EDITORA
UFG – IQG
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

BOLETIM GOIANO DE GEOGRAFIA

PUBLICAÇÃO SEMESTRAL - VOL. 2 Nº 1 - JANEIRO/JUNHO 1982

ISSN 0101-708X

B. Goiano Geogr. 2(1):111-122, jan/jun 1982

DA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS EM ASTRONOMIA

CLAUDIO SOUZA MARTINS (*)

A questão da determinação de distâncias é de fundamental importância em Astronomia, pois só através de distâncias bem determinadas é que podemos ter uma noção da natureza e da evolução do Universo.

São muitos os métodos utilizados nessas medidas, conforme se pretenda estudar o Sistema Solar, a nossa vizinhança estelar, a Galáxia ou o Universo observável, como um todo.

Comecemos pelo Sistema Solar, que é o nosso ambiente astronômico mais restrito.

A terceira lei de Kepler do movimento planetário, publicada em 1618, permitiu a avaliação das distâncias médias relativas dos planetas ao Sol. O seu enunciado é o seguinte:

"Os quadrados dos períodos siderais dos planetas são proporcionais aos cubos das suas distâncias médias ao Sol".

Chegando a a a distância média de um planeta ao Sol; P o seu período sideral; a_T, a distância média Terra-Sol e P_T, o período sideral da Terra, teremos:

$$\frac{a}{a_T^3} = \frac{P^2}{P_T^2}$$

Se tomarmos como unitária a distância média Terra-Sol (conhecida como UNIDADE ASTRONÔMICA) e sendo de um ano o período sideral da Terra, teremos simplesmente:

$$a^3 = P^2$$

(*) - *Professor do Instituto de Química e Geociências Departamento de Geografia e Planetário da UFGo.*

sendo a medida em Unidades Astronômicas e P medida em anos terrestres (anos trópicos).

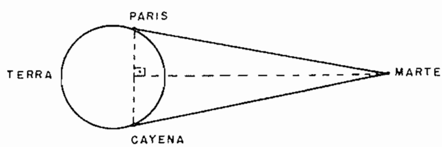
Os períodos siderais dos planetas podem ser facilmente deduzidos das observações e são há muito conhecidos. Pode-se então calcular, em Unidades Astronômicas, as distâncias médias dos planetas ao Sol:

MERCÚRIO	- 0,387	SATURNO	- 9,539
VÊNUS	- 0,723	URANO	- 19,182
TERRA	- 1,000	NETUNO	- 30,058
MARTE	- 1,524	PLUTÃO	- 39,510
JÚPITER	- 5,203		

Permanecia porém, o grande mistério: qual o valor da Unidade Astronômica?

Muitos métodos forma idealizados para calcular esta distância. O primeiro deles foi proposto por Cassini em 1671. Consiste em se fazer observações simultâneas de um mesmo planeta, relativamente próximo, por dois observadores situados em pontos bem afastados sobre a superfície terrestre. A primeira aplicação deste método tomou como base a distância Paris-Cayena, de onde foram feitas as observações do planeta Marte. Conhecida a distância Paris-Cayena e os ângulos medidos pelos observadores, o problema se reduzia à solução de um triângulo retângulo como mostra a figura (1). Esta medida deu para Marte uma distância de 72.563.350,85 km. Sabendo-se que a distância Terra - Marte é de 0,524 UA, pode-se calcular a distância média Terra-Sol: 138.479.967,2 Km.

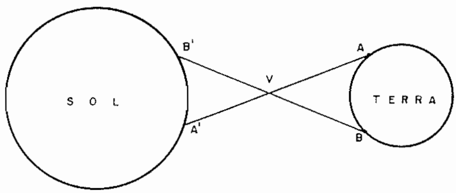
Fig 1

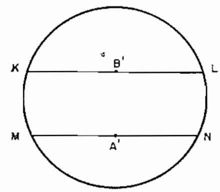


Em 1769, pela primeira vez foi observado um trânsito de Vênus (passagem do planeta na frente do disco solar) com o objetivo de se determinar o valor da Unidade Astronômica.

Dois observadores situados sobre o mesmo meridiano terrestre, em dois pontos A e B, veriam o planeta, projetado sobre o disco solar, em A' e B'. Determinado o afastamento angular entre A' e B', pode-se resolver o triângulo AVB e determinar a distância Terra-Vênus. O afastamento angular entre A' e B' pode ser determinado medindo-se os tempos gastos pelo planeta para percorrer as cordas $\overline{KL}$ e $\overline{MN}$, sabendo-se que Vênus, visto da Terra, percorre no céu cerca de 37' de arco por dia.

