

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

2015

Módulo 2

*Conhecendo o Universo
em que vivemos*

Presidente da República
Dilma Vana Rousseff

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação
José Aldo Rebelo Figueiredo

Secretário-Executivo do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
Álvaro Doubes Prata

Subsecretário de Coordenação de Unidades de Pesquisas
Kaio Júlio César Pereira

Diretor do Observatório Nacional
João Carlos Costa dos Anjos

Observatório Nacional/MCTI (*Site: www.on.br*)
Rua General José Cristino, 77
São Cristóvão, Rio de Janeiro - RJ
CEP: 20921-400

Criação, Produção e Desenvolvimento (*Email: daed@on.br*)



Carlos Henrique Veiga
Cosme Ferreira da Ponte Neto
Sílvia da Cunha Lima
Vanessa Araújo Santos
Giulliana Vendramini da Silva
Giselle Veríssimo
Caio Siqueira da Silva

Equipe de realização

Conteúdo científico e texto
Carlos Henrique Veiga

Projeto gráfico, editoração e capa
Vanessa Araújo Santos

Web Design
Giselle Veríssimo
Caio Siqueira da Silva

Colaboradores
Ney Avelino B. Seixas
Alex Sandro de Souza de Oliveira

Este livro é dedicado a Antares Cleber Crijó (1948 - 2009) que dedicou boa parte da sua carreira científica à divulgação e popularização da ciência astronômica.

© 2015 Todos os direitos reservados ao Observatório Nacional.



A Via Láctea é uma galáxia espiral da qual o Sistema Solar faz parte. Vista da Terra, aparece como uma faixa brilhante e difusa que circunda toda a esfera celeste, recortada por nuvens moleculares que lhe conferem um intrincado aspecto irregular e recortado. Sua visibilidade é severamente comprometida pela poluição luminosa. Com poucas exceções, todos os objetos visíveis a olho nu pertencem a essa galáxia.

Crédito: European Southern Observatory (ESO)

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

2015

Módulo 2

*Conhecendo o Universo
em que vivemos*

11

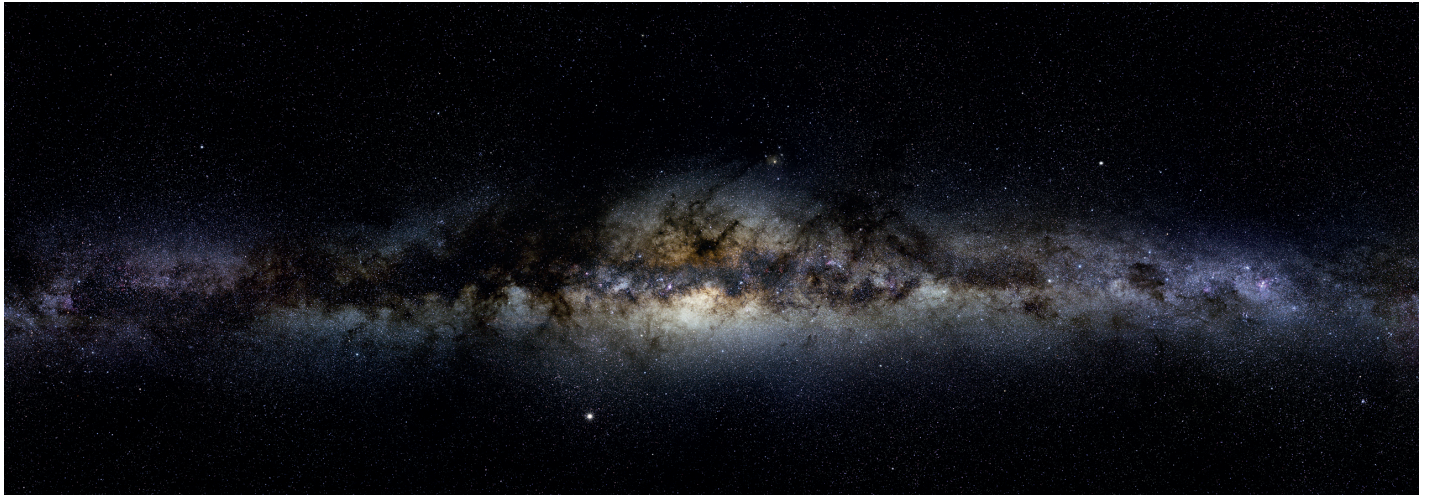
As primeiras descobertas

COMO COMEÇAMOS A CONHECER O CONTEÚDO DO UNIVERSO

Vimos que a vontade de descrever o Universo estava presente em várias culturas antigas. O conteúdo conhecido do Universo, naquela época, limitava-se aos seis planetas visíveis a olho nu (Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno), seus satélites naturais (nossa Lua e, a partir de Galileu, os quatro grandes satélites de Júpiter ou seja, Io, Europa, Ganimedes e Calisto), e as estrelas.

O Universo dos povos antigos era apenas a nossa Galáxia, a Via Láctea, este enorme conjunto de estrelas que vemos distribuídas no céu em uma noite escura. Ela é formada pelas estrelas que constituem o plano da nossa Galáxia. A imagem abaixo mostra toda a riqueza da Via Láctea que podemos observar em uma noite bastante escura. Este era o Universo até praticamente o século XX! Veremos mais tarde que somente em 1935 é que passamos a aceitar que a nossa Galáxia não era o Universo e sim apenas uma pequeníssima parte dele.

Plano da Via Láctea.



Muitos séculos passariam até que o ser humano tivesse uma imagem mais detalhada, mas de modo algum completa, do conteúdo do Universo. Esse conhecimento certamente aumentou após a primeira utilização do telescópio para observar os céus, feita por Galileu em 1609, e a partir da disseminação de seu uso por outros estudiosos da astronomia. Mas, embora colecionar dados seja importante, não é suficiente para que os cientistas consigam descrever a estrutura do Universo. Isto continua a ser, até hoje, um dos mais fascinantes assuntos científicos. No entanto, apesar de todos os esforços, o Universo ainda guarda seus segredos e sua estrutura, até hoje, continua não completamente explicada.

Abd Al-Rahman Al-Sufi (903-986).



OS PRIMEIROS MODELOS

Numa época em que a palavra “cientista” ainda não existia e aqueles que se interessavam por ciência eram chamados de “filósofos naturais”, muitos pensadores começaram a especular não sobre o movimento dos planetas no Sistema Solar mas sim sobre um Universo bem mais amplo que incluía um número cada vez maior de estrelas. Afinal, qual era o seu tamanho e seu conteúdo?

Há muito tempo que certas partes do céu chamavam a atenção daqueles que o admiravam. Por exemplo, algumas pessoas antigas, dotadas de um senso agudo de observação, já haviam notado a existência de uma pequena nebulosidade, visível a olho nu, nos céus do hemisfério sul.

Essa pequena nebulosidade já havia sido percebida pelo astrônomo persa Abd Al-Rahman Al-Sufi (também conhecido como Abr-ar Rahman As Sufi,

ou Abd al Rahman Abu al Husain, e algumas vezes como Azophi) que a citou no seu “Livro das Estrelas Fixas”, publicado no ano 964, com o nome de “Al Bakr” (“Boi Branco”).

A figura ao lado pertence ao livro de Al-Sufi e nela podemos ver o desenho que localiza esta pequena nebulosidade, marcada com a letra ‘A’.

Para a história oficial esta “nuvem” foi descoberta pelo navegador Fernão de Magalhães em 1519 e recebeu o nome de Grande Nuvem de Magalhães (mais tarde veremos que esta é uma das duas únicas galáxias visíveis a olho nu no hemisfério sul).

A imagem a seguir mostra as galáxias Grande e Pequena Nuvem de Magalhães observadas com o auxílio de modernos telescópios. No entanto, o que os antigos observadores viam era algo completamente diferente, apenas uma pequenina mancha no céu. O que era esse objeto nebuloso? Por que ele era diferente das estrelas?



Imagem extraída do livro de Al-Sufi.



Imagem das galáxias Grande e Pequena Nuvem de Magalhães.

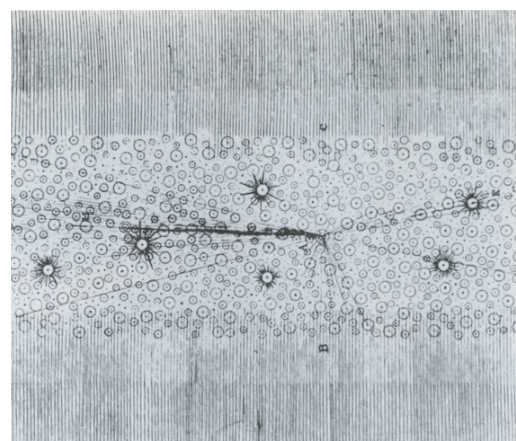
THOMAS WRIGHT E UM DOS PRIMEIROS MODELOS MODERNOS DO UNIVERSO

A partir do século XVIII, com o desenvolvimento de novas teorias científicas e a melhoria dos equipamentos usados para observações astronômicas, os cientistas passaram a ter alguns elementos essenciais para começar a compreender a estrutura do Universo.

O filósofo inglês Thomas Wright propôs em seu livro “An original theory or new hypothesis of the universe”, publicado em 1750, um dos primeiros modelos modernos para o Universo. Nele Wright procurava explicar alguns aspectos que eram naturalmente observados no céu como, por exemplo, a aparência da Via Láctea.

Para Wright o Universo estava contido em uma pequena concha situada entre duas esferas concêntricas. As estrelas estavam distribuídas de tal modo a “preencher o meio inteiro com um tipo de irregularidade regular de objetos”. Olhando ao longo de uma tangente à concha, veríamos uma quantidade enorme de estrelas. O céu inteiro naquela direção estaria preenchido com estrelas distantes e fracas de tal maneira que a região pareceria ter um brilho nebuloso. Se um observador olhasse através da porção fina de tal Universo ele veria bem poucas estrelas e o céu pareceria bem pouco populoso nesta direção. Wright então concluiu que a aparência da Via Láctea resultava de uma distribuição esférica de estrelas. Para Thomas Wright a aparência observada da Via Láctea era devida a um efeito óptico produzido pelo fato de estarmos imersos no que, localmente, era semelhante a uma camada plana de estrelas. A imagem ao lado reflete as ideias de Thomas Wright.

Entretanto, é preciso assinalar que Wright não se apoiava em qualquer análise científica para estabelecer seu modelo do Universo. Sua motivação era religiosa pois ele acreditava que a estrutura esférica era a mais lógica para ter sido construída por Deus. Apesar disso ele estava correto em atribuir o brilho da Via Láctea a efeitos ópticos.



As ideias de Thomas Wright sobre o Universo.

IMMANUEL KANT E OS “UNIVERSOS ILHA”

Escritores do período romântico no início do século XIX, como, por exemplo, William Wordsworth na Inglaterra e Friedrich Schelling na Alemanha, reagiram contra a cosmologia Newtoniana. Convencidos de que a ordem cósmica estava além da explicação científica, eles procuraram trazer de volta a “vida divina” para o que parecia um universo que se tornava cada vez mais mecanizado e sem Deus.



Immanuel Kant (1724- 1804).

O filósofo alemão Immanuel Kant argumentou contra os românticos insistindo que a metafísica não poderia fornecer uma explicação dos fundamentos da natureza física, corpórea e que a questão da existência de Deus estava completamente divorciada da experiência sensorial direta.

Em 1775 Kant apresentou um modelo para descrever o Universo. Ele levantou a seguinte questão: se as estrelas se movem, então porque elas parecem estar fixas no céu? Ele mesmo forneceu uma resposta bastante razoável. Segundo Kant este movimento ou era excessivamente lento, tendo em vista a grande distância entre as estrelas e o centro comum em torno do qual elas giravam, ou essa falta de movimento era devida a uma mera incapacidade nossa de percebê-lo, devido à grande distância existente entre o local onde elas estavam e aquele de onde as observávamos.

Para Kant o Sistema Solar Newtoniano fornecia um modelo para os sistemas estelares maiores. Kant raciocinou que a mesma causa que deu aos planetas sua força centrífuga, mantendo-os em órbita em torno do Sol, poderia também ter dado às estrelas o poder de realizar seus movimentos em círculo. E seja o que for que fez todos os planetas descreverem órbitas aproximadamente no mesmo plano, poderia ter feito o mesmo com as estrelas. Para ele o Universo tinha uma ordem similar àquela que vemos no Sistema Solar, mas em uma escala maior e envolvendo muito mais objetos. O Universo de Kant era formado por uma multidão de estrelas que giravam em torno de um centro comum estando todas, aproximadamente, no mesmo plano.

A maior contribuição de Kant foi a introdução, no seu modelo do Universo, das pequenas manchas luminosas elípticas observadas no céu pelos astrônomos de sua época e que eram chamadas coletivamente de “estrelas nebulosas”. Ele raciocinou que, se a Via Láctea tinha a forma de um disco de estrelas, não seria viável existirem também outros planos agregados de estrelas espalhados por todo o espaço? Kant também argumentou que se estes agregados, tendo em vista os seus tamanhos, estavam tão distantes da Via Láctea, do mesmo modo como as estrelas individuais estão umas das outras, então eles deveriam aparecer para nós como pequenas manchas luminosas, manchas estas que teriam a forma mais ou menos elíptica dependendo de quanto elas estavam inclinadas em relação à nossa linha de visada.

Kant estava convencido da existência de “outros Universos” além da nossa Via Láctea e foi ele quem propôs pela primeira vez, mas baseado apenas em filosofia, que o Universo era formado por vários “Universos ilha” repletos de estrelas, semelhantes à Via Láctea, a bela faixa de estrelas que vemos atravessada no céu em uma noite escura e que, insistimos, é apenas o plano da nossa Galáxia e não ela toda.

Assim, os objetos que pareciam nebulosos quando observados nos céus se tornaram, na mente de Kant, “universos ilhas”, algo como colossais sistemas solares formados por milhares de estrelas.

Os pensamentos de Kant sobre o universo tinham pouco conteúdo observacional. Os fundamentos de suas hipóteses cosmológicas eram filosóficos e teológicos. As observações entrariam pela primeira vez na cosmologia de um modo marcante no final do século XVIII graças ao astrônomo amador alemão, naturalizado inglês, William Herschel.

DESCOBRINDO O CÉU: WILLIAN HERSCHEL

Herschel observa o Universo

As equações de Newton permitiam que os cientistas descrevessem sob o ponto de vista matemático o nosso Sistema Solar. Logo especulou-se que elas também seriam capazes de oferecer um modelo para os sistemas estelares de



William Herschel (1738 - 1822).

maior porte. O arranjo das estrelas poderia ser similar àquele dos planetas. Além disso, o sistema Newtoniano fornecia, por analogia, uma explicação para uma estrutura de disco. A mesma causa que deu aos planetas seus movimentos e direcionou suas órbitas para um plano, poderia também ter dado às estrelas o poder de revolução e colocado suas órbitas em um plano.

No final do século XVIII as observações entraram na cosmologia estelar com um papel principal. Isso se deve ao astrônomo alemão Wilhelm Friedrich Herschel que ao se naturalizar inglês assumiu o nome de William Herschel. Suas descobertas se tornaram possíveis graças aos grandes telescópios que ele mesmo construiu.

Em 1773 Herschel, baseado em uns poucos livros existentes sobre astronomia que ele havia comprado, mas dotado de grande habilidade em óptica e mecânica, construiu alguns dos melhores (e maiores) telescópios existentes na sua época. Isso culminou em 1789 quando Herschel construiu um enorme telescópio refletor com comprimento focal de 40 pés e cujo espelho tinha o diâmetro de 48 polegadas (imagem ao lado). Este telescópio refletor, uma das maravilhas da época, não seria superado por décadas.

Os vários telescópios construídos por Herschel não somente revelaram mais satélites em órbita em torno de planetas como também revelaram algumas “nebulosas” de aspecto indistinto em aglomerados de estrelas. Eles também permitiram que Herschel registrasse objetos celestes situados a distâncias muito além do alcance dos telescópios refratores existentes naquela época. Os telescópios refratores dependiam de uma grande lente, mas a arte de polimento de lentes estava limitada a aberturas pequenas, bem menores do que os espelhos de 48 polegadas construídos por William Herschel.

