INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA FUNDAMENTAL

Dietmar W. Foryta

CAPÍTULO 1

Mini-Curso FEG: Introdução à Astronomia

Os fenômenos da natureza sempre chamaram a atenção dos seres humanos que deixaram rastros desta percepção lavradas em pedras. Algumas vezes na forma de monumentos megalíticos, as vezes na forma de pinturas em cavernas. Certas destas pinturas indicam a apercepção das fases da lua, portanto teriam em mãos um calendário rudimentar.

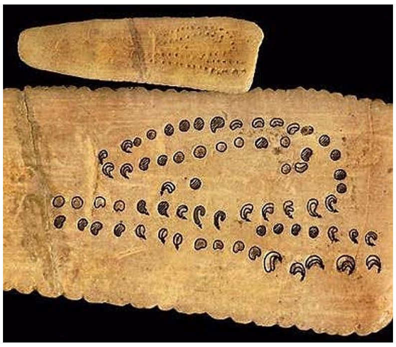


Figura 1.1: Entre os registros mais antigos do interesse dos seres humanos dos eventos astronômicos é da Cultura Aurignaciano, estimado em 32000 anos aC., um calendário lunar encravado em pedaços de ossos. Leve e facil de transportar em extensas viagens como as caçadas e migrações sazonais. Deve-se salientar que ss marcas das fases da Lua tem imprecisões pois é improvável que houvesse um ciclo completo de noites prefeitamente claras (Marshack 1970).

Mas a percepção parecida com o que nós chamamos hoje de científica não prevalece necessariamente. No texto *História*, de Heródoto temos escrita a seguinte passagem.

> *A guerra eclodiu entre os Lidios e os Medos, e continuaram por cinco anos, com várias sucessos. Durante esta [geurra] os Medos ganharam muitas vitórias sobre os Lídios, e os Lídios, também, ganharam muitas vitórias sobre os Medos. Com, então, o balanço não inclinou-se em favor de nenhuma das nações, outro combate teve lugar no sexto ano, que durante este, justo quando a batalha crescia, o dia transformou-se subitamente em noite. Este evento havia sido predito por Tales, o Milesiano, que previniu os Ionianos dele, fixando para ele o ano em que ele ocorreu. Os Medos e os Lídios, quando observaram a mudança, cessaram a luta, e ficaram todos anxiosos pelos termos de paz que foram acordados.*[1]

[1] Herodoto (ca. 440aC.), *História*, livro 1 capítulo 74. Herodoto de Halicarnassus (485-425 aC.) foi o primeiro historiador grego e é, também, conhecido como o "Pai da História", escreveu *Histórias* em nove livros

Rapidamente um tratado foi feito e selado com o casamento da filha do rei Lídio com o filho do rei Medo. Esta história mostra uma das mais dramáticas respostas na história envolvendo os fenômenos astronômicos e indica o imenso pavor que os povos antigos tinham quando confrontados com algo como um eclipse total do Sol.

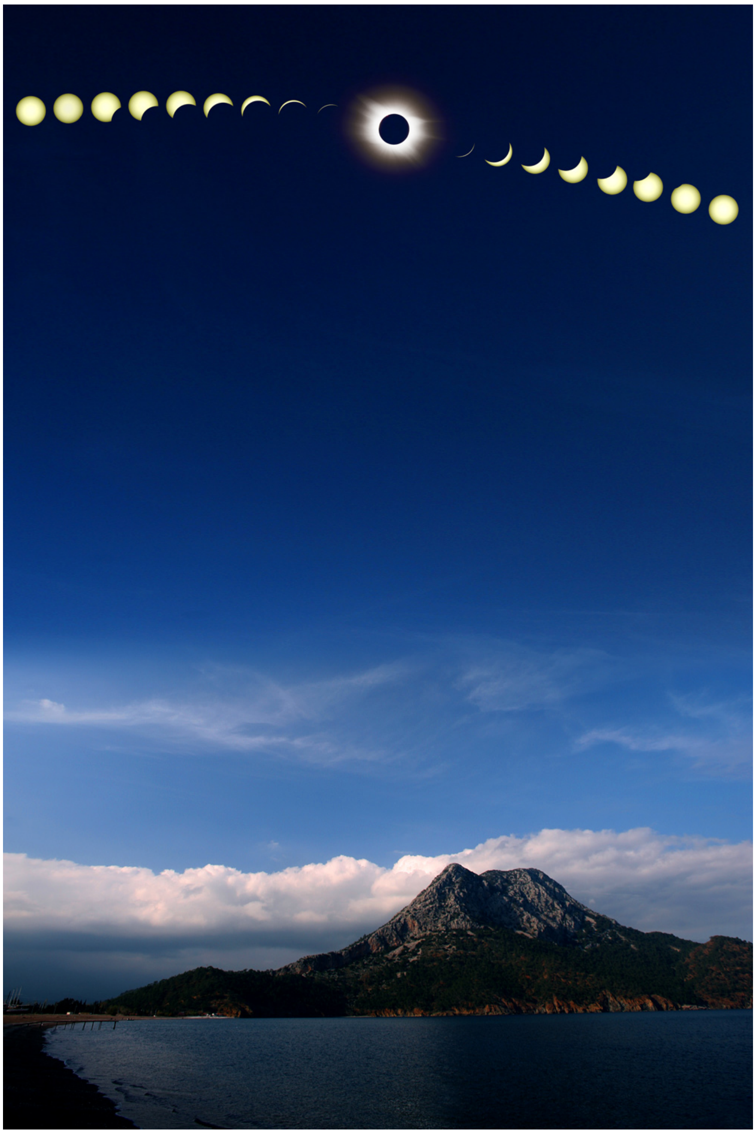


Figura 1.2: Durante o eclipse total de 2006, visto na região da Antália, Turquia, o astrógrafo Stefan Seip capturou a Lua nos diversos estágios enquanto passava entre a Terra e o Sol. Na exposição central, a Lua bloqueia completamente o Sol e, desta maneira, podemos ver a magnífica corona solar. A exposição ambiente foi tomada no mesmo local durante o dia com o mesmo apontamento do horário do eclipse. Imagem: Stefan Seip.

1.1. Eclipses Solares e Lunares e o Tamanho da Lua

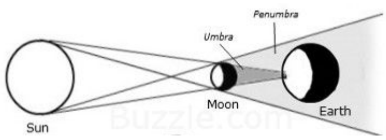


Figura 1.3: A partir da análise geométrica podemos tirar duas conclusões da existência dos eclipses solares. Primeiro, que o disco solar tem aproximadamente o mesmo tamanho que o disco da Lua, então o Sol deve ser maior do que a Lua na mesma proposção de suas distâncias. Segundo, que a extensão da sombra da Lua deve ser longa o suficiente para tocar a superfície da Terra. Quando se percebe a existência de eclipses solares ditos anulares pode-se concluir que durante os eclipses anulares a sombra da Lua não pode ser maior que a distância da Lua a Terra. Assim, podemos colacar que a extensão da sombra da Lua é aproximadamente a distância da Lua à Terra.

Tales de Mileto talvez deva ter compreendido o rudimento dos eclipses solares, que é a passagem da Lua em fronte ao Sol, mas não a natureza das órbitas. Tales acreditava que a Terra era um grande disco que flutuava sobre o imenso oceano. Tanto a Lua quanto o Sol seriam também discos que percorriam os céus e que ocasionalmente se alinhavam. O registro histórico indica que ele predisse o eclipses solar de 585 aC., na tarde do dia 28 de Maio ao longo do Mar Mediterraneo e através da Ásia Menor, cuja totalidade durou 6 minutos. Heródoto escreveu que Tales dava o ano da ocorrência, o que levanta a dúvida se foi mesmo predissão ou sorte.

Pitagoras baseou-se no fato que a Lua deveria ser redonda observando-se o terminador, a linha que separa a parte iluminada da parte não iluminada da Lua, durante o ciclo da Lua, para afirmar que a Terra por semelhança também deveria ser redonda.

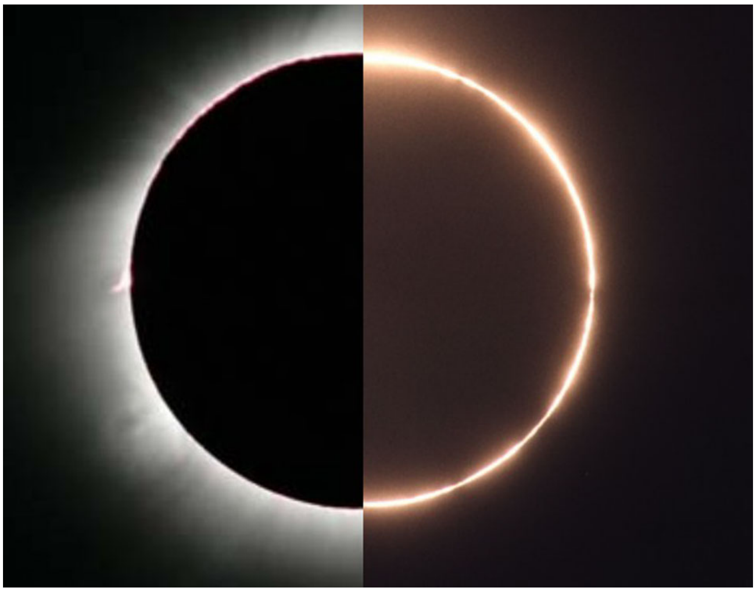


Figura 1.4: Dependendo da localização do observador, sobre a esfera da Terra, pode-se ter um eclipses solar total ou anular. A esquerda Fred Espenak a mais de 2200 km a oeste das Galápagos captura um rápido eclipses total em que se pode ver a corona solar e proeminencias saíndo da borda do Sol. A direita, Stephan Heinsius, no Panamá, no final do eclipse ligeiramente mais distante da Lua, captura um eclipses anular, um brilhante anel de fogo que dura somente 15 segundos. Estes eventos são raros e as estimativas indicam que no século XXI somente 7 dos 224 eclipses totais previstos poderão ser fotografados desta maneira. Imagens: Fred Espenak e Stephan Heinsius.

Anaxágoras, seu discipulo, compreendeu mais tarde a verdadeira natureza dos eclipses solares e lunares, que corpos redondos passavam pelas sombras um do outro, e que a forma do eclipse lunar indicava que a Terra era redonda.

Por volta de 350 aC. Aristoteles declara que a Terra era redonda baseado na observação das constelações que podem ser vistas nos Céus a medida em que se viaja cada vez mais para o Sul.

Pela ocorrência dos eclipses solares sabemos que o Sol está mais distante do que a Lua.

A luz do Sol sendo interceptada por uma Lua redonda garante que a sombra tenha um formato cônico e sobretudo uma extensão. Se a Lua estiver suficientemente próxima da Terra esta sombra deveria poder toca-la, o que caracteriza o eclipse solar. Mas se a Lua estiver o suficientemente distante, o cone de sombra não chega a tocar a superfície da Terra e um eclipse total do Sol não é mais possível.

Como se tinha registros de diversos eclipses solares e ocasionalmente alguns eclipses anulares, chega-se a conclusão que a extensão da sombra da Lua é aproximadamente a distância da Lua à Terra.

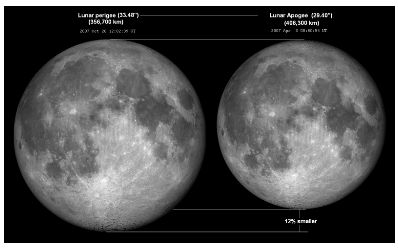


Figura 1.5: Quando nos afastamos de um objeto ele parece cada vez menor. Assim podemos estimar a distância a este objeto baseado no tamanho aparente deste. Quando observamos a fase dita cheia da Lua podemos perceber que em certas épocas a Lua parece maior e em outras a Lua parece menor. Comparando estes tamanhos sabemos que a Lua mantém uma distância quase constante, mas não perfeitamente circular, da Terra.

O eclipse solar também trás outra informação interessante. Como o eclipse solar é rápido comparado com a duração do dia, a extensão da sombra na superfície da Terra não deve ser grande.

Do ponto de vista geométrico, podemos afirmar que a largura da sombra da Lua decresce de um diametro após uma distância da Lua à Terra.

Como a Lua movimenta-se mantendo a distância à Terra quase constante, os eclipses lunares também são explicados pela passagem, agora da Lua pela sombra da Terra. Observando-se um eclipse lunar podemos chagar a conclusão que a Terra deve ser

Figura 1.6: Um eclipse lunar é a interposição da Terra entre a Lua e o Sol. Assim vemos a sombra da Terra atingindo a Lua. Percebe-se que esta sombra tem a forma de um disco. Esta percepção nos leva a possibilidade da Terra ter a forma de um disco. A composição de várias imagens de um eclipse lunar sobrepostas deixa claro a forma da sombra da Terra. Podemos perceber que a Lua atranessando a sombra da Terra, leva um tempo, que é ode maior valor para a passagem através do grande diametro.

redonda pois a sombra da Terra, na distância da Lua é redonda. Mais ainda, percebemos que a Lua atravessa a sombra, e esta travessia leva um tempo.

Não sabemos, a priori, qual o tamanho da Lua mas observando-se um eclipse total da Lua podemos perceber o instante em que a Lua começa a entrar na sombra da Terra e o instante que a Lua finalmente está completamente imersa na sombra da Terra. Assim podemos afirmar que a velocidade da Lua nos Céus é dada pela razão do seu tamanho, seu diâmetro, pelo tempo de imersão.

Mais além, podemos perceber também o instante em que a Lua começa a sair da sombra da Terra. O intervalo de tempo entre o início da imersão na sombra e o instante do início da emersão da sombra nos dá o tamanho da sombra da Terra na distância da Lua; basta multiplicar o tempo decorrido pela velocidade.

Em expressões matemáticas temos que a velocidade da Lua v_L é dada pela razão entre o tamanho da Lua, d_L, e o tempo de imersão desta na sombra, Δt_i, ou

$$v_L = \frac{d_L}{\Delta t_i}. \tag{1.1}$$

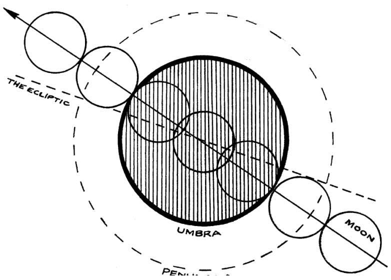


Figura 1.7: Quando a Lua passa pela sombra da Terra a entrada da Lua leva um tempo. Cruzar completamente a sombra leva outro tempo, Assim podemos medir a extensão da sombra.

Continuando, o tempo de traversia da Lua através da sombra é Δt_t nos dá o tamanho da sombra da Terra, S, na distância da Lua D_L, ou

$$S = v_L \Delta t_t = \frac{d_L}{\Delta t_i} \Delta t_t = d_L \frac{\Delta t_t}{\Delta t_i}. \tag{1.2}$$

Perceba que os intervalos de tempo considerados dependem em que região da sombra da Terra a Lua atravessa. Ocasionalmente existem eclipses lunares parciais. Isto significa que quando coletamos diversos eclipses lunares totais, devemos identificar aquele que a Lua atravessa o centro da sombra. Ou seja, aqueles em que o tempo imerso é o mais longo. Sabendo que os tempos típicos destes eventos são 4 minutos e 10 minutos, respectivamente, chegamos a conclusão que a razão dos intervalos de tempo tem um valor aproximado de 2.5.

