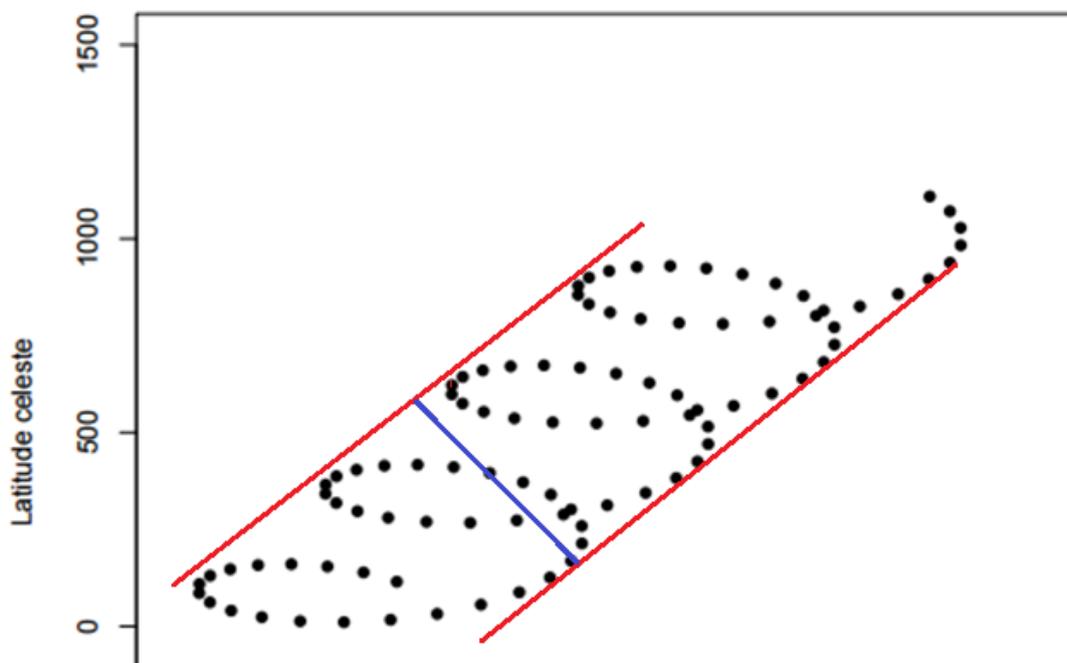


Figura 21: Determinação do ângulo de paralaxe para a estrela de Barnard

4.5.1 Análise de resultados

Após a conclusão de mais esta atividade, recolhemos os resultados obtidos pelos alunos, que a realizaram em duplas. Utilizamos como modelo a estrela de Barnard, com o gráfico apresentado na figura 21 acima. A medida de sua distância ao Sistema Solar, em média, foi de 6,48 anos-luz³¹, em uma amostragem total de 12 duplas. Assim como nos experimentos anteriores, alguns valores se revelaram por demais distantes da média. Especificamente nesta oficina, pequenos descuidos na medida de paralaxe levaram a resultados discrepantes no cálculo da distância, de modo que, em uma futura aplicação, recomendamos que os alunos sejam alertados sobre o grau de acuidade necessário para que os resultados se assemelhem de forma mais satisfatória ao valor correto. No histograma abaixo, podemos observar melhor a distribuição dos resultados.

³¹ Seu valor verdadeiro é aproximadamente 5,95 anos-luz.

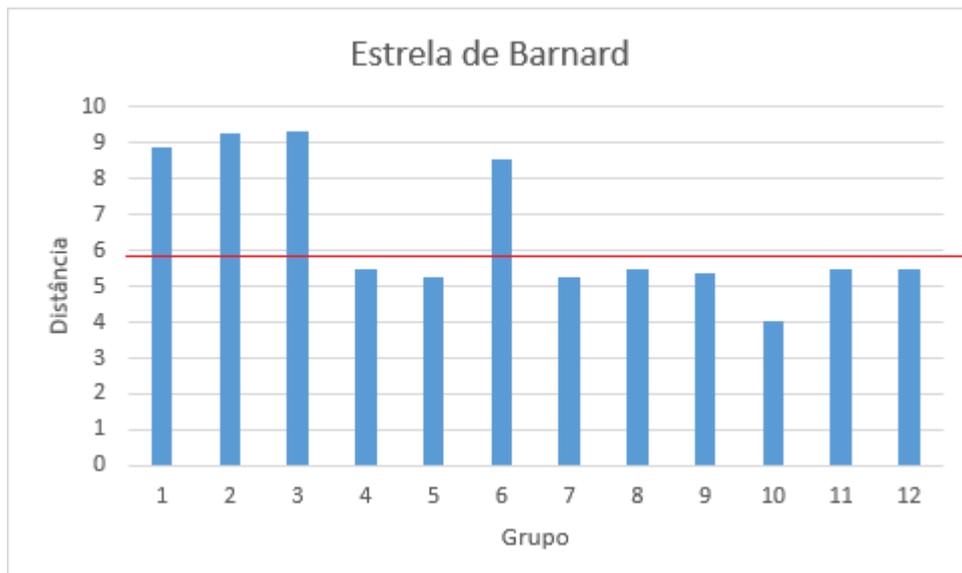


Figura 22: distribuição de resultados por meio do método de paralaxe, o valor conhecido pela literatura encontra-se destacado em vermelho

Podemos observar que, em geral, os resultados obtidos permitem a determinação da ordem de grandeza da distância a que se encontra a estrela. O método da paralaxe é, apesar de elegante, limitado. Pode ser aplicado até distâncias de aproximadamente 10.000 pc. Se lembrarmos que o diâmetro da Via Láctea é aproximadamente 25.000 pc, esse método é, até o momento, ineficaz para medir distâncias extragalácticas. Nas primeiras décadas do século XX, a Astronomia passou por este dilema, como relembramos no segundo capítulo. Para reconstruir esta história com os alunos, procuramos apresentá-los ao método descoberto por Leavitt para estimar distâncias estelares em que as estrelas classificadas como cefeidas apresentam notória importância.

4.5.2 A relação Período-Luminosidade

As estrelas variáveis são de particular interesse na Astronomia, especialmente as cefeidas, utilizadas como velas-padrão na calibração de medidas de distâncias, conforme citamos no segundo capítulo. As estrelas desta categoria possuem luminosidade oscilante, variando desde 0,1 até duas magnitudes em um período de 1 a 100 dias. Tal variabilidade se deve a processos de pulsação no núcleo estelar. Durante a expansão de uma cefeida, sua temperatura e grau de ionização diminuem, a energia expelida de seu núcleo faz com que, pela ação gravitacional, o volume das camadas exteriores diminua em um processo cíclico.

Na última oficina, os gráficos cinemáticos permitiram a determinação de algumas distâncias estelares. Nesta etapa, realizamos uma oficina que busca retratar o método proposto por Leavitt e utilizado por Hubble para determinar a distância entre a nebulosa de Andrômeda e o Sistema Solar. Escolhemos para tal, a estrela X da constelação do Cisne (X-Cygnii), por ser do tipo cefeida e de período curto³².

Os alunos, divididos em duplas, foram convidados a, na primeira aula, a traçar a curva de luz característica desta estrela, receberam os valores de sua magnitude aparente, medida diariamente, durante um período de aproximadamente dois meses. Antes de concluir esta etapa, pedimos para que cada dupla determinasse o período de variação do astro, o que foi realizado sem dificuldades, com o auxílio do professor. As duas aulas seguintes foram utilizadas para determinar a distância em que X-Cygnii se encontra de nós de acordo com a seguinte sequência:

i) Através do gráfico abaixo, determinamos a luminosidade da estrela em função da Luminosidade do Sol (L/L_{sol}), inserindo-a por meio de seu conhecido período de variabilidade.

ii) Determinamos o valor da magnitude absoluta do astro, a partir do conhecimento prévio da magnitude absoluta solar ($M_{sol} = 4,74$) e da seguinte relação:

$$M - M_{sol} = -2,5 \log (L/L_{sol})$$

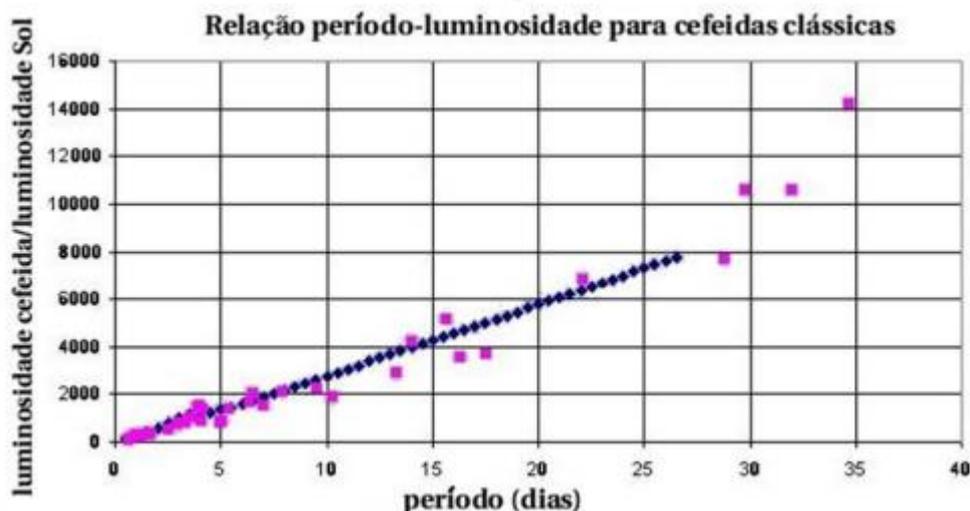


Figura 23: Relação Período-Luminosidade

³² Período de aproximadamente 15 dias.

A magnitude aparente, conforme explicado para os alunos no início desta oficina, é uma medida do brilho aparente do astro, medida diretamente pelos astrônomos e depende de sua distância até a Terra. No caso da estrela escolhida, fornecemos o valor de sua magnitude aparente:

$$m_{\text{xcyg}} = 6,45$$

Com a informação sobre a magnitude aparente de X-Cyg e com o valor de sua magnitude calculado, escolhemos uma forma de permitir que sua distância seja estimada, sem inserirmos a equação do módulo de distância ou o envolvimento de equações logarítmicas mais complexas. Por isso, apresentamos uma tabela com os valores de magnitude aparente, magnitude absoluta e distância, calculada independentemente, e pedimos para que os alunos a completassem, inserindo tais medidas para esta estrela. Por fim, fornecemos um gráfico entre $m-M$ (eixo das ordenadas) em função do logaritmo da distância (eixo das abcissas) convidando-os a observar que este gráfico se comporta aproximadamente de forma linear³³. Com o valor da diferença $m-M$ conhecido, as duplas localizaram no gráfico o valor do $\log(d)$ associado à estrela X-Cyg.

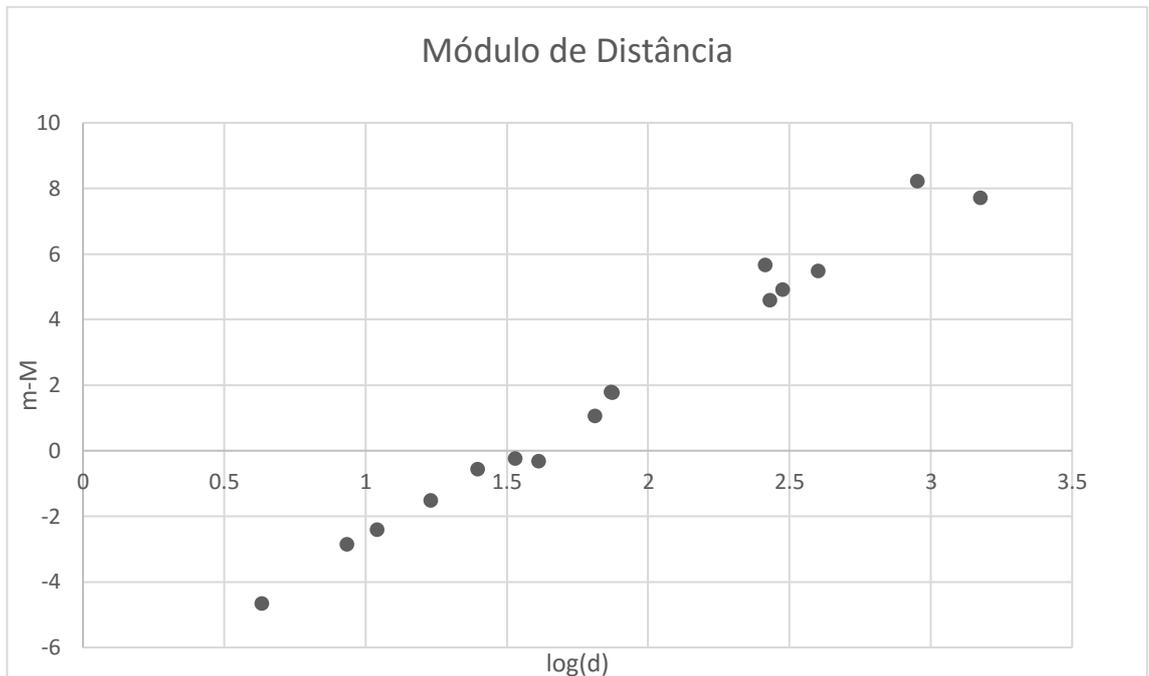


Figura 24: Módulo de distância.

³³ Calculado na base decimal.

