



AGA 299 – IAG/USP
Ronaldo E. de Souza
Fevereiro, 2025

1. Perspectiva Histórica



As primeiras tentativas de descrever a nossa Galáxia nasceram com o surgimento da nossa civilização. Mas somente a partir dos anos de 1700 é que os conceitos amadureceram o suficiente para fundamentar o nosso conhecimento científico atual.

Thomas Wright
Via Láctea como um disco

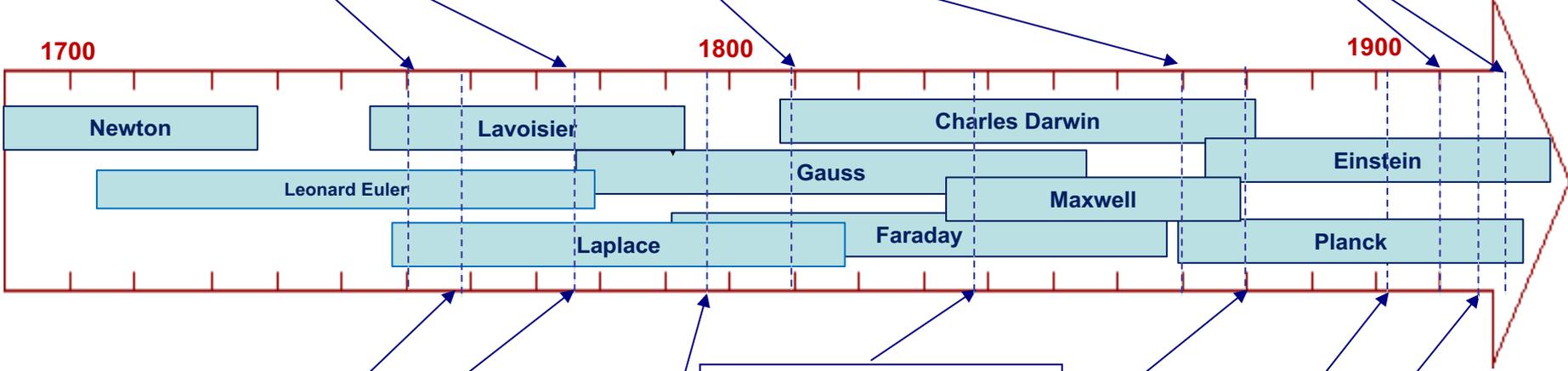
Lorde rosse
Imagens visuais das nebulosas

V. Slipher
Primeiras medidas de velocidades radiais das galáxias

W. Herschel
Modelo da Galáxia a partir de contagens de estrelas

W. Huggins
Identificação das linhas de emissão das nebulosas

E. Hubble
Distâncias das galáxias mais próximas



I. Kant
Universos ilhas como discos achatados

W. Herschel
Morfologia dos objetos do catálogo de Messier

P. Laplace
O Sistema do Mundo, hipótese nebular

J. Fraunhofer
Telescópio acromático, espectrógrafo

J. L. E. Dryer
New General Catalog (NGC)

H. Leavitt
Relação período-luminosidade

Shapley & Curtis
O Grande debate

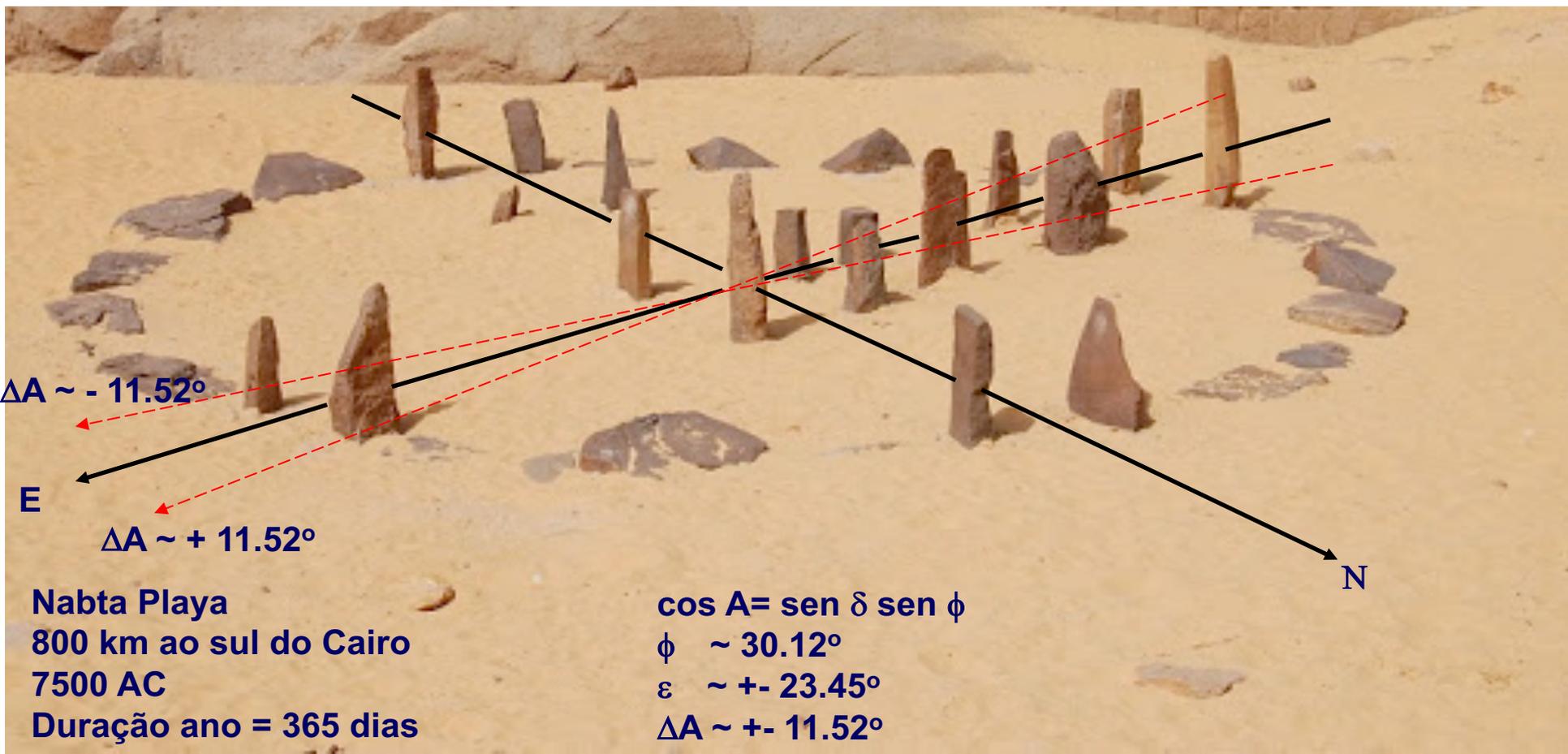
Linha do tempo

Tópicos

- **1.1 Galileu, Thomas Wright e Kant**
- **1.2 William Herschel**
- **1.3 Pierre Laplace**
- **1.4 Lorde Rosse**
- **1.5 William Huggins**
- **1.6 Henrietta Leavitt**
- **1.7 O Grande Debate**
- **1.8 Edwin Hubble**
- **1.9 ...e a vida continua**
- **1.10 Problemas**

1.1 Galileu, Thomas Wright e Kant

Os primeiros registros de observações astronômicas dos povos que ocuparam a planície do rio Nilo é anterior a 7500 AC. No sítio arqueológico de Nabta Playa percebe-se a construção de praças destinadas a observar as estrelas, os nossos primeiros observatórios, e elaborar um calendário fundamental para explorar a agricultura. Portanto, eles se orientavam, conheciam as variações do movimento diurno das estrelas mais brilhantes, sabiam a duração do ano (365 dias) e reconheciam a via Láctea.





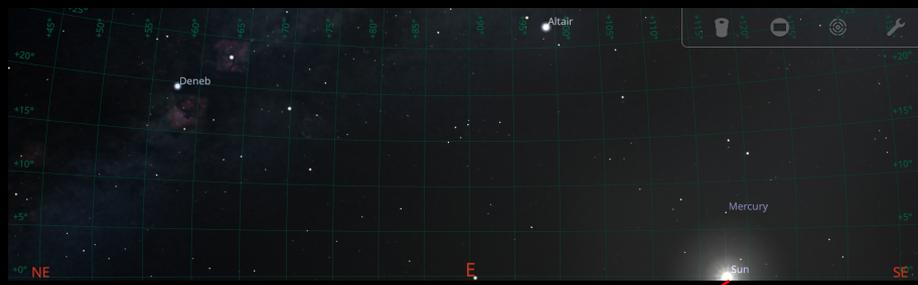
Navigation and utility icons: a trash can, a square button, a target icon, and a wrench icon.

Date and Time interface showing a date of -1300 - 10 - 1 and a Julian Day of 13 : 50 : 35.

Date and Time		Julian Day	
-1300	- 10 - 1	13	: 50 : 35

Mapa do céu obtido pelo aplicativo Stellarium na região do Cairo em 1300AC

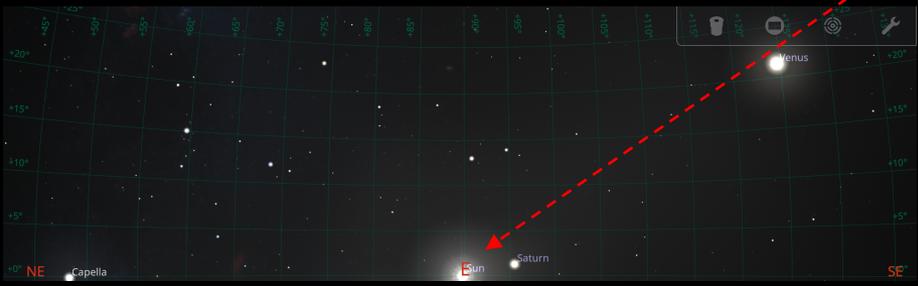
Qual seria a aparência do céu no nascer do Sol para os egípcios no ano de 1300AC?



1 de Janeiro 7H7M
Solstício de Inverno

Posição do Sol no amanhecer

2 de Abril 6H6M
Equinócio de Primavera



Junho: estiagem no Nilo
Colheita



2 de Outubro 5H53M
Equinócio de Outono

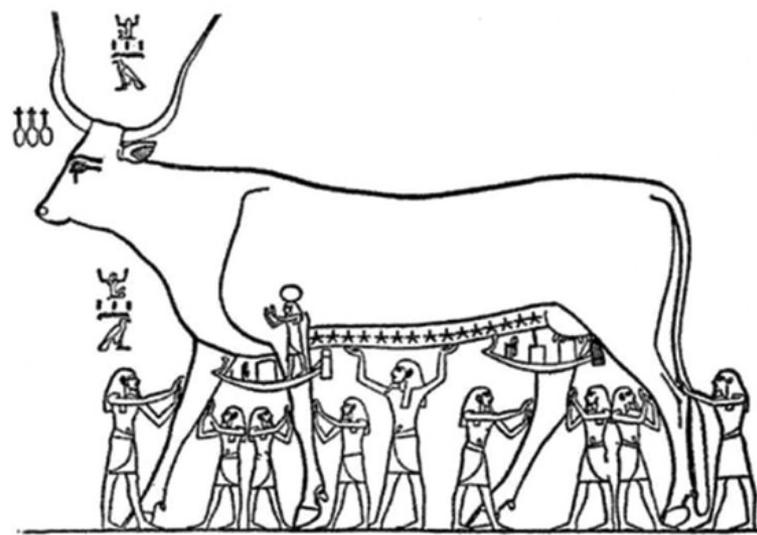
Setembro: chuvas no Nilo
plantio



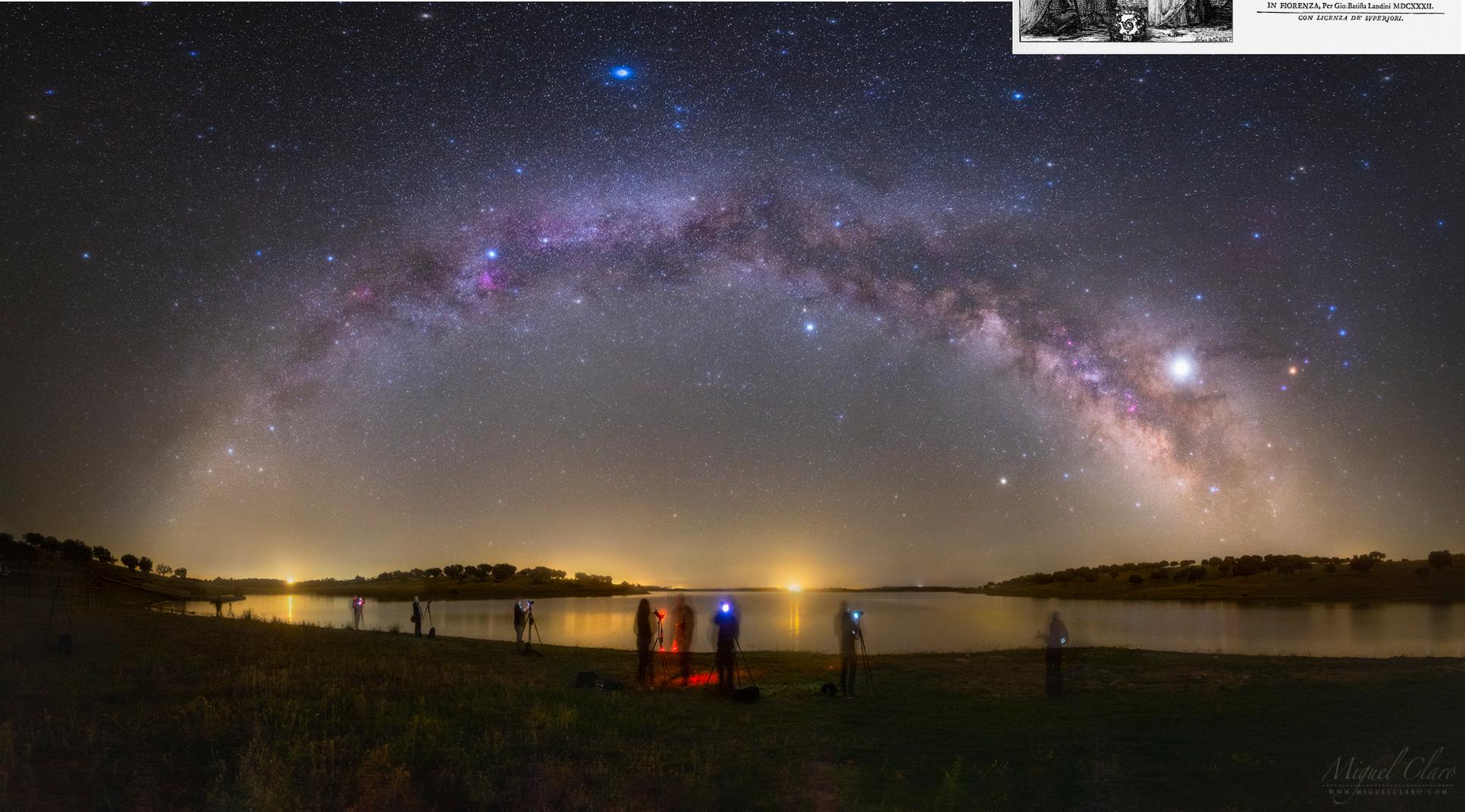
2 de Julho 4H55M
Solstício de Verão



No auge da civilização egípcia a aparência da via Láctea deve ter chamado a atenção como uma mancha alongada que cobre uma fração importante do céu noturno. O detalhe do papiro de Nespakashuty, 1 300 AC, mostra Nut, Geb e o movimento do Sol ao passar à noite pelo interior do corpo da deusa e talvez esta possa ser considerada como a primeira menção à estrutura da nossa Galáxia.

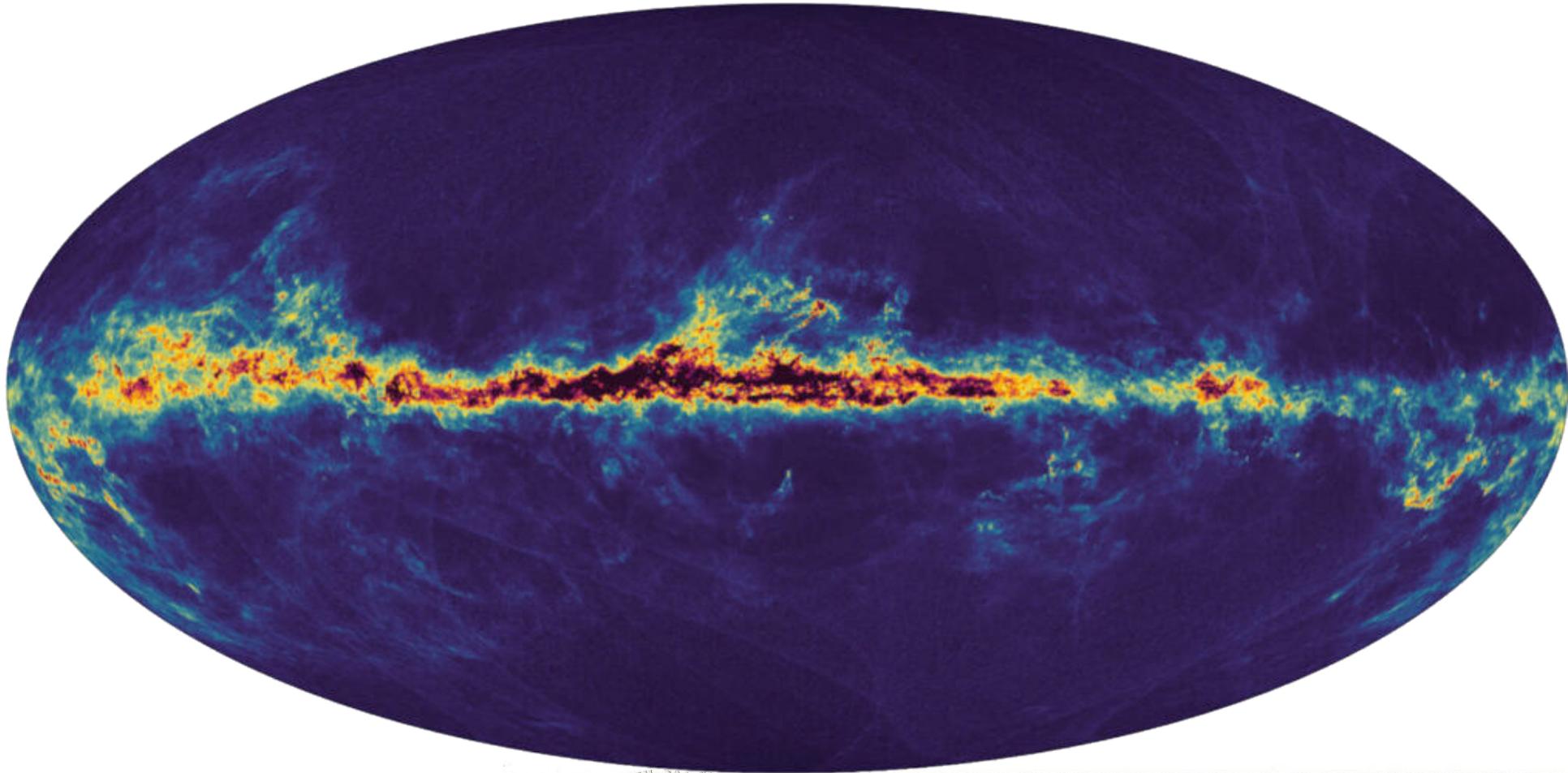


Quase 3 milênios depois, Galileu (1564, 1642) observou o céu noturno com uma luneta em 1609 e concluiu que vivemos em um gigantesco sistema estelar, a nossa Nut(?!). Galileu argumentou ainda que (1) todas a estrelas seriam semelhantes ao nosso Sol e (2) estão distribuídas a diferentes distâncias.

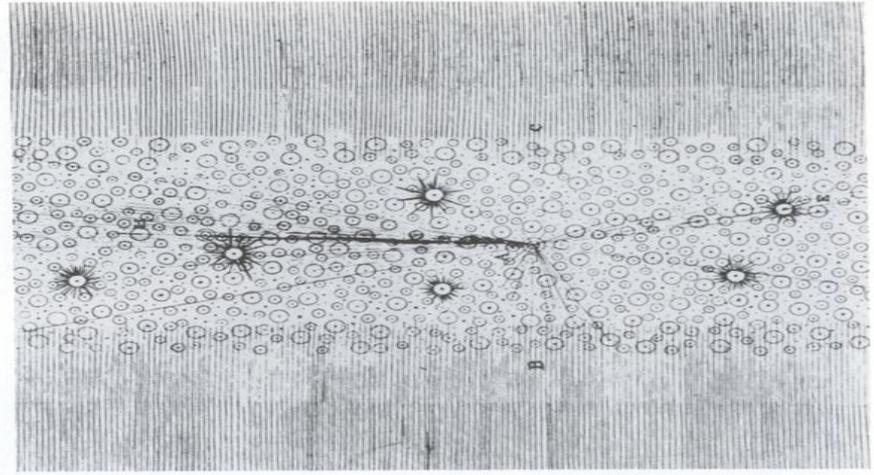
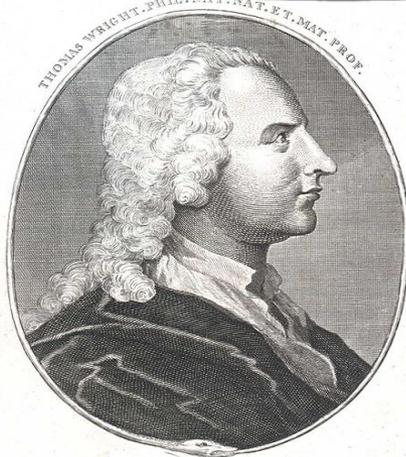




A Via Láctea vista do hemisfério Sul.