Ou seja a sombra tem uma largura de aproximadamente 2.5 vezes o tamanho da Lua, mas na posição dentro do cone de sombra da Terra que está a distância da Lua a Terra. Como a Terra é causadora da sombra da Terra, a sombra da Terra terá o tamanho da Terra d_T quando medida no início da sombra. Assim a largura de sombra medida utilizando-se a Lua é menor do que o tamanho da Terra.

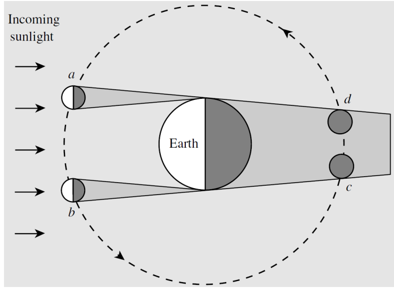


Figura 1.8: O cone de sombra da Lua, vista que ela pode produzir no limite eclipses anulares e totais indica que a distância Terra-Lua é o tamanho da sombra. Como a diminuição do tamanho da sombra leva uma distância Terra-Lua, do outro lado a minimuição do tamanho da sombra da Terra é a mesma, um tamanho da Lua.

Quando afirmamos que a sombra da Terra é um cone de sombra tal qual o cone de sombra da Lua, isto significa que o Sol deve ser maior não só quando comparado com a Lua, mas também maior do que a Terra. Como a sombra da Lua decresce de um tamanho da Lua em uma distância Lua-Terra, então podemos associar o decrescimo do tamanho da sombra da Terra a uma distância Terra-Lua de um tamanho da Lua, ou seja,

$$d_T = (2.5 + 1.0)d_L = 3.5d_L. \tag{1.3}$$

Este resultado obtido por Aritarcos de Samos foi feita em 245 aC., mesmo antes de se ter idéia do tamanho da Terra. A elegância deste resultado é que não só temos a relação de tamanhos Terra-Lua, mas quando determinado o valor numérico do tamanho da Terra teremos imediatmente o tamanho da Lua na mesma unidade física.

Um fenômeno natural que chama muito a atenção é que o tamanho aparente do Sol ser muito parecido com o tamanho aparente da Lua. Isto permite comparar os triangulos tamanho do objeto, pela distância ao observador. Como determinamos o tamanho da Lua poderemos tentar determinar o tamanho do Sol. Para isto precisamos saber a razão das distâncias deste dois objetos, a Lua e o Sol. Como estes valores também são desconhecidos não conseguimos obter o valor do tamanho do Sol.

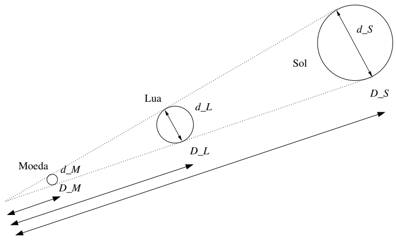


Figura 1.9: Um fenômeno que chama a atenção é que o tamanho aparente do Sol e o da Lua são quase iguais. Então podemos da mesma maneira uma moeda em frente a Lua e coloca-la a uma distância tal que o tamanho aparente da moeda seja o mesmo da Lua. Por semelhança de triangulos basta termos três valores de tamanho e distância o quarto valor é determinado univocamente. Como temos a moeda, temos sua distância ao olho e seu tamanho. Da Lua temos o tamanho da Lua. Assim descobrimos a distância à Lua. Para o Sol o procedimento é analogo, se tivermos a distância teremos seu tamanho, se tivermos o tamanho teremos sua distância.

Entretanto podemos resolver, pelo menos em parte, o problema é através do uso de uma moeda. Podemos colocar uma moeda em frente a Lua e coloca-la à distância tal que esta moeda cubra completamente o disco da Lua. A vantagem é que tanto o tamanho da moeda d_M e sua distância ao olho do observador D_M. Por semelhança de triangulos teremos

$$\frac{D_L}{D_M} = \frac{d_L}{d_M} \qquad \rightarrow \qquad D_L = \frac{d_L}{d_M} D_M. \tag{1.4}$$

Conseguimos assim a partir do tamanho da Lua a sua distância ao observador, a da a Terra.

1.2. A Medida de Aristarcus da Distância ao Sol

O mesmo procedimento pode ser usado para determinar seja o tamanho do Sol seja a distância ao Sol. Basta obtermos por

Figura 1.11: Diversas imagens da Lua durante seu ciclo. Podemos perceber que a forma do terminador, a fronteira entre a região iluminada e a não-iluminada, é em geral curva. Isto significa que a superfície da Lua deve ser redonda como uma esfera. Caso a Lua fosse um disco plano este efeito de cruzamento da sombra sobre o disco lunar não existiria. Para Aristarcus, o instante em que as direções Terra-Lua-Sol formam um ângulo de 90 degree é justo quando a sombra fica retilínea dividindo ao meio a Lua.

outro processo o outro valor, respectivamente, a distância ao Sol ou o tamanho do Sol.

São três os objetos principais que estamos discutindo: a Terra, a Lua e o Sol. Três objetos sempre formam um plano e, fora poucas, situações um triângulo. Esta poucas situações são justamente os eclipses. Assim sabendo algumas informações sobre o triângulo podemos determinar as outras. A paritr do estudo de triângulos, sabemos que se temos três informações podemos determinar as flatantes. Temos a distância Terra-Lua... falta pelo menos duas. Se tomarmos um triângulo retângulo, saberemos que um dos ângulos será reto, ou 90°.

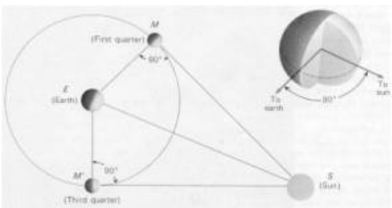


Figura 1.10: Tendo o Sol, a Terra e a Lua poderemos construir um triangulo e correlacionar as diversas distâncias e os diversos ângulos entre estes corpos. Sabe-se a priori a distância da Lua à Terra. Basta conseguirmos mais dois valores que podemos obter todas as outras dimensões. Um valor natural é o ângulo reto. Mas se o colocarmos sobre a Terra, não conseguimos obter nenhum outro valor. Mas observando-se o terminador sobre a Lua podemos medir o ângulo dado pelas direções Lua-Terra-Sol. Por consequência a distância do Sol à Terra.

Se colocarmos o ângulo reto sobre a Terra, não poderemos medir outro ângulo ou distância, então temos que conseguir um triângulo reto ou sobre a Lua ou sobre o Sol. Como a distância Terra-Lua é menor do que a distância Terra-Sol (lembre-se que existem eclipses solares), então o único lugar que podemos ter um ângulo reto será sobre a Lua. Como sabemos que há um ângulo reto sobre a Lua, entre as direções Lua-Terra e Lua-Sol?

Observando a Lua, percebemos as fases da Lua. Cheia, Minguante até a Nova. Durante a fase de Minguante vemos que a sombra da Lua vai tomando a Lua primeiramente na forma de um arco que se inverte até tomar completamente a Lua. Durante esta fase há um breve instante que esta linha de sombra torna-se um diametro do disco aparente da Lua. Neste instante as direções indicadas estão formando um ângulo reto.

Neste hora, podemos medir o ângulo entre as direções Terra-

Lua e Terra-Sol, pois estamos na Terra e podemos medir ali este ângulo. Os antigos gregos assim fizeram e obtiveram o ângulo reto. Isto é problemático pois se realmente for um ângulo reto a direção Terra-Sol e Lua-Sol são perfeitamente paralelas e se encontrarão no infinito. Desta maneira os gregos concluiram que não poderia ser o ângulo reto e teria de ser uma ângulo justo menor. Como a precisão tecnica deste tipo de medir era de 2.5° os gregos atribuiram o ângulo 87.5° para o ângulo procurado. Isto dá uma distância de 20 vezes a distância Terra-Lua.

Em realidade este ângulo só foi possível medir com Vendelinus em 1630, sendo de 89.75°, o que dá uma distância de 230 vezes a distância Terra-Lua.

O único livro de Aristarcus de Samos que sobrevive aos tempos, e chega até nós é *Sobre os tamanhos e distâncias ao Sol e à Lua*. Nele ele consegue os valores

- A distância ao Sol é maior do que 18, mas menor do que 20 vezes, a distância à Lua.
- O raio do Sol é maior do que 18, mas menor do que 20 vezes, o raio da Lua.
- O raio do Sol é maior do que 19/3 (6.3), mas menor do que 43/6 (7.2), vezes o raio da Terra.

Enquanto que os resultados não coincidem com a realidade que conhecemos hoje, o método é brilhante. Atualmente o Sol está 400 vezes mais distante do que a Lua e é aproximadamente 109 vezes o tamanho da Terra.

1.3. A Medida de Erastotenes do Tamanho da Terra

Erastotenes (276-194 a.C.) foi um dos mais notáveis estudiosos do seu tempo e escreveu sobre filosofia, sobre questões científicas e literárias. Como matemático, Erastotenes inventou um método para encontrar números primos. Sua reputação, entre seus contemporâneos, foi tão grande que Arquimedes dedicou um livro a ele. Como geógrafo, ele escreveu *Geografia*, o primeiro livro a dar a este ramo do conhecimento uma base matemática e tratar a Terra como um globo dividido em zonas frigidas, temperadas e tórridas. Este permaneceu como um trabalho padrão e foi usado um século mais tarde por Júlio César. Erastotenes permaneceu a maior parte de sua vida em *Alexandria* e lá morreu em 194 a.C.

Sendo bibliotecário, seu segundo diretor, de 240 a 194 a.C., da Biblioteca de Alexandria, no Egito, cidade fundada por Alexandre, O Grande, Erastotenes tinha o acesso a um volume considerável de informações. Entre elas, sabia-se que no dia de Solistício de Verão, no hemisfério norte, no dia 22 de Junho de

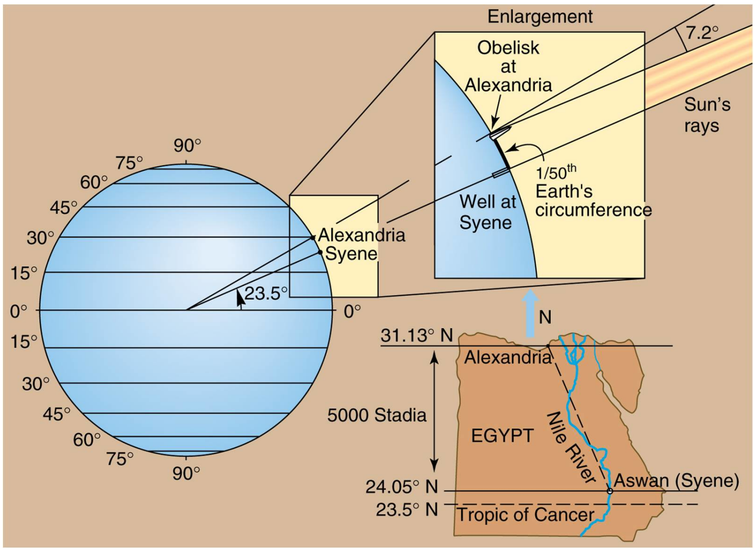


Figura 1.12: Diagrama esquemático mostrando o trabalho de Erastotenes após saber da ausência de sombra no poço de água em Siene. Na cidade de Alexandria o obelisco apresentava uma sombra que foi medida. Supondo que as direções verticais dos obelisco e poço atravessem o centro da Terra, pode-se multiplicar a distância entre as cidades pela razão do ângulo da sombra a volta completa.

cada ano, a luz do Sol era refletida diretamente pelo fundo de um poço d'água em *Siene*, cidade diretamente ao Sul de *Alexandria*, onde a represa de *Aswan* está atualmente. Isto significa que o Sol estava diretamente, verticalmente, sobre *Siene*.

Assim, em 235 a.C., no dia de Solistício, Erastotenes examinou a sombra de um monolito vertical e determinou que esta tinha aproximadamente 1/8 da altura do monolito. Isto corresponde a um ângulo de 7,2^o, ou seja, 1/50 de um círculo.

A distância entre as duas cidades era bem conhecida, já que existia um tráfego comercial considerável, e foi medida por agrimensores da época como 5000 estadia, ou 800 km, 50 dias de camelo a 16 km/dia.

Assim a Terra teria 42000 km de perimetro ou 6700 km de raio. Estes valores contrastam com os atuais valores do perímetro é de 40200 km e 6370 km para o raio. Um erro menor do que 5%; surpreendente para a época!

Uma idéia fundamental que está por trás desta determinação é a presuposição de que os raios do Sol sejam paralelos. Seria este paralelismo correto?

Pode-se experimentar a formação das sobras de objetos iluminados pelo Sol e perceber que a luz parece propagar-se retilineamente. O Sol, como fonte de luz, deve estar a uma certa distância da Terra, assim, os raios de luz do Sol partiriam do Sol e por consequência divergeriam, não chegando paralelos a Terra.

Todavia a medida em que a distância entre o local de observação e a fonte de luz crescer, os raios de luz ainda chegarão não paralelos, mas esta divergência seria cada vez menor. Se a distância for grande o suficiente entre a Terra e o Sol, então a divergência dos raios do Sol poderão ser negligenciados.

Então fica pendente a comparação da distância ao Sol confirmar ou refutar a aplicação geométrica feita por Erastotenes. Como vimos a partir do trabalho de Aristarcus que o Sol estava a diversas distâncias da Lua à Terra, que por sua vez é maior do que o tamanho da Terra, a distância ao Sol é muito maior do que o tamanho da Terra validando, dentro do erro experimental, o paralelismo dos raios solares.

1.4. Geocentrismo e Héliocentrismo

Quando andamos por uma floresta podemos perceber que uma árvore próxima tem a sua esquerda e a sua direita outras árvores visíveis que estão mais distantes. A medida em qu se caminha as árvores que estão a esquerda e a direita daquela que usamos como referência mudam. Isto está esquematizado na figura ??. Você pode ter a mesma experiência ao andar por uma rua e olhar para o poste.

Quando consideramos um modelo héliocentrico para o conjunto Terra, Lua e Sol, deveriamos perceber uma variação dos vizinhos das estrelas devido ao movimento da Terra em Torno do Sol. Como esta variação não é observada deve-se acreditar que a Terra não possui movimento.

Então o modelo héliocentrico deve ser descartado em favor de um modelo onde a Terra está parada, o modelo geocentrico.

Aristarcus foi o primeiro a propor uma teoria héliocentrica apesar dos detalhes não sobreviveram aos tempos. No texto *O Contador de Areia*, Arquimedes escreve que

> *... Aristarcus apresentou em um livro certas hipóteses, nelas aparece, como conseqüência das hipóteses feitas, que o universo é muitas vezes maior do que o 'universo' que acabei de mencionar. Sua hipótese é que as estrelas fixas e o sol permanecem imóveis, que a Terra gira em torno do Sol na circunferência de um círculo, o sol deitado no meio da órbita, e que a esfera das estrelas fixas, situa-se aproximadamente no mesmo centro que o Sol, é tão grande comparada com o círculo em que ele supõe que a terra gira suporta uma proporção com a distância das estrelas fixas tem como centro da esfera tem toda a sua superfície (Heath, p 3)*

Basicamente ele escreve que o Universo é muito maior do que aqueles propostos pelos outros pensadores e que as estrelas estão infinitamente distantes, pelo menos de maneira não mensurável para a época.

Perceba que a medida nula pode representar tanto a incapacidade de medir o valor da paralaxe quanto ser efetivamente nula. Desta maneira deve-se verificar se existe uma "física" capaz de justificar uma ou outra teoria de Mundo.