Apesar de este método possuir menor precisão, tornou-se particularmente interessante por sua simplicidade e valor intuitivo, envolvendo apenas conceitos simples e conhecidos pelos alunos. Os mesmos já haviam estudado o conceito matemático de logaritmo, de modo que conseguiram calcular finalmente a distância em que se encontra a referida estrela:

$$\text{Se } \log(d) = X, \text{ portanto, } d = 10^X \quad (10)$$

A realização desta oficina foi oportunidade de abordar alguns importantes conceitos de Astronomia: a começar pela escala de magnitudes, uma importante aplicação do conceito matemático de logaritmo, passando pelas classes de estrelas variáveis, para situarmos as cefeidas, até chegarmos à relação Período-Luminosidade. São todos tópicos de valor para o ensino de Astronomia e que dialogam naturalmente com o experimento proposto.

4.5.3 Avaliação dos Resultados

A aplicação desta atividade ocorreu sem dificuldades que mereçam particular destaque, o maior problema encontrado pelos alunos envolvem questões sobre a natureza da ciência que vão muito além de nossos propósitos: dificuldade na leitura e compreensão de gráficos. Não gostaríamos de, com este argumento, nos isentarmos da obrigação de contribuir para esta problemática. Acreditamos que, de fato, a realização desta oficina consistiu um importante exercício prático de aplicação gráfica e utilização de uma escala logarítmica. Não é uma oficina na qual recomendamos que os alunos trabalhem sozinhos, mas que sejam constantemente confrontados com as dificuldades encontradas. Também recomendamos uma aula introdutória sobre escalas de magnitudes para que os conceitos sejam explorados com maior clareza. Valemo-nos de um método curiosamente simples, em nome da acessibilidade de tais conceitos aos alunos e a professores da educação básica. O ônus (ou bônus) desta escolha reside nos resultados obtidos, corretos em sua ordem de grandeza e interessantes no sentido de proporcionar uma importante intuição das distâncias envolvidas ao observarmos outras constelações, também permitiu uma reconstrução de nosso avanço rumo ao conhecimento das distâncias astronômicas. Abaixo observamos a distribuição dos resultados encontrados pelos alunos.

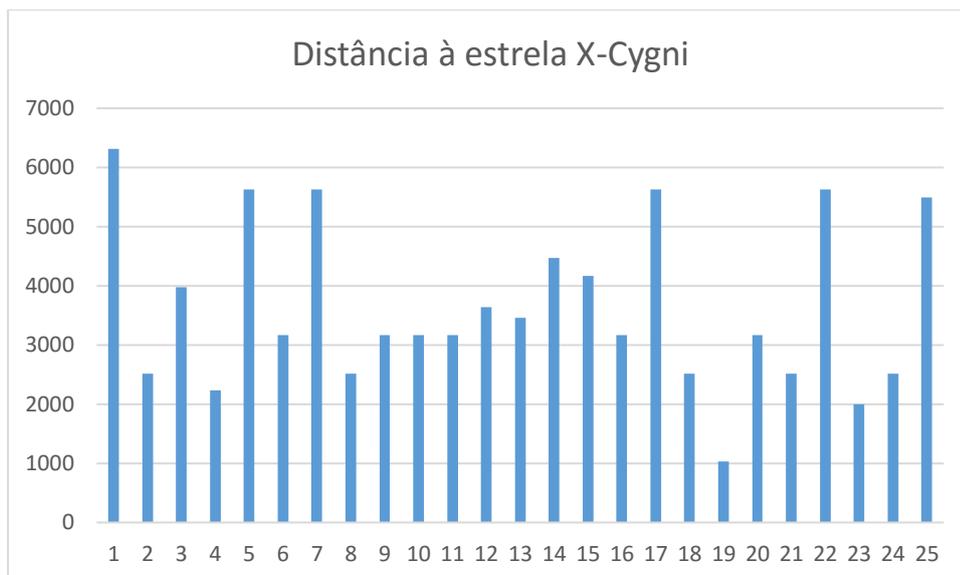


Figura 7: distribuição de valores encontrados acerca da distância em que se encontra X-Cygni.

Como valor médio para sua distância ao Sistema Solar, obtivemos que $d_{med} = 3632$ anos-luz, enquanto que o valor conhecido da literatura é aproximadamente 5017 anos-luz, o que consideramos satisfatório, levando em conta a limitação de nosso método e a inexperiência de nossos alunos ao lidar com dados astronômicos. Para concluir este trabalho sobre distâncias astronômicas e medidas espaciais, elaboramos também uma atividade sobre cosmologia e as maiores distâncias no Universo, a qual não foi aplicada a nenhum grupo de alunos, mas foi disponibilizada³⁴ no produto final em anexo para ser eventualmente aplicada por diversos professores.

³⁴ Caso algum professor se interesse por realizá-la, ficaremos felizes em receber seus resultados e considerações por e-mail. (danilo.rodrigues@usp.br)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho nos revelou uma variedade de olhares que podemos ter sobre o espaço físico muito maior do que imaginávamos inicialmente. Seja sob o viés epistemológico ou matemático, ficou claro para nós o quanto este conceito, e muitos outros de física fundamental, ainda pode ser explorado pelas diversas propostas pedagógicas. Investigação semelhante a esta poderia ser realizada sobre alguns conceitos como massa, tempo, força, campo gravitacional, etc. São todos exemplos de abordagens tradicionais em que aspectos reflexivos e provocadores são, infelizmente, marginalizados nos manuais didáticos e substituídos por definições operacionais superficiais, estimulando o desinteresse da parte dos estudantes.

Concluimos este trabalho certos de não ter esgotado o tema, tanto do ponto de vista histórico, onde diversas tradições exploram há milênios algumas das problematizações aqui inseridas, como a continuidade do espaço ou o problema da fronteira do universo, quando na cosmologia contemporânea onde avanços recentes têm lançado novas luzes sobre a natureza da interação gravitacional enquanto troca de partículas e ação da matéria sobre a estrutura do espaço-tempo, ou até mesmo na Astronomia observacional. Por ocasião do depósito desta dissertação vivemos um período de euforia, onde o telescópio espacial Gaia nos envia sua primeira geração de dados que irá alterar em muito nosso conhecimento da Galáxia e do Universo como um todo. Sobre estas, e tantas outras questões relacionadas ao tema, esperamos ter contribuído para que professores se estimulem a ler a respeito, estudar um pouco mais e construir novas propostas e abordagens pedagógicas.

No que se refere às oficinas sobre medidas e distancias astronômicas, esperamos que as mesmas possam ser exploradas pelos colegas professores com um olhar de continuidade. Cada uma delas torna-se mais rica quando interpretada como uma prévia ou uma continuação de outra oficina. Durante a aplicação das mesmas, percebemos uma falta de autonomia da parte dos estudantes que acreditamos não ser somente característico daquela realidade local, mas reflexo do estado da educação brasileira: nossos alunos, de um modo geral, encontram dificuldades com matemática, leitura e interpretação de textos.

Tais dificuldades, entretanto, não são pretextos para desistirmos do ensino de ciências, mas, pelo contrário, constituem um grande desafio a ser superado por essa geração. Reforçamos novamente a importância da presença do professor, constantemente auxiliando e ensinando, durante a realização das oficinas. Sem sua presença, é provável que as atividades se revelem

exageradamente complicadas. Por outro lado, esperamos no futuro lançar novas versões do caderno de atividades, com algumas adaptações, simplificações, incrementos e atualizações. Para isso, esperamos contar com o feedback daqueles que as lerem e aplicarem, o que nos será muito bem-vindo.

O principal aspecto que esperamos ter explorado não pode ser percebido sem esta visão holística sobre as atividades aqui elaboradas: enxergar mais longe no espaço tem sido nosso propósito desde os primórdios de nossa existência. Ao longo do tempo, à medida em que obtivemos êxito em medir distâncias maiores, temos sido constantemente surpreendidos com a imensidão e riqueza do cosmos. Tal surpresa, além de nos fascinar e motivar, nos obriga a rever drasticamente a maioria de nossas concepções prévias, gerando mudanças irreversíveis nas concepções humanas sobre espaço, tempo e, até mesmo, vida.

O “caderno do professor” que esperamos disponibilizar e atingir o maior número possível de interessados terá como base tudo o que foi discutido aqui, incluindo os comentários e críticas da banca desse mestrado. Deverá também sofrer boas alterações na forma e na linguagem visando uma melhor e boa compreensão por parte daqueles que se interessarem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Rubem. Senso comum e a ciência. Filosofia da ciência. São Paulo: Loyola, 2000.
- ARENDT, Hannah. Entre o passado e o futuro. São Paulo: Perspectiva, 2000.
- _____. A Condição Humana. 7. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1995.
- ASIMOV, ISAAC. O Universo. São Paulo: Edições Bloch, 1968.
- BACHELARD, G. A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- BARRA, E. S.O. A realidade do mundo da ciência: um desafio para a história, a filosofia e a educação científica. Revista ciência e educação, 1998.
- BRASIL, MEC, SEMTEC. PCNs+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, 2002.
- BOCZKO, R. Conceitos de Astronomia. São Paulo: Blucher, 1984.
- CANIATO, R. O céu. São Paulo: Ática, 1990.
- CHALMERS, A.F. O que é ciência afinal? Tradução: Raul Filker, editora Brasiliense, 1993.
- CHERMAN, A; Mendonça, B.R. Por que as coisas caem. Rio de Janeiro, Zahar editora, 2015.
- COHEN, I. Bernard; WESTFALL, Richard. NEWTON: textos, antecedentes, comentários: escolhidos por Bernard Cohen e Richard Westfall. Rio de Janeiro - RJ: EDUERJ/contraponto, 2002. 524 pp. Tradução de Vera Ribeiro.
- DIAS, C.A.C.M; RITA, J.R.S. Inserção da Astronomia como disciplina curricular do Ensino Médio. Revista latino-americana de ensino de Astronomia (RELEA), n.6, 2008.
- FERRIS, Timothy. O Despertar da Via Láctea: Uma história da Astronomia. Rio de Janeiro: Campus, 1990.
- FEYERABEND, P. Adeus à Razão. São Paulo: Editora Unesp, 2010.
- _____. Contra o método. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves Editora, 1977.
- FREIRE, P. Pedagogia do oprimido. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1968.
- GLEISER, Marcelo. A dança do Universo. Companhia das letras, 2008
- HORVATH, J; LUGONES, G; ALLEN, M, P; SCARANO, S; TEIXEIRA, R. Cosmologia Física, São Paulo: Editora Livraria da Física, 2007.
- JAMMER, Max. Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics. Cambridge: Harvard University Press, 1970.

- KUHN, Thomas. A estrutura das Revoluções Científicas. São Paulo: Perspectiva, 1976.
- _____. O caminho desde a estrutura. Trad. Cesar Mortari. São Paulo: Ed. UNESP, 2006.
- LUCIE.P. A gênese do método científico. Rio de Janeiro: ed.CAMPUS LTDA., 1987.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Arquimedes e a coroa do rei: problemas históricos. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v.17, 2000.
- _____. O Universo: Teorias sobre sua origem e evolução. Livraria da Física, 2012.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Do éter ao vácuo e de volta ao éter. Scientific American História (6): 92-98, 2006
- NEWTON, I. Principia - Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. EDUSP, São Paulo, 1990, volume 1. Tradução de T. Ricci; L. G. Brunet; S. T. Gehring e M. H. C. Célia.
- OLIVEIRA, K.S.F., SARAIVA, M.F.O. (2000). Astronomia e Astrofísica. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade.
- PAOLANTINONIO.S; PINTADO.O. Astronomía em la escuela – Medicion de la distancia Tierra – Luna. Revista Latino – Americana de ensino de Astronomia- RELEA, número 3, 2006.
- PEDUZZI, L.O.Q. Física Aristotélica: Por que não considerá-la no ensino de mecânica. Caderno catarinense de ensino de Física, abril de 2013.
- PEDUZZI, L.O.Q; SILVEIRA.F.L. Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, volume 23, 2006.
- PESSOA, Oswaldo. As diferentes posições em Filosofia da Ciência. São Paulo: Cognition Estudos, v.6, 2009.
- _____. Notas do curso Filosofia da Física. São Paulo (IFUSP), 2008.
- PICAZZIO, Enos. [org.] O céu que nos envolve. São Paulo: Odysseus, 2011.
- PIETROCOLA, M. A matemática como estruturante do conhecimento físico, Caderno Catarinense do Ensino de Física, v.19, 2002.
- POE, E.A. Poesia e prosa: obras escolhidas. Rio de Janeiro: Ed. de Ouro. 1966
- PORTO, C.M; PORTO, M.B.D.S.M. Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein, Revista Brasileira de Ensino de Física v.30, 2008.
- PSSC. São Paulo, IBCC - Unesco, 1962.