Fig 2





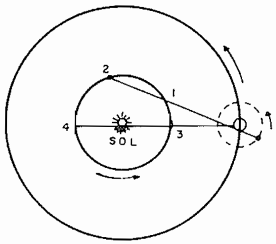
Um terceiro método consiste na observação das ocultações de um satélite de Júpiter. A cada volta que completa em torno do grande planeta, o satélite IO é ocultado pelo disco de Júpiter. Entretanto, em quanto IO completa uma revolução, a Terra também se desloca em sua órbita alterando a sua distância a Júpiter, de tal maneira que para o observador terrestre, o período orbital de IO não é constante.

Suponhamos que no instante de uma ocultação a Terra se encontre na posição 1 em sua órbita - figura (3) e que no instante da ocultação seguinte a Terra já tenha se deslocado para a posição 2. Para o observador terrestre, o período orbital será igual ao período real do satélite mais o tempo gasto pela luz para percorrer o espaço entre os pontos 1 e 2. Naturalmente, se a Terra, em seu movimento de translação, estiver aproximando-se de Júpiter, o período orbital observado será menor do que o real. Assim, através de sucessivas observações, pode-se determinar o verdadeiro período orbital de satélite IO (42 horas e 28 minutos). Agora se fizerem observações com Júpiter em posição (Terra na posição 3) e em conjunção (Terra na posição 4), a diferença de tempo acumulada será de 16 minutos e 38 segundos. Este é exatamente o tempo gasto pela luz para percorrer o espaço entre os pontos 3 e 4, ou seja, o diâmetro da órbita terrestre. Sendo a velocidade da luz de 299.792.5, Km/s a

 B. Goiano Geogr. 2(1):111-122, jan/jun 1982

Unidade Astronômica, isto é, o raio médio da órbita terrestre será de 149.596.457,5 Km.

Fig. 3

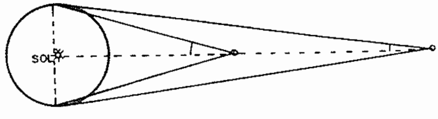


Recentes medidas mais precisas realizadas com o radar dão para a Unidade Astronīmica o valor de 149.600.000 Km.

O ângulo sob o qual, do Sol, se observaria o raio equatorial da Terra é chamado PARALAXE SOLAR.

Conhecido o valor da Unidade Astronômica, tornou-se possível a determinação das distâncias estelares. A medida de paralaxes estelares obedece ao mesmo proncípio utilizado na determinacão da distância de Marte, mas pelo fato das estrelas serem objetos muito mais distantes, é necessário utilizar-se como base, o raio médio da órbita terrestre. Assim, a paralaxe estelar será definida como sendo o angulo sob o qual, da estrela, ver-se-ia o raio médio da órbita terrestre.

Fig. 4



Da figura (4) pode-se deduzir que a paralaxe é tanto menor quanto maior for a distância da estrela. Existe então, um limite confiável para a medida de paralaxes trigonométricas, além do qual, os erros cometidos pelos instrumentos tornam-se demasiadamente grandes.

Para as distâncias estelares, a unidade mais usada é o ANO-LUZ, que é a distância percorrida pela luz durante um ano. Equivale a 9.460.800.000.000 Km. É muito comum utilizar-se o PARSEC que é a distância de uma estrela que tivesse uma paralaxe de 1" (1 segundo de arco). Equivale a 3,26 anos-luz.

A estrela mais próxima do Sol (alfa Centauri) está a 4,3 anos-luz e tem uma paralaxe de apenas 0",76. Uma estrela que estivesse a 10 parsecs teria uma paralaxe de 0",1. A uma distância de 100 parsecs corresponderia uma paralaxe de 0"01. Pode-se então perceber o grau de dificuldade para se medir ângulos tão peouenos. Porisso, o método das paralaxes trigonométricas só pode ser utilizado com um bom grau de confiança, para as vizinhanças do Sol, no máximo, dentro de um raio de 50 anos-luz.