Com base em suas meticulosas observações, nas quais era ajudado por sua irmã Caroline Lucretia Herschel (1750-1848), Herschel observou estrelas que pareciam estar situadas entre dois planos paralelos que se estendiam em linha reta por grandes distâncias. Isso o levou a concluir que a Via Láctea (a banda luminosa de estrelas que parece envolver o céu em uma noite escura e que hoje sabemos ser o plano da nossa Galáxia) é a manifestação da projeção das estrelas nessas camadas. Em 1784 Herschel afirmou que:

“Uma circunstância muito notável que se aplica às nebulosas e aglomerados de estrelas é que elas estão organizadas em camadas, que parecem prosseguir por uma grande extensão; e algumas delas eu já fui capaz de seguir, de modo a supor muito bem suas formas e direções. É muito provável que elas possam circundar toda a esfera aparente dos céus, até mesmo a Via Láctea, que certamente é apenas uma camada de estrelas fixas.”

Vemos ao lado o diagrama feito por Herschel em seu artigo publicado em 1784 sobre a construção dos céus. Ele nos mostra como um observador localizado no centro de uma fina camada de estrelas verá as estrelas circundantes projetadas como um anel que as envolvem. Se a camada se divide, o anel também se divide.

Indo muito mais “longe” no espaço do que qualquer um havia conseguido antes com seus grandes telescópios, Herschel iniciou o primeiro levantamento sobre a forma e o tamanho do Universo ou seja, da estrutura da nossa Galáxia (que era o universo da época!). Usando métodos sistemáticos

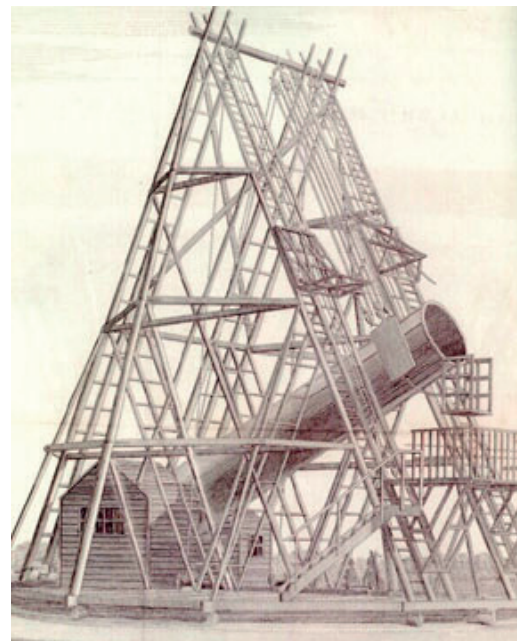
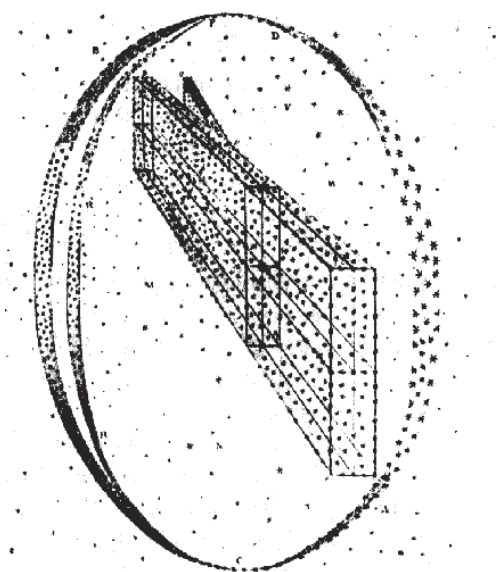
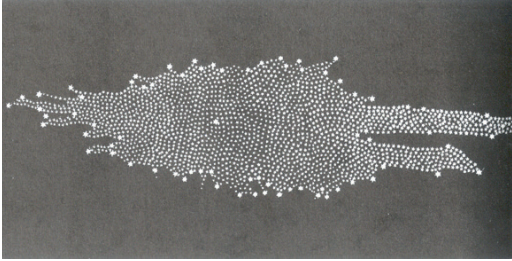


Ilustração de um dos telescópios construído por Herschel.



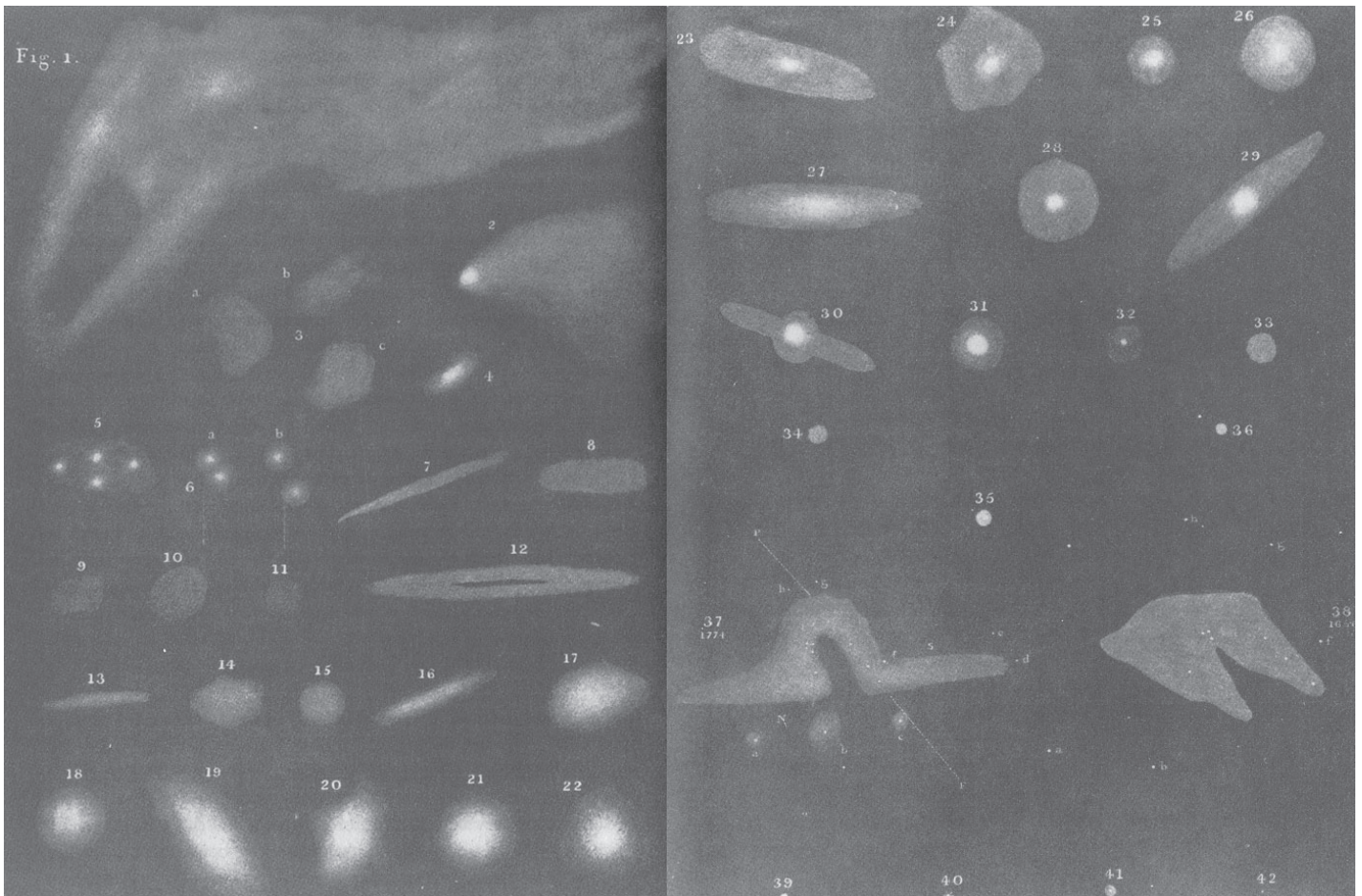
ao invés de conjecturas, Herschel atacou o problema realizando contagens de estrelas em 683 regiões do céu. Herschel raciocinou corretamente que deveria registrar um número maior de estrelas nas contagens feitas na direção do centro da nossa Galáxia e um número menor nas contagens feitas na direção de sua borda.

No entanto, Herschel encontrou aproximadamente o mesmo valor de densidade estelar (número de estrelas por área) em todas as direções examinadas. Daí ele concluiu que o Sistema Solar deveria estar situado no centro da Galáxia (na época de Herschel os astrônomos ainda não sabiam que o espaço interestelar contém poeira e gás capazes de bloquear a luz emitida por estrelas). A partir dessas contagens Herschel chegou a uma forma grosseira do Universo que confirmava a especulação feita anteriormente por Kant, de que o Universo tinha uma forma alongada. A imagem abaixo mostra o Universo ou seja, a nossa Galáxia, descrito por Herschel



Herschel também se interessou pelas “estrelas nebulosas” mencionadas por Kant e, ao longo de seus levantamentos do céu, descobriu muitas outras. Ao iniciar suas observações nos primeiros anos da década de 1780, os astrônomos conheciam cerca de 100 “objetos nebulosos” no céu do hemisfério norte que haviam sido catalogados pelo astrônomo francês Charles Messier. Em 1786 Herschel publicou um catálogo com cerca de 1000 objetos nebulosos. Três anos mais tarde ele acrescentou mais mil objetos à sua lista e em 1802 publicou uma terceira e última lista de mais 500 objetos nebulosos. Em 1811 Herschel publicou na conceituada revista inglesa *Philosophical Transactions of the Royal Society* vários desenhos em que mostrava a rica variedade de objetos nebulosos que ele havia registrado.

Imagem extraída da revista inglesa *Philosophical Transactions of the Royal Society*.



UMA CURIOSIDADE HISTÓRICA

Wilhelm Friedrich Herschel nasceu na cidade de Hanover, Alemanha, em 1738. Sua profissão era músico, tocando na banda do regimento da Guarda de Hanover. Em 1755 as coroas de Hanover e da Inglaterra foram unidas sob a liderança do rei inglês George II. A banda em que Herschel tocava foi enviada para a Inglaterra. Em 1757 ele naturalizou-se inglês e mudou seu nome para Frederick William Herschel. Em solo inglês ele continuou a dar aulas (tocava violino, oboé e, mais tarde, órgão) e a compor músicas sendo o autor de 24 sinfonias, 7 concertos para violino e 2 concertos para órgão. Em 1766 Herschel assumiu o posto de organista na cidade de Bath, Inglaterra, e começou a se interessar por astronomia. A música fez com que Herschel se interessasse por harmonia, esta o levou à matemática e finalmente à astronomia. Para ele astronomia ainda era um passatempo mas, à medida que isso foi ficando mais sério, Herschel foi diminuindo o número de seus estudantes de música de modo a poder dedicar mais e mais tempo à observação astronômica. Neste mesmo ano (1766) ele fez o primeiro registro sobre astronomia em seu diário. A descoberta pela qual ele é mais conhecido ocorreu no dia 13 de março de 1781 quando Herschel observou um pequeno objeto, nebuloso e de brilho fraco, na constelação Taurus que ele pensou ser um novo cometa. No final deste mesmo ano, Herschel já sabia que havia descoberto um novo planeta do Sistema Solar, situado além de Saturno. Com a descoberta do planeta Urano, situado além do limite mais externo até então aceito que era a órbita de Saturno, Herschel praticamente dobrou o tamanho do Sistema Solar conhecido. Embora oficialmente descobridor do planeta Urano, Herschel certamente não foi o primeiro a vê-lo. Este planeta já estava registrado em pelo menos 20 cartas celestes elaboradas no período entre 1690 e 1781. No entanto Herschel foi o primeiro astrônomo a notar que aquele pequeno ponto luminoso era um novo planeta.

Herschel quis agradar o rei da Inglaterra dando ao novo planeta o nome de Georgium Sidus (Estrela de George), o que foi rejeitado por astrônomos de muitos países. Os franceses passaram a chamar o novo planeta de “Herschel”, mas o nome mais aceito foi “Urano”, dado pelo astrônomo alemão Johann Elert Bode.

Com a fama conseguida, Herschel foi indicado astrônomo real pelo rei George III da Inglaterra e passou a receber um grande auxílio financeiro que desfrutou até o fim de sua vida.

WILLIAN PARSONS E A DESCOBERTA DAS “NEBULOSAS ESPIRAIS”

Os “leviatãs” de William Parsons

Um fato importante descoberto por Herschel era que algumas destas “estrelas nebulosas”, vistas através dos telescópios que ele mesmo construía, nada mais eram do que aglomerados de estrelas. Este fato o levou, em 1785, a conjecturar que todas as nebulosidades vistas no céu se revelariam como sistemas estelares distantes se olhadas em poderosos telescópios.

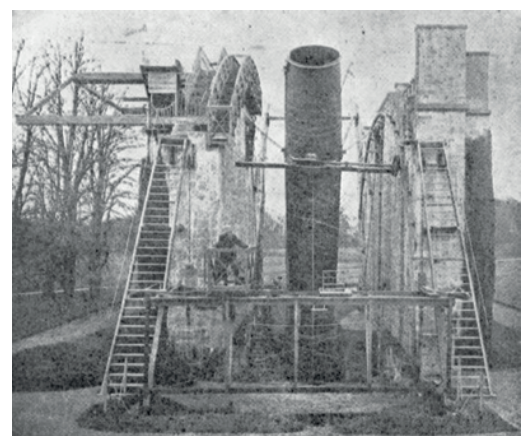
Com o surgimento de telescópios de maior porte, muitos astrônomos passaram a se preocupar com as pequenas nuvens difusas que eram observadas no céu e que, até aquele momento, não haviam sido resolvidas em estrelas. Mesmo os melhores telescópios da época só conseguiam observar estes objetos como nuvens difusas, não discernindo se elas tinham ou não conteúdo estelar.



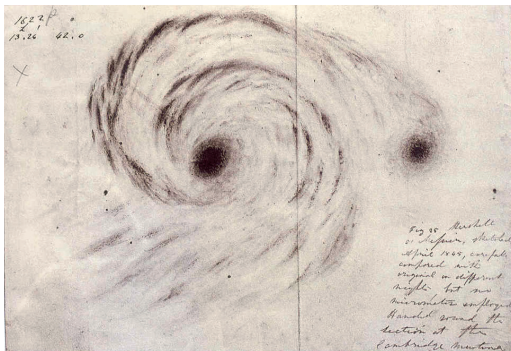
copyright: Birr Scientific and Heritage Foundation



copyright: Birr Scientific and Heritage Foundation



copyright: Birr Scientific and Heritage Foundation



Em 1845, o astrônomo irlandês William Parsons, terceiro conde de Rosse, construiu um telescópio de 72 polegadas no seu castelo em Parsonstown (mais tarde conhecida como Birr), na Irlanda. Esta construção, monstruosa para a época, foi logo apelidada de “Leviathan of Parsonstown”. As três imagens ao lado mostram o “Leviathan” de Parsons.

Parsons conseguiu com a ajuda deste equipamento determinar que algumas destas “nebulosas” possuíam uma estrutura em forma de espiral. Em abril de 1845 Parsons desenhou a “nebulosa” M51 (hoje conhecida como galáxia Rodamoinho) mostrando sua forma espiral. Esta foi a primeira vez em que a forma espiral foi identificada em uma “nebulosa”. O desenho de Parsons teve grande impacto no encontro da British Association for the Advancement of Science realizado em junho deste mesmo ano.

A imagem abaixo mostra a galáxia espiral M51 ou NGC 5194 ou galáxia Rodamoinho (Whirlpool Galaxy) fotografado pelo astrônomo Todd Boroson do National Optical Astronomy Observatory (NOAO). Ela está localizada a apenas 23 milhões de anos-luz de nós e possui 65000 anos-luz de diâmetro. Esta galáxia é uma das mais brilhantes no céu, podendo ser vista com um simples binóculo na constelação Canes Venatici. Compare esta imagem com o desenho feito por William Parsons!



Galáxia espiral M51 ou NGC5194 ou Galáxia do Rodamoinho.

Parsons também conseguiu discernir estrelas individuais em várias “nebulosas” onde nem mesmo o poderoso telescópio de Herschel tinha obtido sucesso.

Tendo em vista sua forma peculiar, estes objetos nebulosos passaram a ser chamados de “nebulosas espirais”. A natureza destas “nebulosas espirais” foi assunto de intenso debate durante as várias décadas que se seguiram. Afinal, estes objetos pertenciam ou não à nossa Galáxia? Note que, nesta época, muitos cientistas acreditavam que a nossa Galáxia era todo o Universo: as estrelas que víamos eram únicas e mais além destas estrelas existia apenas a escuridão de um espaço sem fim.

ONDE ESTÃO AS “NEBULOSAS ESPIRAIS”?

O problema principal para a astronomia naquela época era descobrir como poderíamos medir as distâncias até as chamadas “nebulosas espirais”. Somente assim ficaríamos sabendo se elas pertenciam ou não à nossa Galáxia e esse era um ponto fundamental que precisava ser esclarecido para conhecermos o tamanho do universo.