- REGNER, A.C.K.P. Feyerabend e o pluralismo metodológico. Caderno Catarinense de Ensino de Física, volume 13, 2006.
- Reis, J.C. “Diálogos interdisciplinares: relações entre física e pintura na virada do século XIX para o XX”. Tese de doutorado, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 2002.
- Reis, J.C., Guerra, A., Braga, M. e Freitas, J. *Einstein e o universo relativístico*. São Paulo, Atual Editora. 2000.
- ROBILOTTA, M. R. Construção e realidade no ensino de Física. São Paulo: IFUSP, 1985.
- _____. Massa: O conceito de Newton a Higgs. Notas de aula do curso de extensão 5º Encontro USP Escola. São Paulo: IFUSP, 2013.
- _____. O cinza, o branco e o preto- da relevância da história da ciência no ensino de Física. Catarinense de ensino de Física, volume 5, Florianópolis, 1988.
- Sagan, Carl. *Pale Blue Dot. A vision of the human future in space*. New York: Ballantine Books, 1994.
- SANTOS, A.J.J; VOELZKE, M.R; ARAUJO, M.S.T- O projeto Eratóstenes: a reprodução de um experimento histórico como recurso para a inserção de conceitos da Astronomia no Ensino Médio. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 2012.
- SILVA, M.R. Realismo e anti-realismo na ciência: aspectos introdutórios de uma discussão sobre a natureza das teorias. Revista ciência e educação, 1998, v.5.
- SINGH, Simon. *Big Bang*. Rio de Janeiro, editora Record, 2010.
- TEIXEIRA, R. O céu ao alcance de todos. Observatórios virtuais. São Paulo, 2014.
- Wulf, Andrea. *Os caçadores de Vênus: a corrida para medir o Céu, Paz e Terra*, 2008.
- Young, H. D e Freedman, R. A. – Sears e Zemansky, Física: Óptica e Física Moderna. 10ª edição, Ed. Pearson Addison Wesley, 2010.
- Zanetic, João. Notas de gravitação, 2006. São Paulo.
- _____. Notas do curso “Evolução dos conceitos da Física”. São Paulo: IFUSP, 2007.
- _____. Física e literatura: uma possível integração no ensino. *Cadernos cedes: Ensino da Ciência, Leitura e Literatura*, 41, 1997, p. 46/61.
- _____. Física e arte: uma ponte entre duas culturas. 2006 *Pro-Posições*, v. 17, n. 1 (49), jan./abr., p. 39-57.

CRÉDITOS DE FIGURAS

- Figura 2: site do professor Osvaldo Pessoa Jr.
Disponível em:
➤ <http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/opessoa-cur.htm>
- Figura 3.
Disponível em:
<https://razzendresss.blogspot.com.br/2014/04/efeito-casimir.html>
- Figura 4: Fernando Langhi
Disponível em:
<http://www.if.ufrgs.br/mpef/ieefis/Lang/Dimensoes%20cosmologicas.pdf>
- Figura 7: Telescópio na escola
Disponível em:
<http://player.slideplayer.com.br/3/383343/#>

ESBOÇO INICIAL: CADERNO DO PROFESSOR

**MANUAL DE ATIVIDADES E OFICINAS SOBRE O ESPAÇO E MEDIDAS
ASTRONÔMICAS**

Danilo Miranda Rodrigues

Ramachrisna Teixeira (orientador)

Caderno do professor

Apresentamos aqui um simples esboço para dar um panorama do que queremos para o produto desse mestrado que deverá ser disponibilizado ao professor. Esse produto por enquanto chamado “caderno do professor” estará baseado no conteúdo aqui discutido, nas críticas e sugestões da banca, na experiência adquirida ao longo do mestrado e também nas discussões que pretendemos ter com colegas que, esperamos, desenvolverão algumas das atividades com seus alunos.

Gostaríamos de tecer alguns comentários e breves sugestões sobre as atividades, tanto no sentido de contextualizá-las como de melhorá-las, tomando como base o retorno que tivemos dos alunos. Todas elas foram aplicadas a pequenos grupos de alunos (3 ou 4 em geral) que receberam os textos impressos, na forma em que se encontram nas próximas páginas. Em todas existe um texto introdutório que, se o professor preferir, pode ser substituído por sua exposição prévia de alguns conteúdos. É natural que, mesmo os professores de Física, eventualmente não se sintam seguros com relação a alguns conceitos de Astronomia que podem ter escapado à sua formação inicial. Acreditamos que a leitura dos dois capítulos iniciais da dissertação supra esta demanda, os mesmos foram escritos para fornecer subsídios conceituais para a aplicação das oficinas. As duas primeiras atividades não receberam o nome de oficinas por um motivo simples: percebemos que, antes de colocar os alunos para tomar medidas, seria importante motiva-los, provoca-los, gerar uma saudável inquietação a respeito do conceito de espaço para mostrar como o mesmo merece uma especial atenção de nossa parte. Após essa motivação inicial, se sucedem quatro oficinas que exploram medidas progressivamente maiores de distancias astronômicas, de acordo com a sequência abaixo:

Atividade 1: O universo microscópico.

Atividade 2: Exibição do filme “Alexandria”.

Oficina 1. Determinação do diâmetro terrestre.

Oficina 2: O transito de Vênus e a unidade astronômica.

Oficina 3: Distancias estelares.

Oficina 4: Distancias galácticas.

Oficina 5: Lei de Hubble.

OBS: Esta oficina 5 não foi ainda aplicável com os alunos e, portanto, decidimos por não a publicar nesta versão preliminar. A mesma certamente constará na versão definitiva deste material e seguirá o mesmo modelo apresentado pelas oficinas anteriores.

Atividade 1

Introdução ao conceito de espaço

O conceito de espaço é um dos mais fundamentais da ciência, está contido de alguma forma em todos os modelos teóricos já formulados. Existem certas considerações sobre este conceito que, apesar de normais e até consideradas intuitivas, estão longe de ser óbvias. Nesta atividade, abordamos uma questão muito antiga e que permanece atual, norteando pesquisas recentes em Cosmologia e Física de Partículas.

Primeira Parte: Leia o texto abaixo, extraído da famosa obra “O mundo de Sofia”

“A teoria atomista”

Aqui estou de novo, Sofia. Hoje vou falar sobre o último grande filósofo da natureza. Chamava-se Demócrito (aproximadamente 460-370 a.C.) e vinha da cidade portuária de Abdera, a norte do Mar Egeu. Se conseguiste responder à pergunta acerca das peças do Lego, não te será difícil compreender o projeto deste filósofo. Demócrito concordava com os seus predecessores ao afirmar que as transformações observáveis na natureza não significavam que algo se alterasse realmente. Admitiu, portanto, que tudo tinha de ser composto de elementos pequenos e invisíveis, eternos e imutáveis. Demócrito designava estas pequenas partículas por átomos. O termo “átomo” significa “indivisível”. Para Demócrito, era fundamental afirmar que aquilo a partir do qual tudo é formado não pode ser dividido em partes cada vez menores. Se os átomos pudessem ser constantemente divididos em partes cada vez menores, a natureza teria começado a fluir como uma sopa cada vez mais líquida. Os elementos constitutivos da natureza tinham ainda de se conservar eternamente porque nada pode nascer do nada. Nisto, Demócrito estava de acordo com Parmênides e os eleatas. Além disso, os átomos eram sólidos e compactos. Mas não podiam ser iguais. Porque se os átomos fossem iguais, não teríamos uma explicação válida para o fato de poderem ser combinados de modo a formarem tudo, desde papoulas e oliveiras à pele de cabra e cabelo humano.

Existe uma quantidade infinita de átomos diferentes na natureza segundo Demócrito. Alguns são redondos e lisos, outros são irregulares e curvos. E precisamente porque têm formas tão diversas, podem ser combinados para formarem corpos completamente diversos. Mesmo sendo numerosos e diferentes, todos são eternos, imutáveis e indivisíveis. Quando um corpo, por exemplo, uma árvore ou um animal — morre e entra em decomposição, os seus átomos dispersam-se e podem ser utilizados de novo em novos corpos. Os átomos movem-se no espaço vazio e agregam-se para formar as coisas que vemos à nossa volta.

E agora já percebes o que eu queria dizer com as peças do Lego? Elas possuem mais ou menos as propriedades que Demócrito atribuiu aos átomos, e precisamente por isso se pode construir tão bem com elas. Em primeiro lugar, são indivisíveis. São diferentes em forma e em tamanho, são sólidas e impenetráveis. Além disso, as peças do Lego têm “ganchos”, com os quais podem ser encaixadas umas nas outras; por isso podem ser transformadas em todas as figuras possíveis. Esta combinação pode ser mais tarde desfeita e depois constroem-se novos objetos a partir das mesmas peças. E foi justamente o fato de poderem ser sempre usadas de novo que tornou o Lego tão popular. Uma e a mesma peça de Lego pode fazer hoje parte de um carro, e amanhã de um palácio. Além disso, é possível dizer que as peças do Lego são “imortais”. As crianças de hoje podem brincar com as mesmas peças com que os seus pais brincaram quando ainda eram pequenos. É claro que também podemos construir objetos de barro. Mas o barro nem sempre pode ser reaproveitado, pois se desfaz em partes cada vez menores, até se reduzir a pó. E estas minúsculas partículas de argila não podem ser reunidas para formar novos objetos. Hoje, podemos quase afirmar que a teoria de Demócrito estava certa. A natureza é de fato formada por diversos átomos, que se combinam uns com os outros e se separam de novo.

Um átomo de hidrogênio que está numa célula na extremidade do meu nariz pertenceu, outrora, à tromba de um elefante. Um átomo de carbono do meu miocárdio esteve já na cauda de um dinossauro. Hoje em dia, a ciência descobriu que os átomos se dividiam em “partículas elementares” ainda menores. A essas partículas elementares chamamos prótons, nêutrons e elétrons. E talvez estas se deixem dividir em partículas ainda menores. Mas os físicos concordam em afirmar que tem de haver um limite. Têm de existir as partículas menores a partir das quais a natureza é formada. Demócrito não tinha acesso aos aparelhos eletrônicos do nosso tempo. O seu único instrumento era a razão. Mas a razão não lhe deixava nenhuma alternativa. Se aceitarmos que nada se pode alterar, que nada surge do nada e que nada desaparece, nesse caso a natureza tem de ser formada por elementos constitutivos minúsculos que se combinam e se separam uns dos outros. Demócrito não tinha em conta uma “força” ou um “espírito” que interviesse nos processos naturais. As únicas coisas que existem, segundo ele, são os átomos e o espaço vazio.

Dado que ele só acreditava no que é “material”, denominamo-lo materialista. Nos movimentos dos átomos não há uma finalidade consciente. Isso não significa que tudo o que acontece seja ao “acaso”, porque tudo segue as leis constantes da natureza. Demócrito achava que tudo o que acontece tem uma causa natural, uma causa que reside nas próprias coisas. Teria dito um dia que preferia descobrir uma lei da natureza a tornar-se rei da Pérsia. Segundo Demócrito, a teoria atomista esclarecia também as nossas “sensações”. A percepção que temos de alguma coisa deve-se ao movimento dos átomos no vazio. Quando vejo a lua, o que acontece é que os “átomos lunares” atingem o meu olho. E a “alma”? Não pode ser constituída por átomos, por “coisas” materiais? Para Demócrito a alma era constituída por “átomos de alma” redondos e lisos. Quando um homem morre, os átomos da alma dispersam-se em todas as direções e podem dar vida a outra alma. Isto significa que o homem não possui uma alma imortal. Este é um pensamento partilhado hoje por muitas pessoas. Acreditam, como Demócrito, que a alma está ligada ao cérebro, e que não podemos ter nenhuma forma de consciência quando o cérebro se decompõe.

Com a sua teoria atomista, Demócrito pôs um ponto final provisório na filosofia da natureza grega. Estava de acordo com Heráclito quando pensava que, na natureza, tudo flui; porque as formas vêm e vão. Mas por detrás de tudo o que flui, há algo eterno e imutável que não flui: os átomos, segundo Demócrito. Durante a leitura, Sofia espreitava frequentemente pela janela para verificar se o misterioso autor das cartas aparecia junto à caixa do correio. Nesse momento, olhava fixamente para a rua, enquanto refletia sobre o que tinha lido. Segundo Sofia, Demócrito pensara de um modo simples e genial. Ele encontrara a solução para os problemas do “elemento primordial” e do “devir”. Esta questão era tão complicada que os filósofos tinham trabalhado muito nela durante várias gerações. Por fim, Demócrito resolvera todo o problema, tendo usado simplesmente a sua razão. Sofia quase se riu. Tinha de ser verdade que a natureza era formada por partículas minúsculas que nunca se alteravam. Ao mesmo tempo, Heráclito tinha razão em afirmar que todas as formas na natureza “fluem”, porque todos os homens e animais morrem, e mesmo uma montanha se desagrega lentamente. No entanto essa montanha é constituída por partículas pequenas e indivisíveis que nunca se quebram. Demócrito colocara novas questões. Por exemplo, afirmara que tudo acontece de uma forma mecânica. Não aceitava a ideia de forças espirituais na existência — ao contrário de Empédocles e Anaxágoras. Além disso, Demócrito não acreditava que o homem tivesse uma alma imortal. Poderia ela ter a certeza de que ele tinha razão nesse aspecto? Não estava tão segura disso. Mas ela também estava apenas no início do seu curso de filosofia.

.....

..

Segunda Parte: O paradoxo de Zenão

O texto acima descreve um pouco do modelo atômico proposto por Demócrito de Abdera, famoso filósofo grego do século IV a.C. A analogia entre os diferentes átomos descritos por ele e as peças do brinquedo conhecido como “Lego” resumem sua crença de que o espaço físico é de natureza discreta, ou seja, formado por uma diversidade de partículas indivisíveis (átomo = indivisível) cercadas pelo vazio. Dentre as diversas concepções da matéria, trazemos uma que ficou famosa por contrapor-se ao atomismo de Demócrito, formulada por Zenão de Eléia (sec. V a.C), discípulo do grande filósofo Parmênides de Eléia. O curioso é que Zenão pretendia apenas demonstrar as contradições existentes das descrições de movimento baseadas nos nossos sentidos. Sendo assim, ele formulou diversos paradoxos sobre o movimento, possivelmente mais de 40, dentre os quais o famoso paradoxo da corrida entre Aquiles e a tartaruga:

“O Paradoxo da corrida”

Enunciado: O forte e veloz Aquiles, herói da guerra de Tróia, aceita disputar corrida com uma lenta tartaruga. Como vantagem, ela recebe o privilégio de largar, suponhamos que, 1 quilometro à frente do guerreiro. Vamos assumir que as velocidades de ambos sejam constantes e que Aquiles seja 10 vezes mais veloz que a tartaruga:

$$V_{\text{Aquiles}} = 10 \times V_{\text{tartaruga}}$$

Dessa forma, quando Aquiles partir do instante definido como “0” e percorrer os primeiros 1000 metros, a distância entre ambos será de 100 metros, este será o instante “1”. Posteriormente, quando ele terminar de percorrer os 100 metros seguintes, a tartaruga estará 10 metros a sua frente, este será o instante 2.