Os dois métodos trigonométricos mencionados são denominados: Paralaxe Diurna (no caso de Marte) e Paralaxe Anual (para as estrelas). Em se tratanto de estrelas muito distantes, pode-se lançar mão da Paralaxe Secular que leva em consideração o movimento que o Sol realiza em relação à sua vizinhança estelar, com uma velocidade de 19,5 Km/s, na direção de um ponto imaginário na constelação de Hércules, denominado ÁPEX. Com esta velocidade, em 10 anos o Sol percorre mais de 6 bilhões de Km. É preciso considerar porém, que durante este tempo a estrela cuja distância se pretende medir, também já se deslocou no espaço, com sua velocidade própria, donde a complexidade do método.

Métodos estatísticos são também utilizados para se determinar as paralaxes de estrelas de uma mesma classe de magnitudes.

A paralaxe estatística teve uma importante função no conhecimento das dimensões da nossa galáxia e das distâncias das galáxias mais próximas.

Por volta de 1912, Leavitt Henrietta, fazia observações de uma determinada classe de estrelas variáveis chamadas

CEFEIDAS, na grande Nuvem de Magalhães. As Cefeidas são estrelas variáveis de períodos regulares entre 1 e 50 dias. O seu nome deriva da estrela delta da constelação do Cefeu (delta Cephei), a primeira do tipo a ser estudada. Nesses estudos , "*miss*" Leavitt fez uma importante descoberta: "*As estrelas cefeidas de mesmo período de pulsação têm a mesma luminosidade , ou a mesma magnitude absoluta*". Este fato é conhecido como RELAÇÃO PERÍODO-LUMINOSIDADE.

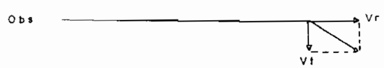
Os períodos das estrelas variáveis podem ser bem determinados, juntamente com suas magnitudes aparentes, através do fotômetro foto-elétrico. Entretanto, para se conhecer a magnitude absoluta de uma estrela, precisamos saber a sua distância, já que a magnitude absoluta é definida como sendo a magnitude aparente que a estrela teria se estivesse a uma distância de 10 parsecs. Se se pudesse conhecer as distâncias de algumas variáveis cefeidas, poder-se-ia determinar a distância da grande Nuvem de Magalhães.

Naquela mesma época, Harlow Shapley já havia afirmado que os aglomerados globulares (grandes sistemas estelares formados por milhares de estrelas e de forma esférica) distribuem-se esfericamente em torno do centro da galáxia, podendo, através desta descoberta, afirmar que este centro se encontra na direção da constelação do Sagitário. A observação de variáveis cefeidas nos aglomerados globulares também permitiria calcular as distâncias destes aglomerados e do centro da galáxia.

Não existe, porém, nenhuma cefeida próxima o suficiente para se determinar a sua paralaxe trigonométrica. Era necessário lançar mão de métodos estatísticos. Para tanto, era imprescindível a observação dos movimentos próprios de variáveis cefeidas nos braços espirais da galáxia, por serem as mais próximas.

Os movimentos próprios das estrelas apresentam-se, para nós, projetados sobre o fundo do céu e decomposto em duas componentes ortogonais como mostra a figura (5). Há uma componente transversal, onde a velocidade é diretamente medida em unidades de arco por segundo (radianos por segundo). Para se conhecer o valor desta velocidade em unidades lineares por segundo (km/seg) é preciso saber a distância da estrela. A segunda componente é radial, isto é, encontra-se na direção da linha de visada do observador, e é diretamente medida em Km/seg, através do efeito Doppler-Fizeau observado, utilizando-se o espectrógrafo.

Fig 5



Vemos então, que só a velocidade transversal em Km/s poderia informar sobre a distância da estrela. Esta porém não era conhecida.

O método utilizado para se resolver o problema foi, sinteticamente o seguinte:

Os movimentos próprios das estrelas não possuem direções preferenciais no espaço, isto é, há estrelas se deslocando em todas as direções. Baseados neste fato, podemos afirmar que, para uma grande amostra de cefeidas de mesmo período, " *em média*", as componentes radiais são iguais às componentes transversais. Como as componentes radiais são conhecidas em Km/s, a média das transversais ficava também conhecida em Km/s. De posse das componentes transversais em radianos/seg, é possível calcular a distância média para aquela amostra de estrelas. Se chamarmos de $\overline{d}$ a esta distância média e $\overline{m}$, a magnitude aparente média das cefeidas em questão, a sua magnitude absoluta pode ser calculada pela expressão:

$$M = \overline{m} + 5 - 5 \log \overline{d}$$

Conhecidas as magnitudes absolutas correspondentes a vários períodos de cefeidas, pode-se determinar as distâncias da grande Nuvem de Magalhães, dos aglomerados globulares e do centro da galáxia.