A chamada física Aristotélica é baseada na idéia que a Natureza pode ter seu conteúdo classificado em grupo. Por exemplo, uma

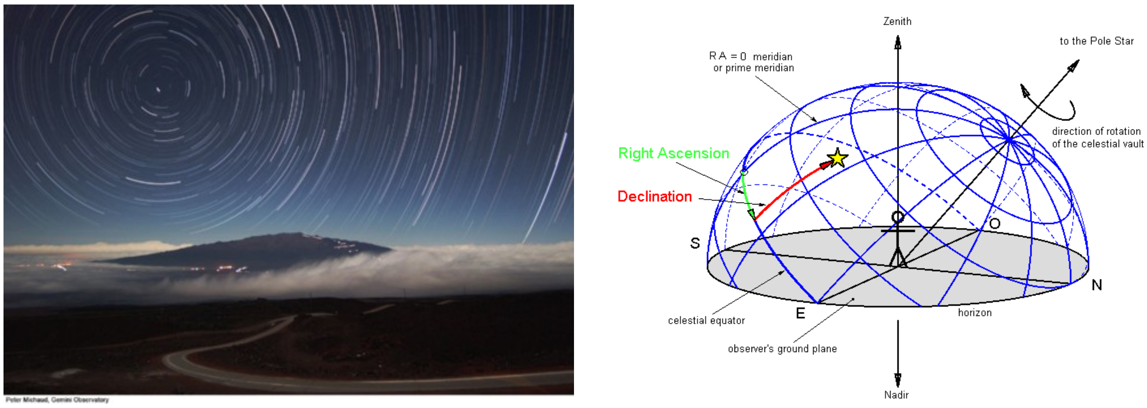


Figura 1.13: Como observamos que as estrelas parecem descrever circulos em torno de um ponto nos Céus fica relativamente fácil imaginar um sistema de coordenadas baseado neste movimento como o esquematizado a direita. Como a estrela descreve o circulo a distância angular polar permanece constante. Quando comparamos duas estrelas durante o movimento azimutal, percebemos que a distância angular permanece constante. Assim, estes dois valores passam a ser as coordenadas das estrelas. Como estes valores permanecem constantes podemos dizer que o movimento das estrelas é rígido. Dizemos que as estrelas são "fixas".

pedra de granito é parecida com uma pedra de marmore, ou mesmo um torrão de terra. Por semelhança, verter água de um copo é muito parecido ao verter um copo de vinho, vinagre ou álcool. Então faz um certo sentido dividir as coisas da Natureza em quatro grupos, a citar

- *terra*, pedras, torrão de terra, tudo que tem uma forma definida e que quando solto cai e fica, cedo ou tarde, em repouso.
- *água*, naturalmente água, vinho, álcool, que não possou forma dfinida mas a forma daquilo que a contém e quando vertida cai, escorre e fica em repouso. Lembre-se um lago.
- *ar*, o ar, gases vulcânicos, etc... Quando soltos sobem! Emborque um copo em um lago e vire-o, o ar sobe!
- *fogo*, naturalmente fogo. Quando feito as chamas sobem, claramente diferente dos materiais tipo terra, água e ar.

Imagine que você solte pedras continuamente. Como as pedras caem para um centro, então cedo ou tarde estas pedras se espalham formando um conjunto que vai se tornando cada vez mais esférico e em repouso.

Figura 1.14: A observação do planeta Vênua permite decidir sobre qual modelo de Universo é mais adequado. Observe como as fases, as áreas iluminadas observáveis a partir da Terra, deste planeta seriam em cada uma dos modelos. Para comparação colocamos uma série de imagens feitas por Chris Proctor no Observatório TBGS, em 2002.

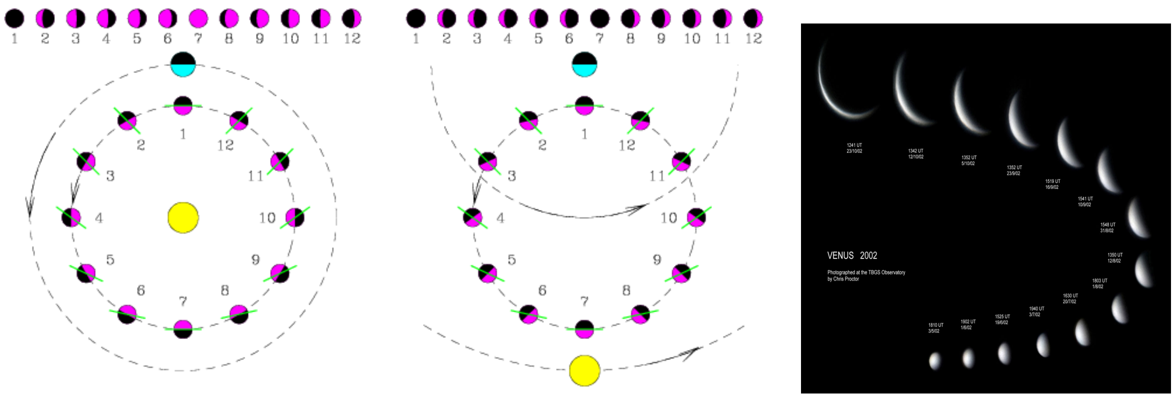


Figura 1.15: O planeta Marte tem um movimento nos Céus que é conhecido como retrogrado. Este movimento é modelado na teoria geocentrica por meio de um epiciclo. Já dentro de uma teoria héliocentrica este movimento retrogrado é natural pois representa a ultrapassagem do planeta externo pelo interno.

Desta maneira a física aristotélica sustenta a idéia que a Terra deva estar em repouso em torno de um centro. Como este centro está em repouso, esta análise está em acordo com as observações sobre a paralaxe estelar: não há movimento.

Por consequência o modelo que deve ser aceito é a teoria geocentrica.

Quando observamos os Céus percebemos que a medida em que a noite vai correndo as estrelas que estão nos céus também vão mudando. Podemos perceber que na noite seguinte estas mesmas estrelas aparecem. Entretanto há uma estrela no hemisfério norte que quase não muda de posição durante a noite e ela é conhecida como estrela polar. As outras estrelas parecem descrever círculos em torno desta estrela.

Se continuarmos mais além, percebemos que todas as estrelas apresentam este movimento. Fica natural então dar a distância angular entre a estrela polar e o círculo que a estrela de interesse está descrevendo.

Quando se compara, agora, as estrelas que estão no mesmo círculo percebemos que nenhuma estrelas ultrapassa outra estrela. Estas estrelas parecem ter um movimento rígido, como se estivessem desenhadas sobre um vidro de compota colocado para girar. As estrelas estão então fixas umas em relação as outras.

Já os planetas percorrem os Céus, ultrapassando as outras estrelas. Este movimento "erratico" é então examinado por meio das mesmas coordenadas que utilizamos para descrever as posições das estrelas.

Isto permite obter os valores numéricos das velociades dos planetas através dos Céus. Tendo-se a velocidade do planeta podemos prever então a posição futura do planeta. Comparando-se a posição prevista e a posição observada podemos verificar se a eterminação da velocidade foi boa ou não.

Entretanto, podemos perceber que um resíduo sempre permanece. Este resíduo é natural pela precisão na determinação da posição dos planetas, nocaso $10'$.

Mas quando Tycho Brahe faz suas observações a qualidade destas observações são de $2'$. Isto coloca em dúvida a qualidade do

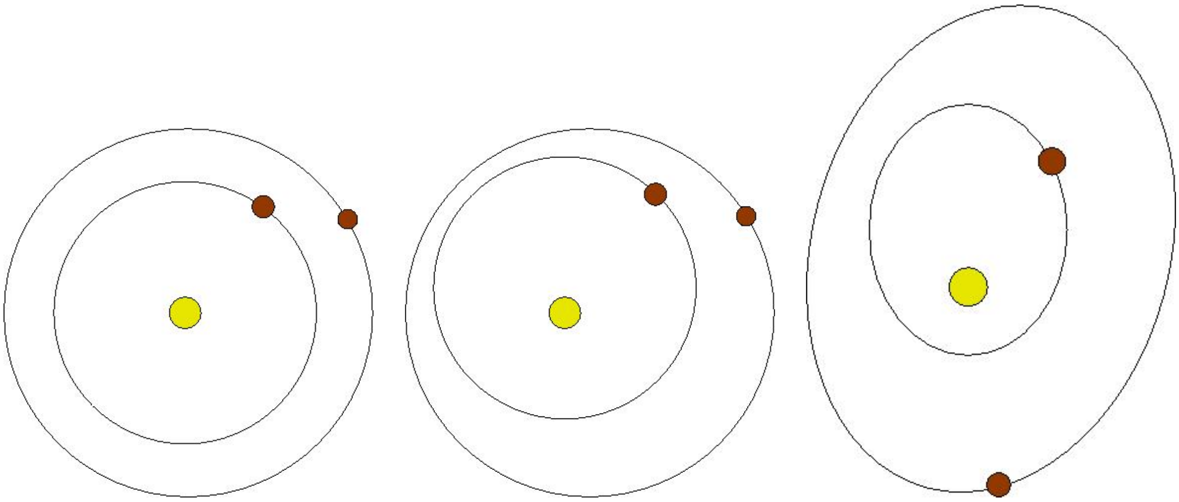


Figura 1.16: São oito dados que Tycho Brahe tem das conjunções de Marte com a precisão de $2'$. Como havia uma divergência entre as observações e as previsões geocentricas de $10'$, isto implica que o modelo deveria estar com problemas. A partir da idéia copernicana, kepler recalcula as previsões com os movimentos planetários circundando o Sol, mas por meio de quais trajetórias? Kepler testa desde órbitas circulares à elipticas. Quando ele utiliza as elipses a diferença entre as observações e as previsões héliocentricas caem para $2'$. Com isto o modelo geocentrico pode ser descartado em favor do modelo héliocentrico.

modelo do movimento planetário.

Com isto, Kepler a partir da idéia copernicana testa possíveis movimentos planetários dentro de uma teoria héliocentrica. Após testar os diversos movimentos chega a conclusão que o movimento planetário é eliptico. Conhecemos este resultado como a Primeira Lei de Kepler.

1.5. A Nova Física: A Física Galilo-Newtoniana

Quando lançamos um bloco sobre uma mesa há algo que para o bloco, e aquilo que faz parar este bloco chamemos de atrito. Esfregue a mão como se fosse o bloco, você sentirá este atrito! Então o atrito é uma ação que diminui, que impede, o movimento.

Podemos melhorar o escorregamento deste bloco, polindo um pouco o bloco ou a mesa. O que ocorrerá? O bloco alcança uma distância ainda maior, se o lançar da mesma maneira com que você o havia lançado. Com a mesma velocidade.

Perceba que a medida que o bloco vai parando, a velocidade diminui. Então verifiquemos as velocidades dos blocos nas diversas situações. Ao lançarmos temos uma velocidade inicial que será a mesma cada vez que lançamos um bloco.

Num primeiro trecho a uma certa distância após o lançamento a velocidade deve ser menor do que a velocidade inicial, pois o atrito diminuiu a velocidade do bloco. Tomando um segundo trecho ainda mais distante, a velocidade no segundo trecho deve ser não só menor do que a velocidade inicial mas também com o valor obtido no primeiro trecho. Veja a figura 1.17.

Após esta análise com o primeiro lançamento do bloco, melhore o escorregamento do bloco; por exemplo polindo o bloco ou a mesa. Lance novamente o bloco. Como ele alcançará uma distância maior podemos afirmar que no segundo trecho a velocidade do bloco é maior do que a velocidade no mesmo trecho na primeira tentativa. O mesmo pode ser dito no primeiro trecho. Mas perceba que os valores da velocidade não podem ser maiores do que os valores nos trechos precedentes.

Quanto mais pudermos melhorar o escorregamento, maiores serão as velocidades, cada vez mais próximas dos valores obtidos nos trecos precedentes, mas nunca superiores. Quanto mais pudermos melhorar o escorregamento, mais o valor no segundo trecho se aproximará do valor da velocidade de lançamento. Cujo limite, se for possível eliminar completamente o atrito que atrapalha o escorregamento do bloco, será a velocidade de lançamento.

Assim podemos afirmar,

> *Na ausência de ações externas, o movimento do corpo permanecerá constante.*

Resecrevamos em notação matemática

$$v = cte \longrightarrow F = 0 \tag{1.5}$$

Observe que este instante é um dos instantes mais impressionantes do estudo da mecânica do movimento. É a primeira vez que podemos atribuir um valor numérico para a força sobre um corpo, neste caso quando temos a força nula. Perceba que é bem diferente você saber se você está, ou não, fazendo força muscular. Aqui temos um método independente da sua sensação subjetiva, basta réguas e cronometros.

E por oposição

> *Na presença de uma ação externa, o movimento não poderá permanecer constante.*

Resecrevamos em notação matemática

$$v \neq cte \longrightarrow F \neq 0 \tag{1.6}$$

Bom mas o que é o movimento? Como pode ser descrito o movimento de um corpo? Pela velocidade? Seria o movimento mudança de posição?

Considere o seguinte experimento: dois carrinhos um deles carregado de pedras e o outro vazio. Pegue dois brutamontes de mesma força; para testar se fazem a mesma força, faça um empurar o outro, se algum deles recuar significa que este fez mais força que o outro.

Cada brutamontes empurra um dos carrinhos. Veremos que um dos carrinhos é mais fácil de ser empurrado e terá maior velocidade rapidamente, e este carrinho é o vazio.

Coloque os dois carrinhos com a mesma velocidade e faça os brutamontes tentarem parar os carrinhos. O carrinho que para mais rapidamente é aquele vazio.

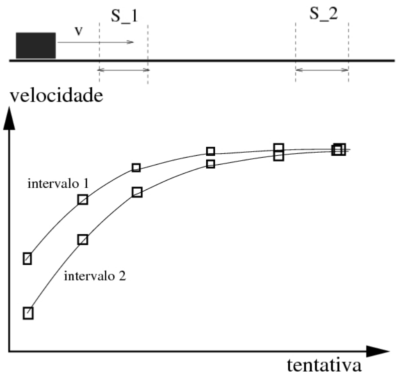


Figura 1.17: Se lançarmos um bloco sobre uma mesa ele parará porque existe o atrito que o faz parar. Se lançarmos o bloco novamente mas melhorando seu escorregamento a velocidade em trechos sucessivos será cada vez mais próxima da velocidade de lançamento. Assim percebemos que se fossemos capazes de eliminar tudo o que atrapalha o movimento do bloco ele permaneceria em movimento constante.

Isto coloca em evidência que o movimento de um corpo não depende somente de sua velocidade mas também de seu peso.

Vamos criar uma nova propriedade física que chamaremos quantidade de movimento, representado por p e que sabemos é função da velocidade do corpo v. Sempre é possível escrever uma pripriedade física como uma soma de funções, aqui escolhemos uma soma polinomial em v:

$$p = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + ... \tag{1.7}$$

onde a_i são coeficientes a serem determinados. [2]

[2] Isto é equivalente a expansão em série de Taylor. Outras representação também poderiam ser utilizadas. A série de MacLaurin é em principio usada para a análise do corpo negro por Planck, mesmo que ele não fale explicitamente disto. As séries de Fourier típicas de representações periódicas, mas não exclusivas.