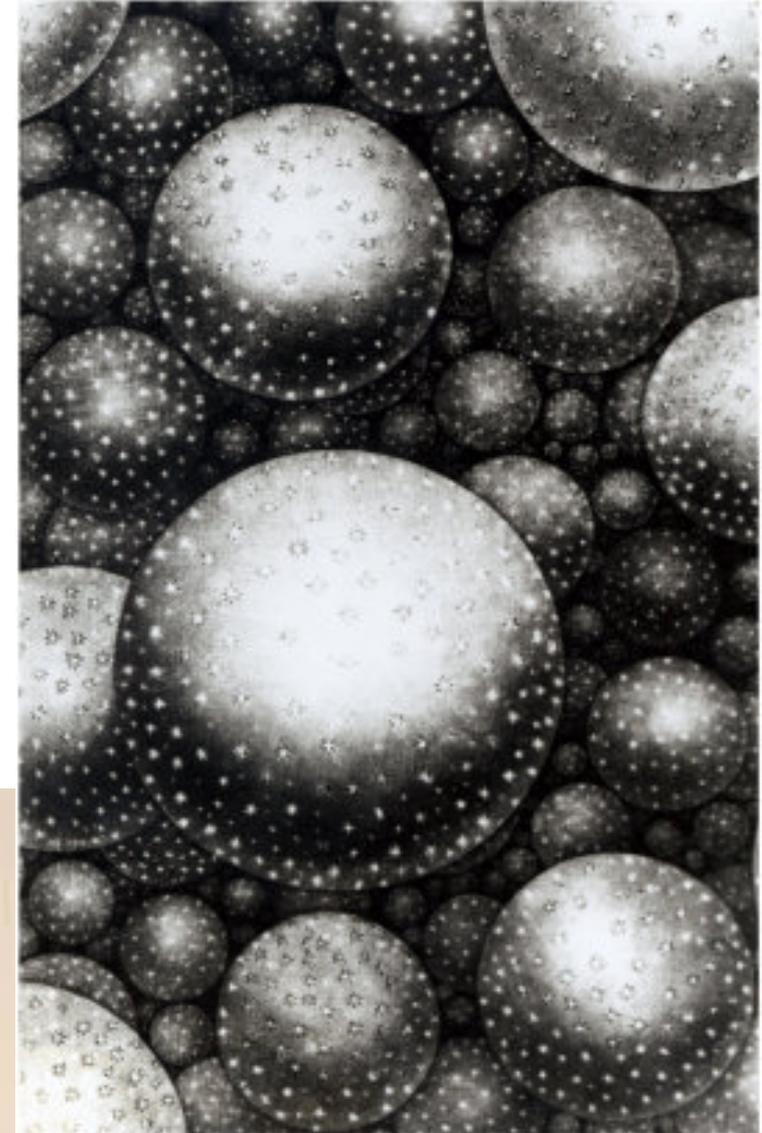
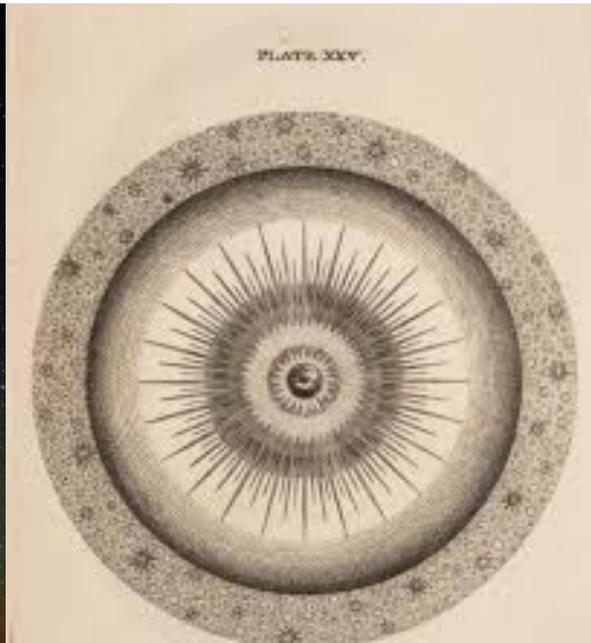


Por volta de 1750 Thomas Wright (1711-1786) considerou que a Via Láctea seria uma distribuição achatada de estrelas cuja luz nos atinge vindo de diferentes direções e distâncias.



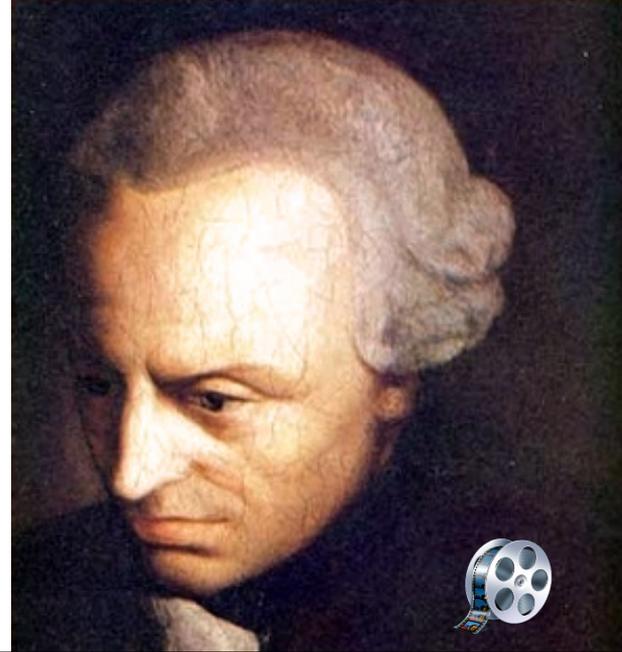
Na complexa concepção de Wright o Universo seria o resultado de três postulados:

- 1. A Via Láctea seria uma entre muitas outras estruturas existentes no Universo.**
- 2. Teria a aparência de uma faixa ao ser observada do seu interior por se tratar de uma casca esférica de estrelas.**
- 3. Cada uma destas “Vias Lácteas” teriam um centro “supernatural” responsável pela manutenção estática de suas propriedades.**

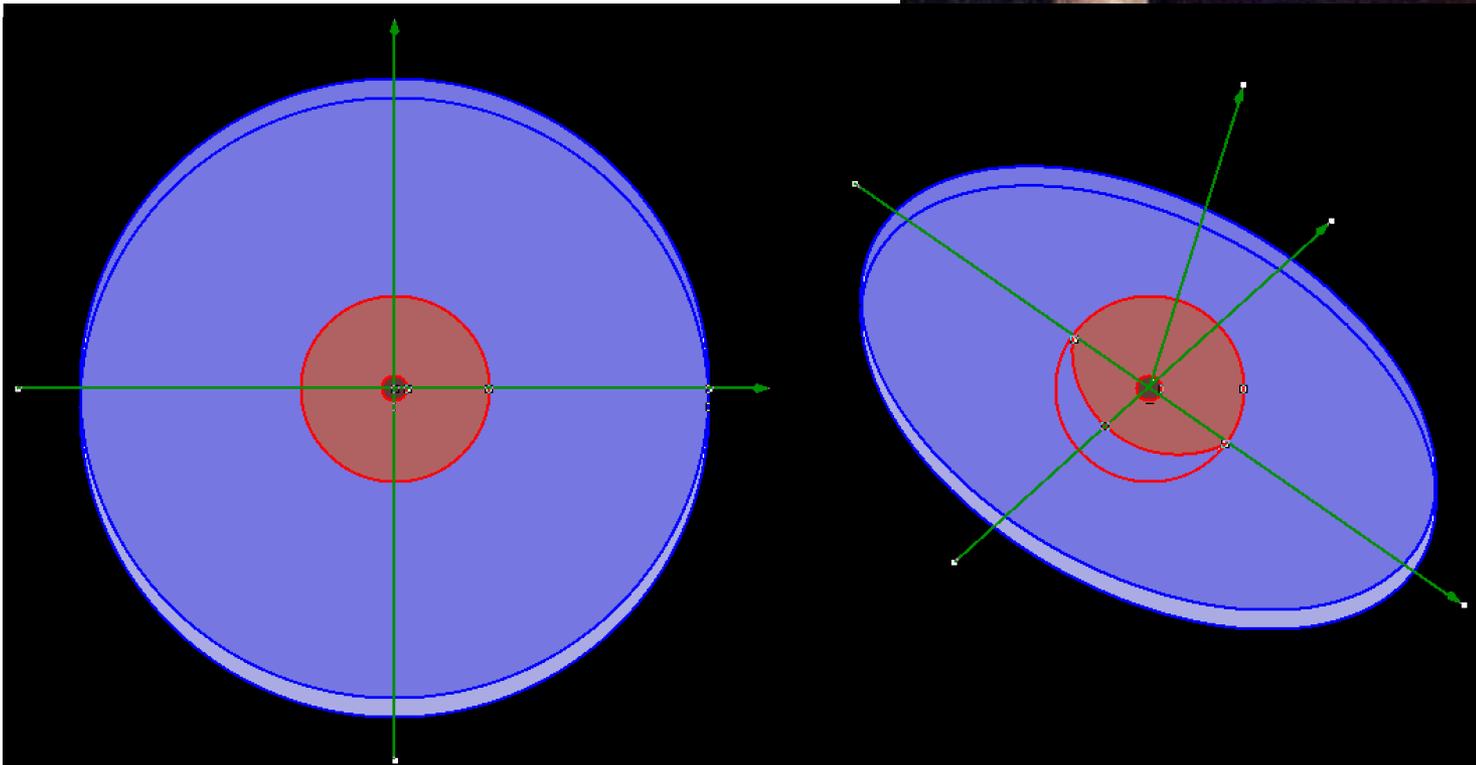


Tente imaginar a sua própria concepção da Via Láctea baseando-se apenas na sua percepção observacional do céu noturno. Em que medida se diferenciaria da visão de Wright?

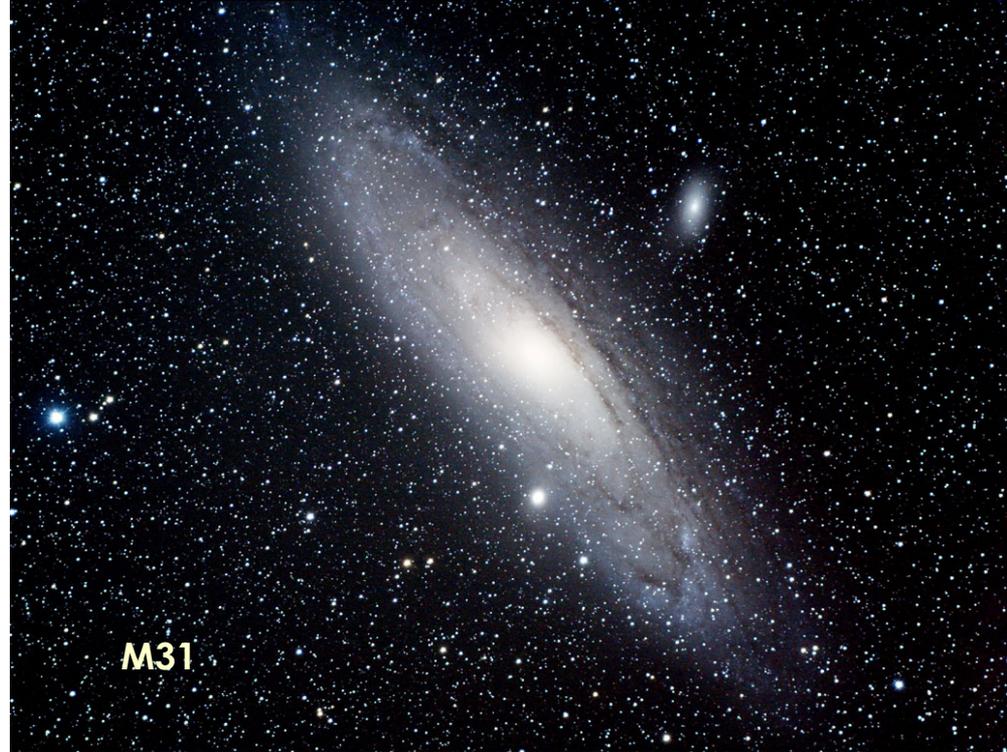
As ideias de Wright tiveram pouca repercussão acadêmica devido à ausência de uma argumentação científica sólida. Porém uma versão desta ideia, publicada no jornal local, influenciou o filósofo Immanuel Kant (1724-1804) que entendeu a proposta como descrevendo na verdade uma estrutura semelhante a um disco de estrelas. Em 1755 Kant incorporou a esta concepção as ideias da física newtoniana e argumentou que as estrelas da Via Láctea se comportariam como os anéis de Saturno e conseqüentemente toda a sua estrutura seria suportada dinamicamente pela rotação. Para Kant a observação destes discos sob diferentes pontos de vista explicaria as



nebulosidades elípticas algumas das quais, como a galáxia de Andrômeda, já haviam sido identificadas por Maupertuis (1698-1759) tendo sido posteriormente catalogadas por Charles Messier (1730-1817).



Portanto, seguindo a concepção de Galileu, Kant considerou que sistemas como a grande nebulosa de Andrômeda seriam na verdade enormes conjuntos de estrelas que estando tão distantes seriam impossíveis de serem percebidas individualmente. Estes discos teriam uma aparente forma elíptica devido ao efeito de projeção provocado pela sua orientação no espaço. No entanto, apesar da surpreendente precisão das previsões de Kant, faltavam ainda as evidências empíricas capazes de consolidar esta concepção idealizada do Universo.



Para identificar esta hipótese Kant utilizou o termo *Mundos Plurais* posteriormente traduzido imprecisamente para o inglês, por Herschel, como *Universos Ilhas*.

Acima uma imagem de Andrômeda, ou M31, vista no visível e ao lado vista no infravermelho pelo satélite WISE mostrando como esta suposição de Kant se aproxima da realidade.

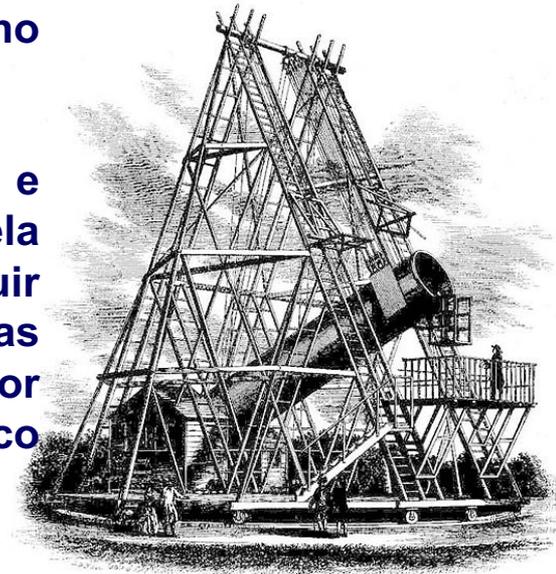
1.2 William Herschel

Devido às limitações instrumentais a pesquisa astronômica profissional no século XVIII se dedicava mais ao estudo dos movimentos planetários deixando para os aficionados amadores o estudo especulativo das nebulosas.

Entre estes estava William Herschel (1738-1822), um compositor, músico e astrônomo alemão, que viveu na Inglaterra. Ele se tornou famoso entre outros motivos pela descoberta do planeta Urano e é considerado como um dos pilares da astronomia moderna. Apesar de não ter sido exposto a um treinamento matemático acurado ele foi capaz de compor vários argumentos especulativos que no entanto se revelaram bastante precisos e inovadores.

Em 1773 após uma carreira de sucesso como músico e compositor Herschel, já residindo na Inglaterra, se interessou pela astronomia. Em particular dedicou-se inicialmente a construir telescópios mais potentes esperando assim observar as maravilhas apresentadas nos livros da época. Deste início, até por volta de 1782, Herschel fez uma transição profissional de músico para astrônomo real na corte de George III.

Herschel construiu inúmeros telescópios sendo o de 49 polegadas o mais famoso, mas este nunca funcionou tão bem quanto o de 20 polegadas, considerado como o seu principal instrumento.



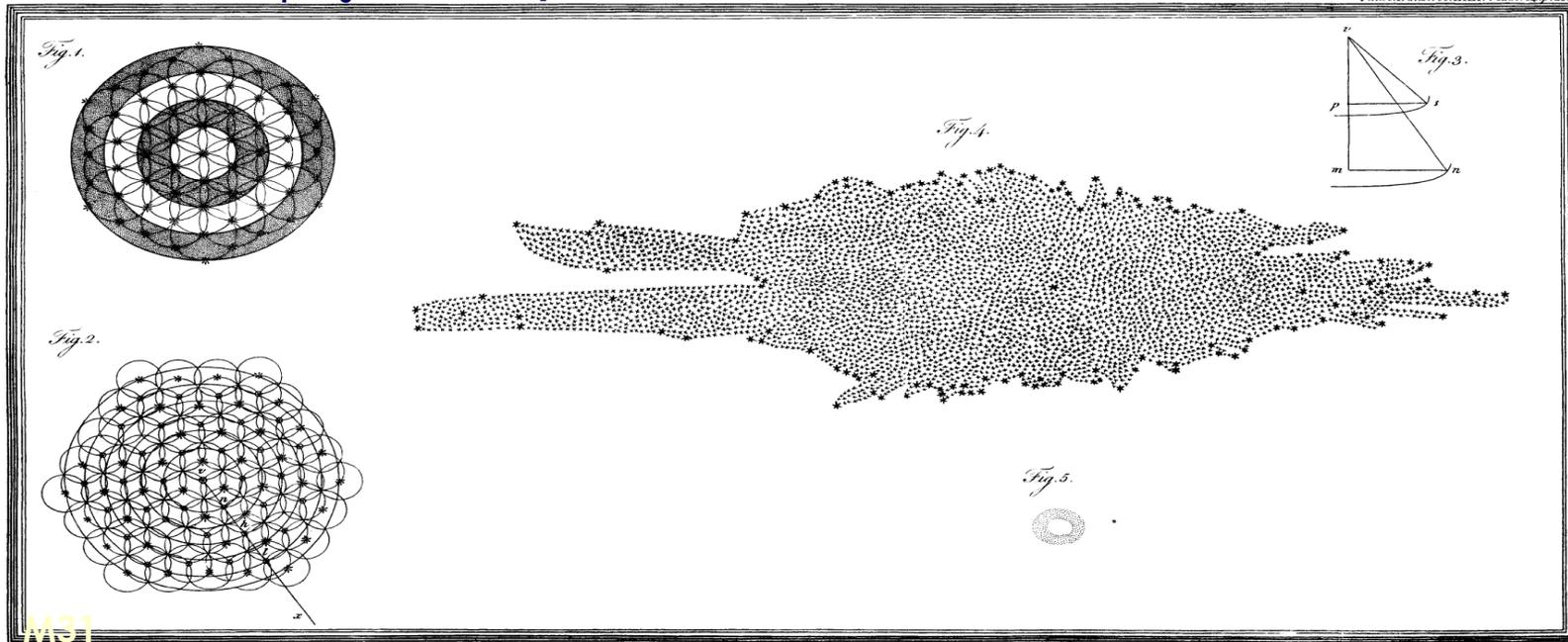
Através das suas próprias observações, baseadas em contagens de estrelas ao longo de 683 direções diferentes, Herschel propôs um modelo para a Via Láctea (1785, PTRSL 75 213). Admitindo que todas tinham em média a mesma luminosidade concluiu que o brilho aparente observado seria um simples reflexo de variações na distância. Em termos mais modernos de magnitudes temos que

$$m = -2,5 \text{ Log } F + \text{Cte}$$

onde $F = F_0 (d_0/d)^2$ é o fluxo que depende da distância e portanto

$$m_i = m_0 + 5 \text{ Log } (d_i/d_0)$$

onde m_i e m_0 são as magnitudes de uma estrela e de um objeto de referência e d_i , d_0 suas respectivas distâncias.