Alguns erros foram cometidos, devido principalmente a dois fatores:

a) não se levou em consideração o fato de que o meio interestelar absorve a luz das estrelas, alterando as medidas das suas magnitudes aparentes;

b) as cefeidas dos braços espirais da galáxia diferem profundamente daquelas dos aglomerados globulares. As primeiras são ditas de População I, estrelas mais jovens, com uma acentuada abundância de elementos pesados; as segundas, de População II, estrelas mais velhas, compostas quase que exclusivamente de hidrogênio e hélio. A relação Período-Luminosidade não é a mesma para as duas populações estelares.

Estabelecidas as diferenças e efetuadas as correções, aceita-se hoje, a distância do centro da galáxia como sendo de 10 kiloparsecs.

A construção de telescópios maiores permitiu a observação de cefeidas em galáxias vizinhas como a de Andrômeda e a consequente determinação de suas distâncias. Aceita-se, para a galáxia de Andrômeda a distância de 2.200.000 anos-luz.

Naturalmente, a determinação de distâncias galáticas através da relação Período-Luminosidade, fica restrita às vizinhanças da Via-Láctea por óbvias limitações observacionais. Praticamente, os nossos telescópios atuais só conseguem revolver estrelas nos membros do nosso aglomerado galático conhecido como GRUPO LOCAL, composto por 19 galáxias, incluindo a pequena e a grande Nuvem de Magalhães que são galáxias satélites da Via-Láctea.

Em 1929, Edwin Hubble, analisando os espectros luminosos de galáxias, descobriu uma importantíssima relação entre estes espectros e as distâncias galáticas. Na verdade, o observado por Hubble , foi o fato de que as galáxias de menor brilho aparente (ou maior magnitude aparente) apresentavam, para o vermelho, se interpretado como efeito Doppler-Fizeau, diz-nos que as galáxias se afastam de nós, com velocidade proporcionais às suas distâncias.

O espectro luminoso de um astro apresenta raias verticais brilhantes (raias de emissão) e escuras (raias de absorção), cujos comprimentos de onda podem ser bem determinados e que representam diversas das características físicas e químicas do astro. Este espectro pode ser comparado com padrões de laboratório para se medir os desvios para o vermelho ou para o azul conforme o astro esteja, respectivamente, se afastando ou se aproximando de nós. Se chamarmos de l_p, o comprimento de onda da raia padrão e l_o, o comprimento de onda da raia observada, o efeito Doppler-Fizeau é calculado pela expressão:

$$z = \frac{l_p - l_o}{l_p}$$

"z" será positivo se o desvio for para o vermelho (afastamento) e negativo se o desvio for para o azul. A velocidade radial do astro é calculada por:

$$v = c.z$$

onde "c" é a velocidade da luz (299.792,5 Km/s).

Esta relação só é válida para pequenas velocidades. Para velocidades próximas da velocidade da luz, o desvio " z " é calculado pela expressão relativística:

$$z = \frac{(1 - v^2/c^2)^{1/2}}{1 - v/c}$$

donde

$$v = \frac{(z^2 + 1)^2 - 1}{(z^2 + 1)^2 + 1}$$

Se "D" é a distância da galáxia e "v" a sua velocidade de recessão calculada através do desvio para o vermelho observado, a lei de Hubble nos diz que:

$$v = H.D$$

onde "v" é medido em Km/s, "D" em megaparsecs e "H" é a constante cujo valor é atualmente aceito como sendo de 55 Km/seg por megaparsec.

Assim, conhecendo a velocidade de recessão da galáxia e o valor da constante de Hubble, podemos facilmente calcular a distância da galáxia.

A lei de Hubble tem uma importante consequência cosmológica: o Universo se acha em expansão! Esta conclusão vem em apoio à teoria defendida por Lamaitre e Gamow, de que o Universo, tal como o vemos na atualidade, teria começado a partir da explosão de uma única célula material que Lemaitre chamou de " *ÁTOMO PRIMITIVO*" e Gamow de *"OVO CÓSMICO"*.