É razoável atribuir uma quantidade de movimento zero para um corpo que está parado, então o coeficiente a_0 é nulo. Como os termos restantes são todos função da velocidade podemos colocar em evidência a velocidade resultando em

$$p = (a_1 + a_2 v + a_3 v^2 + ...)v \tag{1.8}$$

O termos entre parenteses pode ser considerada uma propriedade física cujo significado será atribuído a posteriori e escolhemos representar pelo símbolo m, ficando[3]

[3] Perceba que efetivamente a quantidade m é uma função da velocidade. Usualmente sempre foi considerada constante o que não tem a obrigação de ser. Na realidade quando estudamos a teoria da relatividade restrita chegamos a conclusão que m é uma função da velocidade,

$$m = m_o \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{1.9}$$

$$p = mv. \tag{1.10}$$

Revisitemos as leis sobre o movimento que Galileo enunciou considerando que o movimento não seja a mudança de posição v mas sim a quantidade de movimento p.

A primeira análise de Galileo diz que na ausência de ações externas o movimento permanece constante, ou

$$p = cte \quad \longrightarrow \quad F = 0 \tag{1.11}$$

A segunda análise de Galileo diz que se uma força atua sobre o corpo esta deverá mudar sua velocidade, agora a força deverá mudar a quantidade de movimento, que pode ser notada por Δp. Como esta mudança ocorre durante um intervalo de tempo Δt temos inerentemente uma taxa de mudança de movimento e que vamos associar à força F. Escolhe-se a seguinte relação por definição

$$p \neq cte \quad \longrightarrow \quad \Delta p = \int F \mathrm{d}t \tag{1.12}$$

Claro que uma melhor medida para descrever as minúcias do movimento a partir das diferenças, representadas por Δ, devem ser tão pequenos quanto se queira, ou quanto possível.

Estas duas reanálises chamamos de *Leis do Movimento de Newton*.

Será que estas leis do movimento são boas? Sim e não.

Elas são em princípio melhores pois sabemos que o movimento não é somente velocidade e a propriedade m introduzida deve

Objeto	a	e	i	P
Mercúrio	0.387	0.206	7.00	0.241
Vênus	0.723	0.007	3.39	0.615
Terra	1.000	0.017	0.00	1.000
Marte	1.524	0.094	1.85	1.881
Júpiter	5.203	0.048	1.31	11.862
Saturno	9.534	0.054	2.49	29.456

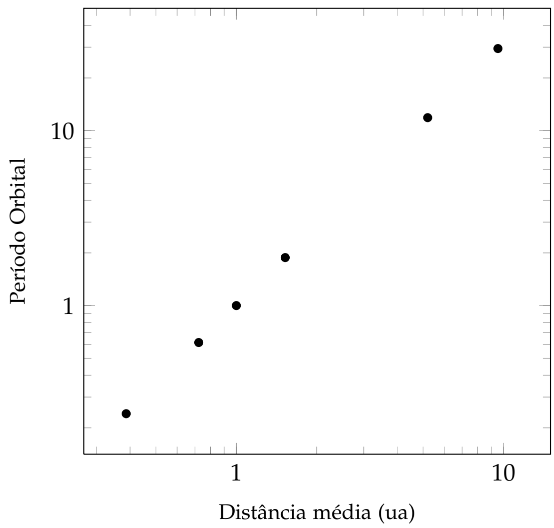


Figura 1.18: A partir da determinação dos parametros orbitais dos diversos planetas pode-se tentar correlacionar as diversas propriedades entre si. Quando observamos os valores das colunas associadas a distância e ao tempo de órbita, parece natural que quanto maior a distância maior será o tempo para efetuar uma órbita. Mas esta relação nem sempre deve ser linear, então podemos determinar uma lei de potência para estas propriedades. Fazemos isto por meio de um diagrama mono-logaritmico, ou bi-logaritnico. Aqui fazemos o diagrama log-log e percebemos que a sequência de dados torna-se uma reta que pode ser associada a uma reta. A inclinação desta reta dá a razão dos expoentes das duas propriedades. Aqui este coeficiente angular é 1.5, ou $\frac{3}{2}$. O que resulta na conhecida Primeira Lei de Kepler.

melhorar a descrição pois insere mais um parâmetro; se introduzirmos ad infinitum parametros qualquer coisa pode ser descrita mesmo que não saibamos o que está acontecendo. Então a melhor descrição deverá ser aquela que possua o menor número de parametros possível.

A terceira lei de Kepler pode ser resumida a partir da análise dos resultados orbitais, figura **??**, obtidos por Kepler por meio da expressão:

$$\frac{P^2}{a^3} = constante = k. \tag{1.13}$$

A partir deste resultado podemos construir uma expressão para uma força que atua entre os corpos conhecidos, que dentro do modelo seria entre o Sol e cada um dos planetas. Por analogia considere uma pedra tendo um movimento circular em torno de uma mão. Perceba que este movimento só pode oorrer pois algo mantém a distância entre a pedra e a mão, uma corda. Já era conhecido, de Issac Newton, que a força que mantém um movimento circular a um centro, a partir das características geométricas deste movimento, velocidade v e raio a, pode ser dada por:

$$F = m\frac{v^2}{a}. \tag{1.14}$$

Assim a terceira lei, equação 1.13, deveria poder ser transformada em algo semelhante a expressão da força centripeta, equação 1.14. Como a velocidade do movimento circular pode ser escrita como

$$v = \frac{2\pi a}{P} \qquad \text{ou} \qquad P = \frac{2\pi a}{v}, \tag{1.15}$$

substituindo na equação 1.13 temos

$$\frac{4\pi^2 a^2}{v^2}\frac{1}{a^3} = k. \tag{1.16}$$

Simplificando adequadamente resulta em

$$v^2 a = \frac{4\pi^2}{k} \qquad \text{ou} \qquad \frac{v^2}{a} = \frac{4\pi^2}{k}\frac{1}{a^2}. \tag{1.17}$$

Na forma da equação 1.14 temos

$$F = m\frac{v^2}{a} = m\frac{4\pi^2}{k}\frac{1}{a^2} \qquad \text{ou} \qquad F = \frac{k'}{a^2}. \tag{1.18}$$

Isto significa que a força, seja ela qual for, que mantém os planetas próximos ao Sol deve depender da distância ao Sol. Quanto mais distante mais fraca, o que é compatível com um maior tempo orbital.

Como a força deve ter origem em alguma coisa que exite nos planetas, tal qual o magnetismo de um ímã é devido a alguma coisa que existe dentro do ímã, podemos imaginar que existe uma certa quantidade destes algo dentro de cada corpo. Desta maneira podemos imaginar que quando uma pedra cai, é algo que faz a cair sobre o planeta, então esta pedra também deverá ter a mesma propriedade que está dentro do planeta. Por extensão, uma pedra para ser mantida longe do solo dever-se-á fazer mais força, então a pedra deverá conter mais desta propriedade atrativa, do dobro do peso então o dobro da propriedade. Ou

$$F = (constante)M. \tag{1.19}$$

Por analogia o outro corpo também deve possuir esta propriedade e portanto este também deverá obedecer a mesma forma da equação 1.19. Assim resultará que a força que atua entre o Sol e o planeta será dada por

$$F = (constante)\frac{M_{Sol}M_{planeta}}{a^2} \tag{1.20}$$

onda a é a distância entre do Sol ao planeta.

Observe que se o Sol atrai um planeta por possuir uma propriedade física, o planeta também deverá ter esta propriedade física, por extensão os planetas também deverão se atrair entre si pois todos devem possuir esta propriedade física. Ainda mais se a Lua também descreve um movimento compatível com a elipse, quase circular, esta também deverá ter esta propriedade. E finalmente se a Terra é feita de material terrestre, que é atraída pelo Sol, uma pedra é atraída pela Terra, então a pedra também deverá ter esta propriedade física. Assim todos os corpos conhecidos deverão ter esta propriedade então todos os corpos devem se atrair pelo simples fato de terem esta propriedade. A conclusão surpreendente é que o material que são constituídos os planetas observados nos céus, que foram considerados distintos, por possuirem um movimento contínuo, dos movimentos de pedras, que entrarão em repouso, não são, na realidade, diferentes.

Existe portanto uma unificação entre os céus e terra, assim uma ação entre massas que é universal, a "força da gravitação universal"!

Os objetos celestes eram feitos de material celeste enquanto que a Terra era feita de material tipo terra. Com a construção da lei de gravitação, mostramos que o Sol deve ter uma propriedade física associada a massa tal qual a Terra tem massa.

O Sol passa a ter a maesma propriedade que a Terra, portanto deve ser feita dos mesmos tipos de material. Como Marte também é atraída pelo Sol, Marte também deve ser feito do mesmo material da Terra. Então, todos os objetos celestes são feitos dos mesmos materiais que são feitos na Terra.

Por extensão, tudo que está nos céus é o mesmo que está na Terra. Eis a primeira grande unificação que o conhecimento humano produziu.

1.6. Propriedades Físicas dos Planetas

Como pesar uma balança se você não consegue sair de cima dela? A determinação do peso, ou seja medir m, da Terra também é em princípio problemática. Mas considere a expressão da força gravitacional entre duas massas. O que faz um corpo pesar? A ação da Terra sobre a massa do corpo que pesa. Então podemos identificar o peso de um corpo com a ação gravitacional sobre ele,

$$G\frac{Mm}{d^2} = mg \tag{1.21}$$

onde g é o valor medido da aceleração gravitacional, *a priori* no local do experimento, G a constante da gravitação universal, M a massa da Terra e m a massa do corpo que pesa. Aqui a distância entre m e M é d, neste caso o raio da Terra[4].

[4] Uma complicação é que o valor medido g é a aceleração efetiva no local onde ocorreu a medida, que é afetado da rotação da Terra.

Isolando o valor M, a massa do planeta temos

$$M = \frac{gd^2}{G} \tag{1.22}$$

Alternativamente o que faz a Lua orbitar a Terra é a massa da Terra, então o mesmo pode ser feito para a Lua. Associando a representação geométrica da força que garante o movimento circular, a força centripeta, com a força entre as massa, temos

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{v^2}{r} \tag{1.23}$$

onde r é a distância do centro da Terra ao centro da Lua, M continua sendo a massa da Terra e m agora é a massa da Lua. Intervindo aqui temos v a velocidade orbital da Lua em torno da Terra. A priori não sabemos este valor, mas sabendo a distância,

r, e o período orbital, P, temos esta velocidade, i.e.,

$$v = \frac{2\pi r}{P} \tag{1.24}$$

Fazendo a devida substituição e isolando o valor de interesse teremos o resultado

$$M = \frac{rv^2}{G} \tag{1.25}$$

Observa que esta técnica, utilizando a órbita da Lua, pode ser utilizada também para medir a massa dos planetas que possuem satélites orbitando. Antes do advento das missões espaciais planetárias tinhamos Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno.

1.7. A Estrelas mais Próximas

No coração do *Principia* de Newton reside um profundo paradoxo. A gravidade é uma força e a gravidade universal é uma força universal, e uma força universal, pelo menos, deveria ser uma causa de movimento universal.

É surpreendente que no *Principia* Newton nada diz sobre o paradoxo da existência de uma força causadora de movimento sobre um universo de estrelas "fixas". No *Principia* o termo que Newton usa para as estrelas é *fixa* (de *fixa stella*), visto que perto de dois mil anos de observações justificavam este termo.

A atenção de Newton foi direcionada às questões cosmológicas somente após 1692, quando Richard Bently, teólogo, escreveulhe e perguntou-lhe sobre o Universo ser finito ou infinito. Ambos concordaram facilmente que o universo de estrelas não poderia ser finito por que as estrelas eram fixas, em repouso, e um sistema de estrelas finito em repouso sofreria sob influência da gravidade um rápido colapso. As estrelas seriam puxadas para o centro de um sistema finito. Caso o sistema fosse infinito não existiria um centro para o colapso.

James Gregory, em 1668, publicou um pequeno trabalho de geometria contendo num breve apêndice um brilhante método para a determinação da distância aproximada das estrelas. O método baseava-se no princípio, cada vez mais aceito como certo, que o Sol é uma estrela que casualmente é a mais próxima, e que as estrelas e o Sol eram fisicamente similares.

Segue-se assim, que o Sol e uma estrela, por exemplo Sirius, diferiam de brilho aparente pela suas distâncias até nós e que se o Sol estivesse tão longe quanto Sírius, este brilharia tanto quanto Sírius nos é visível.

Agora, se espaço entre nós e Sírius for completamente transparente, o brilho observado diminuiria com o quadrado da distância. Com isto basta medir a diferença de brilho para ter-se

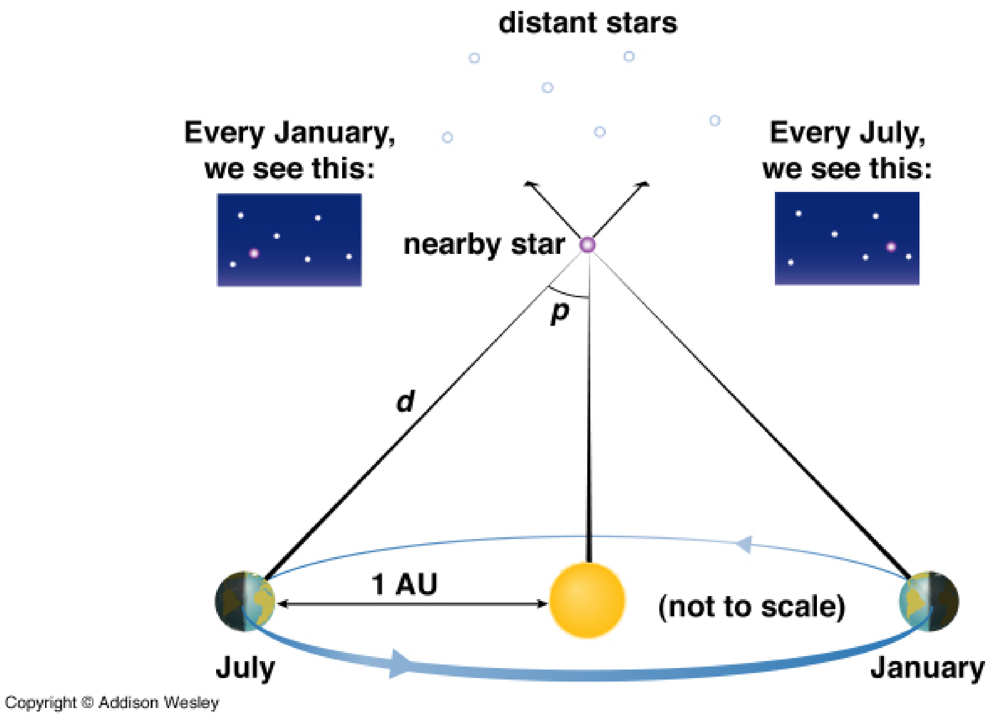


Figura 1.19: Exemplificando o que os olhos observam e as posições relativas observadas sendo diferentes nos dá uma medida de distância deste objeto. Esta é a base utilizada pela cartografia para a produção de mapas geográficos. A mesma idéia utilizada na geografia pode ser usada na astronomia. A dificuldade inerente é que dois observadores não farão as observações simultaneamente, pois o tamanho da Terra é pequeno e o problema de sincronismo. Assim, supondo que o fundo de estrelas é distante o suficiente a aparente mudança de posição nos dá a medida angular referente a distância a estrela como esquematizada acima.

uma idéia da distância à Sírius em Unidades Astronômicas, a da distância da Terra ao Sol.

A dificuldade residia em determinar a diferença de brilho com as tecnologias disponíveis na época. Gregory imaginou um método engenhoso para resolver esta dificuldade prática que foi aplicada por Newton em seu *Sistema do Mundo* concluindo que Sírius estaria a impressionante distância de um milhão de Unidades Astronômicas.