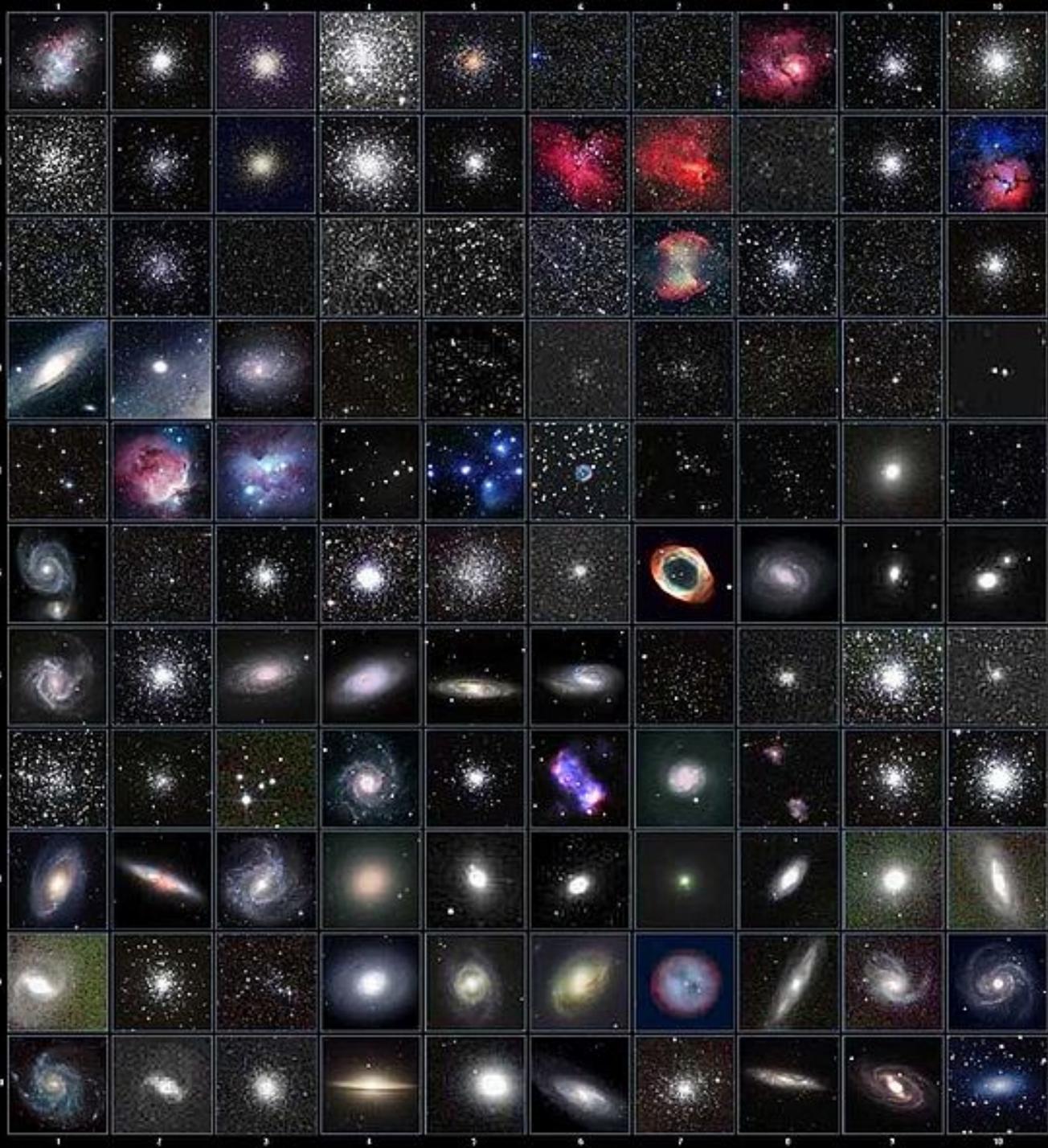


Como a absorção interestelar afeta a construção deste modelo?

Em 1781, ao ser eleito para a sociedade real de astronomia, após a descoberta de Urano, Herschel tomou contato com o famoso catálogo de nebulosas de Charles Messier (1730-1817). O propósito deste catálogo era o de auxiliar os astrônomos a não confundir estes objetos com os cometas, seu principal interesse. Sabe-se hoje que esta lista contém aglomerados globulares, aglomerados abertos, nebulosas galácticas e galáxias.



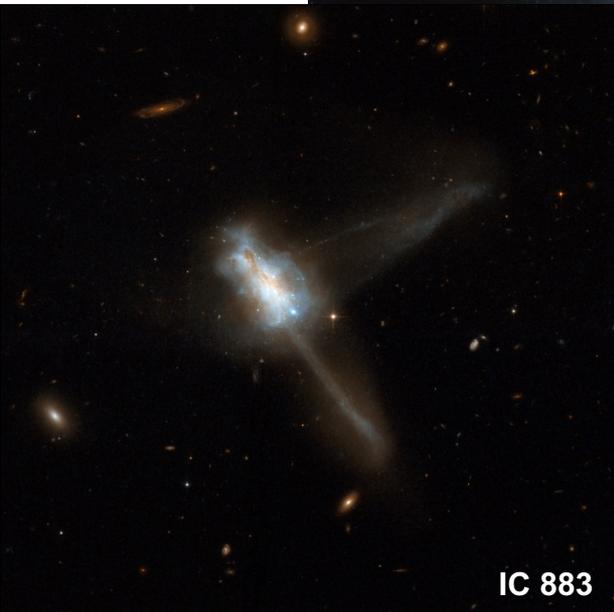
M31



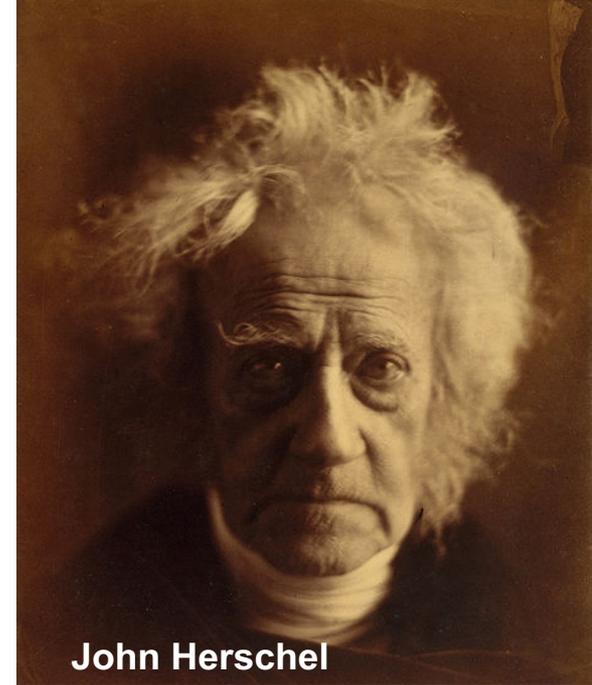


William Herschel acreditava que a forma observada nas nebulosas guardava semelhança com flores vistas em um jardim. Talvez umas poucas formas intrínsecas fossem necessárias para explicar toda a diversidade observadas nas formas aparentes.

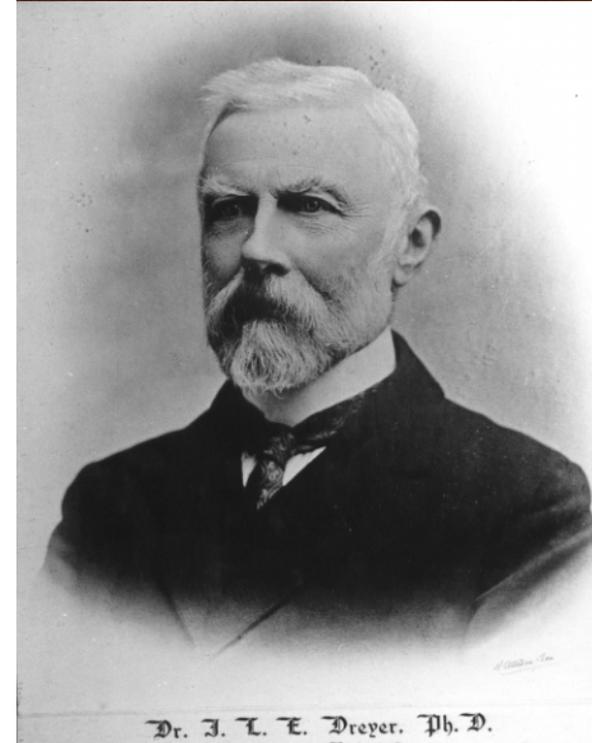
Um subproduto muito importante do trabalho de Herschel foi o catálogo NGC (New General Catalog) compilado nos anos de 1880 por J. L. E. Dreyer a partir das observações de William Herschel e seu filho John Herschel (1792-1871). O catálogo NGC contém 7840 objetos e posteriormente foi complementado, pelo próprio Dreyer, através do catálogo IC (Index Catalog) contendo um conjunto adicional de 5387 objetos.



IC 883



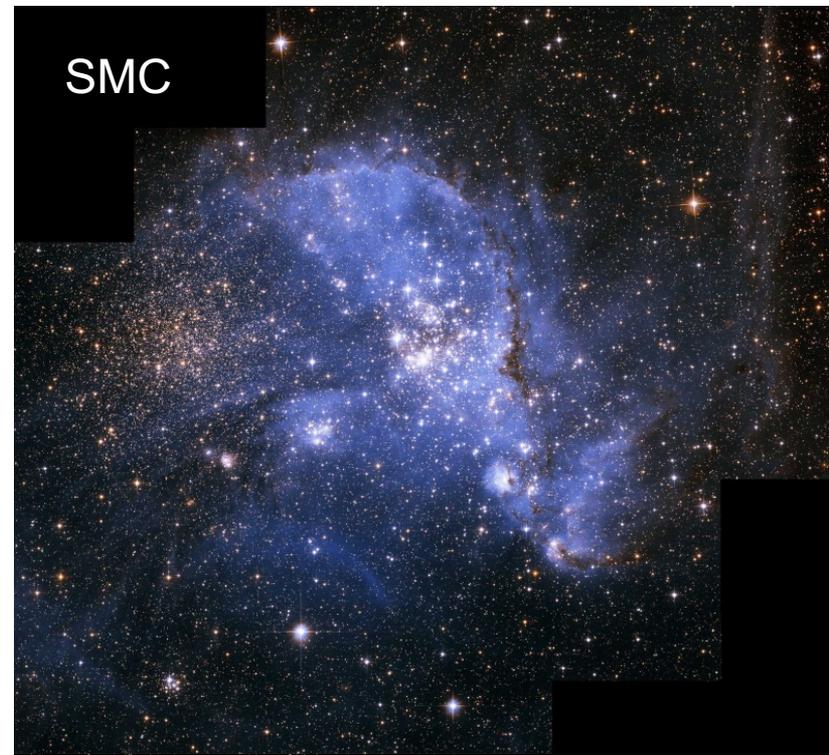
John Herschel



Dr. J. L. E. Dreyer. Ph. D.

Após o falecimento do pai John Herschel realizou uma revisão completa dos catálogos de nebulosas e de estrelas duplas. Posteriormente ele se transferiu para a cidade do Cabo levando o telescópio de 20 polegadas. Durante sua estadia John Herschel completou a parte sul do catálogo de nebulosas e tomou contato com as Nuvens de Magalhães e a região do centro galáctico na constelação de Sagitário.

Ficou claro para ele a importância das nuvens de Magalhães como um laboratório para estudar as propriedades das estrelas e esta ideia seria retomada posteriormente no início do século XX.



1.3 Pierre Laplace

Pierre Laplace (1749-1827) foi um matemático, astrônomo e físico considerado como um dos fundadores da astronomia matemática com trabalhos fundamentais particularmente na mecânica celeste. Em uma de suas publicações mais influentes (*O Sistema do Mundo*, 1792-1835) Laplace discutiu duas possibilidades distintas para criação dos planetas: (a) contração da nebulosa protoestelar e (b) formação catastrófica pela colisão entre duas estrelas, formulada por Buffon (1707-1788). Na opinião dele, que se revelou correta, a primeira hipótese explica melhor as regularidades observadas no sistema solar.

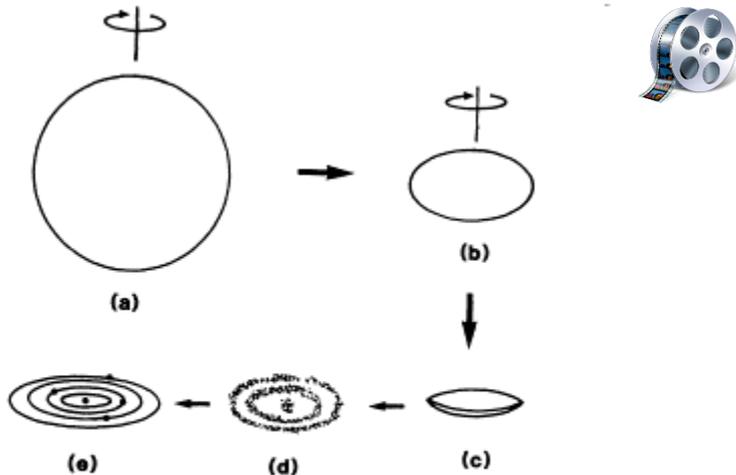


FIG. 1. The Laplace nebula model: (a) a rotating nebula; (b) the collapsing nebula flattened along its rotation axis; (c) formation of a lenticular shape; (d) a series of rings left behind by the contracting core; (e) one residual condensation in each ring forms a planet.

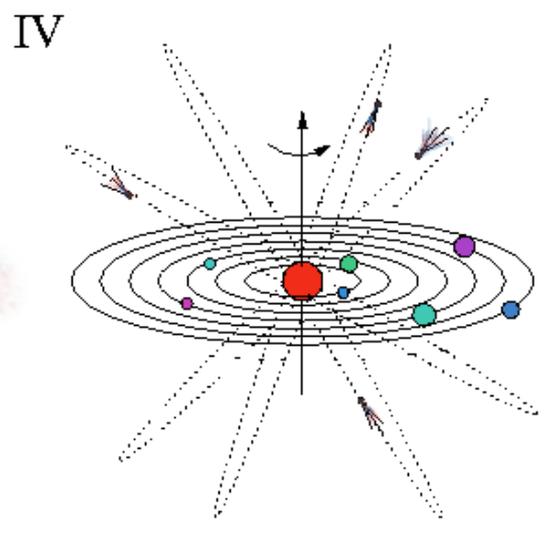
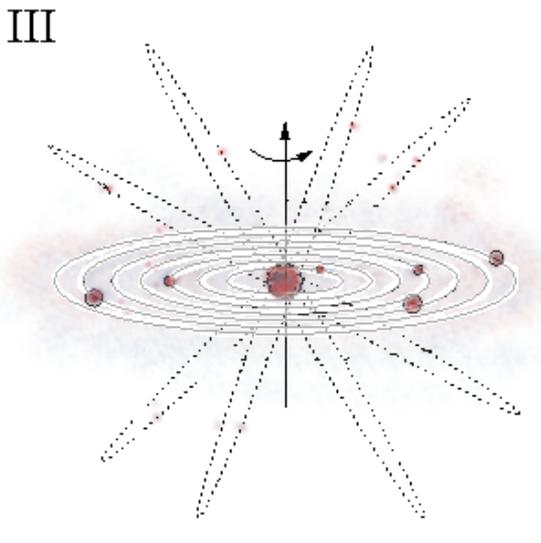
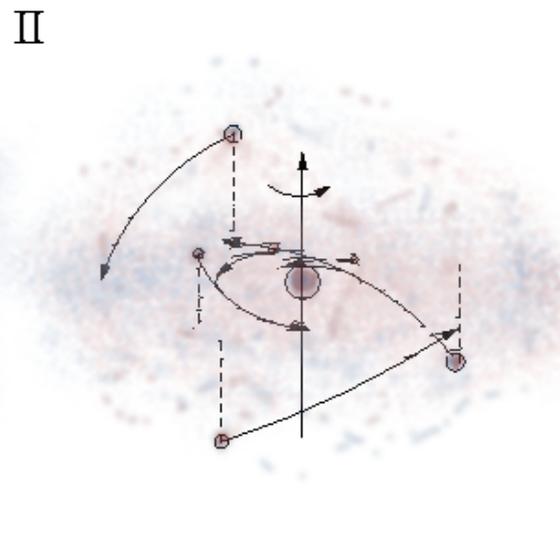
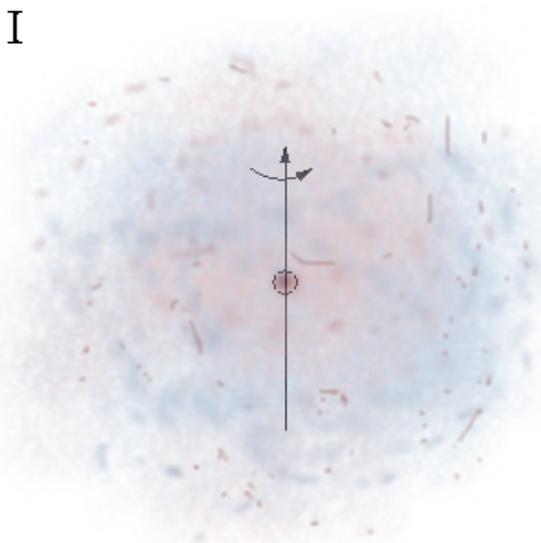
Regularidades consideradas por Laplace

1. A revolução dos planetas no mesmo sentido em relação ao Sol.
2. Movimento dos satélites no mesmo sentido.
3. Rotação dos planetas coincidente com a revolução orbital.
4. Baixa excentricidade das órbitas de planetas e satélites.
5. Alta excentricidade das órbitas dos cometas.

Na hipótese original de Laplace o sistema solar teria sido formado em quatro fases:

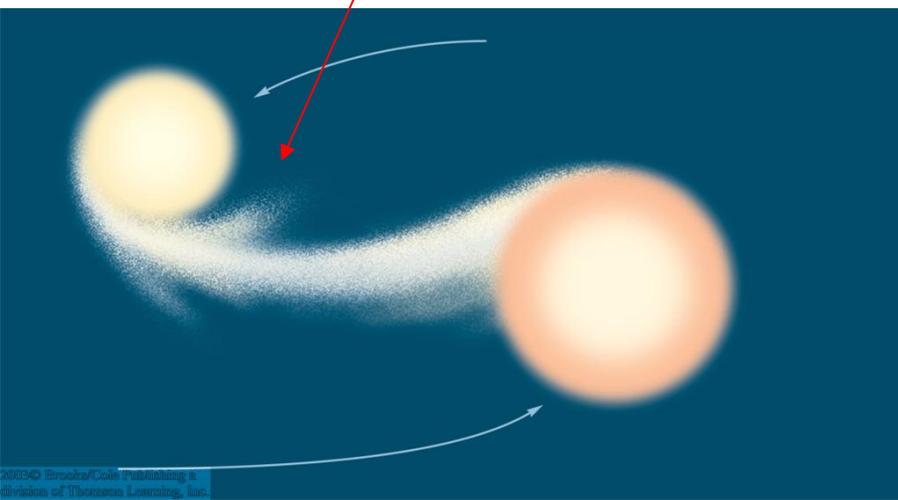
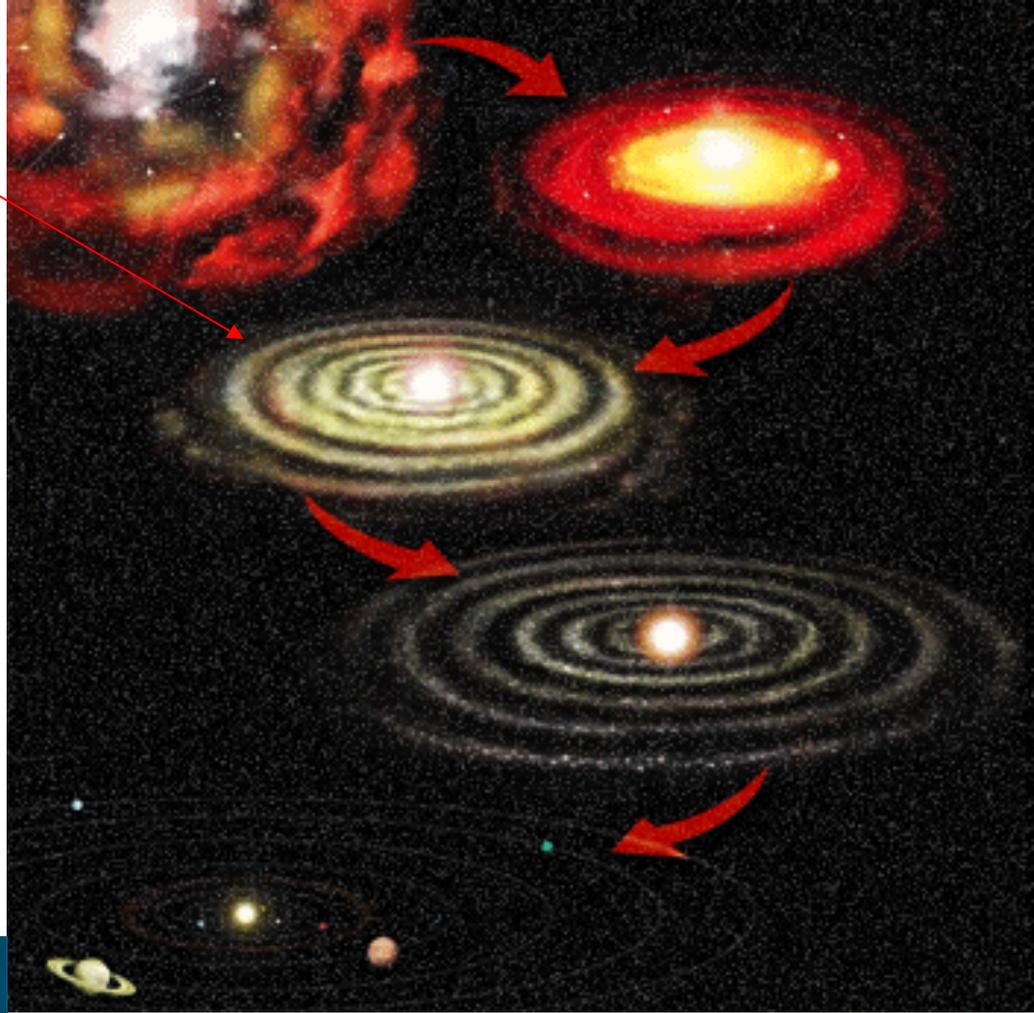
- 1. Contração da nebulosa em direção ao centro bem como no entorno de núcleos localizados.
- 2. Os núcleos periféricos crescem e começam a sofrer fricção com gás se aproximando do plano de simetria.
- 3. Os futuros planetas acumulam parte do gás residual de forma muito mais eficiente do que os cometas.
- 4. O material residual disperso se espalha por não ser capaz de se manter em equilíbrio mecânico.