Seguindo o raciocínio, cada novo instante será definido quando Aquiles percorrer a distância que os separava no instante anterior.

Complete a tabela abaixo:

Distância percorrida por Aquiles (m)	1000	100	10										
Distância entre os competidores (m)	100	10											
Instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...

Terceira Parte: Questões para discussão e reflexão

✦ Pela tabela construída, devemos observar que a vantagem da tartaruga não cairá a zero em nenhum instante e, portanto, podemos concluir que não haverá ultrapassagem, independentemente da duração da corrida. Esta afirmação é verdadeira? Em caso negativo, como você justifica o resultado obtido pela tabela

✦ Como você imagina que Demócrito explicaria o paradoxo da corrida? Você considera que o modelo das “peças de lego” pode contribuir para a solução deste paradoxo?

✦ Ao longo do último século, diversas descobertas importantes foram feitas sobre as chamadas “partículas elementares”. Atualmente os astrônomos consideram que as moléculas são formadas por átomos, os átomos por sua vez são constituídos por prótons nêutrons e eletros. Por fim, os prótons são formados por partículas menores, conhecidas como quarks. Estes sim são considerados elementares. Será apenas questão de tempo até os cientistas encontrarem entidades menores do que os quarks?

✦ Ainda sobre a questão anterior, se sua resposta foi afirmativa, será que futuramente poderemos sempre encontrar estruturas menores no espaço físico e, portanto, o mesmo é de natureza **contínua**, ou será que, em algum momento, a menor e indivisível estrutura do universo será encontrada e finalmente teremos achado os “Legos” descritos por Demócrito? Se isto for verdade, poderemos afirmar que o espaço físico é de natureza **discreta**.

Em suma, você considera que o espaço seja contínuo ou discreto?

Atividade 2: Exibição do filme “Alexandria”

Diálogo 1

Hipátia:

“Muitos tolos se perguntaram: por que as estrelas não caem do céu. Mas, vocês, instruídos pelos sábios, sabem que as estrelas não se movem para cima e para baixo. Apenas gravitam de leste para oeste segundo a rota mais perfeita já criada: o círculo. Como o círculo reina no céu, as estrelas nunca caem e nunca cairão. Mas, o que acontece aqui na Terra?”

Aqui os corpos caem, mas não em movimentos circulares, e sim, lineares!

Agora eu vos pergunto: Qual mistério imaginam existir nas profundezas da Terra para que, cada pessoa, animal ou objeto permaneça aqui na Terra e não se perca pelos ares?”

.....

- a) Como você responderia atualmente a esta questão?
- b) Várias explicações distintas para a causa da queda dos corpos já foram formuladas ao longo do tempo, cite ao menos duas delas.

DIÁLOGO 2

Hipátia: “Estive pensando em algo que me disse no dia em que criticou o mecanismo celeste, chamando-o de arbitrário”

Orestes: “Na verdade, eu criticava Ptolomeu por complicar tudo com os epiciclos, mas talvez seja meu pensamento simplista”

Hipátia: “O céu deveria ser simples! E se houvesse uma explicação mais simples para os errantes”

Personagem Oculto:

“Existe, mas é tão absurda, tão antiga que ninguém acredita... Aristarco argumentou que a Terra se move. O estranho comportamento dos errantes é apenas uma ilusão de óptica causada pelo nosso movimento em combinação com o deles ao redor do Sol”

.....

Questão:

a) Comente a frase atribuída ao personagem Orestes:

“Ptolomeu não é perfeito mas funciona ”

b) Se diversas explicações para os mesmos fenômenos são formuladas ao longo do tempo, como ter certeza se atualmente a ciência oferece respostas que não serão negadas no futuro.

DIÁLOGO 3

Hipátia: Por que os errantes mudam seu brilho tão de repente? E o que é pior, por que o Sol muda de tamanho do verão para o inverno?

Aspasius: Porque talvez esteja mais perto algumas vezes e mais longe outras

.....

Pergunta: Seria possível que Hipátia ou qualquer um de seus contemporâneos pudessem efetivamente verificar que a distância entre o Sol e a Terra varia entre o inverno e o verão.

O EXPERIMENTO DE ERATÓSTENES

(Elaborado e realizado em duas partes)

Primeira Parte: Nosso lugar na Terra

OBJETIVOS: Determinar a latitude local e as direções dos quatro pontos cardeais.

INTRODUÇÃO:

Desde que atingiu o estágio de civilizado, o Homem tem se envolvido, de maneira direta ou indireta, com fenômenos e conceitos astronômicos. Esse envolvimento ocorreu e ocorre tanto pela curiosidade quanto pela sobrevivência. De modo especial, a compreensão acerca do movimento do Sol e de outras estrelas, visto no passado com sendo em relação à Terra (ponto de vista geocêntrico), nos possibilitou expandir nossa visão sobre o tamanho do mundo conhecido, nos permitiu inferir a esfericidade do nosso planeta bem como nos levou a um universo cujas dimensões somos incapazes de imaginar.

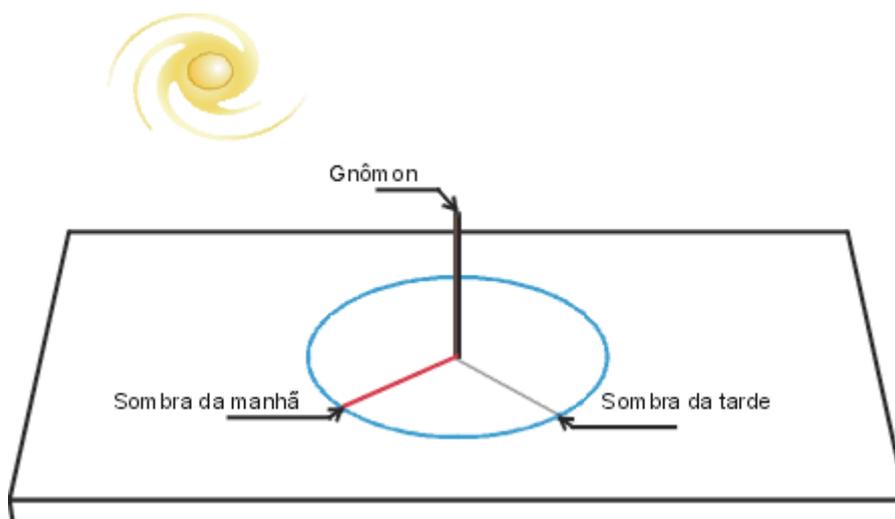
Nesta atividade, buscaremos nos localizar em nosso planeta, como fizeram diversos antepassados em importantes momentos da nossa história. Primeiramente seu grupo deve determinar os pontos cardeais e construir um gnomon de Sol para, em seguida, determinar nossa latitude. Por fim, colocamos em anexo uma maneira de trabalhar esta atividade sem observações diretas do Sol, mas substituindo-as pelo software chamado Stellarium,

MATERIAL:

-
- Suporte de isopor forrado externamente com folha sulfite (dimensão sugerida: 20cm x 20cm)
 - Espeto de churrasco
 - Barbante (comprimento sugerido de 1 metro)
 - Canetas
 - Fita métrica
 - Calculadora científica (uma por grupo)
-

PROCEDIMENTO:

- 1) Antes de iniciar a construção de seu relógio de Sol (GNOMON) escolha um local apropriado para deixar seu suporte de isopor, deve ser um local a céu aberto, apto a receber iluminação solar durante um dia inteiro sem o obstáculo de sombras de outros objetos em nenhum horário.
- 2) Uma vez escolhido o local e fixado o suporte, o espeto será fincado sobre o mesmo, ocupando a posição vertical, um fio de prumo pode ser improvisado com barbante e canetas amarradas, para garantir que o espeto ocupe a posição vertical. Em seguida, será medido o comprimento da sombra formada pela haste. Tal medida deverá ser realizada no período da manhã e o horário de sua realização deverá ser cuidadosamente anotado pelo grupo. Para finalizar esta etapa, o grupo deverá traçar uma circunferência horizontal, com centro na base da haste, sobre o suporte, onde o raio é definido pelo comprimento da sombra encontrado.
- 3) Ao longo do período da manhã, a sombra da haste apresentará comprimentos cada vez menores, ocorrendo o inverso no período da tarde, com o detalhe que o meio-dia solar não coincide exatamente com o meio-dia convencional. Por isso, o seu grupo deverá realizar diversas medidas da localização da borda externa da sombra da haste, no período compreendido entre 11h e 13h com o intuito de localizar a sombra de comprimento mínimo.
- 4) Seu grupo deve estar atento para o instante em que a sombra da haste voltar a “tocar” a circunferência desenhada no período da manhã. Uma vez que os dois instantes sejam *aproximadamente* simétricos em relação ao meio-dia geográfico, é possível realizar uma previsão do período da tarde em que o grupo deverá ter máxima atenção para não perder o instante em que a sombra deve ser marcada. O horário do segundo encontro da sombra com a circunferência desenhada durante a manhã deve ser anotado junto com a posição da sombra.



Antes de prosseguir, o grupo deve certificar-se de possuir os seguintes dados:

a) Comprimento da haste vertical

L = _____ cm

b) Comprimento da sombra no período da manhã.
(sombra 1)

Sombra 1

M edida 1	
M edida 2	
M edida 3	
M edida 4	
M ÉDIA	

HORÁRIO: ____: ____

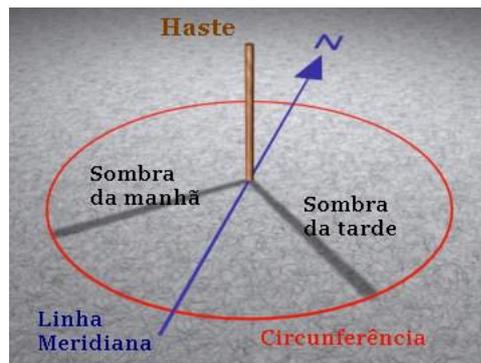
c) Comprimento da sombra mínima. (Sombra 2)

Sombra 2

M edida 1	
M edida 2	
M edida 3	
M edida 4	
ÉDIA M	

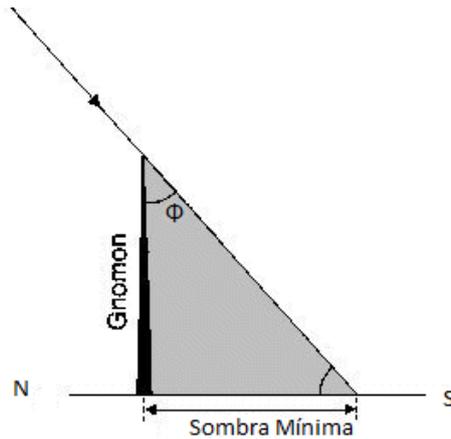
HORÁRIO: ___: ___

Uma vez que estamos abaixo da linha do Equador, a sombra mínima define, não apenas a direção geográfica Norte Sul, como também o sentido de cada ponto cardeal, desenhe os quatro pontos cardeais sobre seu relógio solar, como no desenho abaixo:



DETERMINAÇÃO DA LATITUDE LOCAL:

O ângulo de latitude poderia ser facilmente determinado se nós estivéssemos nas datas dos equinócios, de outono ou de primavera, quando seu valor Φ é encontrado diretamente pelas medidas da altura do gnomon (haste vertical) e de sua sombra mínima pela seguinte relação:



$$\tan (\Phi) = \frac{\text{comprimento da sombra mínima}}{\text{altura do gnomon}}$$

Utilizando uma calculadora com a função arco tangente (tg^{-1}), expresse seus resultados abaixo:

$$\tan (\Phi)_{\text{medido}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\Phi_{\text{medido}} = \underline{\hspace{1cm}}^{\circ}$$

O ângulo Φ encontrado previamente não é definido como o ângulo de latitude local, mas coincide com seu valor nas datas dos equinócios, de modo que, seu valor precisa ser corrigido, uma vez que não estamos realizando o experimento nestas datas. Para um observador na superfície da Terra, o Sol executa um movimento anual em que sua altura em relação ao equador celeste varia entre aproximadamente $+23^{\circ} 45'$ e $-23^{\circ} 45'$ e tal movimento é conhecido como sua declinação (δ).