Assim fica surpreendente que a primeira pessoa na história, Newton, que pode entrever as distâncias entre as estrelas, capaz de perceber que o estado de repouso das estrelas era completamente inconclusivo, não tenha o feito.

Um dos problemas colocados pelos antigos contra o modelo héliocentrico que antes havia sido proposto é a chamada inexistência da paralaxe estelar. O que é isto?

Fique na frente de uma paisagem. Feche um dos olhos e observe as posições de alguns objetos em relação a outros. Por exemplo em uma sala de aula, a posição de um aluno em relação a outro que está atrás. Aquilo que seu olho descoberto enxerga.

Agora alterne o olho que observa e feche o primeiro. A distância dos objetos em relação aos outros irá mudar. Alguns se afastarão outros se aproximarão. Até mesmo poderão estar parcialmente escondidos. Veja a figura 1.24.

Uma maneira alternativa que foi proposta por Gregory, em um panfleto de seis páginas, era comparar o brilho observado de uma estrela. Se fosse possível atribuir o brilho absoluto, a potência da estrela como um todo, a diferença de brilho estaria associada com a distância.

Newton efetuou então a medida do brilho de Sírius em função do brilho do Sol. Ainda não é claro como efetivamente foi feita esta medida, mas supondo que ambos o Sol e Sírius teriam a priori o mesmo brilho absoluto, a diferença indicaria portanto que a distância de Sírius a Terra seria na ordem de um milhão de vezes a distância da Terra ao Sol.

Esta era a primeira vez que se estimava, coerentemente, um valor para a distância às estrelas.

Na realidade a paralaxe estelar existia, mas possuia um valor numérico tal que os instrumentos não eram capazes de detectar. Foi somente com o advento do micrometro acoplado com um telecópio que permitiu a determinação das distâncias às estrelas.

Uma dificuldade natural do "método" utilizado por Newton é o uso da hipótese de que Sírius teria o mesmo brilho que o Sol, o que, *a priori*, não será. Isto significa que a distância inferida pelo método não é confiável, apesar de refletir, de alguma maneira, o valor "verdadeiro". A partir deste raciocínio percebe-se que há a necessidade de encontrar um outro método de determinação de distâncias.

Outra grande objeção a construção de um modelo héliocentrico do sistema de planetas consistia na medida nula da paralaxe estelar. Como no modelo héliocentrico caracterizava-se pelo movimento da Terra, este movimento colocaria um observador situado nela e posições diferentes quando observando as estrelas.

Tabela 1.1: Quando se pode medir a paralaxe trigonométrica pode-se determinar a distância até a estrela. O subproduto natural deste valor é a determinação do brilho absoluto desta estrela a partir do valor medido do brilho aparente.

Nome		Coordenadas (J2000)		Distância		Brilho	
		α	δ	π	D	m_V	M_V
α Centaury	A	$14^h39^m35.1^s$	$-60°50'02''$	747.23(117)	4.3650(68)	0.01	4.38
	B	$14^h39^m36.5^s$	$-60°50'14''$			1.34	5.71
	C	$14^h29^m43.0^s$	$-62°40'46''$	768.87(029)	4.2421(16)	11.09	15.53
Estrela de Barnard		$17^h57^m48.5^s$	$+04°41'36''$	546.98(1 00)	5.9630(109)	9.53	13.22
WISE 1049-5319	A	$10^h49^m15.57^s$	$-53°19'06''$	495 (5)	6.59(7)	10.7	
	B						
Wolf 359		$10^h56^m29.2^s$	$+07°00'53''$	419.10(210)	7.7825(390)	13.44	16.55
Lalande 21185		$11^h03^m20.2^s$	$+35°58'12''$	393.42(070)	8.2905(148)	7.47	10.44
Sirius	A	$06^h45^m08.9^s$	$-16°42'58''$	380.02(128)	8.5828(289)	−1.46	1.42
	B					8.44	11.34
Luyten 726-8	A	$01^h39^m01.3^s$	$-17°57'01''$	373.70(270)	8.7280(631)	12.54	15.40
	B					12.99	15.85

Assim, dever-se-ia notar uma mudança no padrão das estrelas, este movimento estelar periódico chamava-se *paralaxe estelar*.

Com uma estimativa de distância pode-se concluir, parcialmente, que mesmo possuindo um movimento devida a distância a paralaxe estelar seria muito pequena e, muito provavelmente, além da capacidade observacional. Assim, as estrelas pareceriam paradas.

Podemos exemplificar a paralaxe estelar pelo passeio em meio a um arvoredo. A medida em que se passeia as arvores movem-se umas em relação às outras pela existência do movimento através das árvores.

Imaginemos agora o movimento da Terra em torno do Sol e como estas estrelas mover-se-iam supondo que este observador seja capaz de observar pequenos ângulos. Para efeitos de análise considere uma estrela "próxima" e diversas estrelas mais distantes.

A medida em que a Terra percorre sua órbita, a estrela "próxima" descreve um caminho no céu que reflete a mudança do observador. A amplitude desta mudança pode ser medida na foma de um ângulo, como está esquematizado na figura **??**. Tendo-se agora este ângulo e conhecendo-se a distância entre os dois pontos extremos da órbita terrestre, conhecemos então a distância a estrela "próxima".

Agora que conhecemos a distância por um método que não é baseado no brilho da própria estrela, poderemos saber qual é seu brilho, sua potência, e comparar com a potência do Sol. Uma vez feita tal tabela, objeto, potência e distância, podemos perceber que a hipótese de Gregory é somente aproximada e leva a um erro na determinação da distância.

Vale muito salientar que a idéia de Gregory não deve ser rejeitada simplesmente por que ela não dá o valor "correto" da distância, mas sim considera-la como extremamente útil, pois foi esta que permitiu a primeira estimativa de distância para alguma estrela. Claro que técnicas mais aprimoradas resultarão em valores "melhores", todavia uma informação mesmo que aproximada é melhor do que nenhuma.

Seria o Sol uma grande fogueira? Como poderiamos fazer para poder decidir se sim ou não? Imaginemos um experimento.

Se o Sol for uma grande fogueira, basta fazer uma grande, pelo menos para nós humanos, fogueira e ver as consequências sobre alguns objetos e comparar estes mesmos objetos colocados ao Sol.

Colocou-se esterco, unhas, cabelos e pedaços de carne. Como os objetos colocados ao Sol putrefavam de maneira diferente daqueles colocados sob a luz e calor da fogueira, pode-se concluir

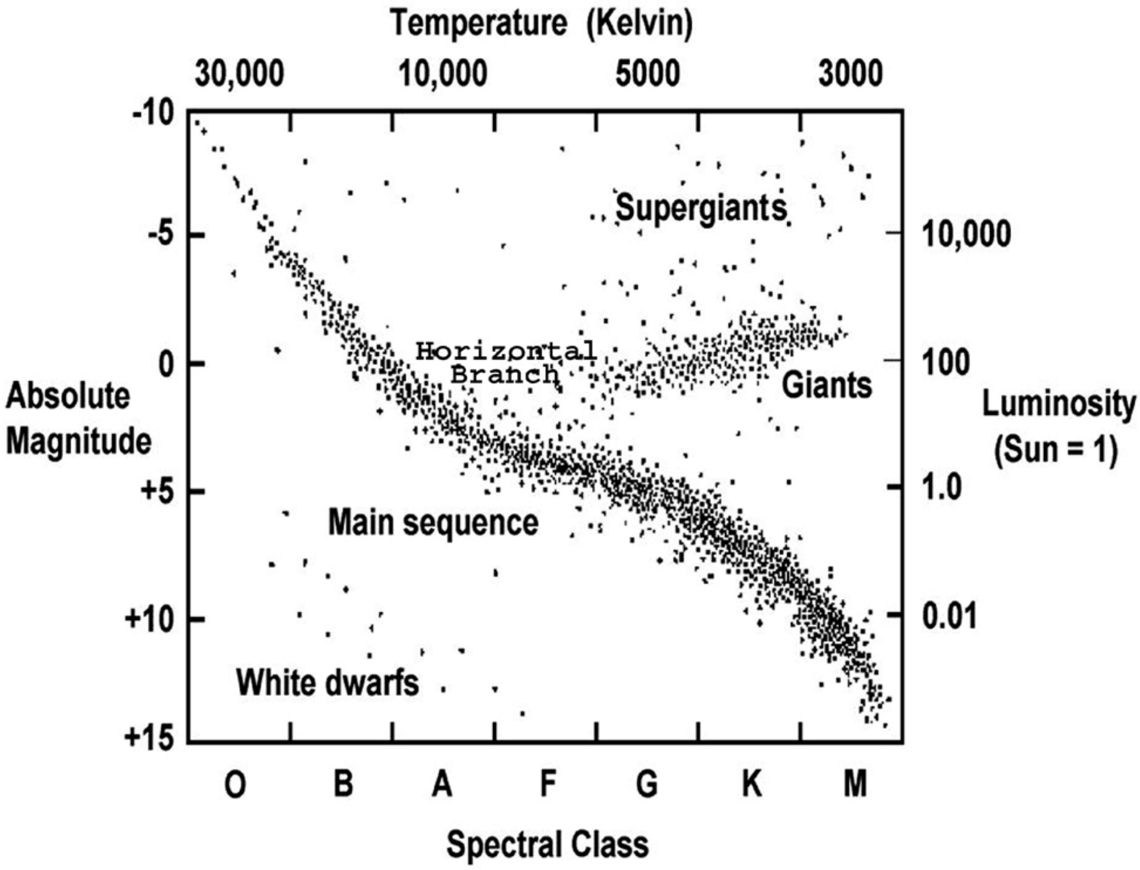


Figura 1.20: Diagrama Hertzsprung-Russel que correlaciona as cores das estrelas, que está associado tanto a temperatura e brilho absoluto. Algumas estrelas conhecidas estão inficadas.

que o Sol não é igual a uma grande fogueira. Realmente, carne de Sol é diferente de carne de fogueira, e não seria carne de Sol se não fosse o Sol.

Cuidado, hoje podemos simular a ação do Sol sobre carnes e fazer carne de Sol sem Sol. Quase igual. O mesmo ocorre com carnes defumadas. As carnes defumadas hoje são sabor fumaça e em geral não são defumadas realmente.

Como estudar o que é o Sol? Para isto devemos determinar as propriedades físicas e geométricas do Sol e atribuir números a partir de medidas adequadas. Para se comparar com as estrelas, a primeira tentativa seria seu brilho. O brilho tem duas componentes, uma é a intensidade do brilho e outro é a cor do brilho. Existem estrelas vermelhas, amarelas e brancas, ou coisa que o valha.

Será que estrelas brancas são tão brancas quanto as outras estrelas brancas? Isto decorre da comparação de tecidos brancos com outros tecidos brancos. Alguns parecem mais amarelados enquanto outros parecem mais azulados. Assim temos que determinar quanto de azul tem estes dois brancos, quanto de amarelo, de verde, ou de vermelho. Se um branco tem mais azul quando comparado com vermelho este branco é azulado, mas

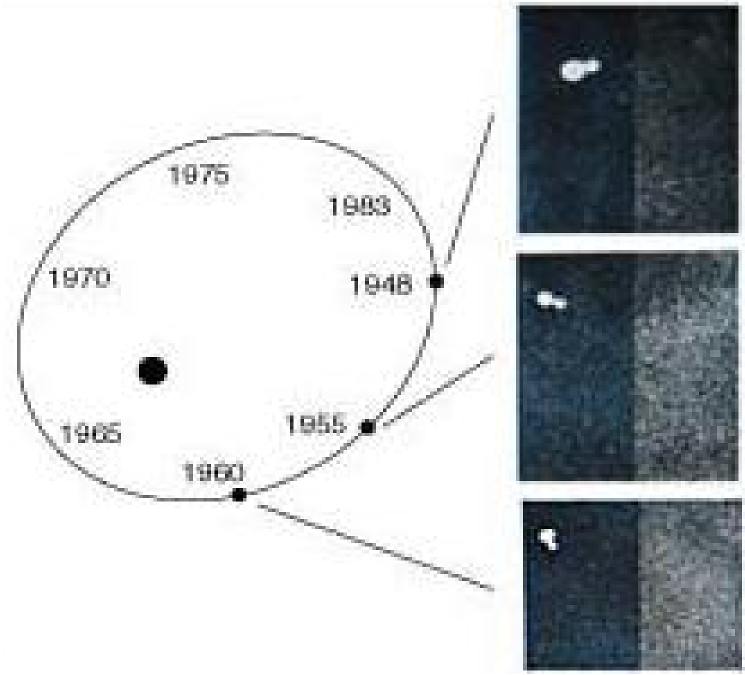


Figura 1.21: O sistema Kruegar 60 é um objeto binário. Acima temos três exposições mostrando o movimento desta binária. Quando transofamos as distâncias observadas nas imagens com a extensão em metros na distância das estrelas, podemos determinar a massa destas estrelas.

se tem menos pode ser outra cor: amarelo, vermelho.

O Sol é "branco" mas podemos filtrar a quantidade de luz azul e a quantidade de luz vermelha presente no branco. A razão ou a diferença entre estes dois nos dá um número. Quando fazemos o mesmo para as estrelas percebemos que há uma grande variedade de razão de cores, um contínuo de valores.

Sabendo as distâncias a estas estrelas, podemos determinar quan é o brilho absoluto, independente da distância, ou uma distância de referência. O diagrama entre estes brilhos comparáveis, com as diferenças entre as cores nos dão um diagrama conhecido hoje como diagrama Hertzsprung-Russel, figura 1.20.

1.8. As Estrelas não tão Próximas

Da mesma maneira que podemos inferir a massa dos planetas dotados de satélites podemos determinar a massa das estrelas... bom desde que estas tenham satélites observáveis. Os objetos estelares contendo satélites são as estrelas binárias, o satélite é uma outra estrela.

Isto causa uma modificação na aplicação da terceira lei de Kepler pois devemos incluir a contribuição da massa do satélite, pois este satélite tem uma massa m_2 comparável com aquele que queremos medir m_1. Ou seja

$$(m_1 + m_2)P^2 = (d_1 + d_2)^3 = R^3. \tag{1.26}$$

O problema que intervêem é que devemos de alguma maneira descobrir não só a distância R entre as estrelas, mas em relação

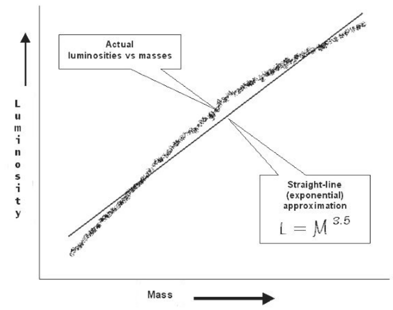


Figura 1.22: A associação entre as massas medidas em binárias com os respectivos brilhos produz aquilo que é conhecido como relação massa-luminosidade.

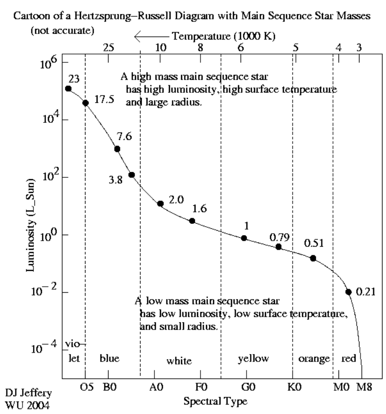


Figura 1.23: A associação entre as massas medidas em binárias com os respectivos brilhos produz aquilo que é conhecido como relação massa-luminosidade. Pode-se também indicar onde as massas estão em um diagrama Hetzsprung-Russel, o que é feito a direita.

ao centro de massa do conjunto, d_1 e d_2. Algumas vezes isto é possível pela coleta sucessiva de images em relação a uma outra estrela próxima dentro deste campo. O que em geral não é o caso.