Atualmente sabe-se que este processo é bem mais complexo do que esta visão simplificada. Na época as duas visões antagônicas sobre as nebulosas não podiam ser resolvidas dada a impossibilidade de determinação das distâncias. A instrumentação existente não era adequada para estas medições.



Tanto no cenário defendido por Buffon como no cenário preferido por Laplace abria-se a possibilidade para a existência de nebulosidades espiraladas que resultariam finalmente na formação de estruturas semelhantes ao nosso sistema solar. Portanto, criou-se a possibilidade de que as nebulosas então observadas fossem as evidências diretas deste processo.

Esta era uma visão alternativa à hipótese dos Universos Ilhas de Kant que dividiu as opiniões na comunidade científica. Sem medir diretamente as distâncias era impossível distinguir estas possibilidades.

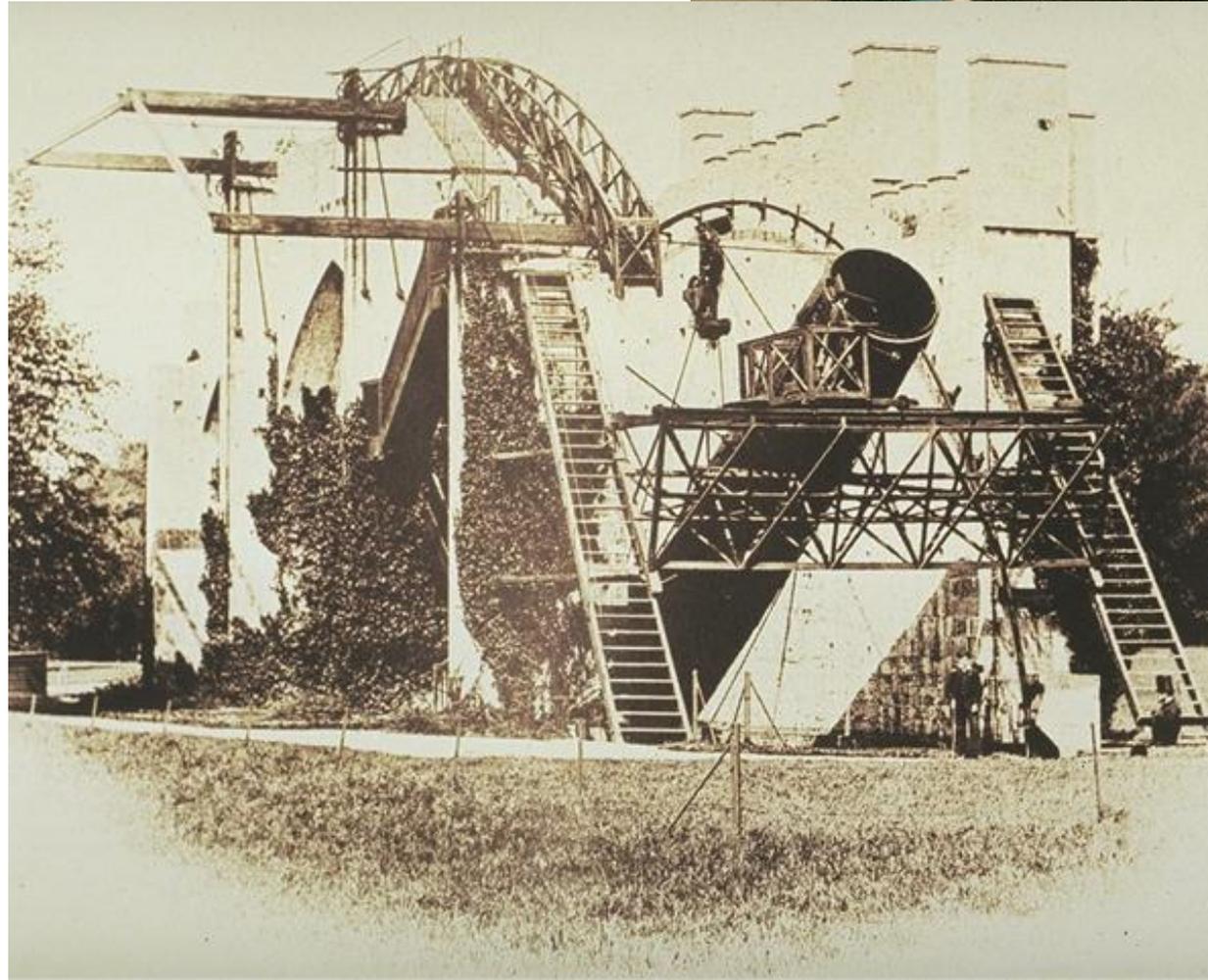


Você tem idéia da probabilidade de ocorrência de uma colisão direta entre duas estrelas?

1.4 Lorde Rosse

William Parson, Lorde Rosse, (1800-1867) era um aficionado pela astronomia que construiu vários telescópios e foi o primeiro a identificar claramente a natureza espiral de algumas nebulosas.

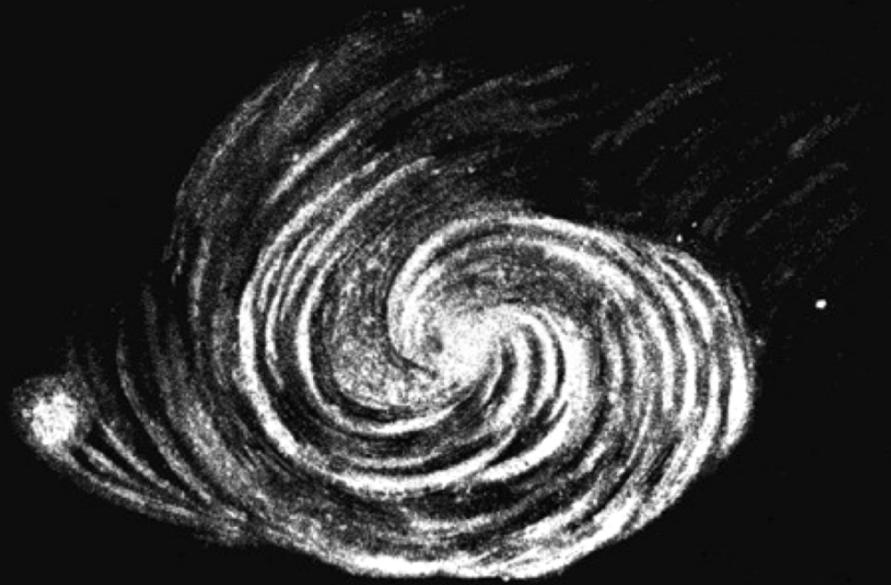
Em 1840 construiu o maior dos seus instrumentos, o Leviatã de Parsonstown, com uma abertura de 183 cm. Durante vários anos este foi o maior telescópio construído na Inglaterra. Devido a sua montagem peculiar cada objeto podia ser observado no máximo por cerca de 30 min durante a sua passagem meridiana.



Este instrumento custou 12 000 libras em 1840 correspondendo atualmente a cerca de 529 000 libras ou 830 000 US\$. Este foi o preço da curiosidade de Lorde Rosse!



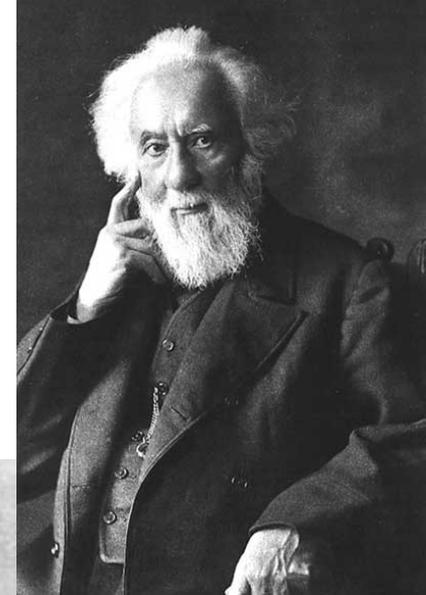
Em 1845 Lorde Rosse identificou claramente em um desenho a estrutura espiral da galáxia M51 e sua companheira. Durante anos ele realizou diferentes desenhos tentando verificar uma possível evolução temporal dos braços espirais desta galáxia.



Porque você acha que seria tão importante detectar eventuais movimentos internos nas nebulosas?

1.5 William Huggins

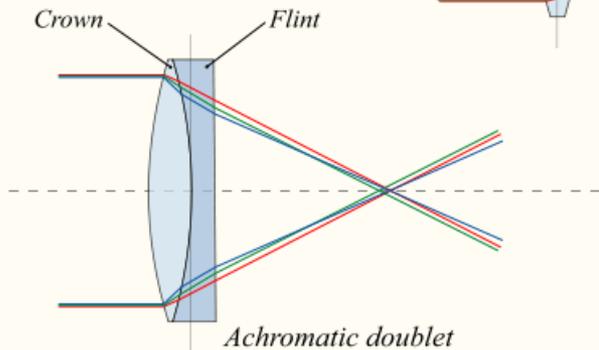
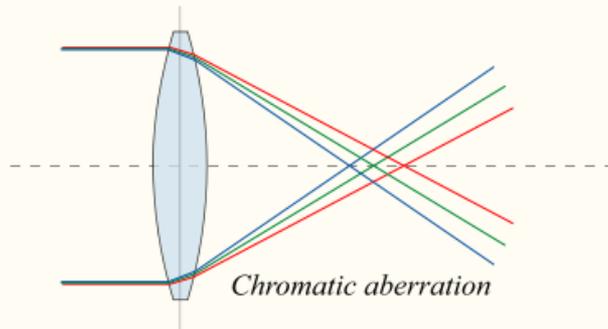
William Huggins (1824-1910) foi outro astrônomo amador que realizou um extenso trabalho mostrando que várias nebulosas apresentavam linhas espectroscópicas em emissão. Em seu trabalho Huggins soube tirar proveito de vários avanços científicos e tecnológicos ocorridos no século XIX.



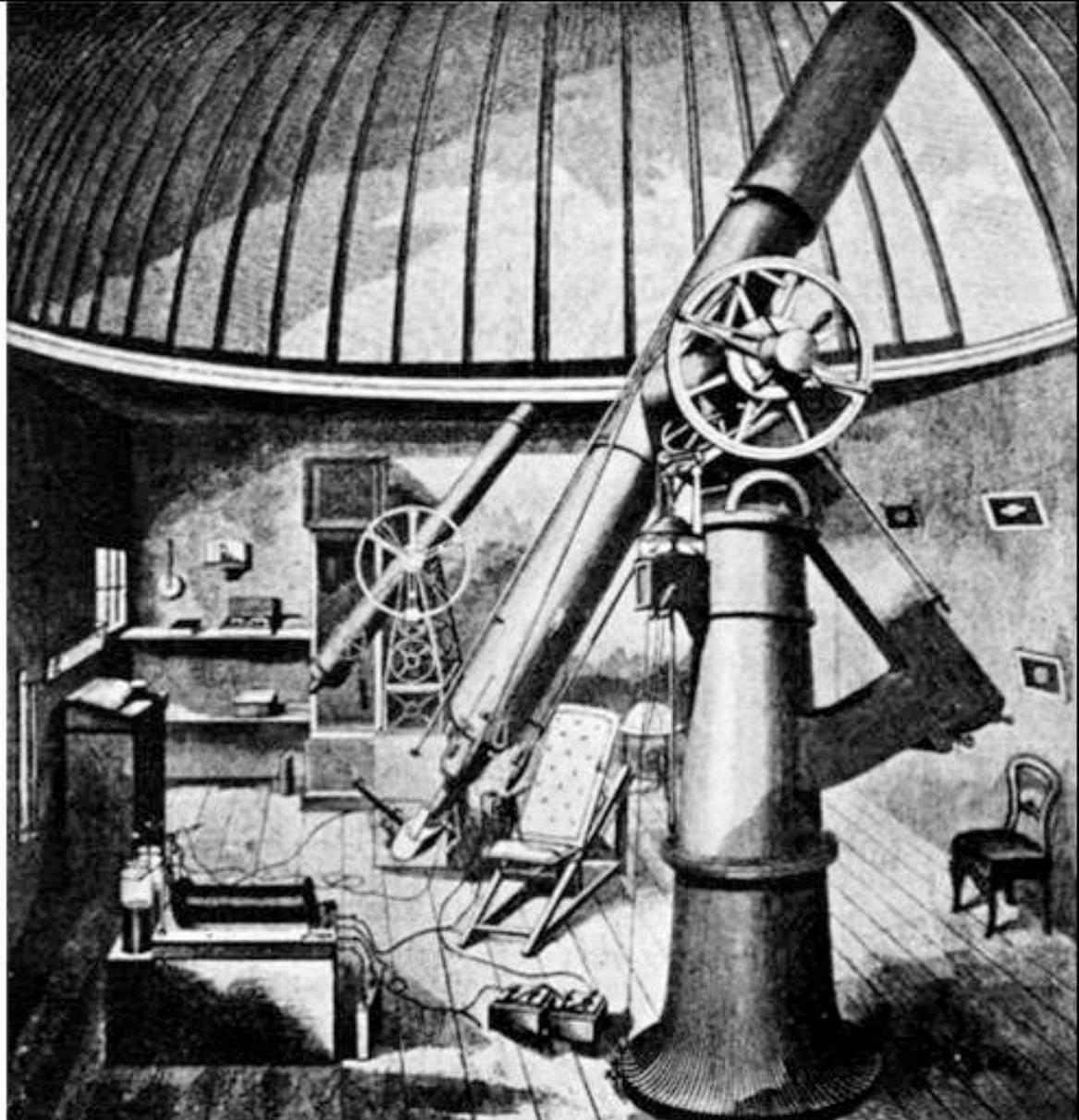
Em particular, neste período Joseph Fraunhofer (1787-1826) desenvolveu o espectrógrafo que possibilitou a identificação das principais linhas atômicas dos elementos químicos mais comuns.

Outro instrumento de importância fundamental desenvolvido por Fraunhofer foi o telescópio refrator com objetiva acromática que permitiu a obtenção de imagens com qualidade óptica muito superior ao que existia na época.

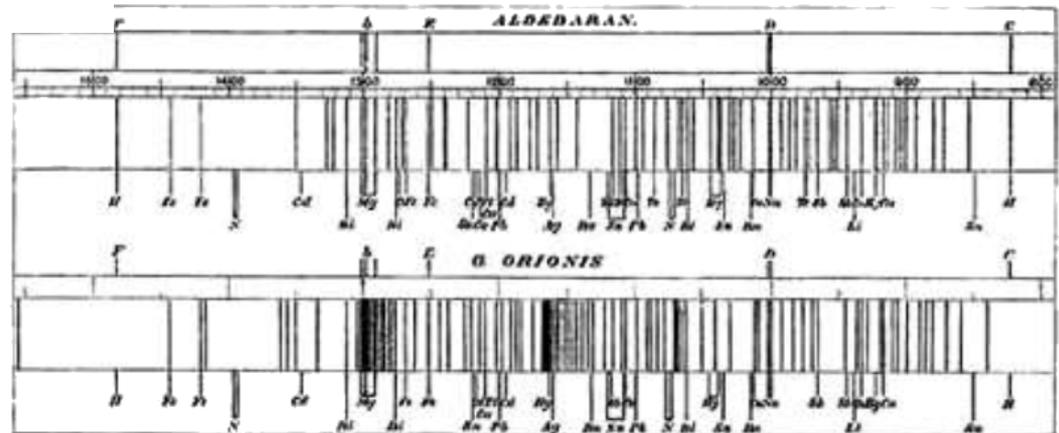
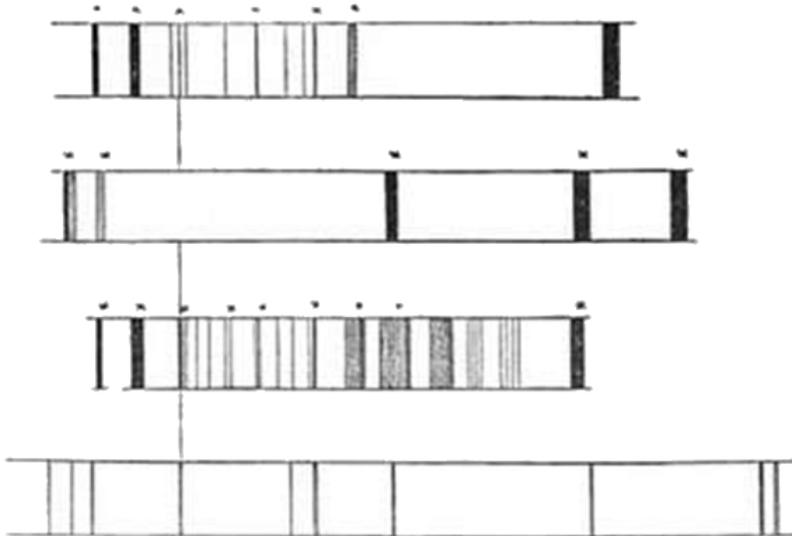
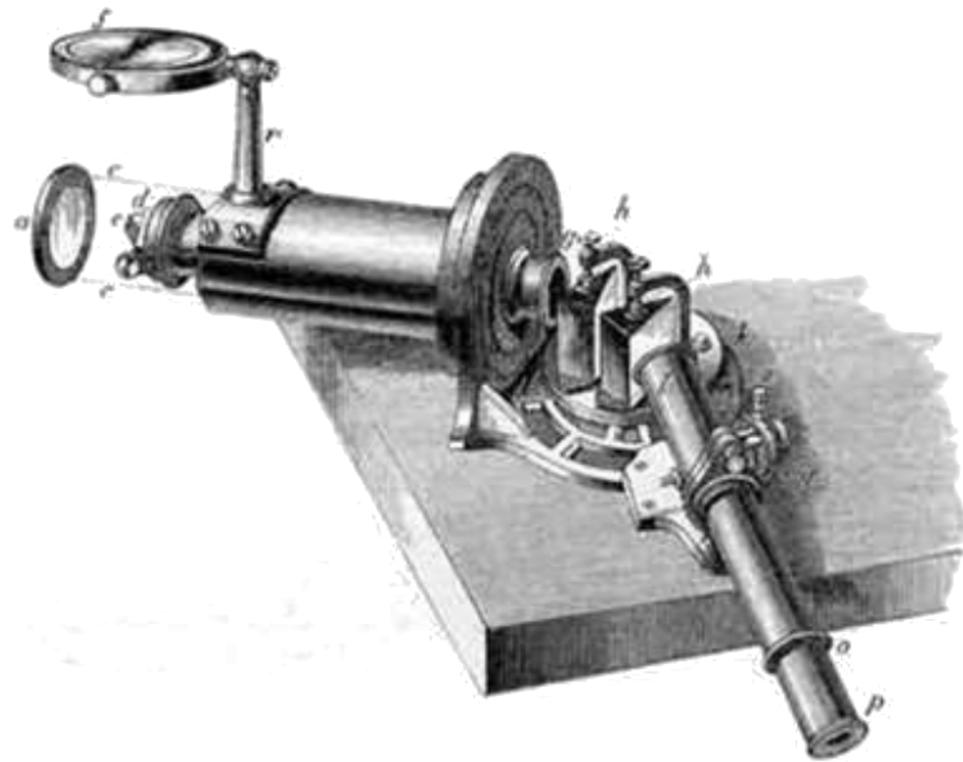
Finalmente em 1838 Friedrich W. Bessel, então diretor do observatório de Königsberg, usando um telescópio desenvolvido por Fraunhofer, anunciou a primeira medida confiável da paralaxe da estrela 61 Cygni, cerca de $0,31316'' \pm 0,0254''$, implicando em uma distância da ordem de 660 000 maior que a distância da Terra ao Sol.