A declinação do Sol (δ) pode ser determinada aproximadamente, para cada dia do ano, consulte no anexo final deste relatório uma tabela para os valores da declinação do Sol ao longo do ano, em intervalos de 4 dias e determine o valor aproximado para o ângulo de declinação na data de hoje

$$\delta_{\text{data}} = \underline{\hspace{1cm}}^{\circ}$$

Por fim, com a correção feita pela declinação do Sol, podemos determinar a latitude local, pela seguinte relação:

$$\Phi_{\text{verdadeira}} = \Phi_{\text{medida}} - \bar{\delta}$$

Expresse seu resultado, e compare-o com o valor verdadeiro da latitude de São Paulo, escrevendo um pequeno texto contendo as considerações do grupo sobre possíveis discrepâncias entre os dois valores.

$$\Phi_{\text{verdadeira}} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}$$

$$\Phi_{\text{São Paulo}} = 23,5^{\circ}$$

Apêndice: Declinação do Sol ao longo do ano

DECLINAÇÃO DO SOL (Em graus e décimos de grau).						A declinação está tabelada para o décimo de grau mais próximo em vez do minuto mais próximo. Para converter os décimos de grau em minutos, multiplique por 66 (isto é, $27,9^\circ = 27^\circ 54'$)						
Dia	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	S 23,1	S 17,5	S 7,7	N 4,4	N 15,0	N 22,0	N 23,1	N 18,1	N 8,4	S 3,1	S 14,3	S 21,8
2	23,0	17,2	7,3	4,8	15,3	22,1	23,1	17,9	8,1	3,4	14,6	21,9
3	22,9	16,9	6,9	5,2	15,6	22,3	23,0	17,6	7,7	3,8	15,0	22,1
4	22,9	16,6	6,6	5,6	15,9	22,4	22,9	17,3	7,3	4,2	15,3	22,2
5	22,8	16,3	6,2	5,9	16,2	22,5	22,8	17,1	7,0	4,6	15,6	22,3
6	S 22,7	S 16,0	S 5,8	N 6,3	N 16,4	N 22,6	N 22,7	N 16,8	N 6,6	S 5,0	S 15,9	S 22,5
7	22,5	15,7	5,4	6,7	16,7	22,7	22,6	16,5	6,2	5,4	16,2	22,6
8	22,4	15,4	5,0	7,1	17,0	22,8	22,5	16,3	5,8	5,7	16,5	22,7
9	22,3	15,1	4,6	7,4	17,3	22,9	22,4	16,0	5,5	6,1	16,8	22,8
10	22,2	14,8	4,2	7,8	17,5	23,0	22,3	15,7	5,1	6,5	17,1	22,9
11	S 22,0	S 14,5	S 3,8	N 8,2	N 17,8	N 23,1	N 22,2	N 15,4	N 4,7	S 6,9	S 17,3	S 23,0
12	21,9	14,1	3,5	8,6	18,0	23,1	22,0	15,1	4,3	7,3	17,6	23,1
13	21,7	13,8	3,1	8,9	18,3	23,2	21,9	14,8	3,9	7,6	17,9	23,1
14	21,5	13,5	2,7	9,3	18,5	23,2	21,7	14,5	3,6	8,0	18,1	23,2
15	21,4	13,1	2,3	9,6	18,8	23,2	21,6	14,2	3,2	8,4	18,4	23,3
16	S 21,2	S 12,8	S 1,9	N 10,0	N 19,0	N 23,2	N 21,4	N 13,9	N 2,8	S 8,8	S 18,7	S 23,3
17	21,0	12,4	1,5	10,4	19,2	23,4	21,3	13,5	2,4	9,1	18,9	23,3
18	20,8	12,1	1,1	10,7	19,5	23,4	21,1	13,2	2,0	9,5	19,1	23,4
19	20,6	11,7	0,7	11,1	19,7	23,4	20,9	12,9	1,6	9,9	19,4	23,4
20	20,4	11,4	0,3	11,4	19,9	23,4	20,7	12,6	1,2	10,2	19,6	23,4
21	S 20,2	S 11,0	N 0,1	N 11,7	N 20,1	N 23,4	N 20,5	N 12,2	N 0,8	S 10,6	S 19,8	S 23,4
22	20,0	10,7	0,5	12,1	20,3	23,4	20,4	11,9	0,5	10,9	20,1	23,4
23	19,8	10,3	0,9	12,4	20,5	23,4	20,2	11,6	N 0,1	11,3	20,3	23,4
24	19,5	9,9	1,3	12,7	20,7	23,4	20,0	11,2	S 0,3	11,6	20,5	23,4
25	19,3	9,6	1,7	13,1	20,9	23,4	19,7	10,9	0,7	12,0	20,7	23,4
26	S 19,0	S 9,2	N 2,1	N 13,4	N 21,1	N 23,4	N 19,5	N 10,5	S 1,1	S 12,3	S 20,9	S 23,4
27	18,8	8,8	2,5	13,7	21,2	23,3	19,3	10,2	1,5	12,7	21,1	23,3
28	18,5	8,5	2,9	14,0	21,4	23,3	19,1	9,8	1,9	13,0	21,3	23,3
29	18,3	8,1	3,2	14,4	21,6	23,3	18,8	9,5	2,3	13,3	21,4	23,3
30	18,0	...	3,6	14,7	21,7	23,2	18,6	9,1	2,7	13,7	21,6	23,2
31	S 17,7	...	N 4,0	...	N 21,9	...	N 18,4	N 8,8	...	S 14,0	...	S 23,1

EXEMPLO: a 10 de Dezembro, a declinação do Sol é $22,9^\circ$ S, pelo que um observador que meça uma distância ao zénite de 0° deverá saber que está a uma latitude de $22,9^\circ$. Se medir uma distância ao zénite igual a 5° com o Sol a sul do zénite, estará a 5° a norte de $22,9^\circ$ S, ou à latitude de $17,9^\circ$ S, e se o Sol estiver a norte, ele estará 5° a sul de $22,9^\circ$ S, ou seja, à latitude de $27,9^\circ$ S.

SEGUNDA PARTE: NOSSO LUGAR NO UNIVERSO

Determinação da circunferência da Terra

Introdução

Muitos filósofos gregos se perguntaram acerca do formato da Terra, podemos citar as contribuições de Aristóteles enquanto importantes argumentos qualitativos contrários à concepção de um planeta plano, existente previamente. O fato de navios desaparecerem rapidamente no horizonte ou a sombra circular da Terra projetada frequentemente sobre a Lua são algumas de suas importantes reflexões. Mas o conhecimento da curvatura de nosso planeta não tornava ainda possível a medida de sua curvatura e de suas dimensões. Um limite inferior para a medida espacial do nosso planeta foi realizada por geógrafos gregos, uma vez que os mesmos sabiam haver terra além do estreito de Gibraltar. As estimativas realizadas davam algo em torno de 9600 km, mas o quão inferior poderia ser este limite? Coube a Erastóstenes de Cirene (276-196 a.C) realizar tal façanha. Ao observar registros presentes na biblioteca de Alexandria, obteve a informação de que, precisamente no dia 21 de junho, quando o Sol se encontrava em sua altura máxima, um grande poço construído na cidade de Siene (atual Assuã), não apresentava sombra. Erastóstenes buscou verificar se o mesmo aconteceria em Alexandria, fincando uma haste vertical e verificando a evolução de sua sombra ao longo do dia. Observou então que não havia ausência de sombra e que o ângulo mínimo, entre o Sol e a vertical local, mostrava-se próximo de 7° . O resultado de Erastóstenes era muito claro, se a Terra fosse plana, a posição do Sol na esfera celeste seria a mesma para todos os observadores da superfície terrestre. Sendo assim, para um determinado instante, todos os seus pontos apresentariam simultaneamente sombra ou nenhum deles as possuiria! Mas sua contribuição não foi apenas qualitativa.

Uma vez conhecida a distância entre as duas cidades, foi possível determinar o diâmetro da Terra, obtendo um valor de aproximadamente 12870 km, a estimativa atual é de aproximadamente 12739 km, o que explicita a eficácia do trabalho de Erastóstenes. Os detalhes dos cálculos utilizados serão expostos nas próximas etapas, uma vez que obteremos o raio da Terra por um método praticamente idêntico ao seu.

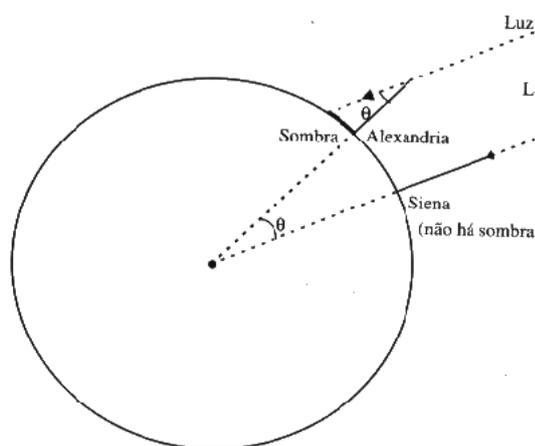


Figura 1: Esquema do experimento de Erastóstenes

(<http://www.grupoescolar.com/pesquisa/eratostenes-calcula-a-circunferencia-da-terra.html>)

Considerando o mapa do Brasil que se encontra abaixo e sua escala, proporemos um procedimento análogo ao feito por Erastóstenes para medir o comprimento da Terra. Analogamente ao sábio de Cirene que vivia em Alexandria e usou sua esta cidade como ponto de partida, tomaremos nossa cidade de São Paulo como origem. Na primeira parte desta atividade, realizada alguns dias atrás, foi possível determinar a latitude (\varnothing) de São Paulo, utilizando apenas uma haste vertical fincada no solo (como fez Erastóstenes). Seu valor será fundamental para nosso próximo empreendimento. Abaixo temos disponível um valor aproximado para a latitude de São Paulo, esperamos que todos tenham obtido valores semelhantes a este:

$$\varnothing_{sp} = -23,5^\circ$$



Procedimento:

Utilizando uma régua, determine a distância de São Paulo até a linha do Equador:

a) Em centímetros:

$$d = \text{_____ cm}$$

b) Efetuando a conversão para quilômetros, lembre-se que o gráfico acima possui uma escala de conversão entre unidades de medida de distâncias:

$$D = \text{_____ cm}$$

c) Agora que você sabe a distância de São Paulo até a linha do Equador, determine o comprimento de toda a circunferência da Terra (distância percorrida por um viajante que decide dar uma volta no globo partindo da cidade de São Paulo). Para tal determinação, podemos nos valer de uma proporção entre o ângulo de abertura de uma circunferência e a medida do arco associado a este ângulo.

$$C = \text{_____ km}$$

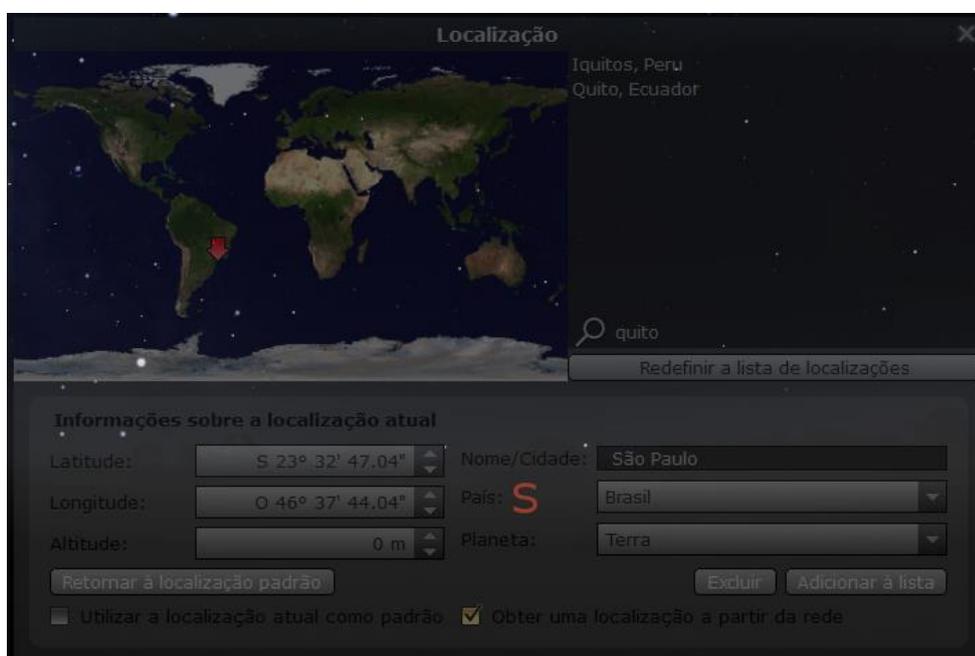
Questões:

1. Podemos afirmar que diariamente por volta do meio dia o Sol está a pino, ou seja, passa pela vertical de um observador em São Paulo (zênite)? O Sol nasce, se põe e passa pelo ponto mais alto do céu diariamente no mesmo horário? Justifique sua resposta.
2. Se o poço de Siena fosse observado em outra data, o resultado da observação apresentaria alguma mudança perceptível? Qual a importância desta data para o experimento de Eratóstenes
3. O que define as posições dos trópicos de Câncer e Capricórnio? É possível que o Sol esteja a pino para um observador na região intertropical? Com qual frequência ao longo de um ano? E para um observador localizado fora desta região?

Apêndice: o experimento de Eratóstenes via software Stellarium

Uma interessante alternativa de atividade sobre o experimento de Eratóstenes é sua realização não por meio de uma tomada direta de dados, mas por observação do fenômeno por meio do conhecido programa de computador chamado Stellarium. Abaixo descreveremos sucintamente uma possibilidade de abordar alguns importantes conceitos de Astronomia por meio deste programa. Evidentemente não pretendemos esgotar o tema e esta proposta pode, de diversas maneiras, ser adaptada de acordo com o contexto pedagógico local. Recomendamos inicialmente que os professores façam o download deste software gratuito através de seu website oficial e se familiarizem com as suas ferramentas (www.stellarium.org).

Ao iniciar o programa, selecione na barra vertical à esquerda o ícone “janela de localização” e selecione a cidade de Quito no Equador



Pronto, agora podemos observar o céu de um ponto de Equador. Em seguida, selecionamos na mesma barra vertical da esquerda o ícone “janela de data e hora” e escolhemos a data de um dos dois Equinócios anuais, por exemplo, no dia 21/3.