Segundo George Gamow, esta explosão teria ocorrido a cerca de 10 bilhões de anos e que a energia remanescente teria atualmente uma temperatura de corpo negro de 3ºK (esta é uma temperatura equivalente que nos diz que um corpo negro - um radiador perfeito - que estivesse aquecido a uma temperatura absoluta de 3ºK, radiaria aquela mesma quantidade de energia).

Recentes pesquisas radioastronômicas revelaram que o cosmos possui uma radiação de fundo da ordem de 2,7ºK. Este fato, ao lado do acentuado desvio para o vermelho observado nos espectros das galáxias mais distantes, apoiam firmemente a teoria da expansão do Universo.

Entretanto, por volta do ano 1960, a descoberta de intensas fontes de rádio de aspectos *"quase estelares"* vieram questionar esta teoria e até mesmo colocar em xeque os fundamentos da mederna Cosmologia. Os mais conhecidos destes objetos são chamados: 3C-273, na Virgem; 3C-48, no Triângulo e 3C-147 , no Cocheiro. A designação 3C refere-se ao *"Third Cambridge Catalogue of Radio Sources"*, publicado pela Royal Astronomical Society, em 1959.

Estes objetos, conhecidos como QUASARS, têm como características principais, o acentuado desvio para o vermelho e altíssimas luminosidades. Se, cosmologicamente, o desvio para o vermelho reflete a distância de um objeto de características galáticas, os Quasars devem ter dimensões de supergaláxias, considerando seu grande brilho aparente. Por outro lado, estes estranhos objetos apresentam variações luminosas como períodos da ordem de um ano (já se registrou períodos menores em alguns Quasars). Ora, uma supergaláxia deve ter um diâmetro de pelo menos 300.000 anos-luz. Isto quer dizer que a luz gasta para atravessá-lo, 300.000 anos. Como pode um objeto dessas dimensões, variar todo o seu brilho em apenas um ano, ou menos? Parece impossível relacionar os dois fatos.

Com velocidade de afastamento de dezenas de milhares de Km/seg, não se poderia supor que os Quasars fossem objetos componentes da nossa galáxia, já que as estrelas mais velozes que se conhece, deslocam-se a velocidades de, apenas algumas poucas centenas de Km/seg. Além disso, muitas dessas estrelas aproximam-se de nós e isso não se verifica com nenhum Quasar (já se conhecem milhares deles).

Pode-se interpretar o desvio para o vermelho como sendo um efeito gravitacional causado por objetos de grandes massas e densidades. Se r_g e M_g são respectivamente, o raio e a massa de uma galáxia, o desvio gravitacional é calculado pela fórmula:

$$Zg = \frac{GM_g}{r_g c2}$$

onde "G" é a constante de gravitação e "c" a velocidade da luz.

Para uma galáxia típica, $z = 10^{-7}$... (0,0000001). Consideremos o Quasar 3C-273 cujo desvio para o vermelho é 0,158. Levando este dado à expressão do desvio gravitacional, encontramos que a sua relação massa-raio deveria ser de $2x10^{27}$g/cm. Se levarmos em conta que este Quasar deve ter pelo menos 1 ano-luz de diâmetro para se explicar a pulsação observada, a sua massa deveria ser da ordem de 500 bilhões de massas solares e a sua densidade da ordem de 960 bilhões de estrelas por cada ano-luz cúbico. Comparemos com a nossa galáxia. A sua massa é estimada em 100 bilhões de massas solares. Concentrando toda essa massa no seu núcleo de 10.000 anos-luz de raio, a sua densidade deve ser de 0,025 estrelas por ano-luz cúbico.

Podemos concluir que se o desvio para o vermelho fosse exclusivamente gravitacional, este quasar seria um objeto extremamente compacto. Objetos dessa natureza não têm estabilidade e tendem ao colapso gravitacional, o que o transformaria num buraco negro e, consequentemente, ele não poderia ser visto. Além disso, se tivesse um ano-luz de diâmetro, com a magnitude aparente que nos apresenta (12,8), o 3C-273 deveria estar muito mais próximo do que o calculado através da lei de Hubble (3 bilhões de anos-luz).

B. Goiano Geogr. 2(1):111-122, jan/jun 1982

Qual é a natureza dos Quasars? Este é um desafio que talvez venha exigir uma exaustiva e profunda revisão da Astronomia e da Física modernas.