Como tantos outros astrônomos William Huggins também participou desta fase de prosperidade científica utilizando o espectrógrafo e telescópios de melhor qualidade óptica para identificar e desenvolver um esquema de classificação espectral das estrelas.

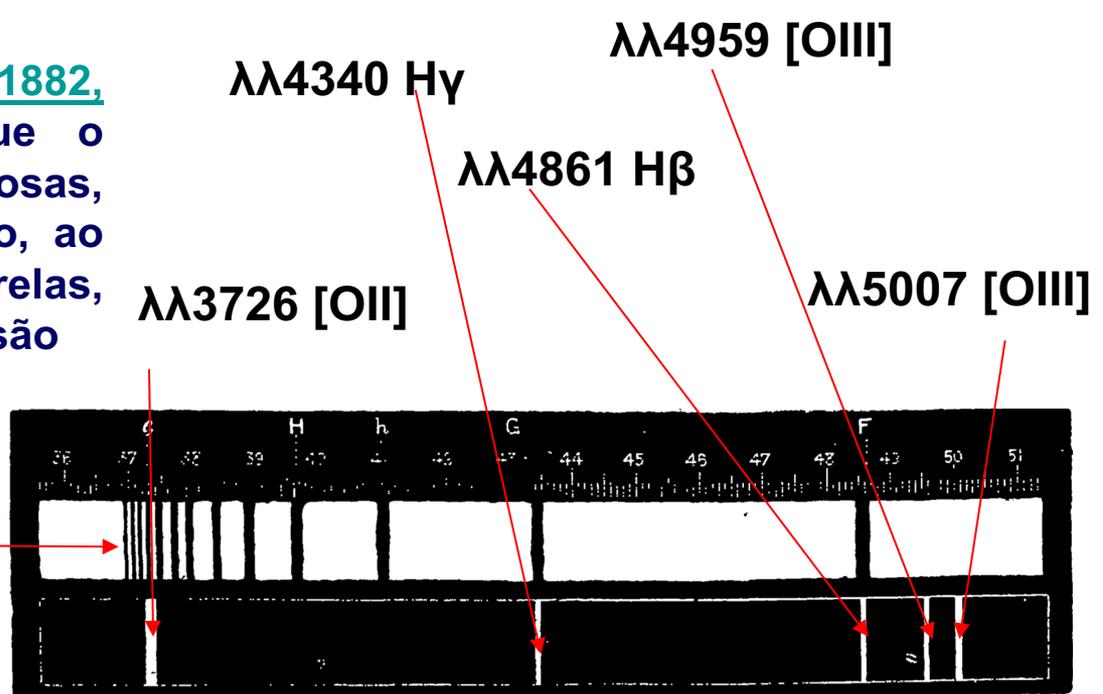


Utilizando um espectrógrafo de prisma acoplado a um telescópio tornou-se possível a identificação das principais linhas espectroscópicas de absorção e conseqüentemente nascia o esquema de classificação espectral das estrelas.



Posteriormente Huggins ([1882, Obs, 5, 106](#)) percebeu que o espectro de algumas nebulosas, como Orion, ilustrado abaixo, ao contrário da maioria das estrelas, apresentavam linhas de emissão

Espectro da lâmpada de comparação para calibrar o comprimento de onda



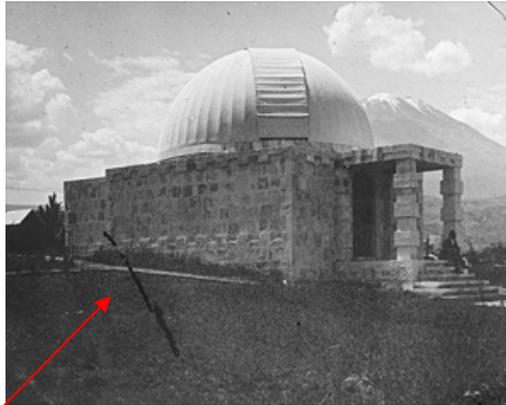
My researches on the visible portion of the spectrum of nebulae have shown the existence of four isolated bright lines †. The strongest of these lines, wave-length 5005, is coincident with the less refrangible component of the strongest double line of nitrogen. The second line has a wave-length of 4957. The other two lines, which are more refrangible, are coincident with the lines H β (F) and H γ of hydrogen.

Várias destas nebulosas com linhas de emissão estavam preferencialmente distribuídas próximas da Via Láctea, ao contrário das outras. Qual é o significado deste fato?

1.6 Henrietta Leavitt

Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) iniciou a sua carreira como astrônoma em 1893, realizando contagens de estrelas em placas fotográficas, e acabou por descobrir a relação período-luminosidade das estrelas Cefeidas que mudaria o cenário da astronomia extragaláctica. Ela era uma das muitas mulheres que trabalhavam sob as ordens de Pickering para medir e catalogar as inúmeras placas fotográficas do acervo do da estação Boyden do observatório de Harvard instalado no Peru.

Como resultado deste trabalho ela constatou a presença de inúmeras estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães.



Em 1912 Edward C. Pickering comunicou uma análise de 25 das estrelas do tipo Cefeidas nas Nuvens de Magalhães analisadas por H. Leavitt ([1912,HarvCirc, 173,1](#)). Deste estudo resultou a concepção que este tipo de estrela variável obedecia a uma estreita relação entre a luminosidade aparente e o período.

Como estes objetos estavam a uma mesma distância trata-se de uma relação entre a luminosidade absoluta e o período. Na figura à direita os dados do período, no eixo horizontal, estão dispostos em uma escala logarítmica reforçando a percepção da lei de potência entre as duas variáveis.

variables alike, is about 1.2 magnitudes. Since the variables are probably at nearly the same distance from the Earth, their periods are apparently associated with their actual emission of light, as determined by their mass, density, and surface brightness.

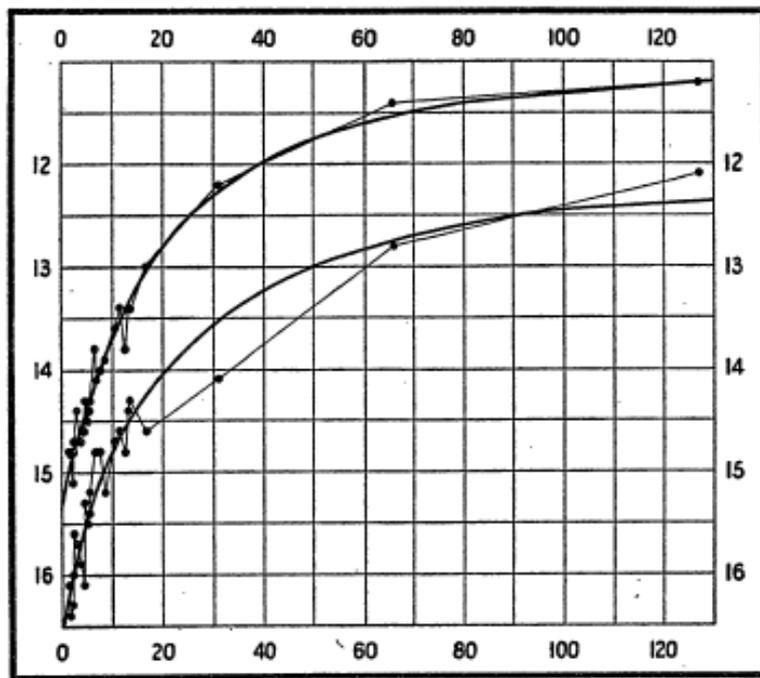


FIG. 1.

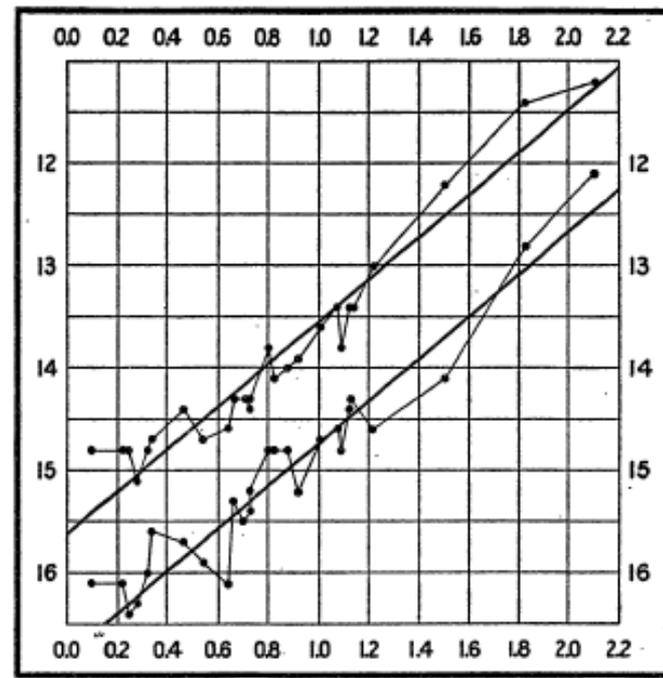


FIG. 2.

A relação período-luminosidade, na banda B, pode ser expressa na forma,

$$M = M_0 - 2,222 \text{ Log } P$$

Onde M é a magnitude absoluta da estrela e P é o período expresso em dias. M_0 é a chamada constante de ponto zero e que precisava ser determinada para que esta relação seja usada como indicador de distância através da relação

$$m - M = -5 + 5 \text{ Log } d$$

Sendo m a magnitude aparente e d a distância em parsecs.

Esta tarefa coube ao astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967) que determinou M_0 a partir de estrelas cefeidas próximas com distâncias estimadas por paralaxe. Atualmente acredita-se que $M_0 \sim -1,182$ (B). Na época Hertzsprung utilizou a estimativa então existente para avaliar pela primeira vez a distância das nuvens de Magalhães. Mas em sua primeira tentativa ele não avaliou corretamente a distância das nuvens de Magalhães. Esta tarefa coube posteriormente a Norris Russel. Finalmente a comunidade astronômica dispunha de um método para avaliar as distâncias das galáxias.

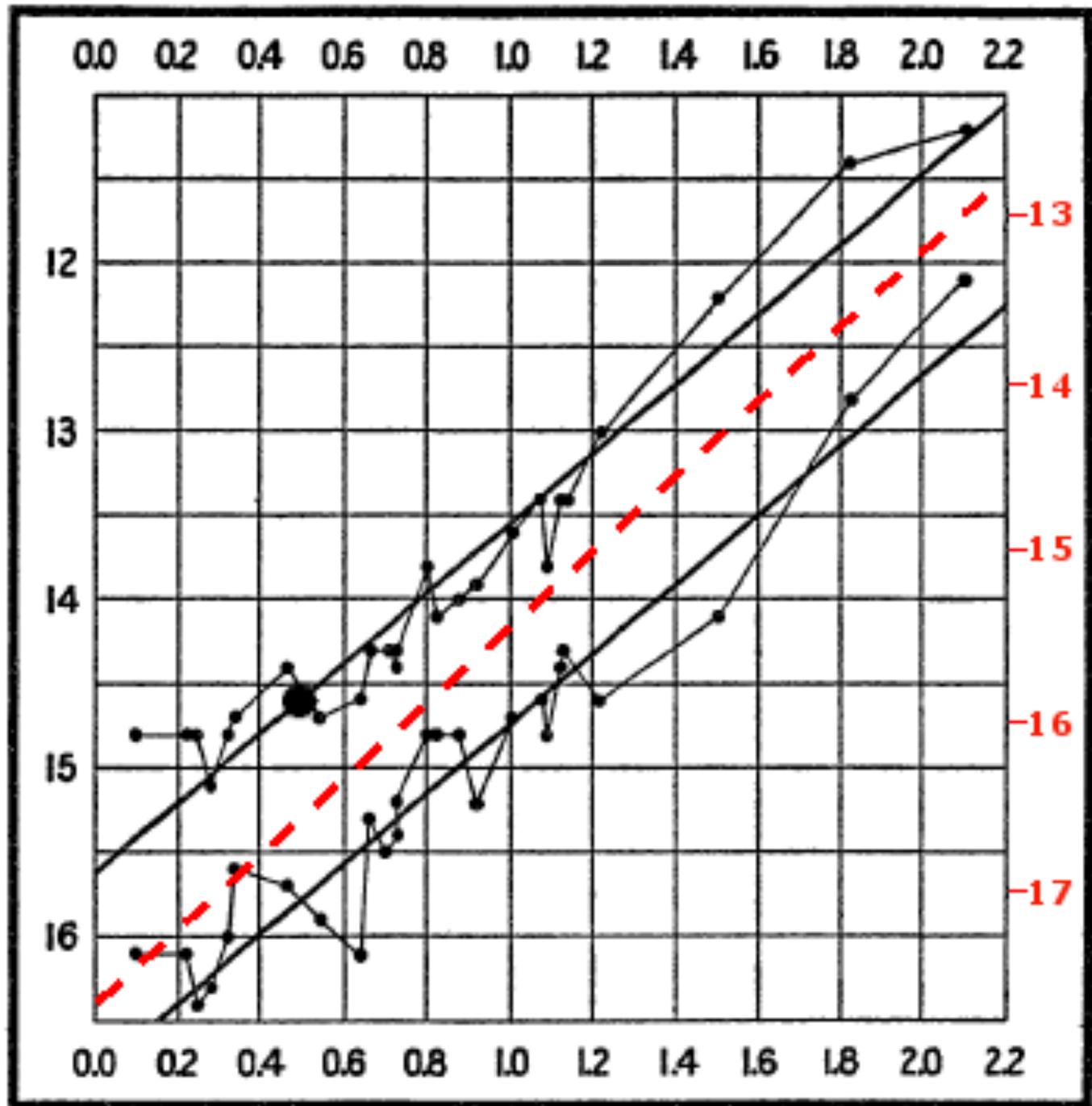


Uma estrela cefeida em M31 pulsa com um período de 30 dias e tem uma magnitude B média da ordem de 20 mag. Qual deve ser a distância de M31?

$$M_B \sim -1,182 - 2,222 \text{ Log } P \sim -4,46$$

$$d \sim 780 \text{ Kpc}$$

A escala de magnitudes utilizada naquela época ainda continha erros sistemáticos que gradualmente foram sendo corrigidos. A figura ao lado mostra na escala vermelha à direita a atual escala de magnitudes aparentes, B , já devidamente corrigidas. A linha tracejada mostra a atual relação período-luminosidade. Apesar da diferença sistemática podemos verificar que a relação de Miss Leavitt está bastante próxima dos valores mais modernos.



Neste mesmo período histórico, de 1912 a 1920, o astrônomo Vesto Slipher (1875-1969) realizou as primeiras observações espectroscópicas mostrando que a maior parte dos objetos que viriam a ser posteriormente classificados como galáxias estavam se afastando da via Láctea a velocidades da ordem de 300 - 1100 km/s. Além disto, os espectros fotográficos a diferentes distâncias da região central indicavam claramente a presença de um efeito de rotação.

Num artigo de 1917 ([PAPhS, 56, 403](#)), contendo as velocidades radiais de 25 galáxias, Slipher detectou um movimento sistemático médio em relação à Galáxia, da ordem de 700 km/s, e comentou:

"... Para que apresentemos esta enorme velocidade, sem que as estrelas próximas se movimentem, é necessário que todo o nosso sistema estelar esteja se movimentando. Tem sido comentado há muito tempo que estas nebulosas espirais seriam sistemas estelares muito distantes. Esta teoria dos Universos Ilhas ganha um grande reforço com as presentes observações."



A vasta maioria das estrelas próximas apresentam velocidades de no máximo 200 km/s. Como é possível argumentar que objetos de velocidades superiores a 700 km/s não pertençam à Via Láctea?

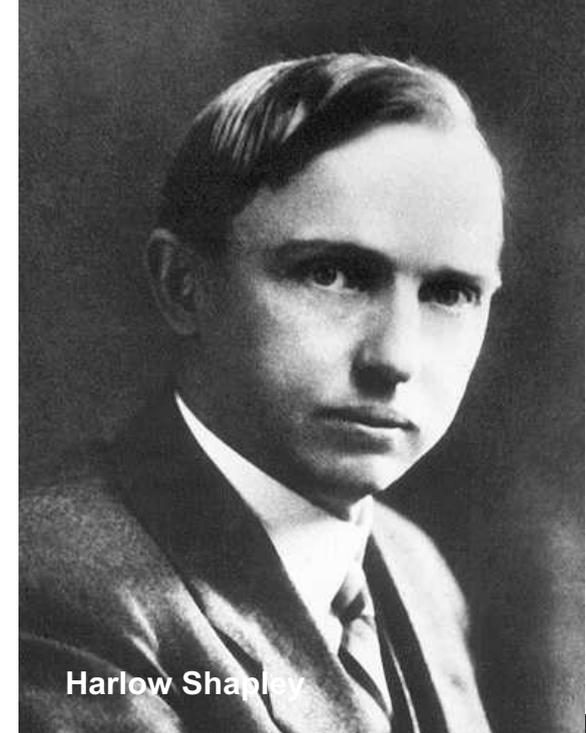
1.7 O Grande Debate



Em 1920 a academia de ciências de Washington convidou Harlow Shapley (1885-1972) e Herber D. Curtis (1872-1942) para um debate sobre a real natureza das nebulosas. Seriam estes objetos galácticos ou extragaláctico?

Entre 1914 a 1921 Harlow Shapley trabalhava na equipe do Observatório de Monte Wilson quando calibrou a relação período-luminosidade das Cefeidas visando estimar as distâncias dos aglomerados globulares. Ele acreditava, corretamente, que estes objetos determinam os limites da Via Láctea.

Herber Curtis trabalhava no Observatório de Lick estendendo o projeto de imageamento de galáxias iniciado anos antes por Keeler. Curtis estava convencido da natureza extragaláctica das nebulosas já que estes objetos se distribuía na esfera celeste claramente evitando o plano da Via Láctea.



Harlow Shapley



Herber D. Curtis

Em 1919 H. Shapley publicou um artigo intitulado *On the Existence of External galaxies* ([1919, JRASC, 13, 438](#)) que resume bem as suas ideias sobre o assunto. Na opinião dele toda a confusão estaria sendo gerada ao se assumir uma escala de dimensão da Via Láctea da ordem de 30-60 Kpc e admitir que as nebulosas tivessem esta mesma escala de dimensão (hipótese que finalmente se revelou aproximadamente correta!). Na verdade os seus trabalhos sobre a distribuição dos aglomerados globulares indicavam, na opinião dele, uma dimensão muito maior podendo atingir cerca de 900 Kpc e neste caso não haveria sentido em se acreditar que as nebulosas fossem exemplos de Universos Ilhas. Se fosse esse o caso então uma nebulosa típica com cerca de 10' de diâmetro deveria estar a cerca de 300 Mpc e não seria possível observar os movimentos internos que alguns observadores como van Maanen ([1918, PASP, 30, 307](#)) argumentava estar detectando!