Em seguida, dirija-se até a barra horizontal que se encontra na parte de baixo da tela e ative o ícone em que se encontra escrito “grade azimutal”.

Acompanhe o movimento do Sol (selecione a opção “aumentar a velocidade do tempo”) e verifique em que instante ele passa pelo ponto mais alto do céu (anotem)

Perguntas:

- 1) Em outras datas o Sol também passa pelo zênite?
- 2) Esta passagem não deveria ocorrer exatamente ao meio-dia?

Agora, ainda na mesma data e horário inicial (por volta das 11 horas) altere a localização para a cidade de Santo André, ative tanto a grade horizontal quanto a azimutal, observem o movimento do Sol. Congele a imagem no instante que o Sol apresenta sua maior aproximação do Zênite e verifique, com base nas grades equatorial e azimutal, o ângulo de separação entre ambos nesta configuração.

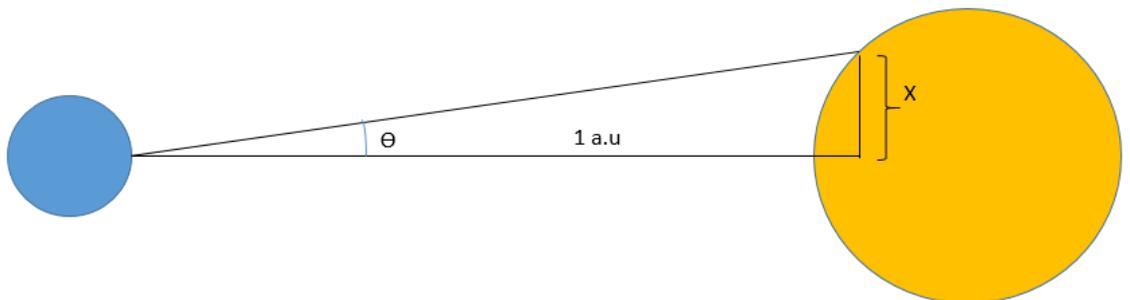
- 1) Este ângulo possui alguma relação com a latitude da cidade?

Verifique o valor da distância entre as cidades e, com este valor, determine o raio da Terra da mesma forma que foi feita por Eratóstenes.

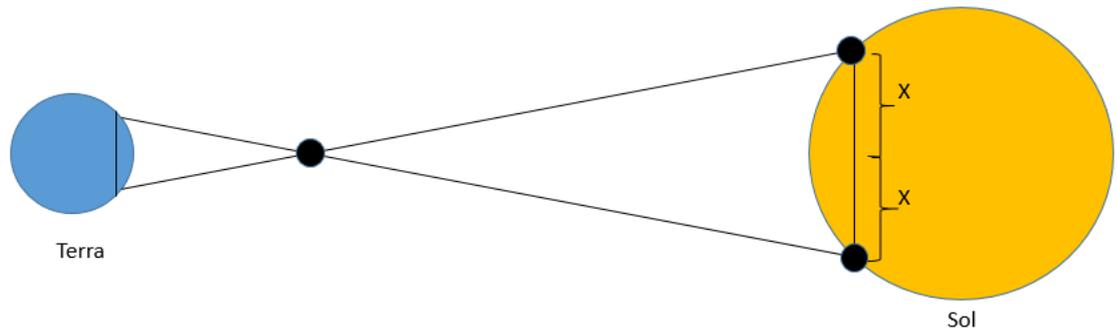
O TRÂNSITO DE VÊNUS E A DETERMINAÇÃO DA UNIDADE ASTRONÔMICA

1. Introdução

Os trânsitos planetários são fenômenos astronômicos belíssimos e raros, que tem nos encantado há muitas gerações. Foi a observação de um transito de Mercúrio em 1677 que levou Edmond Halley a encontrar um método para calcular o valor da unidade astronômica e, finalmente, determinar a escala do Sistema Solar. Halley não estaria vivo para presenciar o próximo transito de Vênus, de 1761, mas deixou como legado para a próxima geração de astrônomos um interessante método de determinação e a convocação para completar o empreendimento iniciado por ele. Atualmente, os trânsitos planetários ganharam nova importância uma vez que, ao longo das últimas duas décadas tem sido usado para descobrir diversos exoplanetas e asteroides. Propomos nesta atividade um procedimento semelhante ao concebido por Halley para determinar o valor da unidade astronômica (a.u) em quilômetros. Para isso, utilizaremos informações extraídas do último transito de Vênus, visto em São Paulo no ano de 2012.



Conforme observamos na figura acima, para calcularmos o valor da unidade astronômica, precisamos conhecer o valor do ângulo Θ associado a uma certa distância X , medida sobre a superfície do Sol. Os pontos extremos do segmento de reta na figura acima (x) podem ser obtidos por um método semelhante ao proposto por Halley em que é possível utilizar uma configuração de transito de algum dos dois planetas internos.



Em linhas gerais, o intuito desta atividade será propor uma série de etapas para que cheguemos aos valores da distância X e do ângulo Θ para enfim determinarmos o valor da unidade astronômica.

2. Sequência de etapas

O exercício se inicia com a convocação de Halley para que astrônomos do mundo inteiro meçam o valor da unidade astronômica. Dois astrônomos contemporâneos resolvem utilizar o trânsito de Vênus de 2012 para realizar tal empreitada. Ambos medirão os instantes de entrada e saída do planeta sobre o disco solar. Após realizarem as medidas, suas informações serão compartilhadas para finalmente concluir a missão. O empreendimento será dividido em duas etapas descritas abaixo.

1ª etapa: Cálculos preliminares

- Esta etapa inclui alguns cálculos preliminares importantes: a determinação da distância linear entre dois observadores sobre a superfície terrestre e também a determinação da distância entre as projeções das trajetórias de Vênus ao longo da superfície do Sol segundo os dois observadores.

2ª etapa: Observando o transito de Vênus

- Aqui se iniciam as observações do transito e, conseqüentemente, os astrônomos compartilham seus resultados para determinar o ângulo de paralaxe diurna. De posse do ângulo de paralaxe eles podem enfim, com o auxílio de alguns conceitos e definições trigonométricas, determinar o valor da unidade astronômica (a.u).

Boas medidas

Primeira Parte

No início do século XVII o astrônomo alemão Johannes Kepler determinou sua famosa terceira lei do movimento planetário, que consiste em uma relação entre período de revolução e a distância média do respectivo planeta ao Sol. Seus períodos de revolução ao redor do Sol já eram conhecidos e estão fornecidos na tabela abaixo:

Planeta	Período em anos terrestres
Mercúrio	0,24
Vênus	0,61
Terra	1,0
Marte	1,9
Júpiter	12
Saturno	29
Urano	84
Netuno	165
Plutão	248

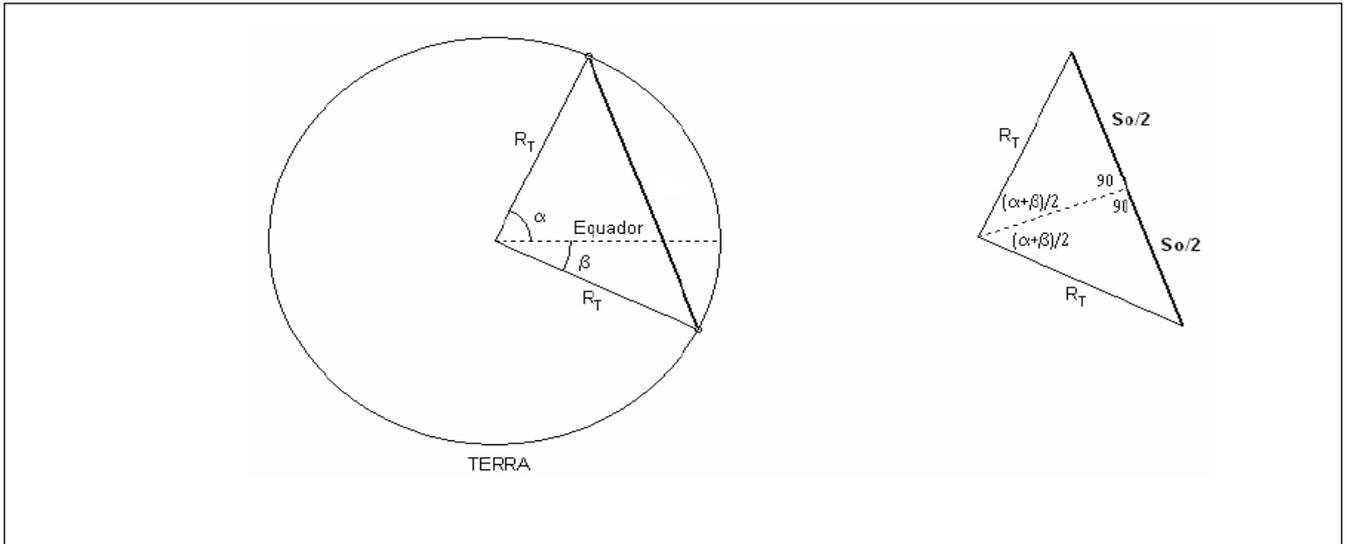
a) Utilizando a terceira lei de Kepler, determine a distância, em unidade astronômica (a.u.) entre a Terra e Vênus (D_{TV}) e entre Vênus e o Sol (D_{VS}) em uma hipotética conjunção de “transito”:

$$D_{TV} = \text{_____} \text{ a.u.}$$

$$D_{VS} = \text{_____} \text{ a.u.}$$

(Espaço para seus cálculos)

b) Os dois astrônomos encarregados de determinar o valor da unidade astronômica, foram enviados respectivamente para Santo André e Nuuk (capital da Groelândia), atravessados aproximadamente pelo mesmo meridiano, cujas latitudes são respectivamente dadas por $\phi_{SA} = -22^\circ 39'$ e $\phi_N = 72^\circ 00'$. Antes de prosseguir, devem determinar a distância entre seus respectivos paralelos (será chamada S_0). Para isso, devem utilizar alguns conceitos de trigonometria e geometria plana, expressos nas figuras abaixo, e o valor do raio da Terra (R_T)

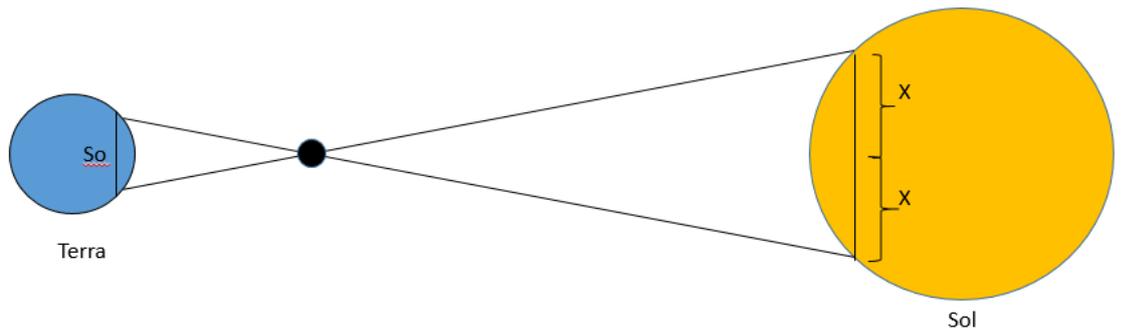


Com base nas figuras acima, determine a distância entre seus respectivos meridianos.

Dado: $R_{Terra} = 6400 \text{ km}$

(Espaço para seus cálculos)

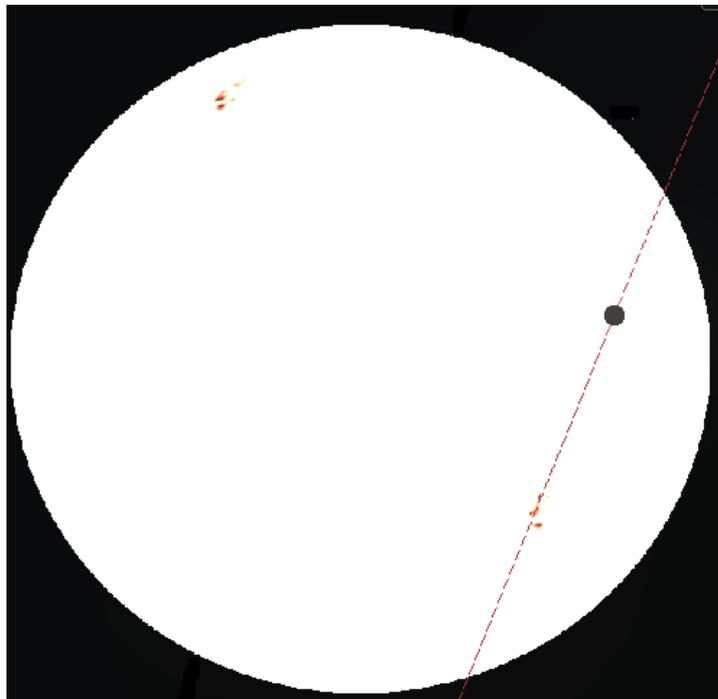
c) Para concluir esta etapa inicial, os astrônomos podem determinar, usando semelhança de triângulo, a distância linear entre as suas duas projeções de Vênus sobre a superfície do Sol ($2x$), quando observado à partir de suas latitudes. Determine, portanto, o valor da medida X da figura abaixo em unidade astronômica.