Entretanto, não havia nenhum método confiável para determinar distâncias a objetos astronômicos situados além das estrelas mais próximas. Isso não permitia que fosse respondida a pergunta: estavam as “nebulosas espirais” relativamente próximas a nós e eram apenas nuvens de gás em rodado ou elas estavam muito longe de nós e eram extremamente grandes? É fácil ver como isso modificaria a nossa percepção do tamanho do universo.

Para resolver este problema era necessário, em primeiro lugar, desenvolver métodos que permitissem calcular distâncias às estrelas.

MEDINDO DISTÂNCIAS AOS CORPOS CELESTES

Os primeiros astrônomos estimavam as distâncias às estrelas comparando seus brilhos. Para isso eles supunham que todas elas possuíam a mesma luminosidade intrínseca. Assim, aquelas que pareciam ser mais brilhantes certamente estavam mais próximas.

Definição de luminosidade

A **luminosidade** de um corpo celeste é a quantidade de energia luminosa total ou seja, em todos os comprimentos de onda, emitida por este corpo em uma determinada unidade de tempo.

A primeira técnica direta de medição de distâncias às estrelas foi conhecida como **paralaxe trigonométrica**. Este método foi empregado em 1838 por Friedrich Wilhelm Bessel para demonstrar que a Terra girava em torno do Sol.

Tendo em vista o movimento de translação que o nosso planeta faz em torno do Sol, um observador sobre a superfície da Terra verá uma mudança contínua e periódica nas posições aparentes das estrelas no céu. Assim, as estrelas mais próximas de nós, que chamamos de estrelas vizinhas, mudarão suas posições aparentes em relação às estrelas mais distantes. A quantidade medida deste deslocamento na posição aparente dessas estrelas é inversamente proporcional à distância à estrela.

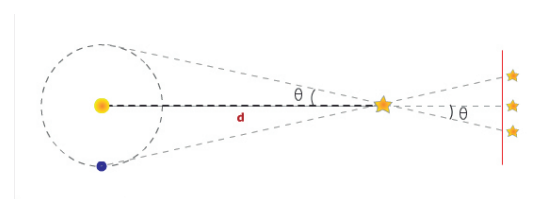
Para observar a paralaxe de uma estrela os astrônomos utilizam o movimento da Terra em torno do Sol. Eles observam uma estrela e cuidadosamente medem sua posição contra as estrelas que estão no fundo do céu. Seis meses após isso a Terra se moveu para o lado diametralmente oposto de sua órbita. Essa distância é conhecida pois ela representa duas vezes a distância entre o Sol e a Terra. Agora os astrônomos fazem uma nova medida e verificam que a estrela está em uma posição ligeiramente diferente daquela medida seis meses antes. O valor dessa diferença dependerá somente da distância entre a estrela e nós. Quanto mais próxima a estrela estiver de nós maior será essa diferença de posição. No entanto, note que mesmo para as estrelas muito próximas a medida de paralaxe é extremamente pequena. Por esse motivo a paralaxe não é medida em graus mas sim frações de grau que têm o nome de “segundos de arco”.

A paralaxe de uma estrela é a metade do valor do ângulo de deslocamento aparente da estrela. Baseados nessa definição a distância a uma estrela é dada pelo inverso da paralaxe. Se medirmos a paralaxe em segundos de arco a distância será dada em parsecs.

12

Medindo distâncias aos objetos celestes

OBSERVAÇÃO: Existem hoje vários métodos de determinação de distância a objetos celestes. Só citaremos alguns métodos históricos. O leitor interessado no assunto deve procurar textos de Astrofísica.



$$d \text{ (em parsecs)} = \frac{1}{\theta} \text{ (em segundos de arco)}$$

Onde: d é a distância à estrela e θ é a paralaxe medida.

Infelizmente esta técnica só podia ser aplicada às estrelas que estavam mais próximas de nós, usualmente àquelas situadas a menos de 100 parsecs. Para as estrelas situadas a distâncias maiores que esta, o deslocamento angular é tão pequeno que torna-se quase impossível medi-lo.

No século XIX o refinamento das técnicas de astrometria, parte da astronomia que se preocupa com medições de movimentos e posições estelares, fez surgir uma técnica de medições de distâncias baseada no chamado **movimento próprio** das estrelas.

Definição de movimento próprio

O **movimento próprio** de uma estrela é a componente do seu movimento verdadeiro perpendicular à nossa linha de visada. O movimento próprio é medido em segundos de arco por ano e é designado pela letra grega μ .

Os astrónomos separam a velocidade de uma estrela no espaço em duas componentes:

- uma componente paralela à nossa linha de visada. Esta é a **velocidade radial** da estrela, designada por v_r .
- uma componente perpendicular à nossa linha de visada. Esta é a **velocidade tangencial** da estrela, designada por v_t .

A velocidade tangencial de uma estrela está relacionada com o movimento próprio pela expressão:

$$v_t = 4,74 \mu d$$

onde d é a distância às estrelas.

A técnica do movimento próprio foi usada amplamente durante o século XIX por diversos astrónomos. No entanto, na prática só podemos medir pequenas distâncias desta maneira, uma vez que o movimento próprio de estrelas muito distantes é pequeno demais para que possamos detectá-lo. Apesar disto esta técnica permitiu que os astrónomos medissem distâncias a estrelas situadas bem além do alcance oferecido pela paralaxe trigonométrica.

No século XIX as técnicas de espectroscopia, até então utilizadas somente nos laboratórios de física, passaram a ser uma útil ferramenta para os estudos das estrelas. Isso produziu um grande avanço no conhecimento destes objetos, uma vez que o espectro estelar nos dá informações muito importantes sobre sua constituição física.

Em 1886 o diretor do Harvard College Observatory, o astrónomo norte-americano Edward Charles Pickering (1846–1919), inventou um método engenhoso pelo qual era possível obter espectros de centenas de estrelas de uma só vez usando o chamado “prisma objetivo”. Para analisar os espectros obtidos, um trabalho lento e meticuloso, Pickering tinha um grupo de mulheres, o chamado “harém de Pickering”. Entre elas destacaram-se as astrónomas Annie Jump Cannon, Henrietta Swan Leavitt e Antonia Maury que, além do trabalho de classificação, desenvolveram outras importantes pesquisas científicas.

As duas imagens ao lado mostram Pickering cercado por suas colaboradoras. A primeira imagem é de 1890 e a segunda é de 1912.

Uma dessas pesquisadoras, Annie Jump Cannon, verificou que as estrelas podiam ser classificadas de acordo com as linhas que apareciam nos seus espectros. Ela notou que as classes espectrais podiam ser rearranjadas de modo a formarem uma sequência contínua de mudanças graduais. Foi então que surgiu a chamada “classificação espectral de Harvard”, que usamos até hoje, e que classifica as estrelas como sendo dos tipos O, B, A, F, G, K, M, R, N e S. Os





Annie Jump Cannon (1863 - 1941), Ejnar Hertzsprung (1873 - 1967), Henrietta S. Leavitt (1868 - 1921) e George Willis Ritchey (1864 - 1945).

pesquisadores de Harvard logo notaram que o fator básico subjacente a esta classificação era a temperatura da superfície das estrelas: ela diminuía continuamente das estrelas mais quentes, classificadas como O, até chegar às mais frias, do tipo M.

Em 1906 o astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung descobriu que existiam estrelas gigantes e anãs. Isso mostrou que as estrelas podiam ser bastante diferentes também em seus aspectos físicos. As estrelas com grande tamanho, chamadas estrelas gigantes, também tinham alta luminosidade. Como resultado dessa pesquisa os astrônomos viram que as distâncias às estrelas podiam ser estimadas se seus espectros fossem conhecidos.

Ao mesmo tempo em que isso acontecia, a astrônoma Henrietta Swan Leavitt, do Harvard College Observatory, fez uma grande contribuição para o cálculo de distâncias às estrelas. Em 1908, enquanto estudava estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães, ela notou que havia uma correlação entre o período de sua variabilidade e sua luminosidade. Embora essa descoberta tenha um grande potencial para a determinação precisa de distâncias a objetos celestes Leavitt não a desenvolveu. Ela foi proibida de fazê-lo pelo diretor do Harvard College Observatory, Professor Pickering, sob a alegação de que a tarefa para a qual ela havia sido contratada era coletar dados e não analisá-los.

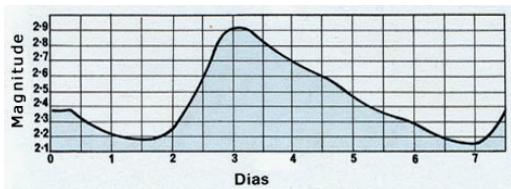
No ano seguinte à descoberta de Leavitt, Hertzsprung verificou que as estrelas variáveis observadas por ela nas Nuvens de Magalhães eram variáveis do tipo Cefeida, já conhecidas dos astrônomos.

O QUE SÃO AS “VARIÁVEIS CEFÉIDAS”

Durante o processo de evolução de uma estrela, em um dado momento ela inicia seu caminho para se tornar uma estrela gigante. Esse processo de evolução para o ramo das gigantes faz com que ela fique instável e mude, de modo periódico, tanto o seu tamanho como sua luminosidade. Às estrelas que estão passando por este processo damos o nome de estrelas variáveis pulsantes.

Existem vários tipos de estrelas variáveis pulsantes. O tipo de variabilidade de cada uma delas dependerá de sua massa. Quanto maior for a massa de uma estrela, maior será sua luminosidade durante o período de pulsação, em comparação com as estrelas de pequena massa. Como a luminosidade está associada com a massa, e o período de pulsação também está associado com a massa, os astrônomos puderam deduzir uma importantíssima relação entre período e luminosidade, a chamada relação período-luminosidade.

Um desses tipos de estrelas variáveis pulsantes são as chamadas “variáveis Cefeidas”. As estrelas classificadas nessa categoria cada vez que pulsam



mudam o valor do seu raio em cerca de 5% a 10% do valor que teriam em equilíbrio. As estrelas variáveis Cefeidas possuem, em média, períodos de variação entre 1 e 70 dias e, em geral, a amplitude de sua variação é de 0,1 a 2,0 magnitudes. Ao lado mostramos o gráfico de variação de magnitude de uma estrela variável Cefeida típica.

Hertzsprung logo notou que conhecendo o período de qualquer estrela variável Cefeida, sua luminosidade absoluta poderia ser determinada. Isso era muito bom pois os astrônomos sabiam como calcular distâncias a partir das magnitudes absoluta e aparente das estrelas. Embora o método que usa a relação período-luminosidade não fosse um método direto, ele era muito mais preciso e versátil do que os métodos estatísticos anteriores que dependiam de grandes números de estrelas para ter alguma precisão.

O método de determinação de distâncias baseado nas estrelas variáveis Cefeidas requer somente uma única Cefeida associada ao objeto em estudo para permitir o cálculo de sua distância.

Em 1917, acidentalmente, o astrônomo norte-americano George Willis Ritchey (imagem na página anterior) descobriu um dos melhores indicadores de distância. Ritchey começou a fazer fotografias de longa exposição de algumas das chamadas “nebulosas espirais” com o objetivo de descobrir se elas estavam em rotação e qual o valor de seus movimentos próprios. No dia 19 de julho de 1917, na placa fotográfica da “nebulosa espiral” NGC 6946, Ritchey notou a presença de uma “Nova”.

DEFINIÇÃO DE NOVA

Ao contrário do que possa parecer uma Nova não é uma estrela que surgiu recentemente no céu. Uma Nova é uma estrela que, de modo súbito, tem sua luminosidade aumentada em cerca de 10^6 vezes. Este aumento abrupto de luminosidade é seguido por um decréscimo gradual que pode levar vários meses. Os astrônomos acreditam que a Nova ocorre em sistemas binários de estrelas muito próximas uma da outra, sendo uma delas uma estrela comum e a outra uma estrela anã branca. A contínua transferência de hidrogênio da estrela comum para a anã branca faz com que este gás seja cada vez mais comprimido na camada mais externas da anã branca. A temperatura nesta camada externa de hidrogênio vai aumentando e quando chega a cerca de 10^7 K todo este envoltório da estrela anã branca entra em queima nuclear de modo súbito. Isto faz com que a luminosidade da estrela aumente violentamente.

Não podemos confundir Nova com Supernova. São fenômenos completamente diferentes.

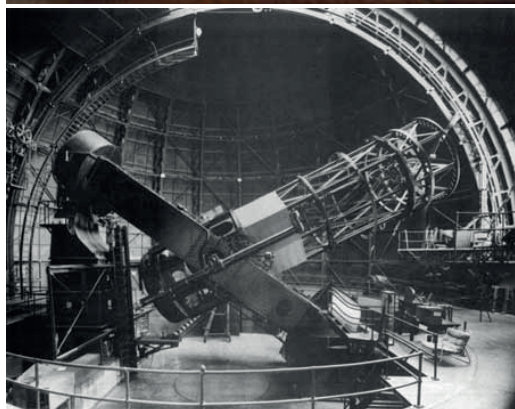
Analisando outra vez suas placas antigas Ritchey descobriu várias “Novas” nas “nebulosas espirais” fotografadas anteriormente. Ao saberem desta descoberta vários astrônomos reexaminaram suas placas fotográficas e, em apenas dois meses, 11 “Novas” já haviam sido descobertas em “nebulosas espirais”.

UMA CURIOSIDADE HISTÓRICA

George Ritchey inicialmente era construtor de móveis e mestre carpinteiro tendo mais tarde se interessado por óptica e construção de lentes e espelhos para telescópios. Ele foi um dos maiores responsáveis pela construção das grandes lentes do telescópio do Yerkes Observatory (ao lado).

Ele também colaborou ativamente com George Ellery Hale na construção dos espelhos de 60 e 100 polegadas dos futuros grandes telescópios do Mount Wilson Observatory (a seguir). Demitido por Hale logo após a construção do espelho de 100 polegadas (por motivos de ciúmes profissionais por parte de

Telescópio refrator de 102cm de abertura do Yerkes Observatory e telescópio refletor de 1,5m de abertura do espelho principal do Mount Wilson Observatory.



Hale), Ritchey sobreviveu vendendo limões e laranjas até ser contratado pelos franceses. No início dos anos de 1910, na França, Ritchey desenvolveu, juntamente com o astrônomo francês Henri Chrétien (1879–1956), um novo projeto óptico de telescópio que hoje tem o nome de “telescópio Ritchey-Chrétien”.

Este modelo de telescópio foi tão bem sucedido que hoje importantes instrumentos tais como os dois telescópios de 10 metros de abertura do Keck Observatory, os quatro telescópios de 8,2 metros do Very Large Telescope do European Southern Observatory (ESO), e até mesmo o telescópio de 2,4 metros do Hubble Space Telescope foram construídos segundo esse tipo de projeto óptico.

Parte do conjunto de 4 telescópios do VLT.



Um dos astrônomos que mais se interessou pelas “Novas” observadas nas “nebulosas planetárias” foi Heber Doust Curtis.

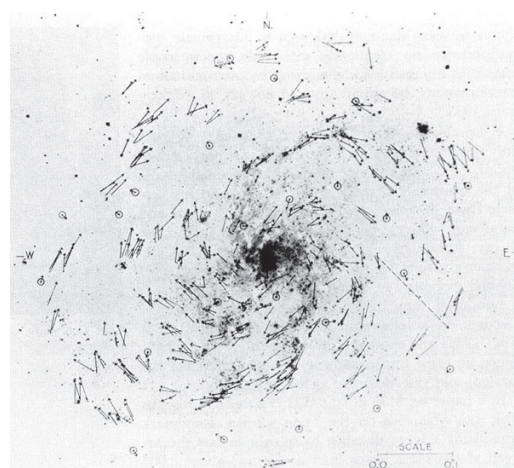
Comparando o brilho das “Novas” encontradas nas “nebulosas espirais” com o daquelas pertencentes à Via Láctea ele obteve valores aproximados para as distâncias a essas espirais. Segundo seus cálculos “as espirais que contém essas Novas estão muito afastadas do nosso sistema estelar”. Isso era um forte impulso à ideia de que as “nebulosas espirais” eram **objetos localizados fora da nossa Galáxia**.

Em 1916 o astrônomo holandês Adriaan van Maanen realizou medições extremamente difíceis de movimentos próprios de vários pontos em uma “nebulosa espiral”. Seus resultados, mostrados na imagem abaixo, provavam que elas estavam em rotação. No entanto, os valores obtidos por van Maanen eram muito grandes. Se eles estivessem corretos e se as “nebulosas espirais” estivessem tão distantes como alegado por Curtis, isso faria com que a velocidade física das bordas dessas “nebulosas espirais” atingissem valores absurdamente grandes. Os resultados obtidos por van Maanen pareciam **desacreditar a teoria dos “Universos Ilhas”**.