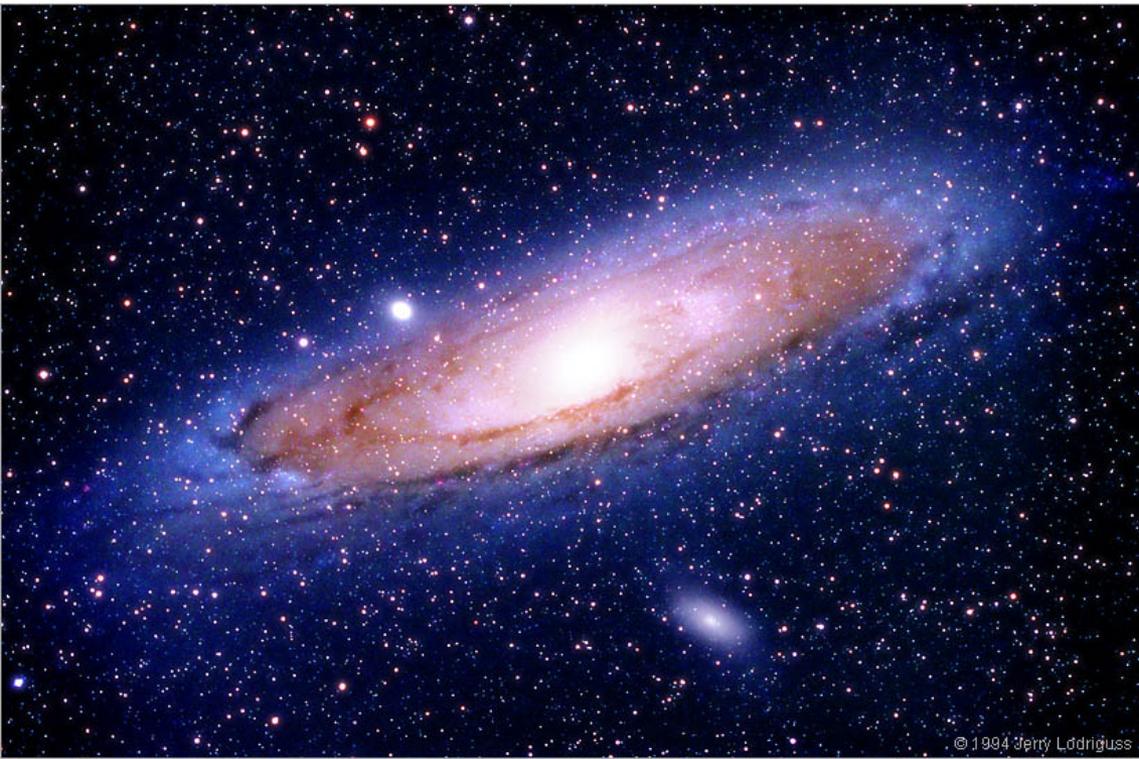
A falha do argumento de Shapley é que a sua estimativa de dimensão da Via Láctea estava grosseiramente superestimada. E isto ocorreu porque no início dos anos de 1920 ainda não existia um perfeito entendimento do fenômeno da absorção interestelar causado pelos grãos de poeira dispersos no disco Galáctico. Esta absorção diminui o brilho aparente das estrelas mais distantes na direção do disco e que foi equivocadamente interpretada como uma diminuição do brilho devido à distância. Além disso a detecção de paralaxe, em M31, anunciada por van Maanen estava incorreta e se devia a dificuldades em determinar posições de objetos difusos em placas fotográficas.

Na verdade a calibração de Shapley indicava uma escala de dimensão do sistema de aglomerados globulares da ordem de 120 Kpc, pelo menos duas vezes superior aos valores atuais. Ao que parece ele achava ainda que este sistema representava uma pequena fração da dimensão total da via Láctea.

Mesmo considerando a premissa errada de Shapley, o seu argumento é interessante na sua essência. Se considerarmos um objeto de diâmetro $D(\text{kpc})$ a uma distância $d(\text{Kpc})$ a sua dimensão angular aparente, em um Universo euclidiano, é

$$\theta = D/d \text{ rad} = 3437,75 D/d \text{ minutos de arco}$$

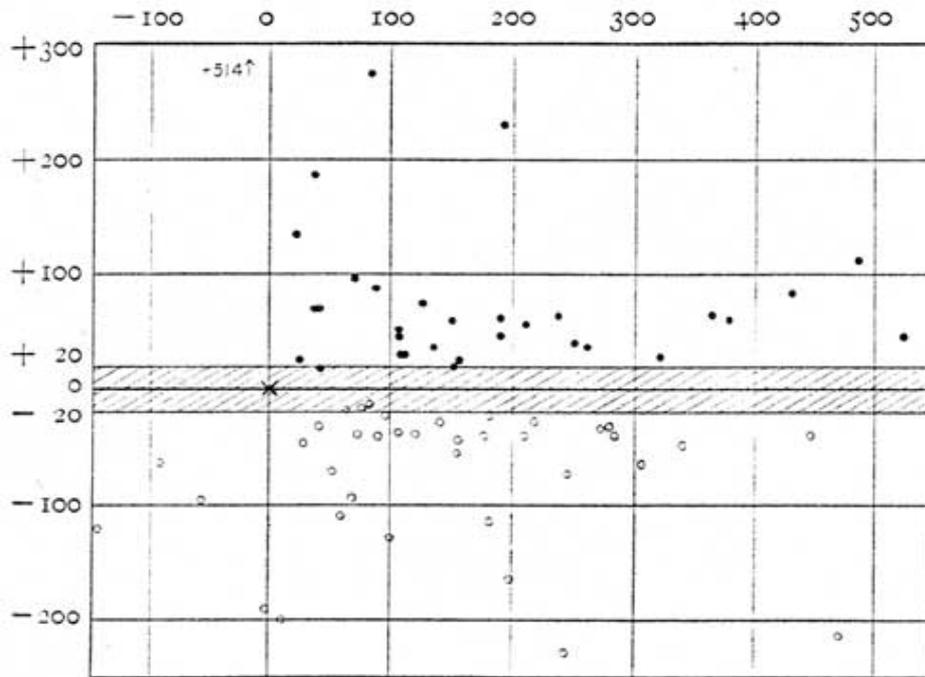
Ora a dimensão angular de M31, a galáxia Andrômeda, é igual a $190'$ e considerando que o seu diâmetro linear seja idêntico ao da nossa Galáxia, $D \sim 40 \text{ Kpc}$, obtemos uma distância $d \sim 724 \text{ Kpc}$. Observe, no entanto, que este argumento não pode ser considerado como uma determinação de distância já que estamos pressupondo um valor ad hoc para o seu diâmetro. Contudo a estimativa resulta ser bastante consistente com a distância real desta galáxia $d \sim 812 \text{ Kpc}$.



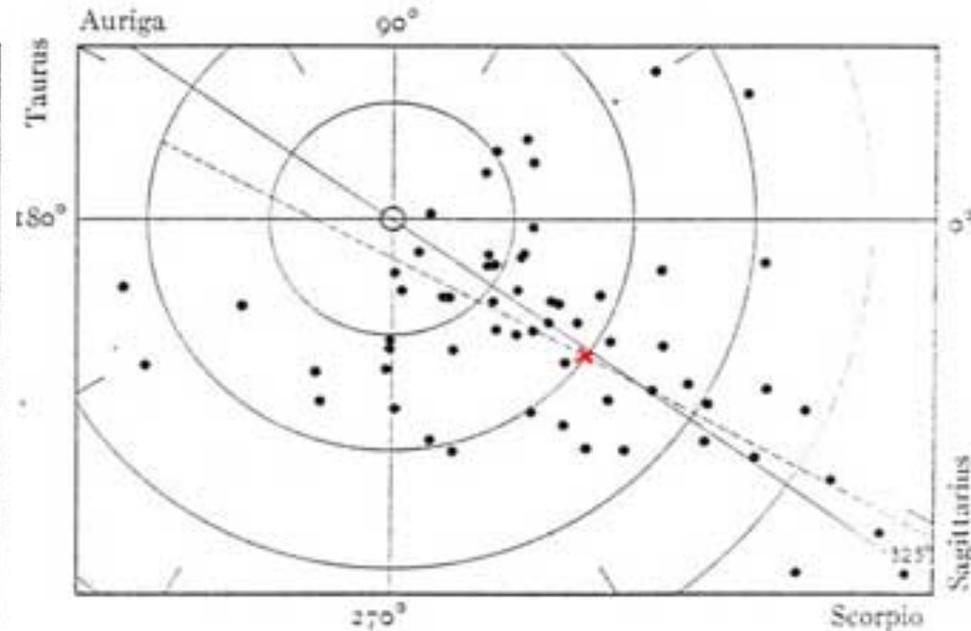
O uso mais corriqueiro da relação acima seria o de estimar o diâmetro linear de M31 a partir da sua distância e conhecendo o seu diâmetro angular aparente. Neste caso obtemos $D \sim 44,8 \text{ Kpc}$.

Durante o grande debate a tônica consistiu na discussão sobre a dimensão da Via Láctea. Shapley defendeu o seu ponto de vista de que a Via Láctea seria muito maior do se acreditava e, como corolário, certamente todas as nebulosas fariam parte da Galáxia.

Ao contrário Herber Curtis defendeu o ponto de vista de que a via Láctea teria um diâmetro da ordem de 20-30 Kpc, mais próximo dos valores atuais. Contudo ele não foi capaz de mostrar objetivamente que o erro na argumentação de Shapley se devia a uma avaliação incorreta da absorção interestelar.



Sistema de aglomerados globulares medidos por Shapley por volta de 1918. A Via Láctea é a região sombreada e os símbolos cheios e vazios marcam os aglomerados acima e abaixo do disco.



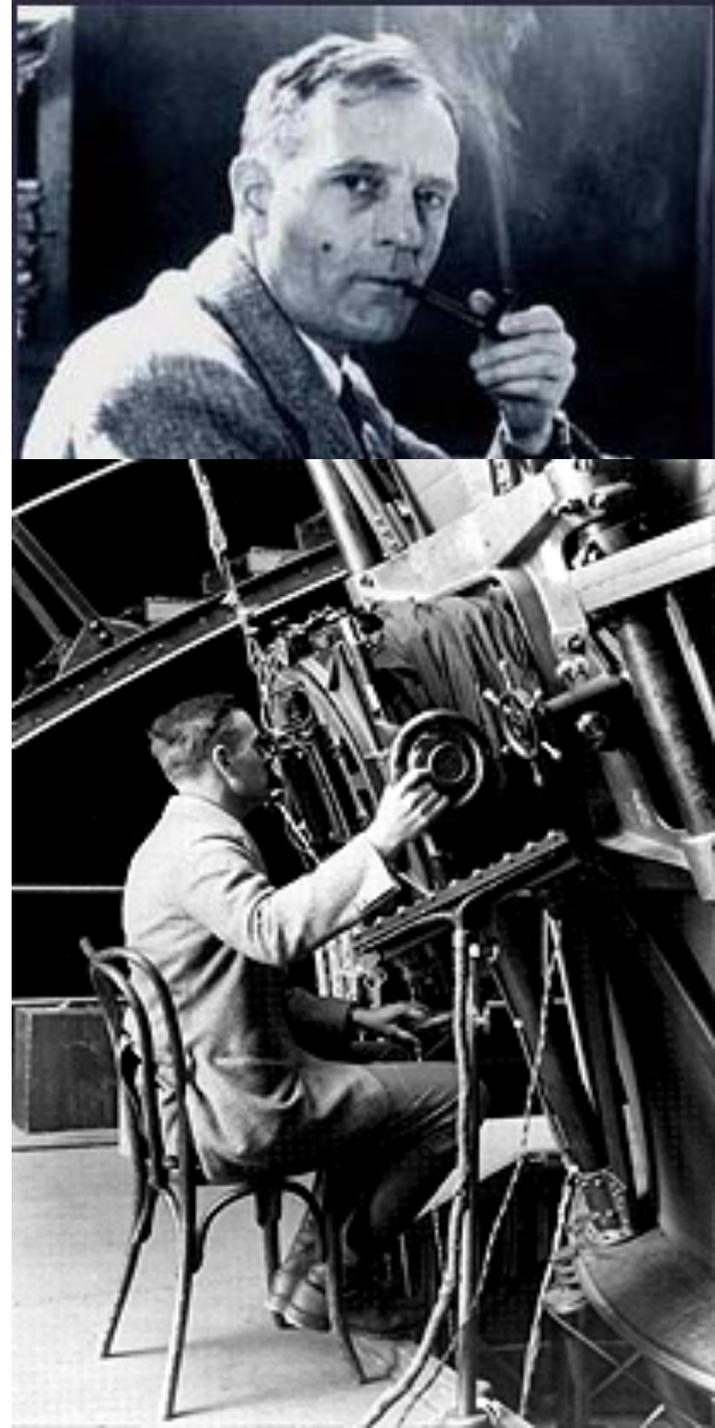
Visão de face do sistema de aglomerados e da dimensão da Galáxia no sistema de Shapley. As separações entre os círculos sucessivos equivale a cerca de 10Mpc.

1.8 Edwin Hubble

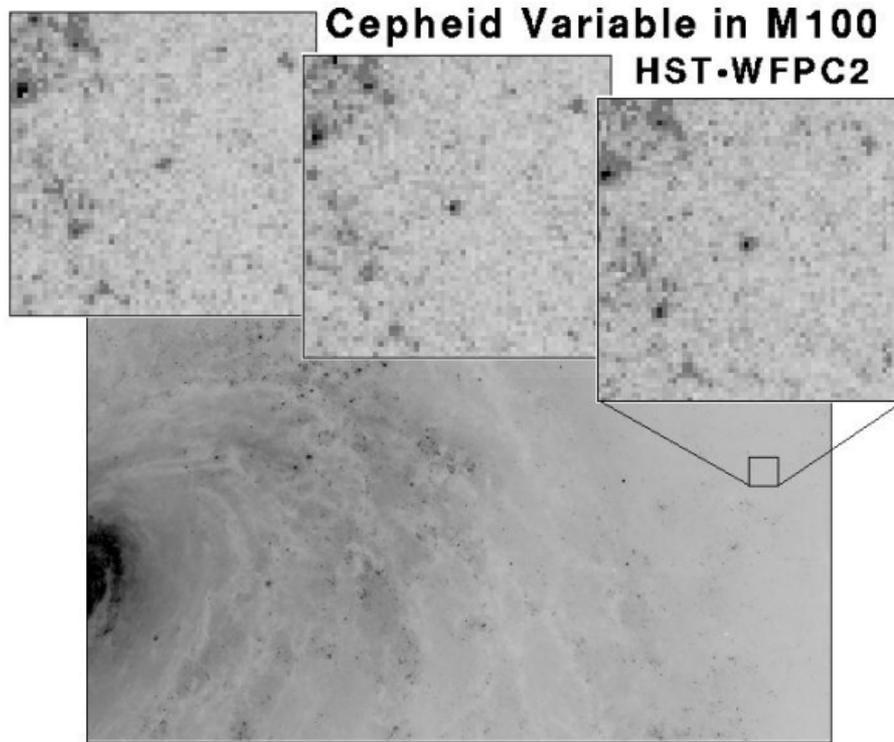
Edwin P. Hubble (1889-1953) formou-se em direito em 1910 e posteriormente estudou astronomia. Em 1914 foi aceito como pesquisador no observatório de Yerkes. Em 1919, após a primeira grande guerra, começou a trabalhar no observatório de Monte Wilson.

Entre as grandes contribuições de Hubble destacam-se:

1. Medidas das distâncias às galáxias próximas.
2. Descoberta da relação distância-velocidade de recessão.
3. Proposta do sistema de classificação morfológica.

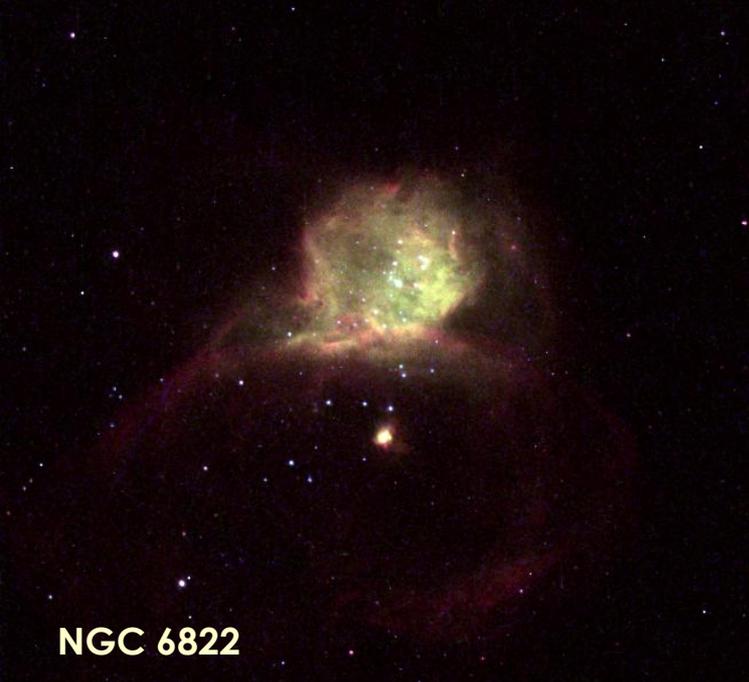


Pouco depois do Grande debate Edwin Hubble resolveu finalmente a grande questão sobre a natureza das nebulosas mostrando que alguns sistemas, como M31, eram de fato estruturas estelares muito distantes e de dimensões comparáveis à própria Via Láctea.



O trabalho de Edwin Hubble foi possível de ser executado graças ao recém inaugurado telescópio Hooker de 100 polegadas. A montagem óptica é do tipo Cassegrain Richthey-Crétien proporcionando uma excelente qualidade óptica permitindo a observação fotográfica individual das estrelas mais brilhantes em galáxias próximas. Várias destas estrelas eram variáveis do tipo Cefeidas possibilitando a estimativa das suas luminosidades, período de variabilidade e conseqüentemente suas distâncias.





NGC 6822

Em 1925 Hubble divulgou os primeiros resultados sobre a distância de NGC 6822. Nesta análise conclui que esta nebulosa deveria estar a uma distância de 214 Kpc ([1925,ApJ,62,409](#)).

Utilize os gráficos ao lado e a calibração das Cefeidas apresentadas antes para estimar a distância de NGC 6822.