Assim deve-se ter um outro método robusto para determinar o equivalente a este valores. Como estas estrelas movimentam-se elas possuem velocidades orbitais. Por meio da espectroscopia podemos medir a velocidade radial, em relação ao observador. Entretanto a velocidade radial não é a velocidade orbital a menos que o plano orbital destas estrelas esteja perfeitamente de perfil. Como em geral temos uma inclinação deste plano em relação a direção de visada, todos os resultados ficam dependentes do seno da inclinação.

Quando coletamos os valores medidos das massas das estrelas em que foi possível determina-la, podemos tentar correlacionar o valor destas massas com outras propriedades físicas destas estrelas.

Uma propriedade que pode ter uma relação com a massa da estrela deveria ser o brilha da estrela. Quanto maior a massa maior é a aceleração gravitacional sobre a própria massa, aumentando a pressão e, portanto, a necessidade de energia interna para contrabalançar a ação gravitacional. A consequência final é que o brilho, a potencia da estrela deverá ser maior para maiores massas.

Se isto for verdade, deve surgir esta relação quando construirmos uma figura relacionando a massa e o brilho absoluto, o que é bem percebido na chamada relação Massa-Luminosidade, na figura 1.22.

A extrapolação natural é colocar determinar as posições das estrelas com massas conhecidas dentro do diagrama Hertzsprung-Russell como o esquematizado na figura 1.23.

1.9. A Fonte Interna de Energia das estrelas

Na antiguidade o Sol era um Deus, para os egipcios era o olho de Rá, o criador da luz e de todas as coisas. Pars os sumérios era Shamash, deus da justiça pois o Sol tudo via. Para os gregos, Apolo é responsável não somente pela iluminação da Terra com luz, mas também da mente humana com o entendimento. Eles acreditavam que o Sol era uma bola de fogo que atravessava os Céus durante o dia e passava através da Terra em cavernas durante a noite.

A primeira tentativa, algo científica, foi feita por Anaxagoras, no século V a.C. Ele assistiu a queda de um meteorito do tamaho de um vagão. Devida a natureza ardente ele concluiu que este era um pedaço do Sol que havia quebrado. Como o meteorito era metálico, ele deduziu que o Sol deveria ser uma grande bola de ferro quente, em queima, com uns 56 km de diametro a 6500 km de distância.

Não se questiona efetivamente a origem da energia radiante do Sol até o século XIX. Antes acreditava-se que o Sol deveria ser feito de um material especial que brilhava eternamente, mas isto entrava em conflito com a nova teroia da termodinâmica. Surpreendentemente, o Sol poderia deixar de brilhar.

John Waterson calculou que o Sol somente poderia permanecer quente por aproximadamente 30000 anos se sua fonte de energia fosse de origem química, tal qual a combustão. Entretanto os geólogos já haviam que a Terra deveria ser pelo menos mais antiga que milhões de anos. Assim John Waterson concluiu que a fonte de energia deveria ser outra, e a única outra conhecida era a gravidade. Ele imaginou que meteoros caindo sobre o Sol transformariam suas velocidades em calor quando atingissem sua superfície. Mesmo que essa teoria parecesse plausível o Sol não era atingido por um número suficiente de meteoros.

Em 1854, Herman Helmholtz que era a contração da própria massa do Sol que fornecia a energia para que o Sol brilhasse. Assim, supondo que o Sol era um grande conjunto de meteoros que caem um sobre os outros, ele conseguiu estimar que com a contração da massa do Sol o Sol pederia brilhar por aproximadamente 20 milhões de anos. Esta teoria também parece razoável, mas não explica cmo o brilho do Sol deva permanecer constante por um grande intervalo de tempo.

Em 1887, Kelvin melhorou a teoria de Helmholtz sugerindo que o Sol fora uma grande nuvem de gás e poeira que começou a contrair-se, enquanto a nuvem colapsa o calor pode ser liberado continuamente. Uma vez atingindo o tamanho atual a temperatura do núcleo do Sol deveria ser de alguns milhões de graus, causando uma pressão interna que impede o colapso gravitacional. Nestas condições o Sol deveria levar um grande tempo para esfriar, que novamente se contrai e novamente continua a brilhar. Kelvin estimou que o Sol deveria reduzir seu tamanho uns 50 metros por século e permanecer quente durante 100 milhões de anos.

Todavia, os geólogos protestaram pois já haviam achado fósseis indicando que a Terra deveria ter mais do que um bilhão de anos.

Com o final do século XIX e o início do século XX, com o estabelecimento da relação massa-energia da relatividade especial e do conhecimento da transmutação dos elementos, Arthur Stanley Eddington em 1926 propôs que o Sol convertesse hidrogênio em hélio produzindo como resíduo energia.

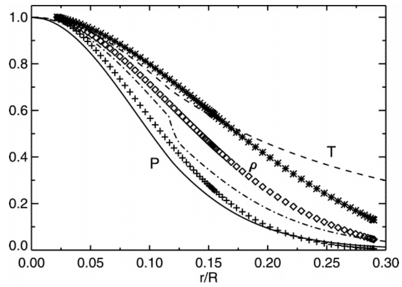


Figura 1.24: O Sol deve ter uma fonte de energia interna para poder brilhar. Esta fonte deve ser térmica vito que "sentimos" o calor irradiado. Esta fonte deve estar em algum lugar no interior da estrela. Os possíveis lugares seriam a priori no centro da estrela ou em algum lugar que não seja o centro. Mas se este lugar não for o centro, bem provavelmente saberiamos disto pois um lado do Sol deveria ser mais brilhante do que o outro. Assim se o local não for o centro, este deve ser uma camada esferosimétrica. Imaginemos que está a uma certa distância do centro. O fluxo de calor irradiado seria para fora e para dentro desta camada. Como não há local de fuga para dentro, o interior atingiria uma temperatura pelo menos igual a da camada gerador. Assim os perfis possíveis estão desenhados esferosimatricamente.

Baseado na expressão $E = mc^2$ e nos valores das massas do hidrogênio e do hélio, a diferença de massa transformada em energia poderia, com o brilho atual, manter o Sol, usando o décimo de sua massa, irradiando durante aproximadamente 11 bilhões de anos.

O que foi evidênciado anteriormente é que se estrelas pertencem a um mesmo aglomerado pela ação da gravidade mantendo-as próximas, então bem provavelmente estas estrelas deverão ter se formado já como membros destes aglomerados e assim todas terão a mesma idade. Como questionar sobre a idade das estrelas?

A antiga analogia do Sol ser parecido com o fogo de uma fogueira pode não ser adequada, mas qual conclusão tiraríamos sobre a idade das estrelas quando estas forem imaginadas como uma fogueira? Quanto maior uma fogueira, mais "quente" esta será. Isto significa que a fogueira estará emitindo mais energia a cada instante do tempo do que outra mais "fria". Então, se temos madeira, ou qualquer outro combustível, uma quantidade de energia a ser gerada implicará no consumo de uma quantidade de combustível. Se a fonte emite mais energia por unidade de tempo, então o consumo de energia será proporcionalmente maior. Seria esta conclusão adequada? Como verificar isto?

Para as estrelas próximas tem-se facilmente um catálogo de estrelas contendo informações sobre sua luminosidade aparente, potência absoluta,... precisa-se das massas das estrelas. Como obter a massa das estrelas?

Considere um par de pessoas dançando, interagindo de maneira que permaneçam próximas uma da outra. Caso as duas pessoas tenham a mesma massa, então as duas girarão equidistantes a um ponto entre elas, mas se uma delas for muito mais "pesada" do que a outra, então o movimento da dança será diferente, o ponto de giração ficará muito mais próximo da pessoa "maior". Outro mais, quanto mais rápido for o movimento mais forte terão de se segurar um ao outro. Para as estrelas a força de atração sendo a gravitação podemos então observando as ampitudes do movimento e sua periodicidade a massa e a razão de massa das estrelas (duplas).

Assim, com o catálogo enriquecido, peo menos para as estrelas duplas, com os valores de massa, tentemos verificar a possível correlação entre a massa e o brilho absoluto das estrelas. O que resulta está colocado no diagrama da figura 1.22.

Observando mais detalhadamente este diagrama, podemos verificar que o brilho da estrela cresce com a massa da estrela, o que parece razoável, mas o brilho cresce muito mais rapidamente, o que impicará que a estrela irá consumir muito, muito mais rapidamente "seu combustível" do que ela ganha com o aumento de massa. Isto resultará que a estrela terá assim uma vida mais curta. Observe que seja qual for a fonte de energia da estrela, ela dverá estar associada a sua massa e não a um agente externo a ela.

Como as estrelas mais brilhantes estão no extremo superior da Sequência Principal então como elas irão evoluir muito mais rapidamente do que as estrelas da parte inferior da Sequência Principal, e assim aglomerados de estrelas mais "antigos " irão conter uma deficiência de estrelas de grande massa. Tal fenômeno pode ser observado no diagrama côr-luminosidade para dois aglomerados de estrelas conhecidos como *Pleiades* e *Praesepe*, na figura **??**.

Análises modernas podem obter valores para as idades em função da massa, e estão esboçadas na figura **??**. Observe na referida figura que a idade cresce muito rapidamente quanto mais fundo for a exaustão das estrelas, o que mostra que estrelas de pequena massa podem ter idades imensamente grandes.

As estimativas atuais indicam que podem haver aglomerados de estrelas com idades de até 19 bilhões de anos. Se imaginarmos, sustentados pela análise do dito paradoxo de Olbers, que o Universo tem uma idade, as estrelas mais antigas tendo idades da ordem de 19 bilhões de anos, então o Universo deverá ser algo mais "velho" do que este valor. Deve-se ter o cuidado de tomar o número muito ao pé da letra, pois quando se tem uma estimativa deve-se levar em conta os possíveis erros das medidas e de modelagem. Com isto o erro do valor indicado pode ser de até 4 bilhões de anos para mais ou para menos.

1.10. Nossa Galáxia

> *Senhor,*
>
> *Diz-se, e, se eu me lembro bem, é também sua opinião, que três dos mais belos espetáculos da natureza são um amanhecer sobre o mar, uma paisagem verdejante com um arco-íris e uma clara noite a luz das estrelas. Eu frequentemente observo eu mesmo estes espetáculos com uma grande alegria e um grande prazer. Eu vejo o primeiro frequentemente e sempre com uma agradável surpresa; eu, também frequentemente, observo o segundo sem menor admiração, mas eu jamais levantarei os olhos para o último sem um assombro misturado de uma espécie de felicidade. A última noite, esta admirável cena se mostrou em toda sua beleza, e como diz Milton*
>
>> *O silêncio se fez, agora que o firmamento avermelhado de suas Safiras vivas; Hesperus que guia a armada de estrelas se eleva a mais brilhante...*
>
> *Eu descobri que era impossível de ver por muito tempo esta cena prodigiosa, tão plena de objetos estupendos, e particularmente a Via Lactea que, a Lua estando ausente, em toda sua perfeição, sem ser obrigado a pensar em minha obra: esta zona de luz sendo o objeto principal que eu empenho-me de tratar e de explicar. [...]*

A partir de 1610, Galileo Galilei apontando para o céu, seu telescópio, na direção daquele fenômeno luminoso que cruza os céus e conhecida como *Via-Lactea*, percebe que o fluido celestial é na realidade um grende número de estrelas com uma grande variedade de brilhos aparentes.

Issac Newton, o primeiro a ter alguma idéia sobre a distância às estrelas, não se dá conta que não há necessidade de fazer o Universo infinito e uniformemente preenchido para evitar que a força gravitacional faça colapsar todo o Universo.

Thomas Wright apresenta, em 1750, a discussão sobre a não uniformidade observacional na distribuição de estrelas nos céus e tenta inferir a causa desta distribuição não uniforme. Ele considera a possibilidade da distribuição espacial se assemelhar a um disco e nosso Sol estar dentro deste.

> [...] Agora admitindo que a largura da Via Lactea seja somente 9^o de largura, e supondo que haja somente 1 200 estrelas por grau quadrado, ela terá em sua totalidade da superfície orbicular aproximadamente 3 888 000 estrelas, e todas estas estrelas em uma pequena porção da imensa extensão dos céus.

E logo após esta proposição estima o tamanho do conjunto de estrelas, utilizando-se da medida de Newton a Sírius

> [...] E como as estrelas são todas visíveis graças a bons telescópios até 9^a ou 10^a magnitude, se nós multiplicarmos a distância primária de Sírius ou de não importa qual outra estrela desta classe pelo número de espaços intermediários comuns, o produto será igual ao raio da criação visível para um observador situado no Sol e esta distância, por esta regra, encontrar-se-á 6 000 000 000 000 de milhas tomando-se uma estrela de 6^a magnitude e para uma estrela de 9^a magnitude, 9 000 000 000 000 de milhas. [...]

Claro que o número fornecido é equivocado, mas ele deixa uma possibilidade de medida que será utilizada mais tarde, correlacionar um grupo de estrelas com o mesmo brilho aparente com sua distância média, o que se revelará razoável em primeira aproximação.

Mas, nada mais belo que uma noite estrelada, as estrelas do céu sob um fundo "negro" das mais belas noites longe das luzes da cidade. Por que não percebemos as estrelas durante o dia? A resposta vem rápida... por causa do Sol. Assim pergunta-se

> Os "céus" da Lua, para que estiver na Lua, durante o "dia", não poderemos ver as estrelas?

Muito mais do que a presença do Sol, é o espalhamento da luz do Sol pela atmosfera que nos impede de observar outras estrelas no céu diurno. Podemos mostrar a importância deste espalhamento experimentando. Sempre podemos encontrar uma sala com uma janela por onde entra a luz do Sol. Varrendo o chão levantamos poeira, e esta poeira, a mais fina, pode ser percebida por que ela espalha luz do Sol. Melhorando ainda mais, uma noite enevoada, com os faróis ao máximo percebemos que não mais enxergamos, pois o brilho nos retorna.

A noite é escura... o que significa isto?

Tomemos as palavras de Heinrich Olbers (1823):

> [...] Se nós supusermos que as estrelas fixas estão uniformemente repartidas no espaço cósmico, e se nós representarmos em torno de nosso sol uma esfera de raio igual a um, ou igual a distância média das estrelas de primeira grandeza, o diâmetro de de cada estrela fixa em média igual a d, e se nós denotamos n seu número a esta distância, então elas recobrirão para nós uma fração $nd^2/4$ da esfera celeste. A distância igual a dois, o diaâmetro aparente das estrelas fixas é $d/2$, mas seu número é $4n$ e por consequência elas recobrirão ainda $nd^2/4$ da esfera. Portanto em todas as distâncias $1, 2, 3, 4, 5, ..., m$ de nós, as estrelas fixas cobrirão áreas iguais sobre a esfera e assim
>
> $$nd^2/4 + nd^2/4 + nd^2/4 + etc... = mnd^2/4$$
>
> torna-se infinitamente grande quando m torna-se infinitamente grande, pois $d^2/4$, por menor que seja, é uma grandeza finita. Então, não somente a esfera celeste é coberta de estrelas, mas ainda elas deveriam estar colocadas umas atrás das outras em fileiras infinitas e ocultando-se umas as outras. É claro que a mesma conclusão vale também se as estrelas fixas não estiverrem uniformemente repartidas no espaço, mas agrupadas em sistemas isolados, separados por grandes distâncias. [...]