Como pode ser notado, havia uma enorme contradição entre as conclusões obtidas por Curtis e por van Maanen. Nem mesmo os métodos observacionais pareciam esclarecer a pergunta que todos os astrônomos faziam: as “nebulosas espirais” estavam próximas a nós ou muito distante sendo, portanto, outras galáxias?

A resposta a essa pergunta era fundamental para que pudéssemos ter uma visão do que era o universo. Mas, apesar dos esforços, o impasse continuava.

Resultados obtidos por Adrian van Maanen de suas observações de movimentos próprios.



13

Surge a relatividade de Poincaré e Einstein

SURGE A RELATIVIDADE DE POINCARÉ E EINSTEIN

Até 1905, os conceitos de espaço e tempo eram descritos pela chamada “física newtoniana”. Isso quer dizer que os fenômenos da natureza, da simples queda de um corpo na superfície da Terra até a descrição dos movimentos dos corpos celestes em suas órbitas, eram descritos pelas equações do movimento e pela teoria da gravitação universal estabelecidas por Isaac Newton.

De acordo com as leis clássicas da física, formuladas por Isaac Newton no seu livro *Principia* em 1687, o movimento de uma partícula tinha que ser descrito em relação a um sistema de referência inercial. Nele a partícula não estava sujeita a forças externas e, portanto, se moveria com uma velocidade constante e em uma linha reta. Segundo Newton dois referenciais inerciais podiam ser relacionados desde que eles estivessem se movendo, um em relação ao outro, em uma direção fixa e com velocidade constante. O tempo nesses referenciais inerciais iria diferir por uma constante e todos os tempos poderiam ser descritos em relação a um tempo absoluto.

Essa teoria, criada no século XVII, não foi alterada até o século XIX quando os fenômenos elétricos e magnéticos passaram a ser estudados teoricamente.

No entanto, ao contrário do que muitos podem pensar, o próprio Newton tinha dúvidas em partes de sua teoria. Por exemplo, a física newtoniana nos dizia que a ação entre dois corpos era descrita por uma lei da gravitação universal que ocorria como uma ação a distância e cuja informação se propagava com velocidade infinita.

Vamos dar um exemplo: dois corpos estão em repouso no espaço. Subitamente um deles se desloca enquanto o outro permanece em repouso. Segundo a teoria de Newton o corpo que permaneceu em repouso sente **imediatamente** o deslocamento do outro corpo. Aqui a palavra “imediatamente” quer dizer “instantaneamente”, sem qualquer intervalo de tempo.

Isso implica que a informação de que “o primeiro corpo se moveu” se propaga com uma velocidade infinita. E isso entravam em contradição com observações feitas em laboratório.

UM ÉTER QUE EVAPOROU

Os físicos já sabiam há muito tempo que o som se propagava através de um meio material. Isso naturalmente levou-os a postular, no final do século XIX, que também deveria existir um meio material no qual a luz se propagava. Tal meio foi chamado de **éter luminífero** ou, simplesmente, **éter**.

Grandes cientistas dessa época, tais como Cauchy, Stokes, Thomson e Planck, aceitaram a hipótese da existência do éter e postularam suas várias propriedades. No final do século XIX a luz, o calor, a eletricidade e o magnetismo tinham seus respectivos éters.

No entanto, à medida que os pesquisadores tentavam explicar o éter e estabelecer suas propriedades, o que se viu foi o surgimento de uma substância quase mágica. Segundo as teorias correntes, o éter tinha que ser um fluido pois era necessário que ele preenchesse o espaço. No entanto, ele também deveria ser milhões de vezes mais rígido do que o aço, pois precisava aguentar as altas frequências das ondas luminosas. Ao mesmo tempo o éter não podia ter massa, deveria ser completamente transparente, não dispersivo, incompressível, contínuo e não ter viscosidade!

Nesta época o físico escocês James Clerk Maxwell mostrou que os fenômenos eletromagnéticos se propagavam com velocidade finita. Matematicamente ele mostrou que a onda eletromagnética se propagava no vácuo com a velocidade constante de cerca de 300000 quilômetros por segundo. Ao verificar que



James Clerk Maxwell (1831-1879)

o campo eletromagnético se propagava com uma velocidade essencialmente igual à velocidade da luz (essa velocidade já havia sido medida em 1676 pelo astrônomo dinamarquês Ole Roemer), Maxwell postulou que a própria luz era um fenômeno eletromagnético.

Assim, a luz passou a ser entendida como uma onda eletromagnética cuja velocidade constante é representada pela letra “c”. Isso equivalia mostrar que a luz se deslocava com uma velocidade que independia do movimento de quem a estivesse observando assim como da velocidade da fonte que a estava emitindo.

As leis físicas, propostas por Newton para o movimentos dos corpos, previa o contrário: elas mostravam que a velocidade da luz dependia do movimento do observador.

Quem estava certo: Newton ou Maxwell?

E o éter? Como ele ficava nessa história? Maxwell escreveu um artigo sobre o éter para a edição de 1878 da Encyclopaedia Britannica e propôs a existência de um único éter. Seu artigo narra sua própria tentativa, sem sucesso, em medir o efeito do arrasto do éter provocado pelo movimento da Terra no espaço. Maxwell também propôs uma maneira astronômica pela qual poderíamos verificar o arrasto do éter feito pelo nosso planeta. Para isso deveríamos medir a velocidade da luz usando os diferentes satélites de Júpiter quando eles estivessem em posições diferentes em relação a Terra.

Impelido pelas ideias de Maxwell, o físico Albert Abraham Michelson (nascido na Prússia e naturalizado norte-americano) iniciou uma série de experiências sobre o éter. Em 1881, ele registrou:

“O resultado da hipótese de um éter estacionário é mostrada ser incorreta, e segue a conclusão necessária de que a hipótese está errada.”

Em 1886 o físico holandês Hendrik Lorentz escreveu um artigo onde criticava a experiência feita por Michelson. Ele declarou que, realmente, não estava preocupado com o resultado experimental obtido por Michelson, que ele desprezava considerando-o ter sido resultado de experiências realizadas sem a precisão necessária.

Michelson foi persuadido por Thomson e outros a repetir sua experiência. Ele assim o fez em 1887, dessa vez associando-se ao físico norte-americano Edward Williams Morley. Os dois cientistas registraram, mais uma vez, que nenhum efeito de arrasto havia sido encontrado. Parecia que a velocidade da luz era independente da velocidade do observador. Michelson e Morley refinaram a experiência e a repetiram várias vezes até 1929.

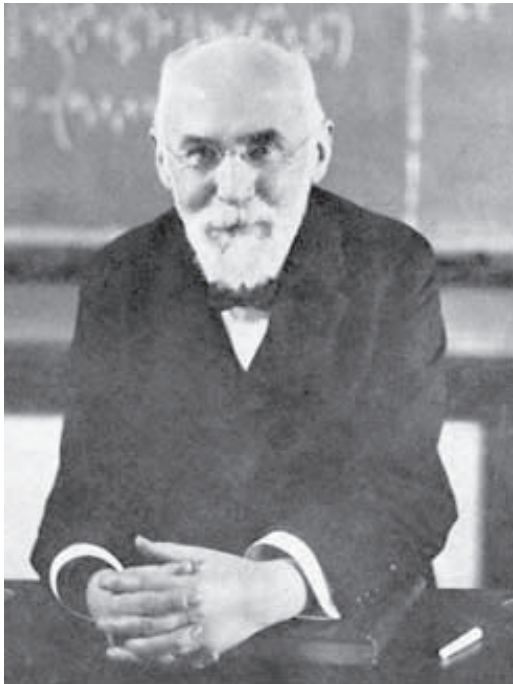
A ideia da existência de um meio material chamado éter só foi abandonada quando as transformações Galileanas e a dinâmica Newtoniana foram modificadas pelas transformações de Lorentz-FitzGerald e pela Teoria da Relatividade Restrita de Albert Einstein.

AS TRANSFORMAÇÕES DE FITZGERALD-LORENTZ

Sabemos hoje que as equações que descrevem um dado fenômeno físico, definidas em um determinado referencial, precisam permanecer inalteradas se as observamos em um outro referencial que se desloca com velocidade constante em relação ao primeiro. O conjunto de equações que associa esses dois referenciais são conhecidas como **transformações de Lorentz** em



Albert A. Michelson (1852 - 1931) e Edward Williams Morley (1838 - 1923).



Hendrik Antoon Lorentz (1853 - 1928).

homenagem ao físico holandês Hendrik Antoon Lorentz que as apresentou mais claramente ao mundo científico. Na verdade, as **transformações de Lorentz** possuem diversos descobridores.

O primeiro cientista a obter as importantes relações que hoje conhecemos como **transformações de FitzGerald-Lorentz** foi o físico alemão Wolde-mar Voigt (1850 - 1919), em 1887. Foi ele quem, pela primeira vez, as escreveu por extenso e mostrou que certas equações eram invariantes sob essas transformações.

Hoje, com um fator de escala diferente, essas transformações são conhecidas simplesmente como **equações de Lorentz** ou **transformações de Lorentz**. O grupo das transformações de Lorentz nos dá a geometria da relatividade especial. Curiosamente, a importância dessas transformações para o desenvolvimento dos conceitos de espaço-tempo era totalmente desconhecida por Voigt, que estava pesquisando o deslocamento Doppler quando as obteve.

Embora Voigt tenha se correspondido com Lorentz sobre a experiência de Michelson-Morley em 1887 e 1888 não parece que esse último tenha tomado conhecimento dessas transformações. Lorentz, nessa época, estava muito preocupado com a nova experiência de Michelson-Morley feita em 1887.

Em 1889 um pequeno artigo foi publicado pelo físico irlandês George FitzGerald na revista Science. O artigo, *The ether and the earth's atmosphere*, tinha menos de meia página e não é técnico. Nele FitzGerald mostrava que os resultados da experiência de Michelson-Morley somente poderiam ser explicados se:

“...o comprimento dos corpos materiais muda, dependendo se eles estão se movendo ao longo do éter ou através dele, por uma quantidade que depende do quadrado da razão entre suas velocidades e aquela da luz.”



Joseph Larmor (1857 - 1942).

Lorentz não conhecia o artigo de FitzGerald e em 1892 propôs a existência de uma “contração” quase idêntica em um artigo que agora considerava muito seriamente a experiência de Michelson-Morley. Quando Lorentz ficou sabendo, em 1894, que FitzGerald já havia publicado uma teoria similar à dele, prontamente escreveu ao físico irlandês. FitzGerald replicou que realmente havia enviado um artigo para a Science, mas “*eu não sei se eles em algum momento o publicaram*”. Ele ficou feliz em saber que Lorentz concordava com ele “*pois eu tenho sido um tanto ridicularizado por aqui devido à minha visão*”. Depois disso Lorentz usou cada oportunidade que surgia para agradecer a FitzGerald, que havia sido o primeiro a propor a ideia de contração dos corpos materiais. Somente FitzGerald, que não sabia se seu artigo havia sido publicado, acreditava que Lorentz tinha publicado primeiro.

Em 1897, o físico norte-irlandês Joseph Larmor publicou as transformações de Lorentz na conceituada revista científica inglesa *Philosophical Transactions of the Royal Society* in 1897. Note que isso ocorreu dois anos antes de Hendrik Lorentz e oito anos antes de Albert Einstein. Larmor também foi capaz de prever o fenômeno da dilatação do tempo e também a contração do espaço.

Larmor escreveu um livro chamado “*Aether and matter*” (1900) no qual escreve por extenso as transformações de Lorentz, o que ainda não havia sido feito por Lorentz, assim como a contração do espaço e a dilatação do tempo. Ele mostrou que a contração de Fitzgerald-Lorentz era uma consequência dessas transformações.

Finalmente Lorentz escreveu por extenso as transformações que agora têm o seu nome, sendo portanto a terceira pessoa a fazê-lo. Ele então, assim como Larmor já havia feito, mostrou que a contração de FitzGerald-Lorentz era uma consequência dessas transformações.

A RELATIVIDADE ENGATINHA

O mais importante artigo relacionado com a relatividade especial publicado antes de 1900 foi de autoria do físico francês Jules Henri Poincaré, “La mesure du temps”, que apareceu em 1898. Nesse artigo Poincaré diz:

“...não temos intuição direta sobre a igualdade de dois intervalos de tempo. A simultaneidade de dois eventos ou a ordem de sua sucessão, assim como a igualdade de dois intervalos de tempo, deve ser definida de tal modo que as afirmações das leis naturais sejam tão simples quanto possível.”

Por volta de 1900 o conceito de éter como uma substância material estava sendo questionado. Paul Drude escreveu:

“O conceito de um éter absolutamente em repouso é o mais simples e o mais natural - pelo menos se o éter é concebido como sendo não uma substância, mas meramente espaço dotado de certas propriedades físicas.”

Poincaré, em sua palestra de abertura no Congresso de Paris em 1900, perguntou “O éter realmente existe?”. Em 1904 esse grande cientista se aproximou bastante de uma teoria da relatividade especial em uma palestra no International Congress of Arts and Science, em Saint Louis. Ele mostrou que observadores em diferentes sistemas de referência terão relógios que:

“... marcarão o que podemos chamar de tempo local...como exigido pelo princípio da relatividade o observador não pode saber se ele está em repouso ou em movimento absoluto.”

O ano em que a relatividade especial finalmente passou a existir foi 1905. O mês de junho desse ano foi muito importante para essa nova teoria. Em 5 de junho Poincaré apresentou um importante trabalho, “Sur la dynamique de l’électron”, enquanto o primeiro artigo de Einstein sobre a relatividade foi recebido em 30 de junho. Poincaré estabeleceu que “*parece que esta impossibilidade de demonstrar movimento absoluto é uma lei geral da natureza.*” Depois de criar o nome de **transformações de Lorentz** em homenagem a esse físico, Poincaré mostrou que essas transformações, junto com as rotações, formam um **grupo**, uma estrutura algébrica muito importante.

O artigo de Einstein possui uma abordagem completamente diferente. Ele não tem como objetivo explicar resultados experimentais, mas sim mostrar a beleza e simplicidade da teoria. Na introdução Einstein diz:



Jules Henri Poincaré (1854 - 1912).

“...a introdução de um éter-luz provará ser supérflua uma vez que, de acordo com a visão a ser desenvolvida aqui, nem um espaço em repouso absoluto dotado de propriedades especiais será introduzido nem um vetor velocidade será associado com um ponto do espaço vazio no qual processos eletromagnéticos ocorrem.”

Referenciais inerciais são introduzidos os quais, por definição, estão em movimento uniforme um em relação ao outro. A teoria inteira é baseada em dois postulados:

1. as leis da física tomam a mesma forma em todos os sistemas de referência inerciais.
2. em qualquer sistema de referência inercial a velocidade da luz c é a mesma independentemente da luz ser emitida por um corpo em repouso ou por um corpo em movimento uniforme.

Einstein deduziu as transformações de Lorentz a partir de seus dois postulados e, como Poincaré, provou a propriedade de grupo dessas transformações. Ele também deduz a contração de FitzGerald-Lorentz e menciona o paradoxo do relógio. Einstein o chamou de teorema e afirma que se dois relógios síncronos C_1 e C_2 são sincronizados em um ponto A e C_2 deixa A movendo-se ao longo de uma curva fechada até retornar a A , então C_2 marcará o tempo mais lentamente comparado com C_1 . Einstein afirma que isso não significa a existência de qualquer paradoxo, uma vez que C_2 experimenta aceleração enquanto C_1 não o faz.

Em setembro de 1905 Einstein publicou um pequeno mas importante artigo no qual ele provou a famosa equação

$$E = mc^2$$

O primeiro artigo sobre a relatividade especial não escrito por Einstein apareceu em 1908 e seu autor foi o físico alemão Max Planck. O fato da teoria da relatividade ter sido aceita por alguém tão importante quanto Planck fez com que ela fosse rapidamente aceita pelos físicos da época. Quando Einstein escreveu seu artigo de 1905, ele ainda era um especialista técnico de terceira classe no escritório de patentes de Berna. Também em 1908 Minkowski publicou um importante artigo sobre relatividade, apresentando pela primeira vez as equações de Maxwell-Lorentz na forma tensorial. Ele também mostrou que a teoria Newtoniana da gravitação não era consistente com a relatividade.

As principais contribuições para a relatividade especial foram feitas, sem dúvida, por Lorentz, Poincaré e, certamente, pelo fundador da teoria, Einstein. É interessante ver suas respectivas reações em relação à formulação final da teoria.