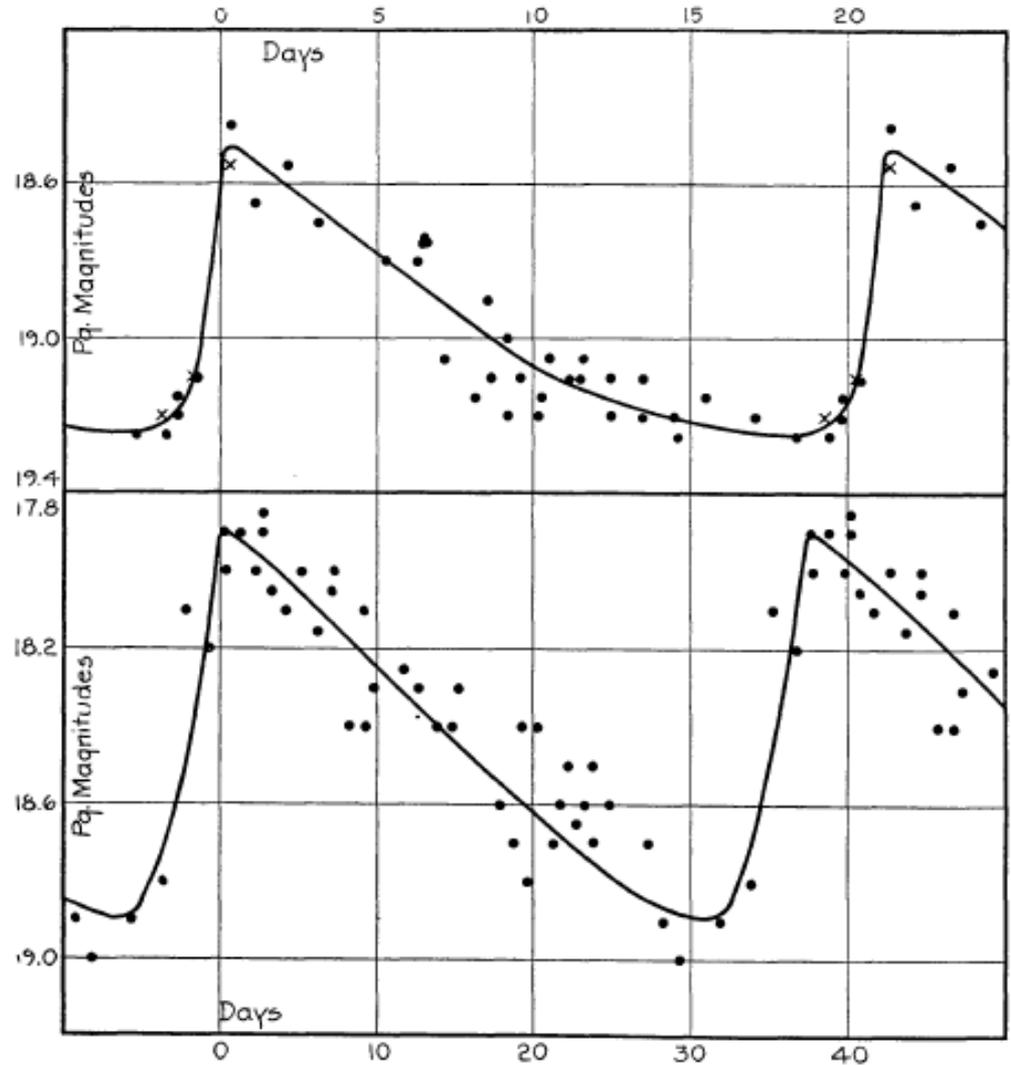
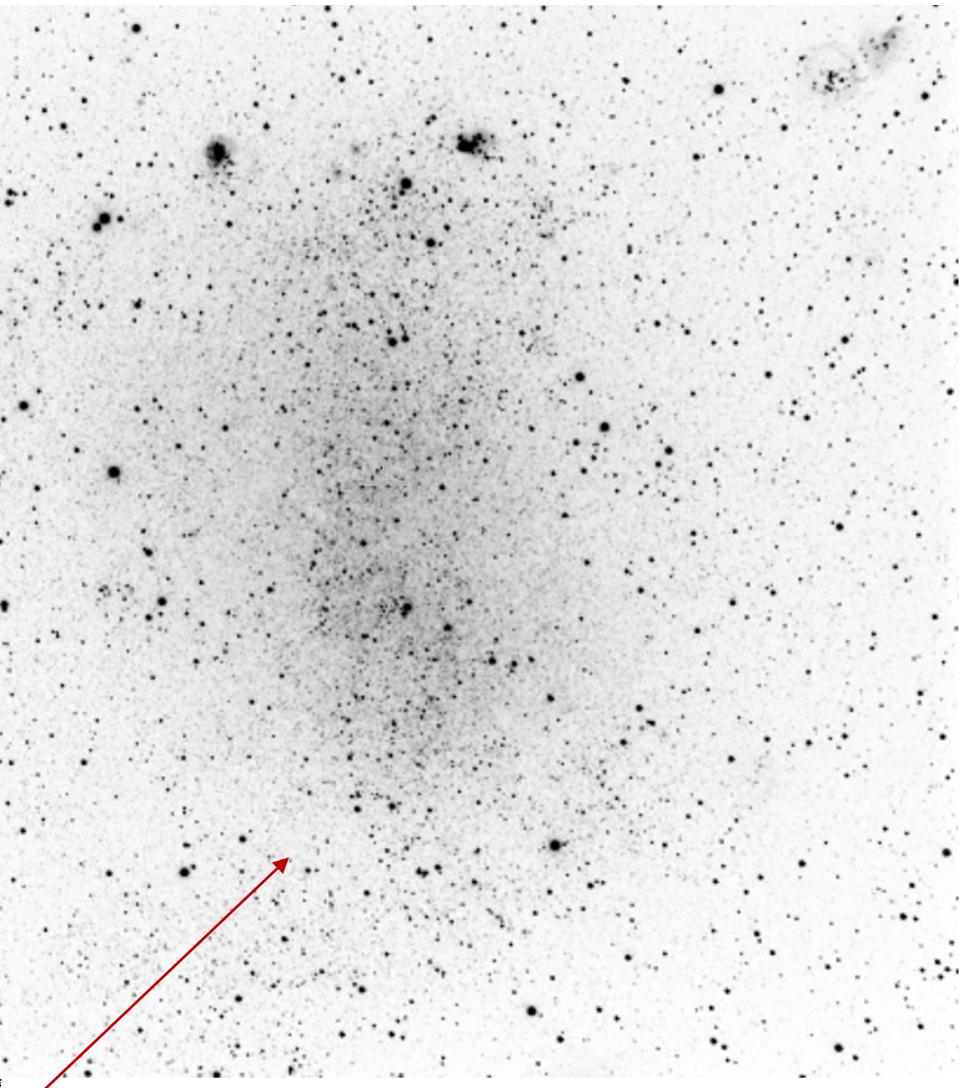
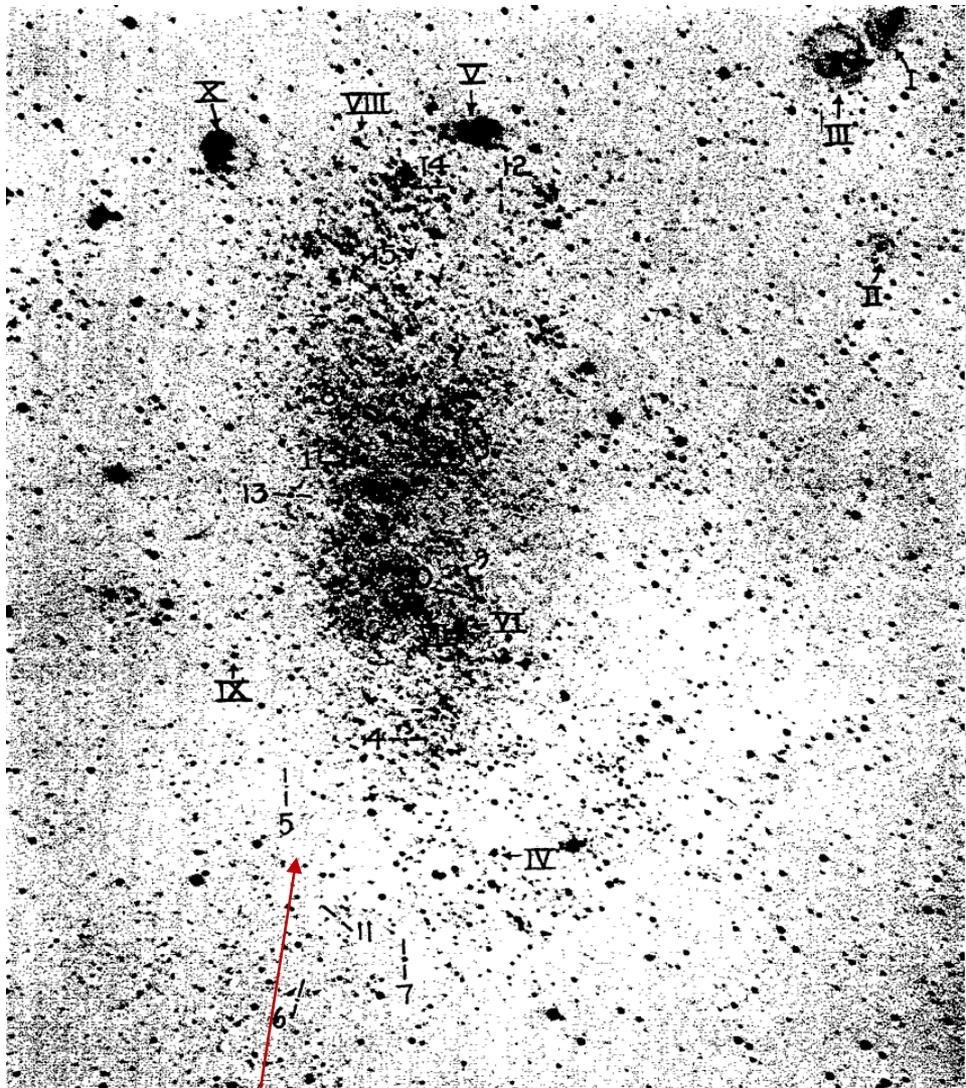


FIG. 1.—Light curves for two Cepheids in N.G.C. 6822. Upper curve, variable No. 6. Period 21.06 days; range 18.5–19.25. Lower curve, variable No. 2. Period 37.45 days; range 17.9–18.9. The three crosses on the rising slope of the upper curve represent observations on successive days and illustrate the rapid brightening of the variables.



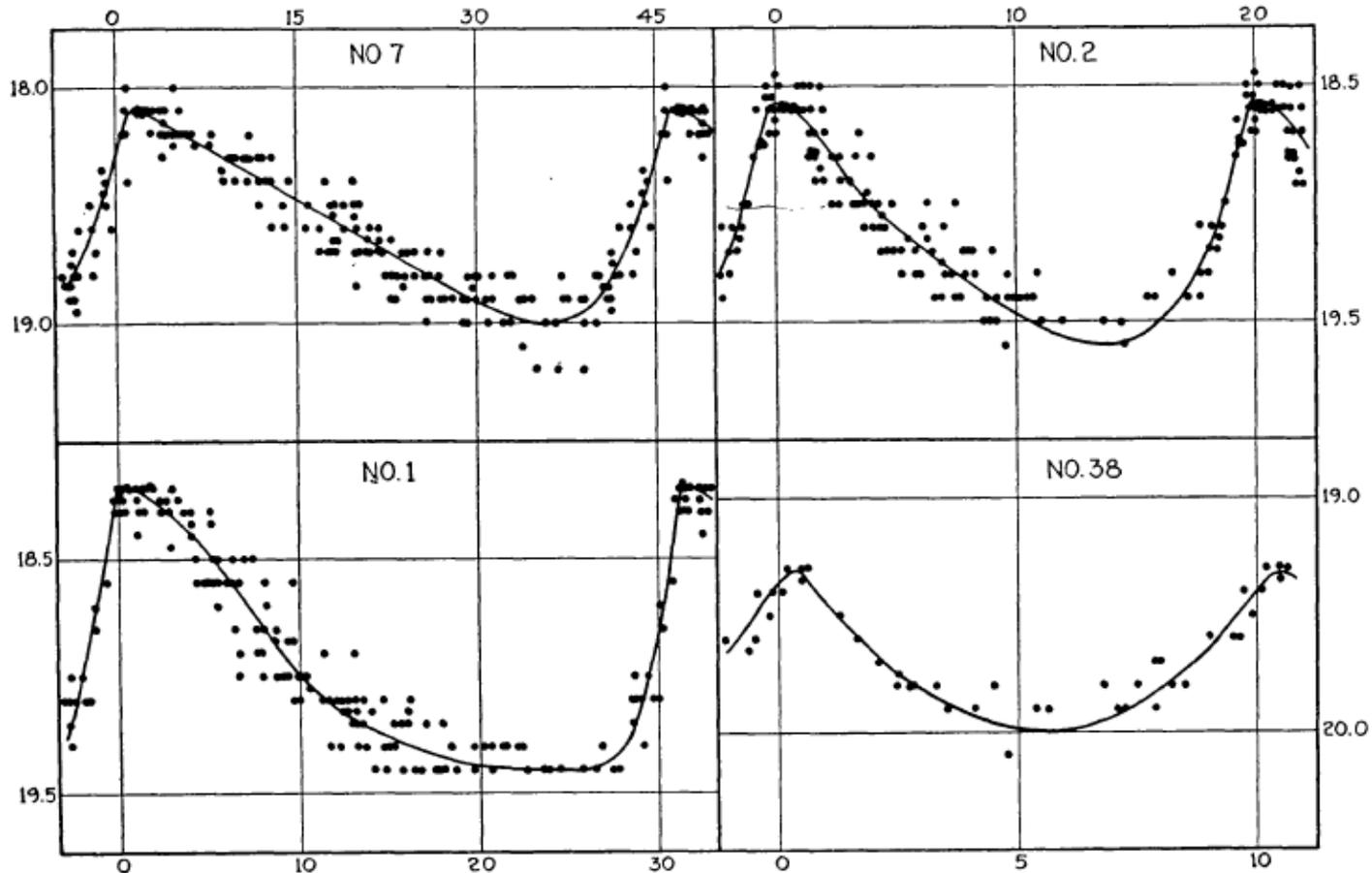
Tal qual a SMC, onde miss Leavitt calibrou a relação período-luminosidade das cefeidas, a galáxia NGC 6822 é também do tipo irregular. Porém as estrelas cefeidas de NGC 6822 são muito mais débeis indicando que o objeto está mais distante. À esquerda temos a imagem original de Hubble e à direita uma imagem moderna obtida com uma câmara CCD. Uma cefeida de mesmo período tem em NGC 6822 uma magnitude 4,2 mag mais débil do que na SMC. Portanto a galáxia NGC 6822 está cerca de 7 vezes mais distante.



M 31
The Andromeda Galaxy

Em 1929 Hubble finalmente divulgou os esperados resultados sobre a distância de M31 ([1929, ApJ, 69, 103](#)) . Um total de 350 placas foram obtidas e 50 variáveis cefeidas tiveram as suas curvas de luz levantadas. A conclusão de Hubble é que a distância devia ser da ordem de 275 Kpc, bem inferior as atuais estimativas. Mesmo assim não havia dúvidas tratar-se de um sistema estelar independente (veja também o livro [RealmOfNebulae](#)).

Utilize os gráficos ao lado e a calibração das Cefeidas apresentadas antes para estimar a distância de M31.



1.9 ...e a vida continua

Mas afinal porque se preocupar em examinar aspectos históricos de problemas que podemos considerar atualmente como ultrapassados e já esclarecidos de longa data? Não seria melhor deixar a História para os historiadores?

O fato é que estas controvérsias nos ensinam muito sobre o comportamento dos pesquisadores e como os avanços ocorrem nas várias áreas e particularmente no assunto deste curso. É certo que as controvérsias atuais tendem a ser resolvidas muito mais rapidamente do que os quase dois séculos de debate sobre a natureza das galáxias. Mas, mesmo assim, existem alguns traços em comum que ilustram como os pesquisadores lidam com as questões científicas.

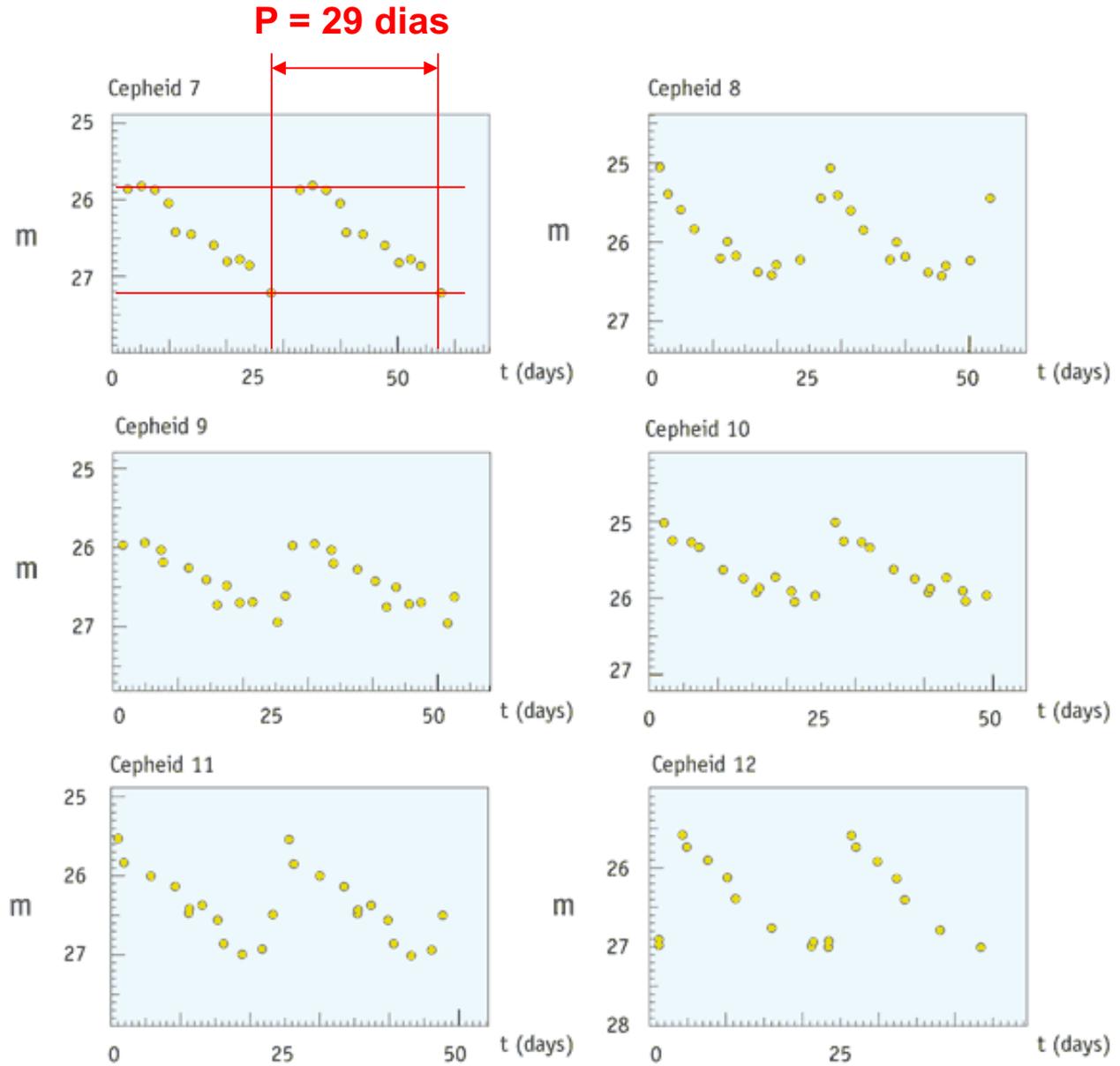
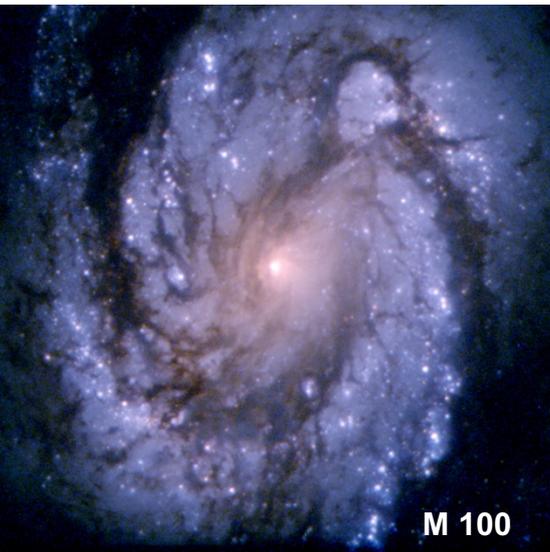
1. Normalmente os grandes conflitos de ideias indicam que opiniões contraditórias podem ser compatíveis com um determinado cenário de informações empíricas. E neste caso, em geral, a solução surge após observações mais acuradas ou em outras regiões espectrais. Um exemplo é a distribuição de massa das galáxias espirais, que era tida como resolvida nos anos de 1950, e que sofreu uma reviravolta a partir dos anos de 1960 com o surgimento de espectrógrafos e detectores mais eficientes. Outra controvérsia mais recente, e relacionada com este tema, diz respeito à natureza da matéria escura, que ainda aguarda um desfecho futuro.
2. Muitas vezes um avanço substantivo nas discussões é obtido quando argumentos contraditórios são descobertos. Nem sempre uma teoria tida como correta deve ser reverenciada como uma verdade absoluta.

3. Outra questão de grande relevância é que um assunto ainda que apresentando opiniões contraditórias não deve ser considerado como estéril até que se resolva a contradição. Veja que a contribuição de Herschel e outros apesar de não ter solucionado o debate foi de grande utilidade para enriquecer este tema de pesquisa. Um exemplo atual desta situação ocorre com a evolução das galáxias. Não se sabe exatamente como as galáxias se formam e evoluem. Existem vários cenários competindo pela primazia de se tornarem definitivos. E novos cenários e ideias são agregados todos os anos a esta discussão.



1.9 Problemas

1. As figuras ao lado mostram os gráficos de curva de luz obtidas recentemente para a galáxia M100. Estime a magnitude média e o período destes objetos. A partir destes dados estime a distância de M100.



Solução:

Observe, por exemplo pela estrela N7, que o seu período é $P = 57 - 28 = 29$ dias e conseqüentemente a sua magnitude absoluta deve ser $M = M_0 - 2,222 \log P = -4,43$. Pela escala vertical da curva de luz constatamos que a sua magnitude média é de aproximadamente 26,75. Portanto o seu módulo de distância será $5 \log d - 5 = 31,18$ e $d = 17,23$ Mpc. Um valor mais acurado pode ser obtido estimando-se a média das outras cefeidas identificadas nesta galáxia. Segundo o site NED a distância média de M100 é igual a 13,90 Mpc.

2. Estime o diâmetro angular de algumas galáxias espirais no aglomerado de Hércules e supondo que estas sejam comparáveis com as dimensões da Via Láctea estime a distância do aglomerado.

Solução:

Pela imagem de A2151 vista no próximo slide podemos estimar a escala de placa desta reprodução. A dimensão angular de $36'43''$ equivale a uma largura de 24,69 cm. Portanto a escala de placa é $K = 36'43''/24,69\text{cm} = 0,6678 \text{ ''/cm}$.

Este aglomerado é rico em galáxias espirais e selecionamos as 3 maiores imagem e medimos as dimensões como sendo 0,72cm, 0,77cm e 0,82cm. Utilizando a escala de placa podemos determinar as dimensões angulares como sendo 0,49', 0,52' e 0,56'. O valor médio nos indica que em média esses objetos devem ter $\langle L \rangle = 0,52'$. A dimensão média expressa em radianos é $\langle L \rangle = 0,00015$ rad. Como $L(\text{rad}) = L(\text{Kpc})/d(\text{Kpc})$ e $L(\text{Kpc}) \sim 30$ Kpc concluímos que $d \sim 30 \text{ Kpc}/L(\text{rad}) \sim 198 \text{ Mpc}$. Como comparação a média de A2151 é de 156 Mpc.



A 2151 Aglomerado de Hércules

3. Duas galáxias têm magnitudes aparentes idênticas $B = 20,0$, mas uma delas está duas vezes mais distante. Qual é a diferença entre as magnitudes absolutas destes dois objetos?