Este pequeno raciocínio nos leva a perceber que como a noite é escura então

o Universo teria um tamanho finito.

Para Olbers o paradoxo, pois para ele o Universo tinha de ser infinito em suas premissas teológicas, seria levantado pela existência de um meio que permeasse o Universo, atenuando a luz das estrelas mais distantes. A idéia do meio interestelar, apesar de correta falha por a absorção da luz aqueceria também este "gás" que o faria brilhar tanto quanto as estrelas elas próprias. Infelizmente ele não teve acesso as informações sobre as teorias do calor que estavam sendo, então, formuladas: Carnot em 1824 com suas *Reflexões sobre a potência motriz do fogo e sobre as máquinas próprias a desenvolver sua potência* e Fourrier em 1822 com sua *Teoria analítica da calor* e em 1824 com *Sobreas temperaturas do globo terrestre e do espaço planetário*.

Entretanto, outra possibilidade poderia resolver o problema posto

o Universo teria uma idade finita.

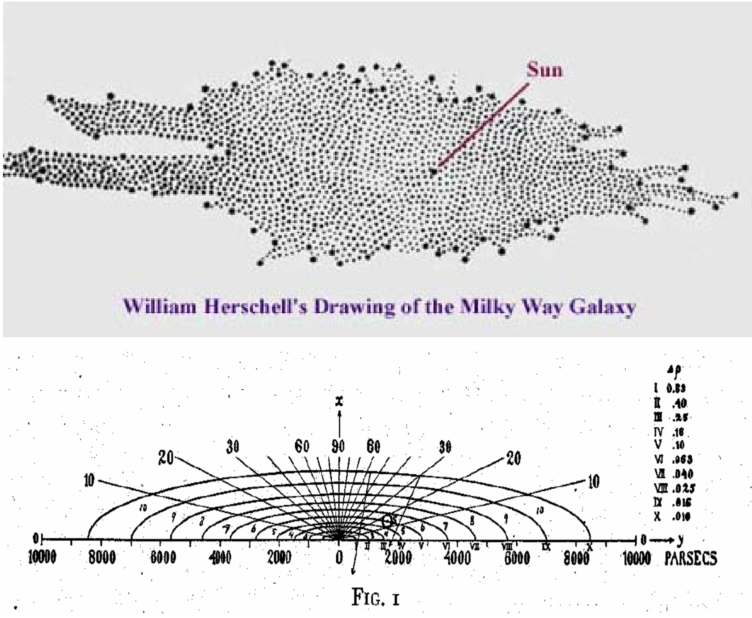


Figura 1.25: Como Herscell fez medidas visuais durante a contagem de estrelas o diagrama mostra aproximadamente o resultado obtido por ele para a distribuição de estrelas através dos Céus. Os resultados principais é que o sistema parece uma lentilha e que o Sol está próximo ao centro da distribuição. Como advento da fotografia, as observações astronômicas chagam a um novo patamar. Pode-se guardar as observações e refazer a medida sem a necessidade da subjetividade do observador. Kapteyn refaz o trabalho dos Herschel's de uma maneira mais sistemática. Aqui seu resultado, as curvas de densidade de estrelas segundo as diversas direções (Kapteyn JC 1922). Vale salientar que o próprio Kapteyn sugere possíveis problemas que poderiam afetar as suas medidas. O principal seria a extinção que ainda não havia sido descoberta.

Como resolver este "pequeno" problema cosmológico? O Universo é finito, ou tem uma idade? Ou, ainda seria o Universo finito e com idade?

Além das estrelas e dos aglomerados de estrelas podemos observar nos céus outros objetos que chamam a atenção. Parte destes objetos tem uma aparência espiral o de uma espiral em perfil, uma outra parte tem aprarências irregulares. Um destes objetos que chamam a atenção é a conhecida "Andromeda" que aparece nos céus do hemisfério Sul e seu tamanho aparente é duas vezes maior do que o tamanho aparente da Lua.

Considerando que quando a Via Lactea foi observada por telescópios pode-se perceber que a luminosidade leitosa era na realidade montes de estrelas fracas muito próximas umas das outras, pode-se conjecturar que tais objetos possam ser também aglomerações de estrelas. A aparência de discos em várias inclinações sugere rapidamente que tais objetos possam ser parecidos com a Galáxia.

A partir da idéia de que objetos, naturais, semelhantes não difiram horrendamente um do outro em tamanho, então aquelas estruturas deverão ter tamanhos próximos ao tamanho da Galáxia. Isto implicaria numa enorme distância entre estas "ilhas" de estrelas.

Daí parte a necessidade de determinar a distância a estes objetos intrigantes. Assim se pudermos utilizar a técnica de medida de distância por meio das estrelas variáveis teremos primeiro de identificar estrelas isoladas nestes objetos, e, ainda mais, encontrar estrelas variáveis adequadas. Isto implica em obter-se telescópios cada vez maiores, e com o custo associado.

Herschel tentou determinar o tamanho e a forma do sistema de estrelas observável usando uma técnica que ele prórpio chamou de *contagem de estrelas*. Esta trabalhosa técnica consistia em contar o número de estrelas que ele podia observar em sucessivos limites de brilho aparente em 683 diferentes direções dos Céus. Ele assumiu que todas as estrelas tinham aproximadamente o mesmo brilho intrinseco; que elas estavam arranjadas de maneira aproximadamente uniforme através do corpo da Via Lactea e que ele poderia ver todas as estrelas até a borda do sistema de estrelas. Com base nestes presupostos, ele pode mapear a distribuição de estrelas na Via Lactea e concluiu que o Sol deveria estar bem próximo do centro da distribuição de estrelas e que esta distribuição era aproximadamente plana onde a razão de aspecto seria de $5:1$ entre o plano e a direção perpendicular. Como Herschel não tinha como medir a luminosidade intrinseca das estrelas que ele observava, ele foi incapaz de dar um número absoluto da escala do tamanho do sistema de estrelas.

Para refinar tal estudo, o Prof. Jacobus Kapteyn decidiu estudar o sistema por meio de placas fotográficas. Assim ele teve de coletar uma imensa quantidade de informações e da colaboração de uma grande quantidade de astronomos através do mundo observando 200 áreas selecionadas através dos Céus. Ele utilizou a mesma técnica de contagem de estrelas, mas acrescentou também os pequenos deslocamentos na posição aparente, o movimento próprio, ao longo do ano. Ele também anotou o espectgro as estrelas parea determinar seus tipos estelares e as velocidades ao longo da direção de visada (a partir do deslocamenteo doppler das linhas características do espectro). A partir da análise dos movimento próprios, Kapteyn foi capaz de estimar as distâncias médias das estrelas em vários níveis de brilho aparente e da contagem de estrelas ele inferiu a distribuição tridimensional das estrelas no espaço.

A figura final, atualemnte conhecida como Universo de Kapteyn, que emergiu estava em acordo com o trabalho de Herschel e localizou o Sol próximo ao centro de uma distribuição aproximadamente esferóide oblata que se extendia 5 vezes ao longo do plano que na direção perpendicular e ligeiramente fora do plano. Ele também demonstrou que a densidade de estrelas caia uniformemente com a distância ao centro da Via Lactea. Mais ainda, Kapteyn foi capz de usar os dados de movimento próprio e estabelecer a primeira estimativa da escala de tamanho de Vai Lactea: ele concluiu que a densidade caia a metade do seu maior valor em um raio de 800 pc ao longo do plano, o que significa que na direção perpendicular a distância que a densidade cairia a metade seria de $800/5 \sim 150$ pc. No plano a densidade cai a 10% em um raio de 2800 pc e a 1% em um raio de 8500 pc.

A análise de Kapteyn colocou o Sol ligeiramente fora do plano

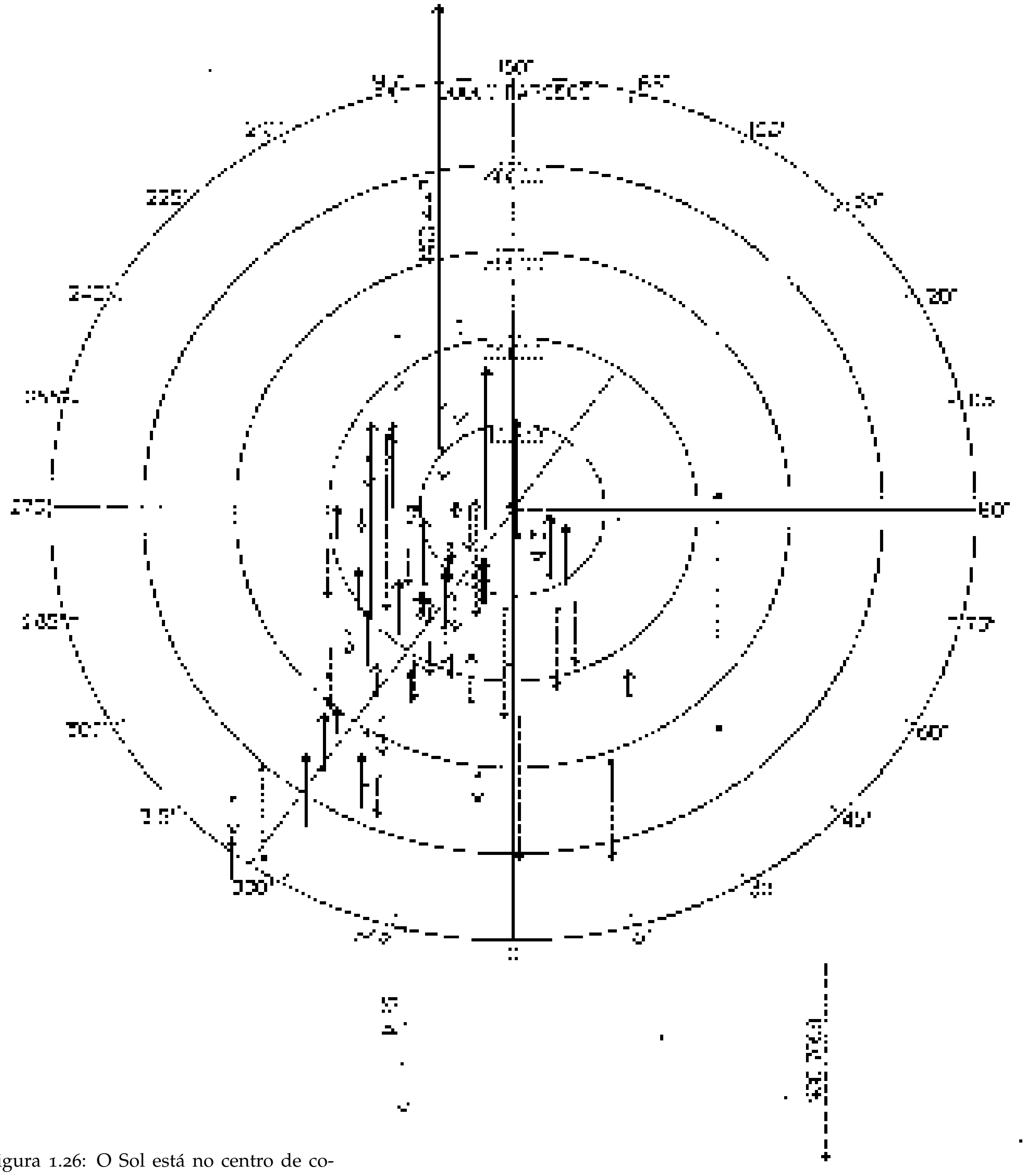


Figura 1.26: O Sol está no centro de coordenadas e os aglomerados globulares estão localizados nas extremidades das setas indicadas. Quão mais extensa é a seta mais distante este aglomerado está do plano galático. Pode-se perceber claramente a direção de maior densidade de aglomerados, em 325°.

da Via lactea a uma distância de 650 pc. Isto proporcionava uma descobfortável aparência heliocentrica ao Universo de Kapteyn. Menos de 10 % de todas as estrelas neste modelo estaria mais distantes do que 700 pc do centro da Via Lactea. E presumindo que poderiamos ter evoluído em qualquer estrela da galáxia, a estatistica indicaria que seria pouco provável que estivessemos tão próximos do centro. *** rever este comentário.

Harlow Shapley trabalhou no estudo detalhado de aglomerados globulares. Estes sistemas aproximadamente esféricos, originalmente classificados como nebulosos tornaram-se resolvidos por telescópios em agragados de dezenas de milhares a milhÕes de estrelas. Diferente das estrelas da Via Lactea, os aglomerdos globulares não estavam restritos a estreita faixa do plano da galáxia, mas distribuídos sobre os Céus inteiramente. Entretanto, Shapley demonstrou que a distribuição não era uniforme, a despeito do quase igual número de aglomerados em cada lado do plano galático, eles não estavam uniformemente distribuídos em longitude. Ao invés havia uma predominancia, uma marcada concentração destes na direção das grandes nuvens de estrelas de Sagitário que definem a secção mais brilhante da Via Lactea.

Shapley argumentou que os aglomerados globulares massivos deveriam ser uma parte maior da estrutura da Via Lactea, e dever-se-ia esperar que o centro desta distribuíção conincidisse com o centro da Via Lactea. A grande assimetria na distribuição de aglomerados globulares implicaria então que nós não estamos próximos do centro da Via Lactea, em flagrante contradição com a análise de Kapteyn.

Shapley tentou determinar as distâncias aos aglomerados globulares usando o brilho aparente de estrelas variáveis, cujas luminosidades intrinsecas eram conhecidas, e do tamanho e do brilho de cada aglomerado como um todo (assumindo que estes teriam tamanhos e brilhos integrados comparáveis). Com base nestas hipóteses, Shapley concluiu que o Sol deveria estar a 15 kpc do centro da distribuição de aglomerados, presumindo então que era o centro da Via Lactea.

Assim Shapley constroe um imagem da Via Lactea radicalemte diferente do Universo de Kapteyn. Shapley foi ainda mais longe estimando que o sistema de aglomerados tinha aproximadamente 100 kpc de tamanho, aproximadamente 10 vezes maior que o Universo de Kapteyn.

diagramas de shapley (ver artigos originais, verificar detalhes a serem acrescidos: zone of avoidance)

Shapley ainda sugere que a analise de Kapteyn captura uma concentração local de estrelas que está aproximadamente centrada no Sol, mas o sistema de estrelas como um todo estaria mais além próximo do centro da distribuição de aglomerados. Até certo ponto este argumento é verdadeiro pois o Sol está aproximadamente perto do centro de um aglomerado local disperso conhecido como *Cinturão de Gould*.