Embora Einstein tenha gasto vários anos pensando sobre como formular essa teoria, uma vez tendo, encontrou os dois postulados, que passaram imediatamente a ser naturais para ele. Einstein sempre foi relutante em aceitar que os resultados da experiência de Michelson-Morley tiveram qualquer influência na sua maneira de pensar.

A reação de Poincaré ao artigo de Einstein de 1905 foi tão estranha quanto a de Einstein em relação aos trabalhos do físico francês. Quando Poincaré deu uma palestra em Göttingen em 1909 sobre relatividade, ele não mencionou Einstein de modo algum. Ele apresentou a relatividade com três postulados, o

terceiro sendo a contração de Fitzgerald-Lorentz. Na verdade Poincaré nunca escreveu um artigo sobre relatividade no qual mencionasse Einstein. O próprio Einstein comportou-se de maneira similar e Poincaré é mencionado apenas uma vez nos artigos de Einstein. Lorentz, entretanto, foi elogiado tanto por Einstein como por Poincaré e frequentemente foi citado nos trabalhos desses dois grandes físicos.

O próprio Lorentz nem sempre parecia aceitar as conclusões de Einstein. Em 1913 ele fez uma palestra advertindo que a teoria da relatividade havia sido aceita muito rapidamente e que não estava tão seguro sobre a sua validade. Lorentz disse:

“Até onde essa palestra diz respeito ele encontra uma certa satisfação na interpretação mais antiga de acordo com a qual o éter possui pelo menos substancialidade, espaço e tempo podem ser rigorosamente separados, e a simultaneidade sem especificação suplementar pode ser falada. Finalmente deve ser notado que a temerária afirmação que nunca podemos observar velocidades maiores do que a velocidade da luz contém uma restrição hipotética do que é acessível a nós, uma restrição que não pode ser aceita sem algumas reservas.”

A despeito da cautela de Lorentz a teoria da relatividade especial foi rapidamente aceita. Em 1912 Lorentz e Einstein foram propostos conjuntamente para o Prêmio Nobel pelo seu trabalho na teoria da relatividade especial. A recomendação foi feita por Wien, o ganhador do Prêmio Nobel de 1911, que disse:

“...Embora Lorentz deva ser considerado como o primeiro a ter encontrado o conteúdo matemático do princípio da relatividade, Einstein foi bem sucedido em reduzi-lo a um princípio simples. Devemos por conseguinte avaliar os méritos de ambos pesquisadores como sendo comparáveis.”

Einstein nunca recebeu Prêmio Nobel pela relatividade. O comitê Nobel estava, a princípio, cauteloso e esperou por confirmações experimentais. Na época em que tal confirmação estava disponível Einstein tinha se movido para trabalhos mais monumentais.

O QUE É A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL?

Os postulados sobre os quais se apoia a teoria da Relatividade Especial

A teoria da Relatividade Especial proposta por Einstein em 1905 baseia-se em dois postulados básicos:

- a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, não importa quais sejam suas **velocidades relativas**.

- as leis da física são as mesmas em qualquer **sistema de referência inercial**.

Para entendermos melhor o que eles significam precisamos definir alguns de seus termos.

O que é um postulado?

O dicionário Aurélio define “postulado” como sendo uma “proposição não evidente nem demonstrável, que se admite como princípio de um sistema dedutível, de uma operação lógica ou de um sistema de normas práticas”. Postulado é um fato ou preceito reconhecido sem prévia demonstração. Isso nos diz que as duas afirmações feitas acima não são demonstráveis. Elas foram estabelecidas por Einstein e colocadas sobre sua teoria sem terem sido deduzidas, calculadas ou inferidas a partir de experiências.

O que é preciso para definir repouso e movimento?

Na nossa vida diária comumente nos referimos a um determinado corpo dizendo se ele está em repouso ou em movimento. Para nós essas palavras bastam, pois são bastante óbvias. No entanto, isso não é visto de modo tão simples pelos físicos.

Quando um físico se refere a “repouso” ou “movimento” ele precisa definir em relação a que sistema de referência isso está relacionado. Duas pessoas paradas em um ponto de ônibus estão em repouso uma em relação à outra se considerarmos que o nosso sistema de referência é o ponto de ônibus. Os ônibus que passam estão em movimento para essas duas pessoas. No entanto, se você está dentro de um ônibus e considera que o sistema de referência é o ônibus, você está parado e as duas pessoas que estão no ponto de ônibus estão em movimento.

Isso nos mostra que “repouso” e “movimento” não são conceitos absolutos mas sim relativos que precisam da definição de uma sistema de referência para que possam ser perfeitamente entendidos pelos físicos.

E o que é movimento?

Definimos velocidade como sendo a variação da posição de um corpo ao longo de um determinado intervalo de tempo. Por isso sempre estamos comentando que um carro nos ultrapassou a mais de 100 quilômetros por hora. No entanto, para os físicos a definição de movimento não é tão simples. Ao dizermos que um determinado corpo está em movimento é preciso que fique claro que tipo de movimento ele tem. O corpo mantém uma direção de movimento retilínea ou sua trajetória é curva? Sua velocidade é constante ou varia em intervalos de tempo?

Quando falamos de velocidade não basta citar um número. Para o físico a velocidade é definida por um valor numérico e por uma direção. Quando uma grandeza física, tal como a velocidade, precisa de um número e uma direção para ser definida, dizemos que ela é uma **grandeza vetorial**. Assim, a velocidade é uma grandeza vetorial e nos referimos a ela como o “vetor velocidade”.

Agora podemos definir “velocidade relativa”. Esse termo nos informa a diferença de velocidade existente entre dois corpos. Se um corpo está em repouso em relação a um referencial, sua velocidade é zero. Ao compararmos isso com um outro corpo que se desloca a uma velocidade de 10 quilômetros por hora nesse mesmo referencial dizemos que a velocidade relativa entre esses dois corpos é de 10 quilômetros por hora.

Por outro lado, se um corpo se desloca a 30 quilômetros por hora e um segundo corpo se desloca a 50 quilômetros por hora, ambas medidas em relação ao mesmo sistema de referência, precisamos conhecer a direção do movimen-

to de cada um deles para podermos determinar sua velocidade relativa. Se eles se afastam ao longo de uma mesma reta ou seja, se eles estão se deslocando em sentidos opostos, sua velocidade relativa é a soma de suas velocidades particulares resultando, nesse caso, em 80 quilômetros por hora. Se eles estão se aproximando ao longo da mesma direção ou melhor, se eles estão se deslocando no mesmo sentido, sua velocidade relativa é a diferença entre suas velocidades particulares ou seja, nesse exemplo, 20 quilômetros por hora.

E o que é aceleração?

A aceleração também é uma grandeza vetorial. Ela também precisa de mais que um número para ser descrita. Ela precisa de um número e de uma direção. Por isso nos referimos sempre ao “vetor aceleração”. Para a física, a aceleração é definida como a variação do vetor velocidade. Note que não foi dito que a aceleração é a variação da velocidade, mas sim do “vetor velocidade”. Como um “vetor” é descrito por um número e uma direção, basta que um desses fatores varie para que se tenha uma variação do próprio vetor. Isso quer dizer que a aceleração pode ser provocada tanto pela variação do valor numérico da velocidade como também pela variação de sua direção. Assim é possível ter aceleração pelo simples fato de mudar a direção do seu movimento.

Vemos então que um corpo que se desloca em linha reta será acelerado se ele variar o valor numérico da sua velocidade, mas mantiver a mesma trajetória. No entanto, se o corpo começa a descrever uma curva, ele estará acelerado uma vez que, mesmo mantendo o valor numérico de sua velocidade, ele estará variando a direção da velocidade!

ANALISANDO OS POSTULADOS DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Primeiro postulado:

“a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, não importa qual seja a sua velocidade relativa.”

Este postulado nos diz que independente da velocidade que o observador possua em valor. Vimos anteriormente que a velocidade relativa entre dois corpos que se deslocam ao longo de uma mesma direção podia ser dada pela soma ou subtração de suas velocidades particulares, dependendo se eles estão se deslocando no mesmo sentido ou não. No caso do feixe luminoso isso não ocorre.

Ao se aproximar de um feixe luminoso será verificado que ele possui uma velocidade **c**. Ao se afastar do feixe, será constatada a mesma velocidade **c**. Seja qual for a velocidade e seja qual for a direção, o deslocamento sempre irá medir a mesma velocidade **c** para o feixe luminoso. A velocidade da luz no vácuo é independente do movimento de todos os observadores e possui o mesmo valor constante de 300000km/s.

Segundo postulado:

“As leis da física são as mesmas em qualquer sistema de referência inercial.”

Vamos supor que um pesquisador observa uma partícula em um determinado referencial inercial ou seja, um sistema de referência não acelerado que neste caso consideramos estar se movendo com uma determinada velocidade constante v . Esse postulado de Einstein nos diz que as leis da física observadas por esse pesquisador serão exatamente as mesmas que aquelas observadas por um outro pesquisador que esteja em repouso ou melhor, parado, em relação a esse sistema de referência.

Ao dizer que as leis da física são as mesmas para todos os observadores que não estão acelerados (ou de outra forma, que estão descrevendo um fenômeno em um **sistema de referência inercial**), este postulado explica vários fenômenos da nossa vida diária: porque conseguimos beber um copo de água em um veículo que se move com velocidade constante e nos molhamos todo se ele acelera? A teoria da relatividade restrita nos mostra que se algo é feito em um veículo em movimento retilíneo e uniforme (velocidade constante) o resultado obtido será o mesmo se fizermos a ação em um veículo que está em repouso (parado).

No entanto, se o veículo acelera (e isso pode ocorrer tanto mudando o valor de sua velocidade como mudando a direção em que ele se desloca) as duas experiências já não darão o mesmo resultado. Agora sabemos porque quando se está em pé dentro de um ônibus que se move com velocidade constante não é necessário segurar naquele ferro que fica no teto do ônibus. No entanto, quando o motorista acelera o coletivo, você é lançado para a frente.

OBJETOS RELATIVÍSTICOS E NÃO RELATIVÍSTICOS

Para os físicos é mais comum usar o termo “partículas” do que “objetos” e é isso que faremos a partir desse momento.

Afinal, o que diferencia um corpo relativístico de um não relativístico? Para os cientistas todas as partículas (ou objetos) cujas velocidades sejam comparáveis à velocidade da luz são consideradas “relativísticas”. Isso quer dizer que ao dividirmos a velocidade v do corpo pela velocidade c da luz o resultado deve ser bem próximo a 1. Dizemos então que um objeto é relativístico se $(v/c) \sim 1$.

No entanto, as partículas cujas velocidades são muito menores do que a velocidade da luz são consideradas “não-relativísticas”. Nesse caso a razão entre essas duas velocidades é bem menor que 1 ou seja (v/c) também é bem menor que 1.

A MUDANÇA NOS CONCEITOS DE ESPAÇO E TEMPO

Os dois postulados da teoria da relatividade modificam radicalmente nossa concepção de espaço e tempo. Deixamos para trás os conceitos Newtonianos de espaço e tempo como entidades separadas e passamos a pensar o espaço e tempo como entidades que funcionam conjuntamente. Não há mais espaço e tempo na física relativística mas sim “espaço-tempo”, uma entidade única.

A introdução do “espaço-tempo” como algo único significa que os dois conceitos não devem (e não podem) ser examinados separadamente. Isso nos traz alguns fenômenos curiosos. Por exemplo, ao contrário do que Newton dizia, eventos que ocorrem simultaneamente para um observador podem ocorrer em momentos diferentes para um outro observador. O conceito de “simultaneidade”, que era um conceito absoluto na teoria Newtoniana, passa a ser “relativo” na teoria de Einstein. Isso nos leva a fenômenos intrigantes tais como a “contração do espaço” e a “dilatação do tempo”.

14

A teoria da gravitação é relativística: Hilbert e Einstein

Um outro fenômeno explicado pela teoria da relatividade é o deslocamento mais lento do tempo quando medido em um referencial que está se movendo. Ela nos diz que cada observador inercial tem seu próprio tempo pessoal que é chamado de **tempo próprio**. O tempo próprio é o valor temporal medido por um relógio que está “acoplado” a um observador inercial ou seja, no mesmo referencial que ele. Isso nos leva a situações tipicamente relativísticas na qual dois observadores, que inicialmente têm as mesmas idades como registradas por seus tempos próprios, terão idades diferentes quando se encontrarem de novo depois de viajarem por diferentes trajetórias no espaço-tempo.

Dizemos em relatividade que cada um de nós descreve durante sua vida uma trajetória no espaço-tempo que é uma **linha do universo**. Cada um de nós (que é o mesmo que dizer “todo e qualquer evento físico no universo”) possui uma “linha do universo”, a descrição temporal de todos os fatos que acontece com o objeto. A cada um dos fatos que ocorrem durante a nossa existência (o que é o mesmo que dizer “qualquer fato que ocorre a qualquer momento no mundo físico”) damos o nome de **evento**.

SURGE A TEORIA RELATIVÍSTICA DA GRAVITAÇÃO

Einstein e a gravitação

A teoria da gravitação universal apresentada por Isaac Newton funcionava extremamente bem nos problemas apresentados pela mecânica clássica. Havia muito pouco motivo para questioná-la. No entanto uma pergunta permanecia na mente dos cientistas: no processo de interação gravitacional entre dois corpos como podemos explicar que cada um deles saiba que o outro está presente?

Além disso, qual seria o comportamento das equações que descrevem os fenômenos físicos da natureza se o processo descrito estivesse ocorrendo não em um sistema inercial mas sim num sistema arbitrário de coordenadas?

Como vimos acima, as leis da física conhecidas até agora, e que eram descritas tanto pela física Newtoniana como pela teoria da relatividade especial somente eram válidas em um conjunto restrito de sistemas de coordenadas conhecido como sistemas de referência inerciais.

Em 1900 **Hendrik Antoon Lorentz** conjecturou que a gravitação poderia ser atribuída a ações que se propagavam com a velocidade da luz. **Henri Poincaré**, em um artigo de julho de 1905 enviado para a revista alguns dias antes do trabalho de Einstein sobre a relatividade restrita, sugeriu que todas as forças deviam se transformar de acordo com as chamadas “transformações de Lorentz-Fitzgerald”. Ele também afirmou que, se essa regra é verdade, a lei de Newton da Gravitação não é mais válida pois ela não a obedece. Poincaré também propôs a existência de ondas gravitacionais que se propagavam com a velocidade da luz.

Em 1907, dois anos após ter apresentado sua teoria da relatividade restrita, Einstein estava preparando um artigo de revisão sobre essa teoria. Durante esse trabalho ele ficou curioso em saber como a gravitação Newtoniana teria que ser modificada para se ajustar dentro da estrutura da sua teoria da relatividade especial. Neste momento ocorreu a Einstein o que ele mesmo descreveu como “*o mais feliz pensamento de minha vida*” ou seja, que um observador que está caindo do telhado de uma casa não sente o campo gravitacional. Como consequência disso ele propôs então o chamado **princípio da equivalência**:

O princípio da equivalência é o responsável pela sensação que temos quando estamos dentro de um elevador que desce em grande velocidade. Todos sentimos como se estivéssemos sendo puxados para cima, como se fossemos ser tirados do chão do elevador. Na verdade, se o elevador romper seus cabos

Existe uma completa equivalência física entre um campo gravitacional e a correspondente aceleração do sistema de referência. Esta suposição estende o princípio da relatividade para o caso de movimento uniformemente acelerado do sistema de referência.

e despencar em queda livre por uma distância suficientemente longa, a pessoa irá flutuar dentro dele e, no final, irá cair com violência no poço do elevador.

Depois de criar o princípio da equivalência em 1907, um importante passo, Einstein não publicou nada mais sobre gravitação até 1911. Ele sabia desde 1907 que um raio luminoso se curvaria na presença de um campo gravitacional forte. Esse encurvamento da luz era uma consequência do princípio da equivalência, mas era difícil fazer uma verificação experimental disso por meio de observações terrestres.

Em 1911 Einstein compreendeu que a curvatura do raio luminoso em um campo gravitacional poderia ser verificada por meio de observações astronômicas.

Também foi discutido nessa época o deslocamento para o vermelho gravitacional, o “redshift” gravitacional, que ocorre quando o comprimento de onda da luz que sai de um corpo de grande massa (uma estrela por exemplo) é deslocado na direção do vermelho devido à perda de energia necessária para escapar do campo gravitacional do corpo.