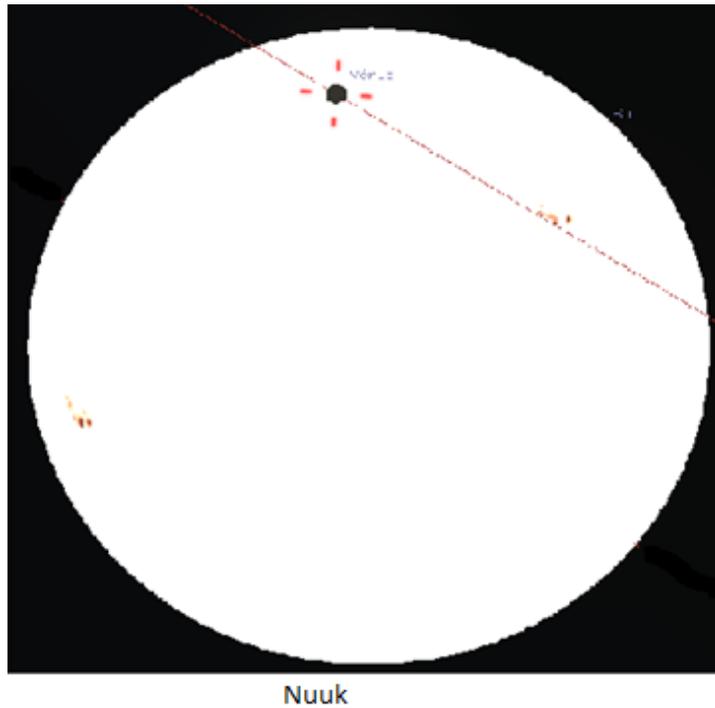
(Espaço para seus cálculos)

Segunda Parte: Observando o transito de 2012

Temos abaixo, duas imagens referentes ao transito de Vênus que ocorreu entre os dias 5 e 6 de 2012. Devido ao fenômeno da paralaxe, os dois observadores, posicionados respectivamente nas cidades de Nuuk (Groelândia) e Santo André, observarão o planeta cruzar o disco solar em posições distintas.



Santo André



Para cada observador, determinaremos a distância angular (Θ) entre o caminho seguido por Vênus e a borda do disco solar.

Procedimento:

- 1) Medir com uma régua o valor do comprimento da corda definida pelo “rastros” do planeta Vênus sobre a superfície do Sol (linha tracejada sobre as figuras) e localizar seu ponto médio (P.M).
- 2) Medir com uma régua o comprimento do diâmetro Solar, sugerimos utilizar o P.M como referência e medir ao longo da direção perpendicular ao rastro da trajetória de Vênus.
- 3) Considerando que o Sol possui diâmetro angular de $32'$, determine a separação angular entre o P.M e a borda do disco solar.

(Espaço para seus cálculos)

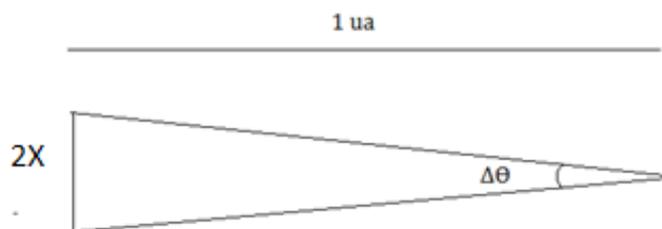
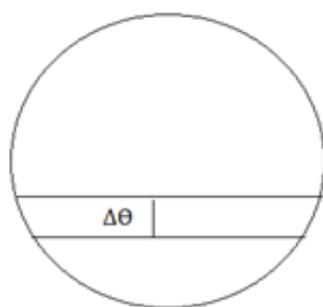
Respostas:

$$\Theta_{SA} = \text{_____ graus}$$

$$\Theta_{Nuuk} = \text{_____ graus}$$

$$\Delta\theta = \Theta_{SA} - \Theta_{Nuuk} = \text{_____ graus}$$

A variação angular $\Delta\theta$ corresponde ao ângulo de paralaxe, associado à variação nas posições de Vênus, quando observado sobre o Sol segundo os dois astrônomos. Com o auxílio de alguns conceitos básicos de trigonometria, as informações extraídas ao longo desta atividade nos permitem calcular o valor da unidade astronômica (a.u), conforme descrito nas imagens abaixo:



Os valores da distância X , medida sobre a superfície do Sol e da variação angular $\Delta\theta$ já foram determinados em etapas anteriores. Utilizando as conhecidas relações trigonométricas, calcule o valor da unidade astronômica, em quilômetros.

(Espaço para seus cálculos)

Oficina 3: DISTÂNCIAS ESTELARES

PARALAXE ANUAL

OBJETIVO: Determinar a distância entre a Terra e estrelas próximas por meio do conceito de paralaxe anual.

INTRODUÇÃO: Um dos conceitos de maior importância da determinação de distâncias astronômicas é a paralaxe. Quando nos deslocamos com a Terra ao redor do Sol, ao observarmos uma mesma estrela em épocas distintas do ano, percebemos um pequeno deslocamento dessa em relação às estrelas mais distantes. Esse deslocamento é consequência de as observações serem feitas de posições consideravelmente distintas. Conceitualmente, este deslocamento é exatamente o mesmo daquele que percebemos quando observamos por exemplo um lápis diante de nossos olhos, ora com o olho direito, ora com o esquerdo (figura 1). A medida desse deslocamento foi, embora não a primeira, a grande prova de que a Terra gira ao redor do Sol buscada pelos astrônomos posteriores a Copérnico. Por causa desse efeito, observamos todas as estrelas executarem uma elipse no céu ao longo do ano (figura 2), em torno da posição que seriam vistas se o observador estivesse no Sol.

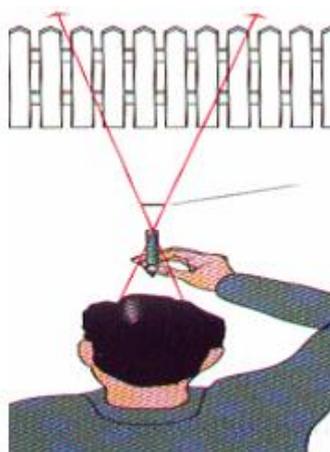


Figura 1: conceito de paralaxe
paralaxe anual

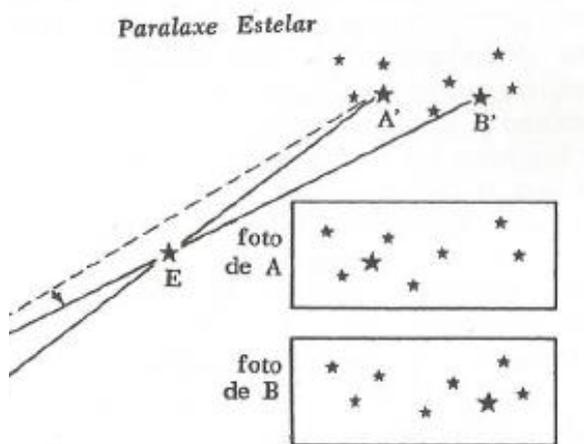


Figura 2:

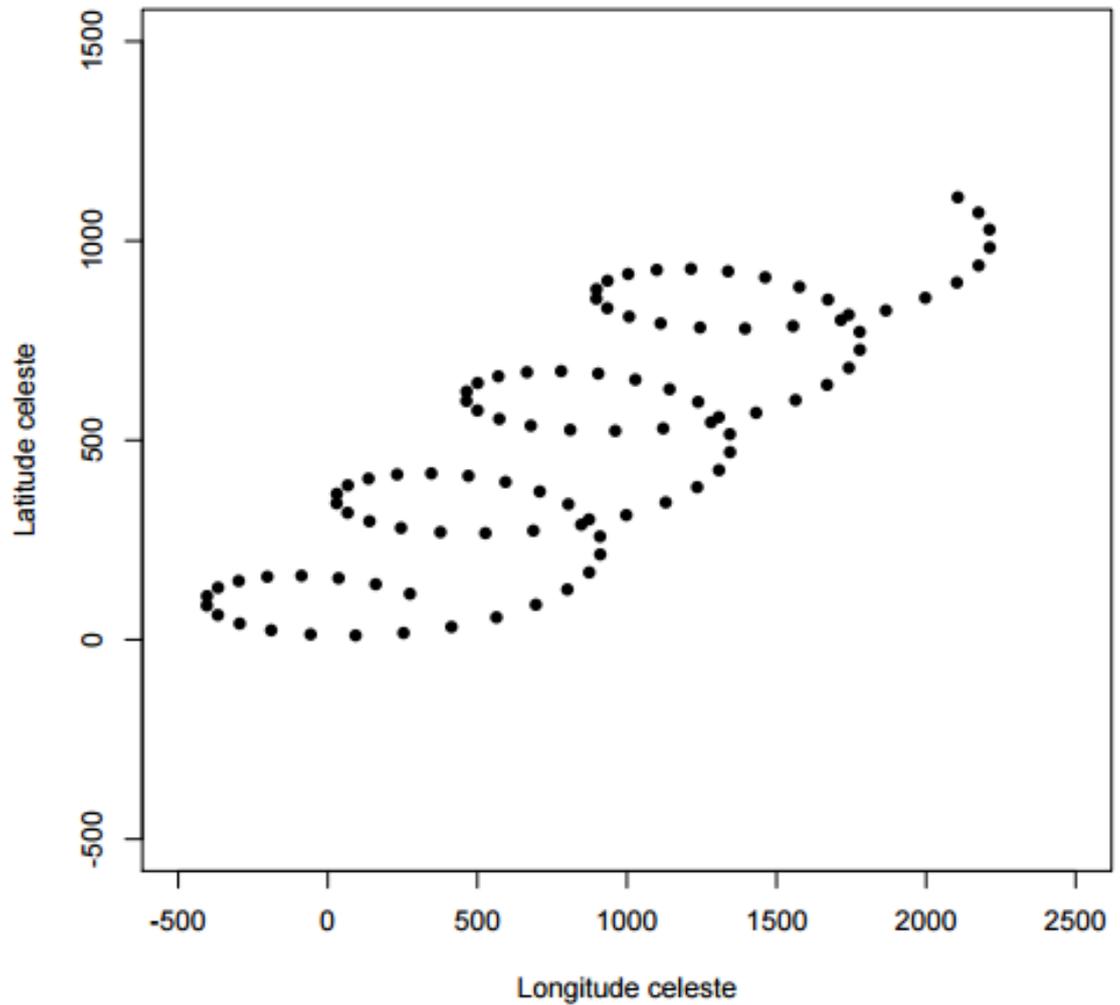
Acontece que os movimentos estelares não se resumem à paralaxe, mas possuem também outra componente, devida a seus respectivos movimentos próprios. O movimento próprio de uma estrela ao longo do período de um ano é aproximadamente retilíneo, uma vez

que a mesma executa uma translação ao redor de seu centro galáctico ao longo de alguns milhões de anos (...). Podemos neste momento fazer uma breve reflexão: Ao longo de qual trajetória nós observaríamos as estrelas se deslocarem no céu ao longo do tempo se a Terra se encontrasse imóvel no centro do Sistema Solar? Podemos afirmar que o movimento de paralaxe das estrelas que observamos no céu consiste em uma prova de que o nosso planeta orbita ao redor do Sol. O que nos permitirá calcular a distância em que uma estrela se encontra é a determinação de sua paralaxe e para isso, precisamos analisar separadamente os dois movimentos realizados por ela.

MENSURAÇÃO DO ÂNGULO DE PARALAXE:

Observamos abaixo o movimento angular da estrela de Barnard na esfera celeste, analisem cuidadosamente a imagem e após discussão, respondam as perguntas que se seguem.

Estrela de Barnard



As coordenadas de latitude e longitude celeste foram obtidas em escala de milissegundos de graus

Lembre-se das seguintes conversões:

$$1^{\circ} = 60' = 3600''$$

$$1 \text{ milissegundo} = 1 \text{ segundo}/1000$$

Perguntas:

1. Faça um esboço de como seria o movimento da estrela de Barnard se a mesma fosse hipoteticamente observada nas seguintes situações:

a) Caso a Terra estivesse parada em relação ao Sol

b) Considerando que a Terra executa normalmente seu movimento ao redor do Sol, mas que a estrela esteja em repouso com relação ao Sol

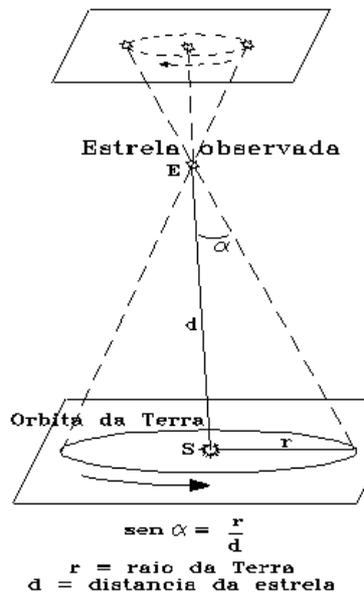
Determinação do ângulo de paralaxe:

Nesta etapa, busquem estimar o valor da amplitude da elipse realizada pela estrela. Veremos na próxima questão que, a metade deste valor é o chamado **ângulo de paralaxe (α)**. Utilizando uma régua, determinem aproximadamente o valor do ângulo de paralaxe da estrela de Barnard:

$\alpha = \underline{\hspace{2cm}}$ graus

1) Determinação da distância estelar:

Uma vez que conhecemos o ângulo de paralaxe α e o raio da órbita anual da Terra ao redor do Sol, determine o valor da distância da estrela de Barnard ao sistema solar



Dado: $r = 15 \times 10^7$ km

Espaço para suas contas

2) As coordenadas celestes de outra estrela lhes serão fornecidas em formato de um gráfico, utilizando o conceito de paralaxe, determine a distância média entre a estrela e o Sistema Solar (conferir lista de estrelas no capítulo 4)

- Expresse sua resposta em quilômetros
- As distâncias estelares são usualmente medidas em uma unidade conhecida como ano-luz, determine quantos quilômetros correspondem ao valor de **um** ano-luz. (Dica: Um ano luz corresponde ao deslocamento percorrido pelos raios de luz no vácuo ao longo de um ano)
- Converta sua resposta obtida no item (a) para anos-luz

Dado: $v_{\text{luz}} = 3 \times 10^8$ km/s

a)

a)

c)

Oficina 4: Escala de magnitudes

OBJETIVO: Determinar a distância entre X-Cyg, uma estrela variável do tipo cefeida, localizada na constelação do Cisne, e o Sistema Solar, por meio da caracterização de sua curva de luz.