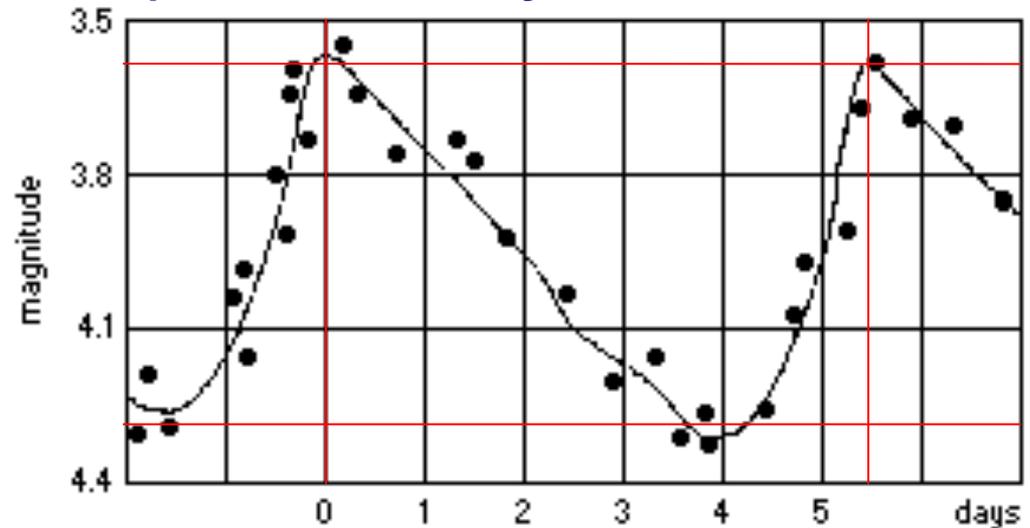
Solução:

Pela definição de magnitude concluímos que $\Delta M = 1,5$ mag.

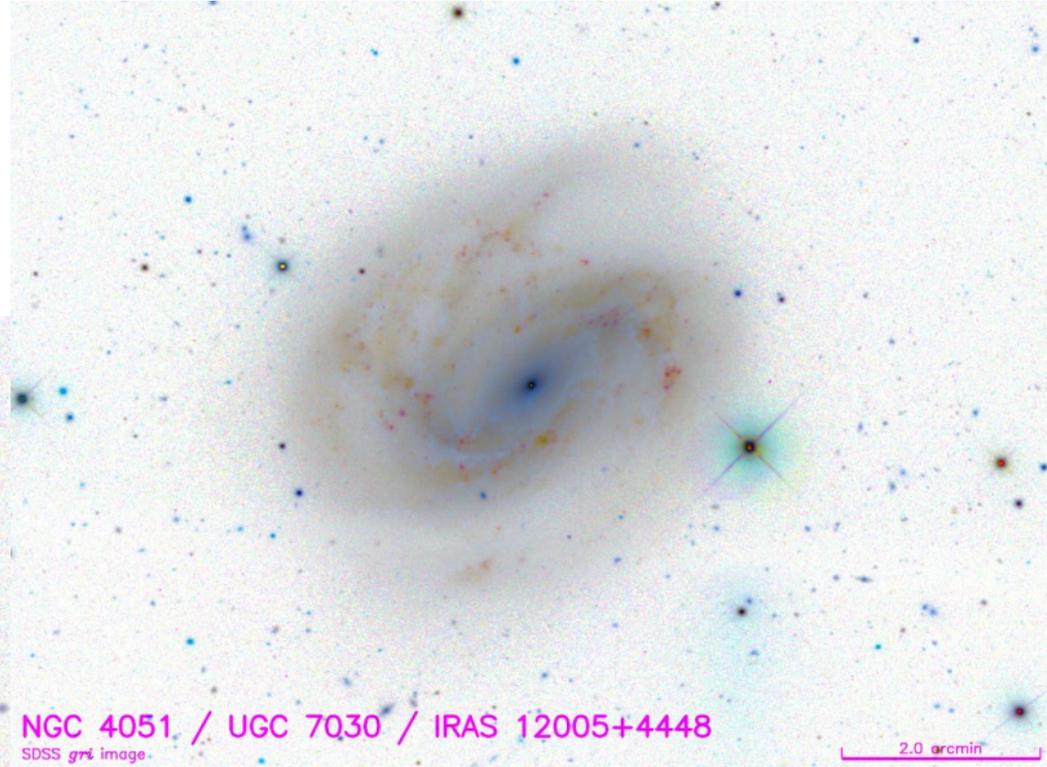
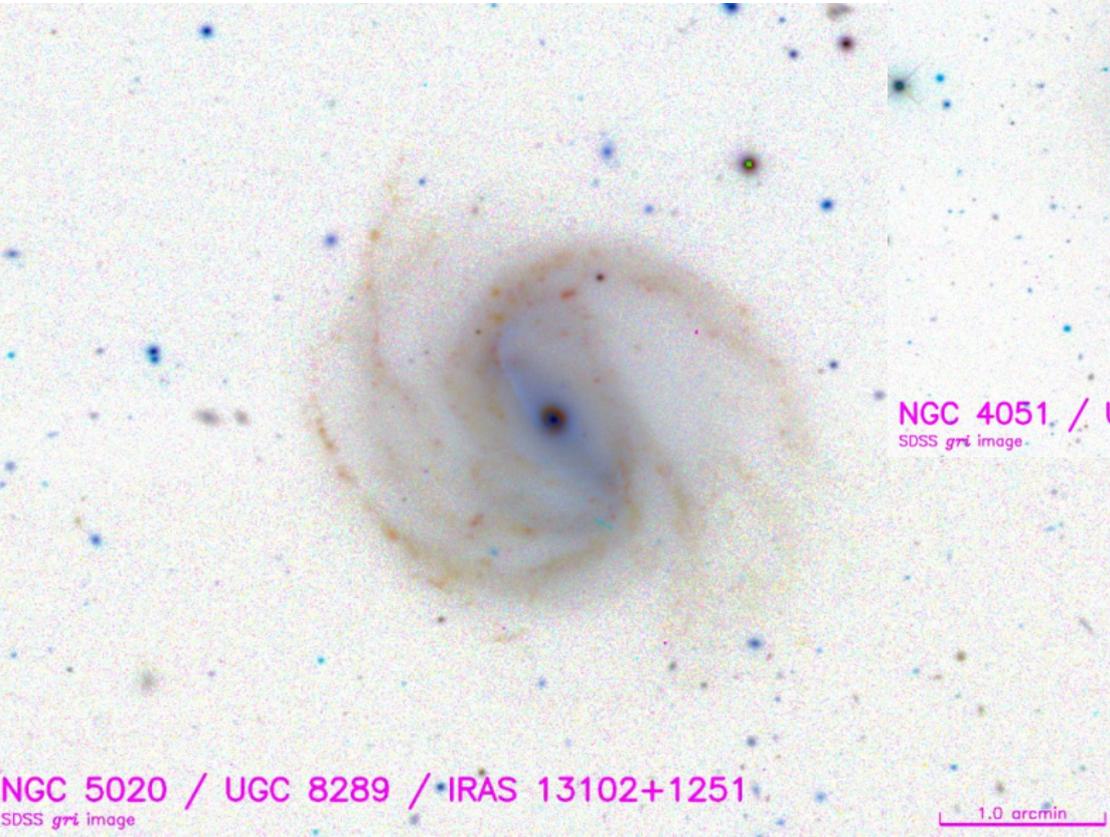
4. A estrela δ Cephei é uma das estrelas cefeídas mais próximas do sistema solar. A sua distância é da ordem de 272 pc e a sua curva de luz está representada na figura abaixo. A partir destas informações avalie o ponto zero da relação das cefeídas.

Solução:

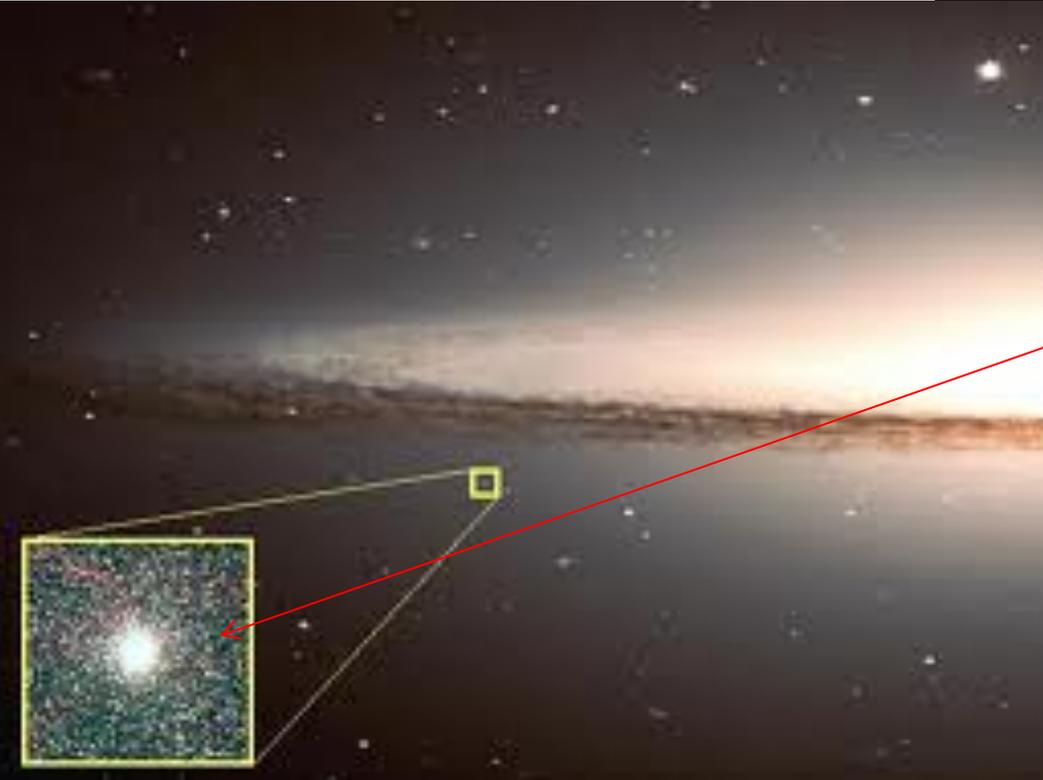
Através da figura ao lado temos que o período desta é $P \sim 5,3$ dias e a magnitude aparente média é de aproximadamente $m = 4,0$ mag resultando em $M = -3,17$. Como $M = M_0 - 2,222 \text{ Log } P$ resulta que $M_0 \sim 1,56$ mag.



5. As galáxias NGC 5020 e NGC 4051 têm uma morfologia semelhante mas dimensões aparentes distintas. Supondo que ambas têm a mesma magnitude absoluta estime a razão entre as distâncias destes dois objetos. Compare esta estimativa com a avaliação mais precisa de distâncias de 53,8 Mpc e 30,8 Mpc respectivamente.



6. A Grande Nuvem de Magalhães está a uma distância de 49 Kpc, apresenta uma magnitude aparente da ordem de 0,40 (V) e o seu diâmetro aparente é da ordem de 645 minutos de arco. Qual é a sua magnitude absoluta? A qual distância ela deveria estar localizada para escapar a uma identificação visual direta ($V \sim 6,0$)? Nesta distância qual seria o seu diâmetro aparente?



7. A imagem ao lado é da galáxia Sombrero = M104 = NGC 4594 cuja distância é igual a 10,39 Mpc. Vários aglomerados globulares foram identificados pelo telescópio espacial HST nesta galáxia como o que está indicado na figura. Estes objetos tem da ordem de 10^4 - 10^6 estrelas e os mais brilhantes apresentam uma magnitude absoluta da ordem de -9,0 (V). Suponha que seja este o caso do aglomerado indicado na figura. Qual seria a sua magnitude aparente?

8. A galáxia M87 localizada no aglomerado de virgo é um exemplo de galáxia elíptica gigante. Ela está localizada a uma distância de 16,84 Mpc, tem uma magnitude aparente igual a 8,63 (V) e um diâmetro aparente igual a 8,3 minutos de arco. Estime a sua magnitude absoluta e o seu diâmetro linear. Quantas vezes esta galáxia é maior do que a nossa própria galáxia cuja dimensão é da ordem de 30 Kpc. Qual é a razão entre a sua luminosidade e a luminosidade da via Láctea ($M_V \sim -21,0$)?

9. A nossa galáxia se aproxima da galáxia Andrômeda com uma velocidade da ordem de 300 km/s. Sabendo que a sua distância atual é da ordem de 792 kpc em quanto tempo estes

Dois objetos
deverão colidir?
Atualmente o
diâmetro angular
de M31 é cerca de
190x60 minutos de
arco. Quanto
tempo vai ser
transcorrido até
que a sua imagem
ocupe cerca de 1/4
do céu. Qual será
a aparência do céu
noturno nesta
época?



10. Imagine que o sistema estelar em que vivemos possa ser modelado por um disco achatado de altura (H) e raio (R). Digamos que este sistema contenha n estrelas por unidade de volume e que não exista absorção interestelar. Nós estamos no interior do disco a uma distância R_0 do centro e a uma altura H_0 do plano. Um observador começa então a realizar contagens de estrelas em um pequeno ângulo sólido $\Delta\Omega$. Qual seria a razão das contagens na direção do centro e do antcentro visto na posição do observador? E na direção vertical ao plano do disco?

11. Em 1745 Georges de Buffon formulou a hipótese que o sistema solar teria se formado quando uma outra estrela se aproximou do Sol e a sua interação gravitacional retirou, por efeito de maré, o material que constituiria cada um dos planeta. Cite pelo menos três argumentos que inviabilizam esta hipótese.

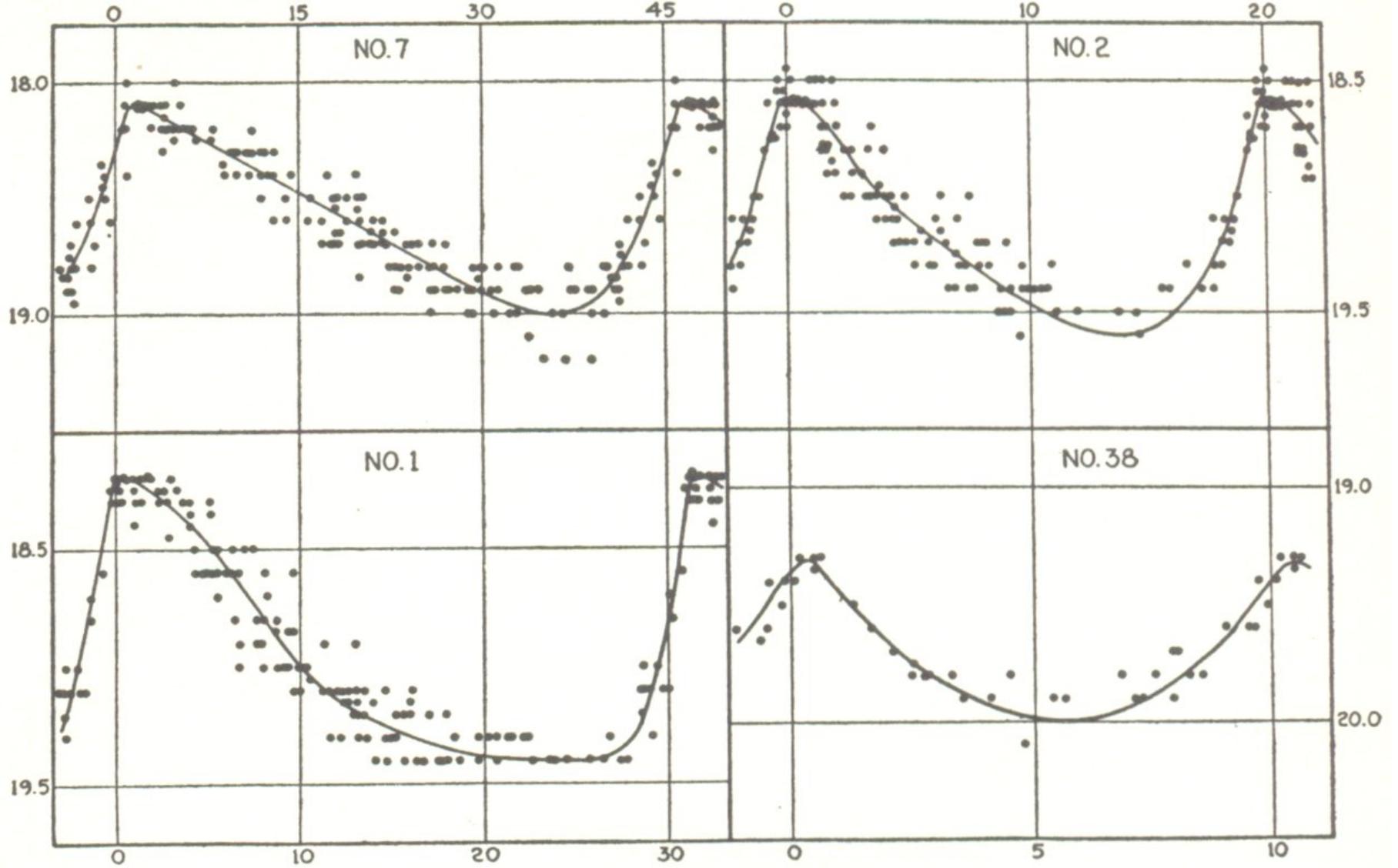
12. Uma estrela se move em média com uma velocidade de 100 km/s no interior da galáxia M31. Sabendo-se a distância desta galáxia estime qual a variação angular na posição desta estrela após um ano de observações. Como se compara esta estimativa com a precisão média de 1 segundo de arco obtida a partir das observações ópticas realizadas de solo.

13. Utilize os dados de miss Leavitt e estime a distância da LMC.

14. (P1-2010) A figura abaixo apresenta um conjunto de quatro cefeidas observadas originalmente por E. Hubble em M31. A escala horizontal está em dias e a escala vertical em magnitudes aparentes.

(A) Estime as magnitudes médias e os respectivos períodos destes objetos.

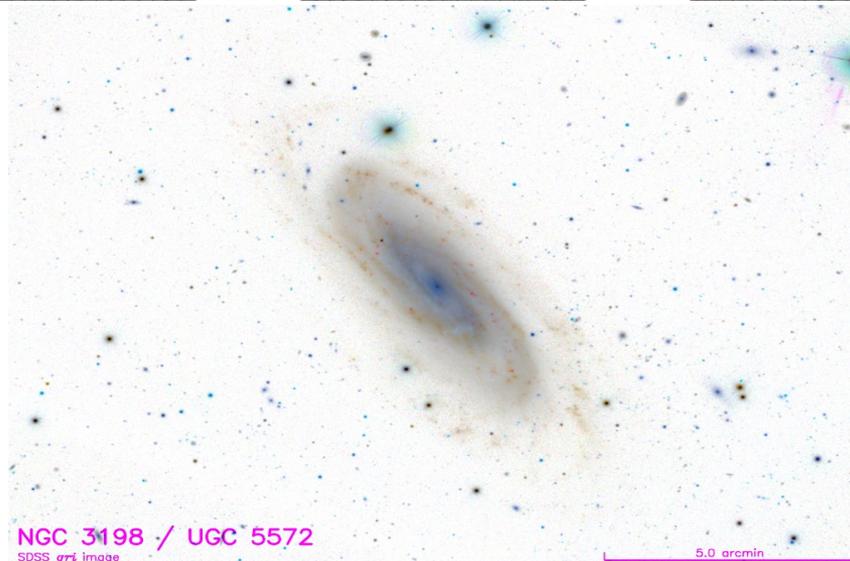
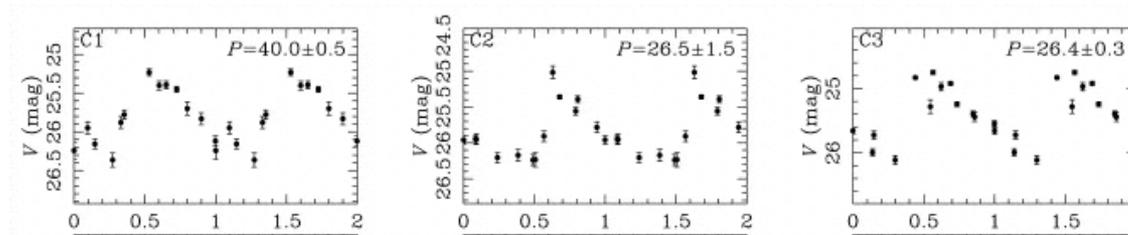
(B) Determine a distância média de M31, com o seu erro observacional.



15. (P1- 2014) Nos anos de 1990 várias estrelas cefeidas foram observadas pelo HST na galáxia NGC 3198. Na figura abaixo temos um exemplo de três destas estrelas com seus respectivos períodos e curvas de luz na banda V. Nesta banda a calibração fotométrica da relação período-luminosidade das cefeidas indica que $M_V = -2,76 \text{ Log } P - 1,40$.

Com base nestas informações responda as seguintes questões:

- Estime as magnitudes aparentes médias das três estrelas cefeidas, a distância desta galáxia e seu respectivo erro.
- Utilizando a imagem acima extraída da base de dados SDSS estime o diâmetro aparente desta galáxia e o seu diâmetro métrico em kiloparsecs.
- Qual seria a sua distância se fizéssemos a suposição inicial que esta galáxia tivesse o mesmo diâmetro da nossa Galáxia?



NGC 3198 / UGC 5572
SDSS grz image

5.0 arcmin