Einstein publicou outros artigos sobre gravitação em 1912. Nestes ele compreendeu que as transformações de Lorentz não se aplicariam na estrutura mais geral que ele estava desenvolvendo. Ele também notou que as equações do campo gravitacional estavam limitadas a não ser lineares e o princípio da equivalência parecia ocorrer somente localmente.

Nessa época Einstein verificou que se todos os sistemas acelerados são equivalentes, então a geometria Euclidiana não pode ser usada em todos eles. Lembrando o estudo da teoria das superfícies de Gauss que havia feito quando estudante, Einstein logo compreendeu que os fundamentos da geometria tinham significado físico.



Marcell Grossmann (1878 - 1936), Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826 - 1866), Elwin Christoffel (1829 - 1900) e Sophus Lie (1842 - 1899).

Ele consultou seu amigo, o grande matemático húngaro **Marcell Grossmann**, que prontamente lhe mostrou os importantes desenvolvimentos que haviam sido feitos em geometria pelos alemães **Bernhard Riemann** e **Elwin Christoffel**, o norueguês **Sophus Lie** e os italianos **Gregorio Ricci-Curbastro** e **Tullio Levi-Civita**, alguns dos nomes mais importantes da matemática naquela época. Pode-se dizer que foi Marcell Grossmann quem descobriu a importância que o cálculo tensorial desenvolvido por esses matemáticos teria para a futura teoria da relatividade geral de Einstein.

Em 1913 Einstein e Grossmann publicaram um artigo juntos (“Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und der Theorie der Gravitation”, *Zs. Math. und Phys.*, **62**, 225 (1913)) onde o cálculo tensorial desenvolvido por Ricci e Levi-Civita é empregado. Grossmann mostrou a Einstein o tensor de Riemann-Christoffel, ou tensor de curvatura, que junto com o tensor de Ricci, que é deduzido a partir dele, iriam se tornar ferramentas importantes na futura teoria relativística da gravitação. Embora a teoria apresentada estivesse

ainda errada, pela primeira vez a gravitação era descrita por um tensor métrico, o que significava um grande avanço.

Em outubro de 1914 Einstein escreveu um artigo em que metade dele é um tratado sobre análise tensorial e geometria diferencial. Esse artigo fez com que fosse iniciada uma correspondência entre Einstein e Levi-Civita na qual o grande matemático italiano apontou erros técnicos no trabalho sobre tensores apresentado por Einstein. Einstein estava maravilhado em ser capaz de trocar ideias com Levi-Civita, um matemático muito mais receptivo às suas ideias sobre a relatividade do que um grande número de seus colegas físicos.

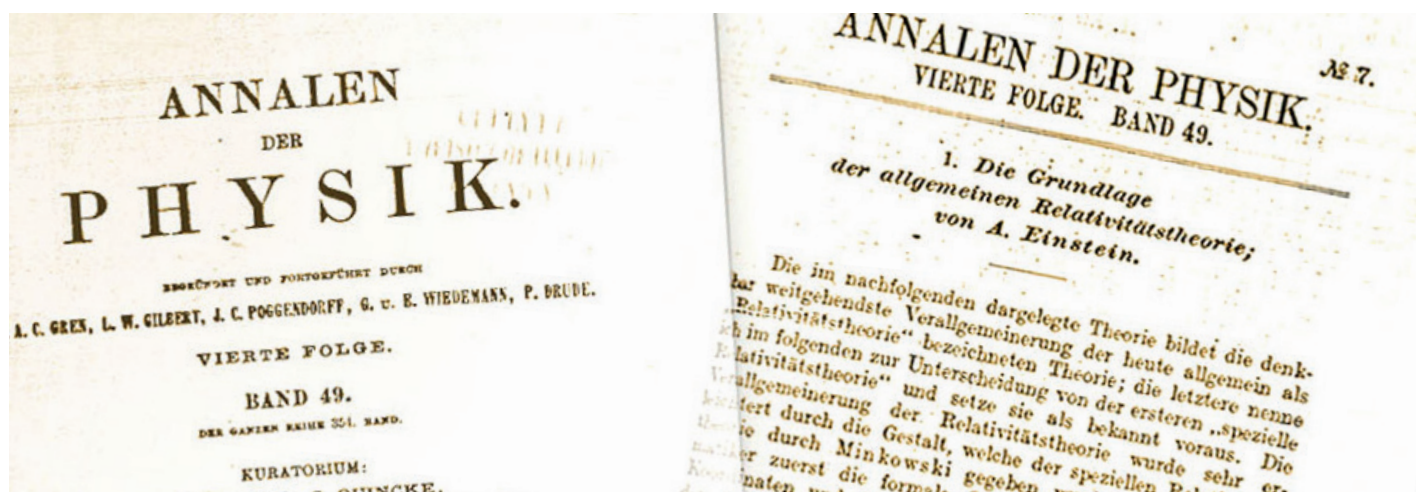
Na segunda metade de 1915 Einstein finalmente aprontou sua teoria. Entretanto, o passo final para a teoria da relatividade geral foi tomado por Einstein e **David Hilbert** quase ao mesmo tempo.

Ambos haviam reconhecido falhas no trabalho de Einstein publicado em outubro de 1914. Uma correspondência entre estes dois cientistas ocorreu em novembro de 1915. É difícil saber quanto um deles aprendeu com o outro mas o fato de ambos descobrirem a mesma forma final das equações do campo gravitacional e publicarem seus artigos com um intervalo de apenas alguns dias, certamente indica que a troca de ideias entre eles foi valiosa.

No dia 20 de novembro de 1915 David Hilbert submeteu seu artigo, com o título “Os fundamentos da física”, (“Die Grundlagen der Physik”, *Nachr. Königl. Gesellsch. Wiss. Göttingen, math.-phys. Kl.* 1915, Heft 3, p. 395), a publicação. Nesse artigo Hilbert obtinha as equações de campo corretas para a gravitação. Cinco dias depois de Hilbert, no dia 25 de novembro de 1915, Albert Einstein submeteu seu artigo, “Die Feldgleichungen der Gravitation”, sobre a teoria da gravitação. Em 1916 Einstein publicou outro artigo, “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie” (*Ann. Phys. (Leipzig)*, **49**, 769, 1916), onde ampliava sua discussão sobre o assunto. A teoria relativística da gravitação era apresentada ao mundo científico em duas brilhantes versões.



David Hilbert (1826 - 1943).



O artigo de Hilbert contém algumas importantes contribuições à relatividade não encontradas no artigo de Einstein. Hilbert aplicou o princípio variacional à gravitação e atribuiu a **Emmy Noether** (imagem a seguir) a descoberta de um dos principais teoremas que dizem respeito a identidades que aparece no seu artigo.

Na verdade o teorema de Emmy Noether só foi publicado com uma demonstração em 1918 em um artigo que ela escreveu sob seu próprio nome (nessa época mulheres não tinham acesso à Academia de Ciências e Emmy Noether entregava seus artigos para serem lidos perante os acadêmicos por algum de seus colegas homens). O teorema proposto por Noether se tornou uma ferramenta vital na física teórica. Um caso especial do teorema de Noe-



Emmy Amelie Noether (1882-1935).

ther foi escrito por **Hermann Weyl** (1885-1955) em 1917 quando o utilizou para deduzir identidades que, mais tarde foi verificado, já haviam sido independentemente descobertas por Ricci em 1889 e por **Luigi Bianchi**, aluno do matemático alemão **Felix Klein** (1849-1925), em 1902.

PENSANDO ALÉM DE NEWTON

Após dez anos de intenso trabalho intelectual, Einstein conseguiu com sucesso traduzir sua intuição física sobre o comportamento da natureza em uma teoria matemática que nos descrevia o movimento livre em espaços-tempo curvos. Nascia então a **teoria da relatividade geral** que por ser na verdade uma teoria da gravitação iremos chamá-la de **teoria relativística da gravitação** (TRG).

Nosso “problema” em aceitar o conceito de espaço curvo é derivado do fato de que nossa vida diária está associada a uma geometria plana, a chamada “geometria Euclidiana”. É ela que aprendemos nos cursos mais básicos e usamos na vida diária: quem não sabe que a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180° ? Um mestre de obras dirá que isso é verdade sem fazer qualquer menção à geometria Euclidiana. Ele sabe, pela sua prática diária, que “isso é verdade”. Em uma geometria curva (ela existe e foi construída por Bolyai, Lobatchevsky, Riemann e outros geniais matemáticos) a soma dos ângulos de um triângulo pode ser maior ou menor que 180° !

Mas porque Einstein complicou a história? Porque ele não fez sua teoria usando a geometria Euclidiana? Esse é o ponto mais nobre da TRG. Para Einstein o espaço-tempo descrito pela TRG se torna **curvo** em resposta aos efeitos da matéria que existe no universo. Vamos usar como exemplo o nosso Sistema Solar. A TRG nos diz que um corpo com massa como, por exemplo, o nosso Sol, faz com que o espaço-tempo em torno dele se curve. Essa curvatura, por sua vez, afeta o movimento dos planetas obrigando-os a descrever órbitas em torno do Sol.

Essa é uma abordagem completamente diferente daquela usada por Isaac Newton para descrever os efeitos da gravitação universal e que foi aceita como verdadeira e única até o século XX. Newton descrevia a gravidade como uma força. Isso quer dizer que dois corpos massivos, independentes dos valores relativos de suas massas, por exemplo a Terra e uma maçã, exerciam uma ação mútua, um sobre o outro: a Terra atraía gravitacionalmente a maçã e essa atraía gravitacionalmente a Terra. Isso resultava da maneira como Newton apresentou sua lei da gravidade. Se a maçã estivesse em repouso no galho da macieira e, por um motivo qualquer esse equilíbrio fosse rompido ou seja, a maçã caísse, ela seria atraída na direção do centro da Terra e pararia na sua superfície. Ela só não atingiria o centro da Terra por ser impedida durante o seu percurso (a crosta e toda a estrutura interior do nosso planeta). Como já vimos as leis de Newton explicavam em detalhes não apenas a queda de maçãs mas também os movimentos dos planetas em torno do Sol e dos satélites em torno dos planetas.

Em resumo, a TRG é uma teoria que nos diz que o espaço e o tempo são quantidades dinâmicas que podem se curvar em resposta aos efeitos da matéria. Por outro lado, o espaço-tempo pode alterar o comportamento da matéria.

AS PRIMEIRAS SOLUÇÕES DAS EQUAÇÕES RELATIVÍSTICAS DA GRAVITAÇÃO

As leis da teoria relativística da gravitação são formuladas de uma maneira que as torna igualmente válidas em qualquer sistema de referência.



Luigi Bianchi (1856-1928).

Essas leis relativísticas gerais conectam matéria e energia com a estrutura geométrica do espaço-tempo. A TRG é uma teoria matematicamente muito mais complexa do que a teoria clássica da gravitação, aquela proposta por Isaac Newton e que permaneceu intocada por tanto tempo. Enquanto a teoria Newtoniana é descrita por uma única equação, a teoria relativística da gravitação, devido às suas características matemáticas, é descrita por um conjunto de 10 equações.

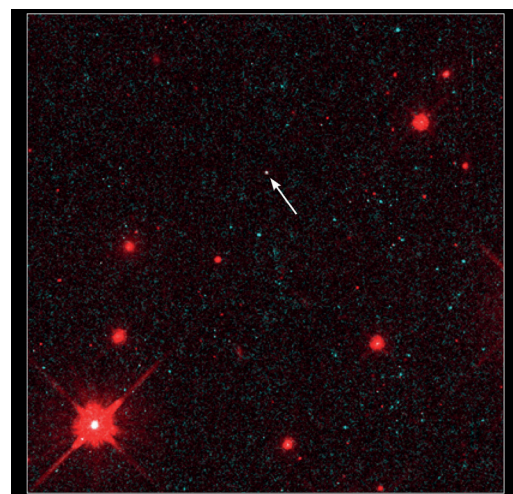
Apesar das dificuldades matemáticas, logo depois dos artigos de Einstein e Hilbert com as equações de campo corretas, o físico alemão **Karl Schwarzschild** obteve, em 1916, uma solução matemática para as equações que corresponde ao campo gravitacional de um objeto compacto esfericamente simétrico. Pela primeira vez era obtida uma solução exata das equações de campo da gravitação relativística para surpresa de Einstein que não acreditava que isso pudesse ocorrer tão cedo.

Na época o resultado apresentado por Schwarzschild foi considerado como um exercício puramente teórico. No entanto, anos mais tarde, verificou-se que esta solução descrevia uma estrela relativística e, deste modo, inaugurava-se uma nova área de pesquisa em astrofísica, a **astrofísica relativística**. Todos os trabalhos que hoje vemos sobre estrelas de nêutrons, pulsares e buracos negros se apoiam inteiramente nas soluções obtidas por Karl Schwarzschild.

Hoje conhecemos muitas soluções das equações relativísticas do campo gravitacional. Algumas dessas soluções estão associadas a estranhos corpos celestes. Por exemplo, a própria solução obtida por Schwarzschild nos introduz o conceito de *buracos negros*. Uma outra solução, conhecida como “solução de Kerr” nos descreve buracos negros em rotação.

Logo os cientistas começaram também a investigar se a TRG poderia ser usada para descrever o universo. Haveria alguma solução das equações da TRG que pudessem ser cosmológicas ou seja, descrever a estrutura geométrica global do espaço-tempo?

Muitas soluções das equações relativísticas do campo gravitacional nos dão as chamadas “soluções cosmológicas”, ambiciosos resultados que descrevem possíveis estruturas geométricas para o Universo.



Observação feita pelo Hubble Space Telescope de uma estrela de nêutron.

TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL = TEORIA DA GRAVITAÇÃO DE EINSTEIN =
TEORIA RELATIVÍSTICA DA GRAVITAÇÃO

A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE GRAVITAÇÃO

Ao contrário do que muitos declaram, a teoria relativística da gravitação não surgiu do nada. Sua elaboração é uma longa história de erros e acertos que se alternaram até que, em um determinado momento, cientistas conseguiram estabelecer a forma correta final que ela deveria ter. Como qualquer outra teoria descoberta na física, a construção da teoria da relatividade geral se apoiou em conhecimentos previamente estabelecidos ou, como disse muito bem Isaac Newton, ela foi criada “*sobre os ombros de gigantes*”. Isso de modo algum é uma tentativa de tirar o mérito científico de Albert Einstein, mas é preciso desmistificar a história e aceitar que muitos outros grandes nomes da física participaram do problema e contribuíram para a sua solução.

15

O universo estático de Einstein e de Sitter

A PROIBIÇÃO DA DINÂMICA: UNIVERSOS ESTÁTICOS

Desde os tempos mais antigos os pensadores que ousaram descrever o universo acreditavam que ele era essencialmente imutável. Até mesmo Newton acreditava que o universo era sempre o mesmo se o estudássemos não localmente, porém sob o ponto de vista mais amplo possível. É claro que ocorriam fenômenos no universo que mudavam coisas, mas isso o afetava apenas localmente e não o perturbava de um modo geral. O nascimento ou morte dos seres vivos na Terra, o movimento dos astros e até mesmo a explosão de uma estrela eram vistos como fenômenos locais. O universo permanecia inalterado, exatamente como ele sempre foi. Isso era descrito dizendo-se que o universo era **estático**.

As equações da teoria relativística da gravitação descrevem a natureza do espaço-tempo e isso logo levou os pesquisadores a perguntar o que elas poderiam dizer sobre a estrutura do próprio universo ou seja, a estrutura do espaço-tempo sob o maior ponto de vista possível. Isso é o domínio da Cosmologia.

O UNIVERSO ESTÁTICO DE EINSTEIN

Tanto Albert Einstein como outros pesquisadores logo se dedicaram a essa tarefa ambiciosa. Em 1917, um ano após Einstein ter divulgado as equações da TRG em sua forma final, para sua surpresa, verificou-se que as equações da TRG não tinham soluções estáticas quando estudadas em escalas cosmológicas. Dito de outro modo, as equações da TRG previam que o universo não era estático: ele era dinâmico e deveria estar ou se expandindo ou se contraindo.

A conclusão de que o universo deveria ser dinâmico e não estático desagradou Einstein. Mas havia um problema com o modelo de universo estático: a TRG mostrava que modelos contendo matéria não podiam ser estáticos. Se o universo fosse estático desde o seu início, a atração gravitacional da matéria faria todos os corpos existentes colapsarem sobre si mesmos. Isso parecia ridículo, pois não havia qualquer razão que justificasse um espaço tão instável.