MATERIAL: Régua e calculadora

INTRODUÇÃO:

Existe uma espécie de estrelas muito particular e importante, por apresentar características que nos possibilitam determinar as distâncias a que elas se encontram de nós, estas estrelas são conhecidas como “variáveis cefeidas”. As estrelas deste grupo apresentam variações periódicas em seus respectivos brilhos, causadas por processos nucleares que ocorrem constantemente em seu interior. A norte-americana Henrietta S. Leavitt, em um trabalho iniciado em 1907, observou uma importante relação entre o brilho (máximo ou mínimo) e o período de variação luminosa para diversas estrelas variáveis do tipo cefeida localizadas nas Nuvens de Magalhães. Seus resultados foram generalizados para outras estrelas variáveis do mesmo tipo, localizadas nas demais constelações.

Temos abaixo o gráfico que mede a Luminosidade (um parâmetro associado à quantidade de luz emitida pela estrela) em função do período de variação do brilho da estrela, para as cefeidas.

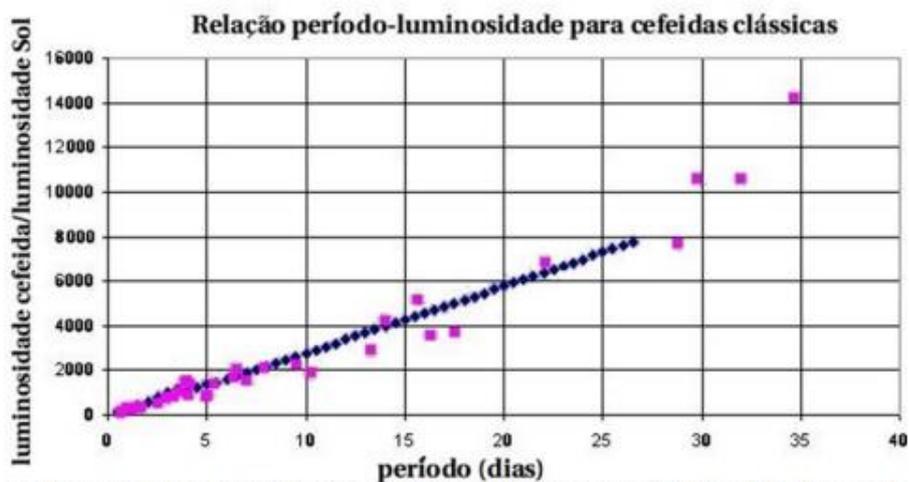


Fig.2 Luminosidade da cefeida (em unidades solares) como função do período de variabilidade.

Procedimento:

Esta atividade será realizada individualmente, ao longo de duas aulas, segundo a divisão de trabalhos proposta a seguir:

Aula 1: Caracterização da curva de luz da estrela X-Cyg, cuja magnitude para diferentes dias se encontra no anexo III. Nesta etapa, cada grupo de alunos recebe uma tabela contendo a magnitude aparente da estrela em cada dia, ao longo de um período de dois meses. A construção deste gráfico permitirá determinar o período de variação de sua magnitude.

Aula 2: Utilizaremos o método de Leavitt para determinar a que distancia se encontra de nós a estrela X da constelação do Cisne (uma estrela variável do tipo Cefeida). Para isto, devemos determinar alguns parâmetros importantes.

1. Determinação da magnitude absoluta da estrela (M)

A magnitude absoluta de um astro é um parâmetro que mede seu brilho absoluto, isto é, não depende da distância que o objeto se encontra de nós. Para determinarmos a magnitude de uma estrela podemos utilizar a seguinte relação:

$$M - M_{\text{Sol}} = -2,5 \log (L/L_{\text{Sol}})$$

No caso da estrela cuja distancia pretendemos medir, utilize o gráfico da relação período-Luminosidade para determinar sua magnitude M, repare que no eixo vertical temos determinada a relação entre as luminosidades L/L_{Sol} para cada variável Cefeida, desde que conheçamos seu período de variação.

A magnitude do Sol é uma constante dada por:

$$M_{\text{sol}} = 4,74$$

Faça seus cálculos aqui:

Por fim, precisamos lançar mão de um conceito muito importante em Astronomia, conhecido como magnitude aparente (m). A magnitude aparente de uma estrela mede o quão brilhante nós a observamos no céu. Evidentemente esta medida é influenciada pela distância a que o objeto se encontra de nós (ao contrário da magnitude absoluta). Ao observar o céu a olho nu, podemos medir a magnitude aparente das diferentes estrelas segundo a escala adotada por Hiparco. A estrela Vega (uma das mais brilhantes) teve sua magnitude aparente definida como zero, as estrelas de maiores magnitudes aparentes são aquelas menos visíveis.

A magnitude aparente da estrela X-Cyg é medida diretamente pelos telescópios e seu valor é estimado por:

$$m = 6,45$$

2. Determinação da distância até X-Cyg:

O valor da diferença ($m - M$) para uma estrela qualquer é uma grandeza que depende apenas de sua distância até nós (diferença entre o brilho do astro quando visto da Terra e o seu brilho intrínseco). Tal dependência pode ser visualizada graficamente, tomemos como exemplo algumas estrelas de magnitude e distância até nós conhecidas previamente. Insira na tabela (anexo 2) os valores de m e M da estrela X-Cyg e então localize-a no gráfico (ainda anexo 2) construído a partir da tabela, repare que no eixo das abcissas temos $\log(d)$.

Por fim, determine a que distância (em a.l.) a estrela se encontra de nós. Caso você ainda não tenha aprendido a calcular logaritmos, utilize a seguinte identidade:

Se $\log d = X$, podemos afirmar que $d = 10^X$

$$d_{x-cyg} = \text{_____ a.l.}$$

Anexo II: Valores do módulo de distância de algumas estrelas

Ordem	Estrela	Magnitu de Absoluta	Magnitu de Aparente	Distân cia à Terra (anos- luz)
.	Sol	4,8	-26,72	.
1	Sírius (no Cão Maior)	1,4	-1,46	8,6
2	Canopus (na Carina)	-2,5	-0,72	74
3	Rigel Kentaurus (Alpha Centauri)	4,4	-0,27	4,3
4	Arcturus (em Boötes)	0,2	-0,04	34
5	Vega (na Lyra)	0,6	0,03	25
6	Capella (na Auriga)	0,4	0,08	41
7	Rigel (no Órion)	-8,1	0,12	900
8	Procyon (no Cão Menor)	2,8	0,38	11
9	Archena r (em Eridanus)	-1,3	0,46	75
10	Betelge use (no Órion)	-7,2	0,5	1 500
11	Hadar (no Centauro)	-4,3	0,61	300
12	Altair (na Águia)	2,3	0,77	17
13	Acrux (no Cruzeiro)	-3,8	0,79	270
14	Aldebar an (em Touro)	-0,2	0,85	65
15	Spica (em Virgem)	-4,7	0,96	260
16	Antares (no Escorpião)	-4,5	0,98	400
17	X Cyg			d

Seus valores, plotados em um gráfico apresentam comportamento tipicamente linear

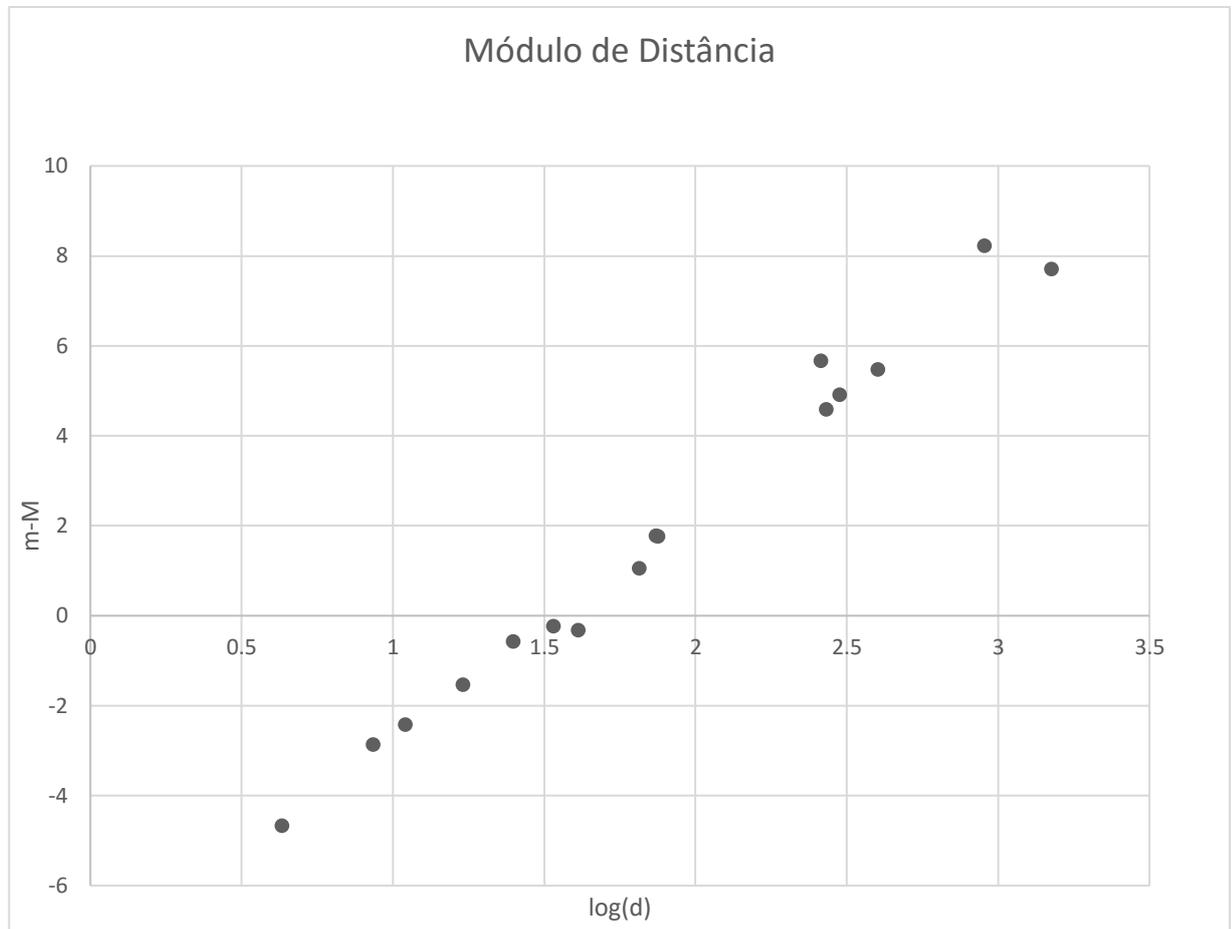


Figura 8: Módulo de distância x log(d)

Anexo III: Variação da magnitude aparente da estrela X-Cygnii em função do tempo.

Data	Magnitude	Data	magnitude
23/05/2016	6	07/06/2016	
24/05/2016	6,25	08/06/2016	
25/05/2016	6,35	09/06/2016	6,1
26/05/2016		10/06/2016	6,3
27/05/2016		11/06/2016	
28/05/2016	6,8	12/06/2016	
29/05/2016	7	13/06/2016	6,8
30/05/2016		14/06/2016	6,85
31/05/2016		15/06/2016	
01/06/2016	6,85	16/06/2016	
02/06/2016		17/06/2016	6,8
03/06/2016	6,45	18/06/2016	6,5
04/06/2016		19/06/2016	
05/06/2016		20/06/2016	6,4
06/06/2016	6,05	21/06/2016	6,1

Anexo IV: Cálculo da idade do Universo considerando geometria plana

(Baseado no livro “Astronomia e Astrofísica” de Kepler de Souza O. Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva)

$V = dr / dt$, na expressão da energia mecânica:

$$\frac{1}{2} m (dr / dt)^2 = GMm / r \quad (1)$$

Podemos reescrever da seguinte forma:

$$r^{(1/2)} dr = (2GM)^{1/2} dt \quad (2)$$

Integrando de ambos os lados e adotando $r = 0$ para $t = 0$, obtemos:

$$\frac{1}{2} r^{3/2} = (2GM)^{1/2} t, \text{ de acordo com a lei de Hubble, podemos escrever } dr / dt = H_0 r$$

Substituindo:

$$\frac{dr}{dt} = H_0 r = (2GM)^{1/2} dt$$

$$(2GM)^{1/2} = H_0 r^{(3/2)} \quad (3)$$

Logo, substituindo (2) em (3), temos:

$$2/3 = H_0 t$$

$$t = \frac{2}{3} H_0$$

Para os valores mais recentes da constante de Hubble, obtemos

$t = 13,8$ bilhões de anos, aproximadamente.