1.11. Grupo Local de Galáxias

Os estudos para se compreender o que são as estrelas passavam pela idéia que podendo relacinar as observáveis entre si poder-se-ia obter informações sobre os mecanismos que estavam em ação no interior das estrelas. Um exemplo cotidiano disto pode

Nome do Grupo	n	δ (Mpc)	V (km/s)	Tamanho		Posição		
				D	d	X	Y	Z
Scl	6	2.4	220	1.0	0.8	+0.1	-2.4	-0.2
M81	9	2.5	160	1.8	0.9	+1.8	+1.7	+0.0
CVn I	9	3.8	342	1.9	0.9	+0.5	+3.8	+0.2
NGC 5128	5	4.0	319	2.1		-3.8	+1.3	-0.4
M101	8	4.6	508	1.8	1.3	+1.8	+3.8	+1.7
NGC 2841	4	6.0	589	1.6	0.8	+3.7	+4.4	-1.6
NGC 1023	8	6.3	625	2.2	1.1	+5.9	-1.9	-1.0
NGC 2997	2	7.6	534	1.9	1.1	-3.0	+3.1	-6.3
M66	5	7.6	592	1.0	0.6	-0.9	+7.1	-2.4
CVn II	15	8.0	747	3.0	1.6	+2.4	+7.7	+0.3
M96	9	8.3	741	1.6	1.0	-0.7	+7.4	-3.6
NGC 3184	4	9.6	629	1.7	0.8	+4.0	+8.4	-2.7
Coma I	15	9.6	944	1.8	0.8	+0.1	+9.5	+0.5
NGC 6300	3	10.0	1270	1.7	0.6	-9.5	-2.7	+1.6

Tabela 1.2: Grupos de galáxias até 10 Mpc onde os principais valores a serem percebidos é a distância δ e a velocidade radial V. Note também o número de membros de cada grupo (de Vaucouleurs 1975).

ser associado, considere uma barra de metal colocada em uma fogueira, quando esta barra estiver brilhando com uma cor avermelhada, esta barra estará "quente" (a uma certa temperatura), mas se abarra estiver com uma coloração mais amarelada, ou mesmo esbranquiçada, isto significa que a barra estará ainda mais "quente" (a uma temeratura ainda maior do que quando estava avermelhada). Isto significa que existe uma correlação entre o brilho da barra com a sua temperatura.

A medida em que se fazia crescer um catálogo de estrelas, que nada mais é do que uma tabela de dados das estrelas, contendo, para cada estrela, a sua distância (pela paralaxe trigonométrica), sua temperatura (pela razão do brilho entre o azul e o vermelho), sua potência (brilho total aparente e conhecendo-se a distância), bem como outras propriedades, percebeu-se que algumas das estrelas não possuiam um brilho que fosse representado por um número somente. Estas estrelas tinham um brilho variável, ora brilhavam mais ora menos, e foram portanto chamadas de *estrelas variáveis*. Para estas estrelas mais uma entrada no catálogo teve de ser efetuada, o período de variação de brilho.

Comparando-se o período do brilho da estrela com as outras propriedades físicas do catálogo percebe-se que quanto mais brilhantes, em potência absoluta, não a aparente, elas o forem maior será o período de sua variabilidade. Assim os valores numéricos foram dispostos em um diagrama, tal como o da figura **??**, para verificar se haveria alguma correlação entre as duas propriedades físicas: o período e o brilho. No referido diagrma percebe-se que os pontos não estão distribuídos ao azar, mas sobre uma "linha" bem determinada. ISto significa que mesmo não sabendo qual o real mecanismo por trás desta característica da Natureza, podemos utilizar este diagrama para medir a distância às estrelas, que não sabemos a distância, conhecendo-se seu período de variabilidade. Claro que se a estrela não possuir tal variabilidade, tal técnica não pode ser utilizada.

Uma vez percebida a relação *período-luminosidade* podemos determinar a distância às estrelas variáveis e de suas companheira próximas, caso tenhamos a certeza de sua proximidade.

Observando-se a distribuição das estrelas nos céus, com mais cuidado do que somente perceber a existência da Via-Lactea, podemos perceber que existem aglomradmentos de estrelas tais como os da figura **??**. Bem provavelmente o aglomeramento deve ter a gravitação como causa e portanto estas estrelas deverão estar próximas em distância e não somente em posição aparente. Se soubermos a distância a uma das estrelas do aglomerado teremos uma boa noção da distância ao aglomerado ele próprio. Tal idéia esta esboçada na figura **??**, conhecendo-se o período de variabilidade sabe-se qual deverá ser o valor de seu brilho. A diferençaentre o brilho observado e o que deveria ser o brilho absoluto deve estar associado a distância à estrela.

os grupos mais próximos do grupo local

1.12. Cartografia do Universo

Quando se explora dados novos podemos ser surpreendidos pelas possíveis consequências imprevistas destas explorações. Quando correlacionamos anteriormente as distâncias planetárias com os períodos orbitais pode-se obter aquilo que nós conhecemos hoje como teceira lei de Kepler.

Durante os estudos a respeito das distâncias aos objetos extragaláticos, obtidos para aglomerados e galáxias um outro número saltou aos olhos. Quanto mais distante maior era a velocidade radial em relação à nossa galáxia. Este resultado é surpreendente pois movimentos aleatórios deveriam ter velocidades aleatórias.

Imagine uma grande caixa contendo átomos de um gás. Estando parado em algum lugar dentro deste gás, a medida da velocidade das outras moléculas seria estatisticamente iguais

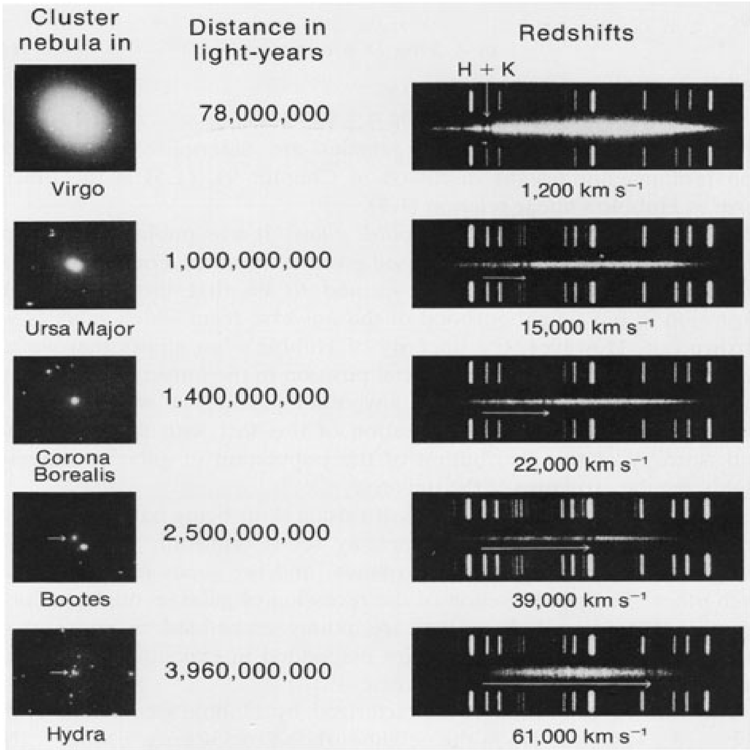
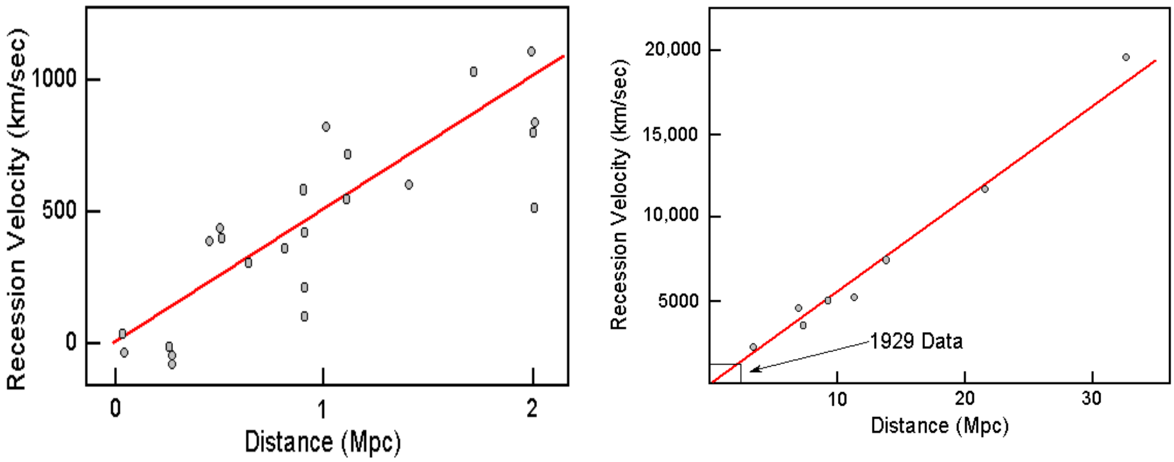


Figura 1.27: Na luz que nos chega das galáxias podemos perceber excesso de energia e faltas de energia em certos comprimentos de onda. Estes excessos e faltas são conhecidas como linhas de emissão e de absorção. Mesmo quando observamos a luz de uma galáxia em que não é possível separar as estrelas isoladamente, estas linhas continuam presentes. Entre as linhas facilmente identificáveis são as linha conhecidas pelas letras 'H' e 'K'. Estas linhas tem um comprimento de onda bem definido, mas devido ao movimento da fonte estas linhas são observadas em outro comprimento de onda. Isto é conhecido como deslocamento Doppler. Com este deslocamento podemos portanto determinar a velocidade das galáxias em relação a nós.

em diferentes posições dentro desta caixa. É claro que se estivessemos nos movimentando dentro deste gás, sendo um dos átomos, mediriamos o mesmo grupo de velocidades em torno de um valor associado a nossa velocidade em relação àquele volume. Mas se considerarmos um volume simetricamente oposto ao primeiro, a contribuição do nosso movimento teria um sinal oposto.

O que Hubble percebe é algo extremamente diferente. Mesmo em direções opostas a possível contribuição do nosso movimento não tem sinal oposto. Isto só poderia acontecer se estivessemos no centro do movimento, de um movimento de afastamento. Ainda pior, como que no centro de uma explosão, mas

Figura 1.28: Além da medida da distância das galáxias os astronomos também efetuam outras medidas de propriedades físicas destas galáxias para podemos compreender o que elas são e como evoluem. Quando se observa os valores numéricos das velocidades radias das galáxias percebe-se que aquelas mais distantes tem um valor de velocidade radial cada vez maior (Hubble 1929, Hubble & Humason 1931). Esta relação que se verificou surpreendentemente linear é conhecida hoje como a Lei de Hubble.



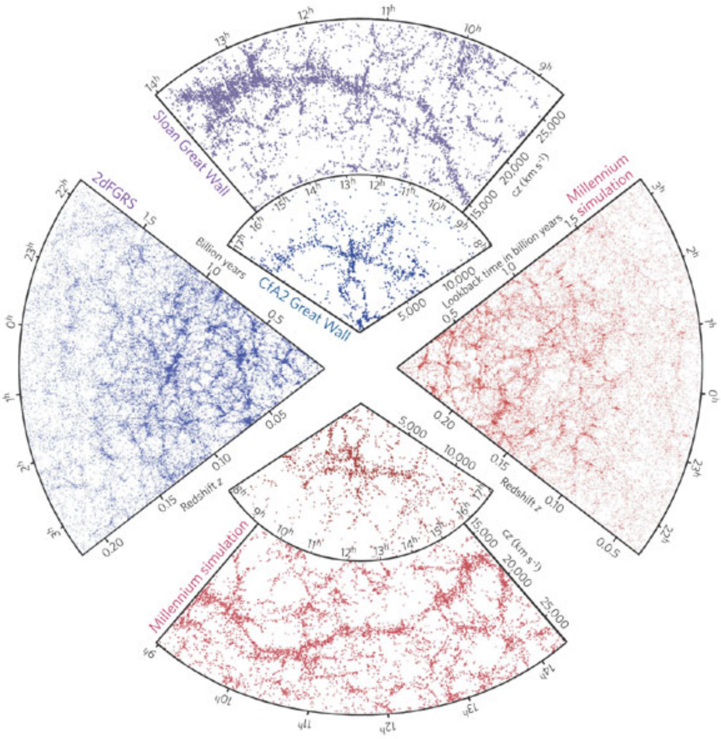


Figura 1.29: Mosaico de resultados de procuras espectroscópicas e feições obtidas por simulações numéricas. Em azul a pequena fatia temos a Grande Muralha da procura CfA2, com o aglomerado de Coma no centro. Na mesma escala temos uma sessão do SDSS em que pode-se identificar uma Grande Muralha ainda maior Esta é a maior estrutura do Universo até agora identificada contendo mais de 10000 galáxias extendendo-s por mais de 1,37 bilhões de anos-luz. O cone a esquerda temos a procura do 2ndFGRS com mais de 220000 galáxias do hemisfério Sul, com uma profundidade de mais de 2 bilhões de anos-luz. A direita e em baixo temos simulações efetuadas pelo projeto Millennium, nas mesmas escalas e geometrias para comparação (Springel, Frenk & White 2006).

que objetos mais distantes tem uma velocidade ainda maior. Proporcionalmente maior (Hubble 1929, Hubble & Humason 1931).

Este resultado surpreendente é conhecido como "Lei de Hubble".

Uma consequência direta da proporcionalidade, uma lei linear, é que quando retornamos ao passado, o tempo de vôo de um objeto a uma certa distância tem um valor bem determinado mas outro objeto que está ao dobro da distância tem o mesmo tempo. Isto seria com que todos os objetos extragaláticos tenham nossa Galáxia como origem de seu movimento, todos a partir do mesmo instante. Como se fosse uma explosão, uma gigantesca explosão.

Esta visão é tão surpreendente que Fred Hoyle, defensor de um Universo estático, em um programa de radio em 1949, ironizou afirmando que a Lei de Hubble implicava num "Big Bang".[5]

Se adotarmos a Lei de Hubble, que a velocidade radial pode nos dar uma idéia da distância às galáxias, podemos efetuar uma cartografia do Universo observável. Existe um importância nesta cartografia pois ela restringe as possíveis teorias da formação do Universo, pois todas as irregularidas na distribuição das galáxias decorre que flutuações das massas originais, ou pelo menos daquilo que se tornaria a massa.

As primeiras procuras permitiram encontrar concentrações de galáxias tão grandes que foram nomeadas a "Grande Muralha".

[5] O termo "Bang" é muito utilizado em desenhos animados para representar um tiro. Então o termo Big Bang, usado por Hoyle, associa o bang ao estouro de um traque (uma pequena bombinha com poucas gramas de polvora, muito usadas em festividades) poderia ser traduzido por Grande Explosãozinha. É claro que até amorte ele negou a ironia (Croswell 1995, Milton 2005).

A consequência direta deste tipo de concentração é um impulso gravitacional na região da nossa Galáxia na direção desta estrutura.

Procuras posteriores, ainda mais profundas, trouxeram a descoberta de uma "Grande Muralha" ainda maior. Realmente o Universo observável é grande o suficiente para que pudesse existir estruturas maiores do que a "Grande Muralha" original.

Observando os mapas produzidos além das grandes concentrações, que em geral nos chama mais a atenção, temos baixas concetrações. Verdadeiros vazios de galáxias que, do ponto de vista de teoria, são tão importantes quanto as grandes concentrações.

É fácil compreender que com o impulso gravitacional mais e mais galáxias se aglomerem nos grandes filamentos observados, mas os vazios são muito vazios. Isto restringe as idades possíveis para o Universo.

1.13. Referências

Croswell K (1995): *The Alchemy of the Heavens*, Anchor Books

Hubble E (1929): *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, Contributions from the Mount Wilson Observatory **3**:23-28

Hubble E & Humason ML (1931): *The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae*, The Astrophysical Journal bf 74:43

Kapteyn JC (1922): *First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sideral system*, The Astrophysical Journal **55**:302

Marshack, A. (1970): *Notation dans les Gravures du Paléolithique Supérieur*, Bordeaux

Mitton S (2005): *Fred Hoyle: A Life in Science*, Aurum Press

Springel V, Frenk CS & White SDH (2006): *The large-scale structure of the Universe*, Nature **440**:1137-1144

de Vaucouleurs G (1975): *Nearby Groups of Galaxies*, em *Galaxies and the Universe*, ed. A. Sandage, M. Sandage and J. Kristian

Harrison ER (1987): *Darkness at Night: A Riddle of the Universe*, Harvard University Press