Para Einstein tudo isso era implausível e ele imediatamente decidiu modificar sua teoria a fim de obrigar a existência de uma solução cosmológica estática mas estável. Para isso Einstein alterou as equações de campo da TRG introduzindo um termo que foi chamado de **constante cosmológica** e representada pela letra grega lambda maiúscula (Λ). Sua função era fornecer soluções cosmológicas estáticas estáveis. Essa constante cosmológica agia como uma força repulsiva que se opunha à ação da força gravitacional. Ajustando o valor dessa constante cosmológica era possível contrabalançar a ação da gravidade que resulta de uma distribuição uniforme de matéria. Se essa constante fosse diferente de zero, o modelo estático com matéria não colapsaria sob sua própria gravidade.

Einstein considerava que essa “constante cosmológica” era somente “um termo hipotético”. Segundo ele, essa constante “não era exigida pela teoria nem parecia natural de um ponto de vista teórico”. Ele declarou que *“esse termo é necessário somente para o propósito de tornar possível uma distribuição quase-estática de matéria”*.

Em resumo, o modelo proposto por Einstein para o universo continha matéria uniformemente distribuída. A geometria do espaço era esférica ou seja, o espaço era uniformemente curvado. Seu universo era de natureza estática: ele não estava se alterando, nem expandindo e nem colapsando.

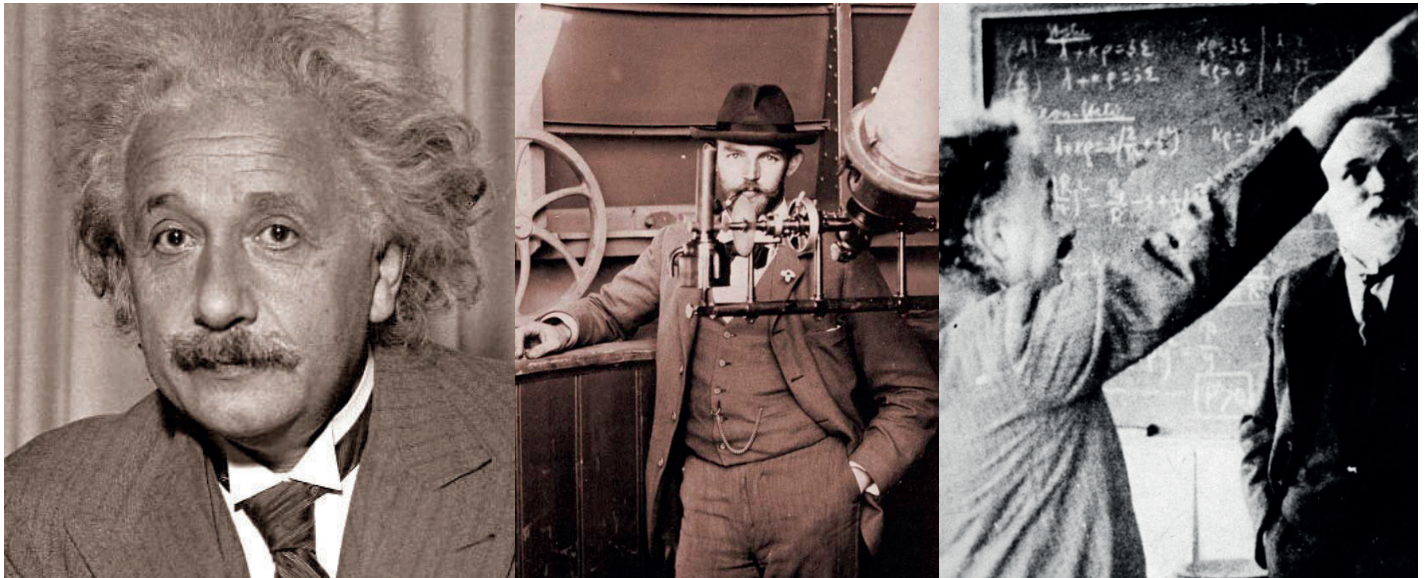
DE SITTER E O UNIVERSO ESTÁTICO SEM MATÉRIA

No mesmo ano em que Einstein apresentou seu modelo de universo estático, o astrônomo holandês Willem de Sitter também propôs um modelo de universo, completamente diferente daquele apresentado por Einstein.

O universo de de Sitter era isotrópico e, para ser estático, não podia conter qualquer quantidade de matéria!

O universo de de Sitter poderia ter sido considerado uma mera curiosidade matemática pelos astrônomos (ele exigia a não existência de matéria, no entanto todos sabemos que o universo é preenchido por matéria na forma de nebulosas, estrelas, galáxias, etc.) se não fosse por uma propriedade muito interessante. Se fosse lançado um punhado de partículas dentro desse universo elas se comportavam de uma maneira estranha: elas pareciam estar se afastando umas das outras. Isso foi interpretado como tendo alguma relação com os resultados de redshift obtidos por Slipher e por muito tempo foi chamado de “efeito de Sitter”.

Os argumentos parecem se contradizer, pois foi dito que o universo é o todo de matéria e energia existentes e agora é dito que é possível jogar algo “dentro” do universo? Onde estava essa matéria até agora? Pior ainda, para jogar alguma coisa dentro do universo é preciso estar do lado de “fora” dele, o que é um absurdo!



Einstein e Sitter discutindo cosmologia.

Podemos supor então que um grupo de partículas é criado, bem próximas umas das outras em um determinado ponto do universo.

De novo vem a dúvida: então podemos criar partículas a partir do “nada”? De repente essas partículas surgem e pronto! Está explicado! Isso é uma violação do princípio de conservação de energia!

A explicação vem do fato que as partículas surgiram a partir de uma flutuação quântica do vácuo.

Logo foi mostrado que a natureza estática do universo de de Sitter era um artifício puramente matemático. Seu modelo de universo se comportava de modo estático somente devido ao fato dele não conter matéria. A presença de matéria fazia com que ele exibisse suas características dinâmicas. O astrônomo norte-americano Howard Robertson mostrou, mais tarde, que o modelo de universo proposto por de Sitter era homogêneo e isotrópico e que nessa forma ele também era espacialmente plano, infinito e estava se expandindo.

16

O universo em expansão

Uma distinção pode ser feita agora entre os modelos de universo propostos por Einstein e por de Sitter. O universo de Einstein era “matéria sem movimento” enquanto que o universo de de Sitter era “movimento sem matéria”.

O UNIVERSO EM EXPANSÃO

Surge o Universo em expansão de Friedmann

Em 1922 o matemático e meteorologista russo Alexander Friedmann (ou Friedman) publicou um conjunto de soluções matemáticas possíveis das equações de campo da teoria relativística da gravitação. A análise dos resultados obtidos mostrava um comportamento não estático para o Universo! Ao contrário do que havia sido previsto por Einstein, Friedmann apresentava uma solução das equações relativísticas nas quais o universo estava em expansão.

A importância do trabalho de Friedmann está no fato de que ele propõe três modelos que descrevem espaços cujas geometrias possuem curvaturas positiva, zero e negativa. Isso foi feito uma década antes que o astrônomo norte-americano Howard Robertson e seu companheiro Walker publicassem os mesmos resultados.

Nesta época, nem Einstein nem qualquer outro cientista teve qualquer interesse no trabalho apresentado por Friedmann. Para os poucos que tiveram contato com esse trabalho, as conclusões apresentadas pareciam ser meramente uma curiosidade teórica bem abstrata, sem qualquer contato com a realidade do universo. A maioria dos astrônomos continuavam a considerar que o universo real era estático.

Foi grande o sentimento de desprezo com que os astrônomos trataram essa descoberta de Friedmann, quando, em 1924, ele publicou novamente o seu trabalho “*Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*” (Sobre a possibilidade de um universo com espaço de curvatura negativa constante - *Zeitschrift für Physik*, vol. 21, páginas 326-332), o artigo foi visto como uma questão puramente da teoria da relatividade, sem qualquer interesse astronômico. O artigo escrito por Friedmann nem mesmo apareceu no levantamento anual de artigos científicos sobre tópicos de astronomia.

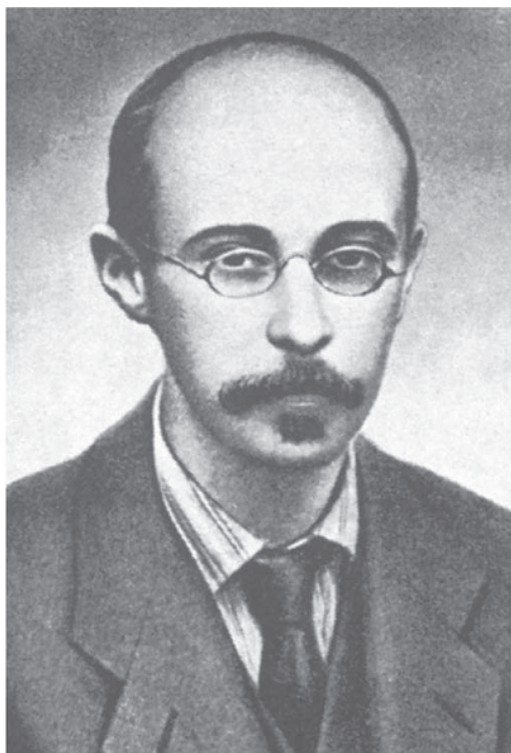
Infelizmente Friedmann não pode nem mesmo defender suas ideias, pois um ano mais tarde ele morreu de febre tifóide, com apenas 37 anos de idade.

Pior ainda, hoje o trabalho pioneiro de Friedmann é simplesmente desprezado por escritores, em particular norte-americanos, que se referem às soluções clássicas das equações de campo da TRG que descrevem um universo homogêneo e isotrópico com sendo “métrica de Robertson-Walker”. Ninguém se refere a isso como “métrica de Friedmann” e alguns poucos a chamam de “métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker” ou “métrica FLRW”.

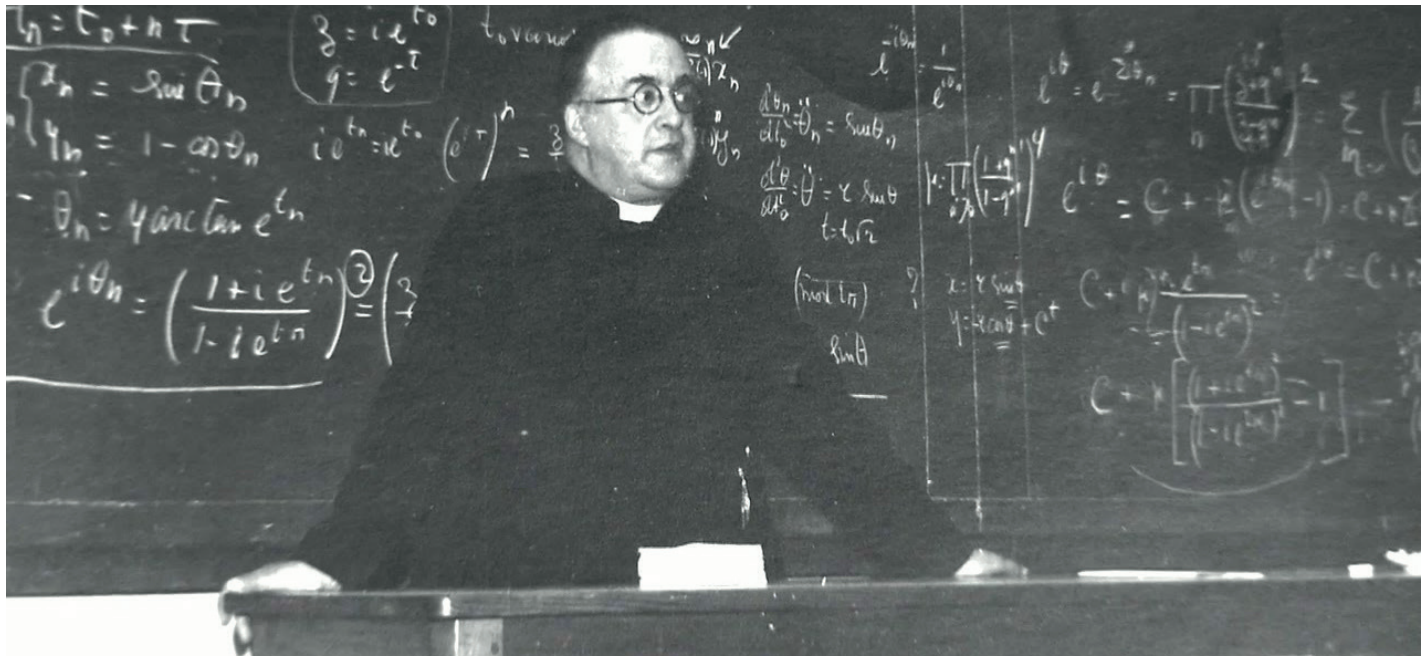
Georges Lemaître e o “nascimento” do Universo

Poucos anos após a publicação do trabalho de Alexander Friedmann, que mostrava pela primeira vez um universo em expansão, o astrofísico belga Georges Lemaître chegou às mesmas conclusões.

Lemaître era um padre católico que durante praticamente toda sua vida se interessou pela ciência. Em 1927 ele publicou na revista científica *Annals of the Brussels Scientific Society*, um modelo de um universo que se expandia. Como essa revista era pouco lida pela maioria dos grandes cientistas da época, a contribuição científica de Lemaître não causou qualquer impacto nos meios científicos. Sua teoria não foi amplamente conhecida e rapidamente esquecida até mesmo por aqueles que leram o seu artigo.



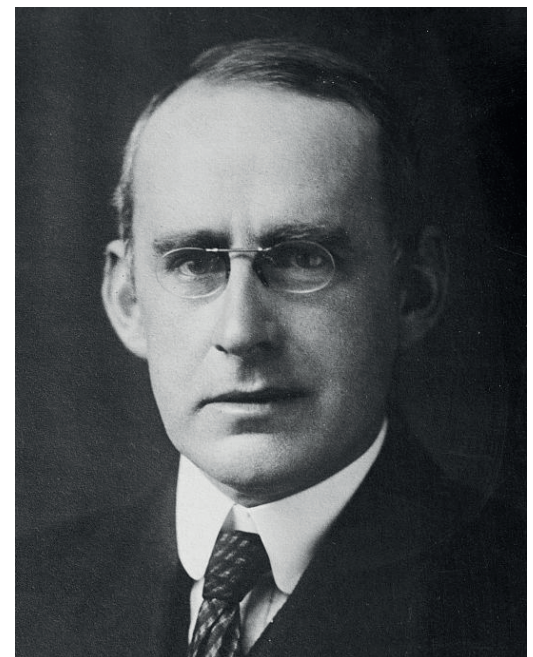
Alexander Friedmann (1888- 1925).



George Lemaître (1894- 1966).

No encontro da Royal Astronomical Society, ocorrido em Londres no início de 1930, de Sitter admitiu que nenhuma das soluções propostas às equações do campo gravitacional relativístico, nem a sua solução cosmológica nem aquela proposta por Einstein, poderiam representar o universo observado. Quando Lemaître viu o resumo desse encontro, prontamente escreveu para o astrofísico inglês Arthur Eddington (que havia sido seu professor) lembrando a ele o artigo que havia publicado em 1927 no qual propunha um universo em expansão (até mesmo Eddington que havia lido o artigo de Lemaître na época de sua publicação já o havia esquecido!).

Eddington prontamente reconheceu o valor do estudo feito por Lemaître e, sem perda de tempo, entrou em contato com de Sitter apresentando a ele esse artigo fundamental, mas quase desconhecido. A existência do artigo de Lemaître foi aos poucos se espalhando entre os nomes célebres da época. Logo depois de tomar conhecimento da existência do artigo de Lemaître, de Sitter escreveu para Harlow Shapley, que estava em Harvard, Estados Unidos, dizendo:



Arthur Eddington (1882- 1944).

“Eu encontrei a solução verdadeira, ou pelo menos uma solução possível, que deve estar aproximadamente próxima da verdade, em um artigo... de Lemaître... que tinha escapado de minha atenção na época.”

Einstein também logo confirmou que o trabalho apresentado por Lemaître

“se ajusta bem na teoria da relatividade geral”

Em 1931, publicamente, de Sitter elogiou a “brilhante descoberta” de Lemaître, o “universo em expansão”. Neste mesmo ano, Lemaître avançou mais ainda suas ideias propondo que o universo atual é formado pelas

“cinzas e fumaça de fogos de artifício brilhantes mas muito rápidos.”

Hoje vemos esta “teoria de fogos de artifício”, como ela ficou sendo conhecida em sua época, como uma primeira versão da “teoria do Big Bang” da origem do Universo.

17

O grande debate: Shapley e Curtis

O GRANDE DEBATE: SHAPLEY E CURTIS

Por volta de 1920 os astrônomos discordavam em vários assuntos que diziam respeito à forma e tamanho da nossa Galáxia. A razão disso era o fato de que eles ainda não dispunham de conhecimento para resolver um dos problemas fundamentais da astronomia: a determinação precisa das distâncias a corpos celestes.

Esse desconhecimento levou a intensas discussões e desacordos sobre dois pontos extremamente importantes para o conhecimento do Universo:

- Qual era a estrutura da nossa Galáxia? Quais eram seus limites?
- Qual era a verdadeira natureza das chamadas “nebulosas espirais”?

Dois eminentes astrônomos norte-americanos, Harlow Shapley, trabalhando então no Mount Wilson Observatory, e H. D. Curtis, do Lick Observatory, tornaram-se os mais ardentes defensores de ideias bastante antagônicas quanto às questões acima.

Shapley acreditava que as “nebulosas espirais” eram partes distantes da nossa Galáxia enquanto que Curtis dizia que elas eram galáxias inteiramente independentes da nossa.

Tal fato culminou com um debate entre eles, no dia 26 de abril de 1920, patrocinado pela National Academy of Sciences dos Estados Unidos e que entraria para a história da astronomia como o “Debate Shapley-Curtis” ou “O Grande Debate”.

Eles iniciaram uma intensa discussão sobre este assunto: as “nebulosas espirais” pertenciam ou não à nossa Galáxia?

O GRANDE DEBATE: A ESCALA DO UNIVERSO

SHAPLEY	CURTIS
O diâmetro de nossa Galáxia é de cerca de 100 kpc.	O diâmetro de nossa Galáxia é de cerca de 10 kpc.
As “nebulosas espirais” não são comparáveis em tamanho à nossa Galáxia.	As “nebulosas espirais” são galáxias semelhantes à nossa.
As “nebulosas espirais” estão localizadas relativamente próximas à nossa Galáxia.	As “nebulosas espirais” estão localizadas a distâncias que variam de 150 kpc para a “nebulosa” Andrômeda até mais de 3000 kpc para aquelas mais distantes.

Curiosamente, o debate não fez terminar a controvérsia. Tanto Shapley como Curtis mantiveram-se fiéis às suas ideias originais e a comunidade científica permaneceu dividida. Na verdade, os resultados posteriores mostraram que cada um dos debatedores tinha razão em alguns pontos e não em outros.

Faltava algo muito especial para que os astrônomos pudessem conhecer as dimensões corretas da nossa Galáxia. Havia mais do que estrelas e “nebulosas espirais” no céu que nos envolve.

Existia também gás e poeira espalhados entre as estrelas e esse material era capaz de diminuir bastante, em algumas situações, o brilho de objetos situados atrás dele. Deste modo, qualquer cálculo de distância envolvendo o conhecimento de magnitudes tinha que levar em conta o obscurecimento provocado pela poeira e gás interestelares. E isso, até agora, não tinha praticamente sido considerado. Somente em 1930 é que, com os trabalhos do astrônomo suíço Robert Julius Trumpler, os pesquisadores ficaram convencidos de que existia um meio interestelar capaz de absorver a radiação emitida pelas estrelas.

HUBBLE E A CLASSIFICAÇÃO DAS GALÁXIAS

Quando estava escrevendo sua tese de doutorado em 1917, o astrônomo norte-americano Edwin Hubble notou que os catálogos já incluíam cerca de 17000 objetos nebulosos, fracos e pequenos, que poderiam, no fim das contas, serem resolvidos em agrupamentos de estrelas. Talvez 150000 destes objetos estivessem dentro do alcance dos telescópios então existentes.

Hubble escreveu:

Pouquíssimo é conhecido sobre a natureza das nebulosas e nenhuma classificação importante foi sugerida até agora; nem mesmo uma definição precisa foi formulada.”

A CLASSIFICAÇÃO DE HUBBLE

Os trabalhos desenvolvidos por Edwin Hubble foram muito significativos. Prosseguindo no seu estudo das galáxias, Hubble desenvolveu um esquema de classificação para elas o qual, com pequenas revisões, permanece em uso hoje.

Hubble dividiu as galáxias em duas categorias principais, **galáxias elípticas** e **galáxias espirais** com uma terceira categoria, as **galáxias irregulares**, utilizada para agrupar todas aquelas galáxias que, de algum modo, desafiavam a classificação regular, não mostrando as características morfológicas marcantes das galáxias elípticas ou espirais.

Galáxias Elípticas

As galáxias elípticas, como o próprio nome indica, são galáxias que possuem a forma de um elipsoide de revolução, uma figura que se obtém fazendo uma elipse girar em torno do seu eixo maior.

As galáxias elípticas não possuem características externas marcantes sendo, essencialmente, formadas por uma região central onde há uma enorme densidade de estrelas. A esta região damos o nome de **bojo nuclear**. Para melhor estudar as galáxias elípticas, os astrônomos as subdividiram em sete classes de elipticidades. Estas classes variam de **E0** (circular) a **E7** (forma de um charuto).

Numericamente calculamos a elipticidade de uma galáxia deste tipo usando uma equação bastante simples, veja ao lado.

$$\text{elipticidade} = 10(a-b)/a$$

Onde: *a* é o comprimento do eixo maior e *b* é o comprimento do eixo menor.

Precisamos ter um pouco de cuidado com este tipo de classificação. Vemos claramente que a classificação proposta por Hubble não nos diz a *forma verdadeira* da galáxia elíptica. Por exemplo, uma galáxia elíptica classificada como **E0** poderia ser uma galáxia elíptica do tipo **E7** (um “charuto”) vista ao longo do seu comprimento.

Estudos estatísticos têm mostrado que a distribuição das galáxias entre as diversas elipticidades é aproximadamente uniforme. Isto quer dizer que, praticamente, vemos o mesmo número de galáxias de todos os tipos entre **E0** e **E7**.

As imagens ao lado, a primeira obtida por David Malin do Anglo-Australian Observatory, nos mostra a galáxia M87 classificada como **E0** e abaixo um exemplo de uma galáxia elíptica do tipo **E5**, a galáxia M 110.

18

Hubble e a classificação das galáxias



copyright: NOAO / AURA / NSF

As galáxias elípticas possuem as seguintes características físicas:

- estrutura central: as galáxias elípticas são formadas apenas por bojo. Elas não possuem qualquer forma de disco.
- braços espirais: não possuem qualquer vestígio de braço espiral.
- presença de gás: quase nenhum gás é observado nas galáxias elípticas.
- presença de estrelas jovens e regiões HII (regiões onde o hidrogênio está ionizado): praticamente não possuem.
- estrelas: as galáxias elípticas são formadas por estrelas quase todas velhas, com idade aproximada de 10^{10} anos. Estas estrelas são do tipo espectral G-K e muito vermelhas.
- massa: as galáxias elípticas se distribuem em um intervalo de massa que vai de 10^8 a 10^{13} massas solares
- luminosidade: a luminosidade das galáxias elípticas varia entre 10^6 a 10^{11} luminosidades solares.

Galáxias Espirais

As galáxias espirais, como o próprio nome diz, são galáxias que apresentam uma estrutura externa espiral. Estas galáxias mostram **braços espirais** que se enrolam em torno de uma região central que é o seu **núcleo**. Em torno desta grande estrutura de braços e núcleo temos toda uma região aproximadamente esférica, que envolve totalmente a galáxia, e que chamamos de **halo**.

No entanto, as galáxias espirais não são todas iguais. Algumas apresentam braços espirais muito abertos enquanto que em outras os braços são muito apertados em torno do núcleo. Algumas delas têm núcleos muito grandes enquanto que em outras a região central é bastante pequena.

Para ajudar no estudo das propriedades físicas das galáxias espirais, Hubble as dividiu em três classes com a seguinte denominação:

- Sa
- Sb
- Sc

EXEMPLOS DE GALÁXIAS ESPIRAIS

A galáxia **M 94** é uma galáxia espiral classificada como sendo do tipo **Sa**.



A galáxia **M 81** é uma galáxia espiral classificada como sendo do tipo **Sb**.



A galáxia **M 101** é uma galáxia espiral classificada como sendo do tipo **Sc**.



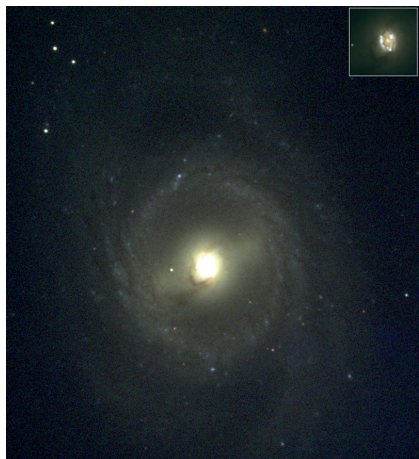
Algumas galáxias espirais mostram, além das estruturas citadas acima, uma “barra” que parece cruzar sua região central. Estas galáxias formam uma

seqüência paralela às galáxias espirais e, devido à presença desta “barra” são chamadas de **galáxias espirais barradas**. As galáxias espirais barradas são classificadas como:

- **SBa**
- **SBb**
- **SBc**

EXEMPLOS DE GALÁXIAS ESPIRAIS BARRADAS

A galáxia **M 95** é classificada como uma galáxia espiral barrada do tipo **SBa**.



A galáxia **M 91** é classificada como uma galáxia espiral barrada do tipo **SBb**.



A galáxia **M 61** é classificada como uma galáxia espiral barrada tipo **SBc**.



Muitas vezes é difícil perceber a presença da barra em uma galáxia espiral, só conseguindo detectá-la após um estudo detalhado. Abaixo mostramos a galáxia NGC 6782 que é uma espiral barrada embora isso não seja tão claro no exame da imagem. No entanto podemos ver com clareza a espetacular e complexa estrutura de um anel que esta galáxia possui em torno da sua barra e, obviamente, do seu núcleo. A presença deste anel é bastante marcante em algumas galáxias barradas embora não seja exclusividade delas. A galáxia NGC 6782, com 80000 anos-luz de diâmetro, está localizada na constelação Pavo, a 180 milhões de anos-luz de distância.

Copyright: Rogier Windhorst (ASU) e colaboradores, Hubble Heritage Team, NASA



Para classificar as galáxias espirais, barradas ou não, em cada uma destas classes, Sa, Sb, Sc, SBa, SBb, SBc, usamos vários critérios. Aqui estão alguns deles:

- **tamanho do bojo nuclear:** as galáxias **Sa** ou **SBa** possuem um bojo grande. O tamanho do bojo vai diminuindo ao longo da classificação até as galáxias **Sc** ou **SBc** que têm o bojo muito pequeno.
- **abertura dos braços espirais:** as galáxias **Sa** ou **SBa** apresentam braços espirais fortemente enrolados. Os braços vão se tornando cada vez mais abertos até que nas galáxias **Sc** ou **SBc** eles são muito abertos.
- **presença de gás:** as galáxias **Sa** ou **SBa** têm pouca quantidade de gás, aproximadamente 1%. Esta quantidade de gás é de cerca de 2 a 5% nas galáxias **Sb** ou **SBb** e fica entre 5 e 10% nas galáxias **Sc** ou **SBc**.
- **resolução dos braços em estrelas jovens e regiões HII:** as galáxias **Sa** ou **SBa** possuem uma estrutura suave, apresentando apenas vestígios de regiões H II e estrelas jovens. As regiões H II são pequenas e em pouca quantidade. Estas quantidades vão aumentando ao longo da classificação até as galáxias **Sc** ou **SBc** cujos braços apresentam uma estrutura não suave, mostrando regiões onde a matéria se amontoa, muitas regiões HII e estrelas jovens brilhantes.
- **estrelas:** As galáxias **Sa** e **SBa** mostram algumas estrelas jovens, de classe espectral G (amarela) e K (laranja-vermelha). O número de estrelas jovens cresce continuamente ao longo da classificação. As galáxias **Sb** e **SBb** mostram uma quantidade maior de estrelas jovens, de classe espectral entre F e K e com cor tendendo a ser menos avermelhada. As galáxias **Sc** e **SBc** apresentam muitas estrelas jovens, de classe espectral A (branca) e F (amarelo-branca) sendo, portanto, bem menos vermelhas do que as da classe **Sb** ou **SBb**.
- **massa:** as galáxias espirais se distribuem no intervalo de massa que vai de 10^{12} a 10^9 no sentido das **Sa/SBa** para as **Sc/SBc**
- **luminosidade:** as galáxias espirais se distribuem no intervalo de luminosidade que vai de 10^{11} a 10^8 no sentido das **Sa/SBa** para as **Sc/SBc**

EXEMPLOS DE GALÁXIAS LENTICULARES

Galáxia **M 86**, classificada como uma galáxia lenticular tipo **SO**.



Galáxia lenticular barrada **NGC 2787**. Com cerca de 4500 anos-luz de diâmetro, esta galáxia, de tipo **SB0**, está situada a 24 milhões de anos-luz de distância, na constelação Ursa Major.



Galáxias Lenticulares

Após ter completado seu esquema de classificação, Hubble notou que era necessária uma outra classe, intermediária entre as galáxias elípticas e as galáxias espirais, barradas ou não.

Estas novas galáxias são classificadas como galáxias **lenticulares** e recebem a sigla **S0** e **SB0** dependendo de ter (SB0) ou não (S0) uma barra.

Do mesmo modo que as galáxias espirais, as galáxias lenticulares contêm um disco mas, como as galáxias elípticas, elas praticamente não têm poeira, gás e braços espirais.

As galáxias lenticulares possuem as seguintes características físicas:

- estrutura central: as galáxias lenticulares apresentam bojo e disco
- braços espirais: não têm qualquer vestígio de braço espiral
- presença de gás: elas quase não contêm gás
- estrelas jovens e regiões H II: as galáxias lenticulares não mostram a presença de estrelas jovens e regiões H II

- estrelas: as estrelas das galáxias lenticulares são estrelas velhas de tipo espectral G-K, vermelhas.

Galáxias Irregulares

As observações logo mostraram que várias galáxias não podiam ser classificadas como espirais ou elípticas. Elas não mostravam as principais características destas categorias tais como braços espirais, bojo, etc. Muitas delas não possuíam qualquer forma de simetria que permitisse sua classificação a não ser com a criação de uma nova classe. Estas galáxias são classificadas como **galáxias irregulares**.

Atualmente consideramos que as galáxias irregulares podem ser agrupadas em duas classes principais:

- **Irregulares I**
- **Irregulares II**

As galáxias irregulares I, também chamadas de **Irr I**, podem ser consideradas como uma extensão lógica do diagrama de Hubble. Vemos nelas algumas características que parecem situá-las como sendo a continuação das galáxias espirais classificadas como classe Sc. Estas características são um alto conteúdo de gás e a presença dominante de uma população de estrelas jovens.

Algumas galáxias Irregulares I mostram estruturas que se assemelham um pouco a uma “barra” e também podem mostrar uma pequena estrutura espiral. Um exemplo clássico disso é a Grande Nuvem de Magalhães, uma galáxia irregular que apresenta algo parecido com uma “barra” no seu centro. Por este motivo, estas galáxias são, algumas vezes, chamadas de galáxias “**Irregulares Magelânicas**”.

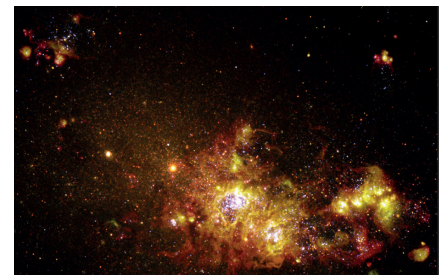
As galáxias irregulares II, ou **Irr II**, são aquelas cuja estrutura desafia qualquer tentativa de classificação. Elas não possuem qualquer simetria e sua forma alterada mostra que elas passaram por algum tipo de perturbação que as deixou sem qualquer forma regular.

As galáxias irregulares possuem as seguintes características físicas:

- **estrutura central:** as galáxias irregulares não apresentam estrutura central
- **braços espirais:** algumas galáxias irregulares mostram vestígios de braços espirais
- **gás:** as galáxias irregulares apresentam muito gás, entre 10% e 50%
- **estrelas jovens e regiões HII:** é importante a presença de estrelas jovens e regiões H II nas galáxias irregulares. Estas características dominam a sua aparência.
- **estrelas:** as estrelas das galáxias irregulares são na maioria jovens embora também apresentem algumas estrelas muito velhas. Estas estrelas têm os tipos espectrais entre A e F e são bem mais azuis.
- **massa:** as galáxias irregulares apresentam massa no intervalo entre 10^8 a 10^{11} massas solares.
- **luminosidade:** as galáxias irregulares apresentam luminosidade no intervalo entre 10^8 a 10^{11} massas solares.

EXEMPLOS DE GALÁXIAS IRREGULARES

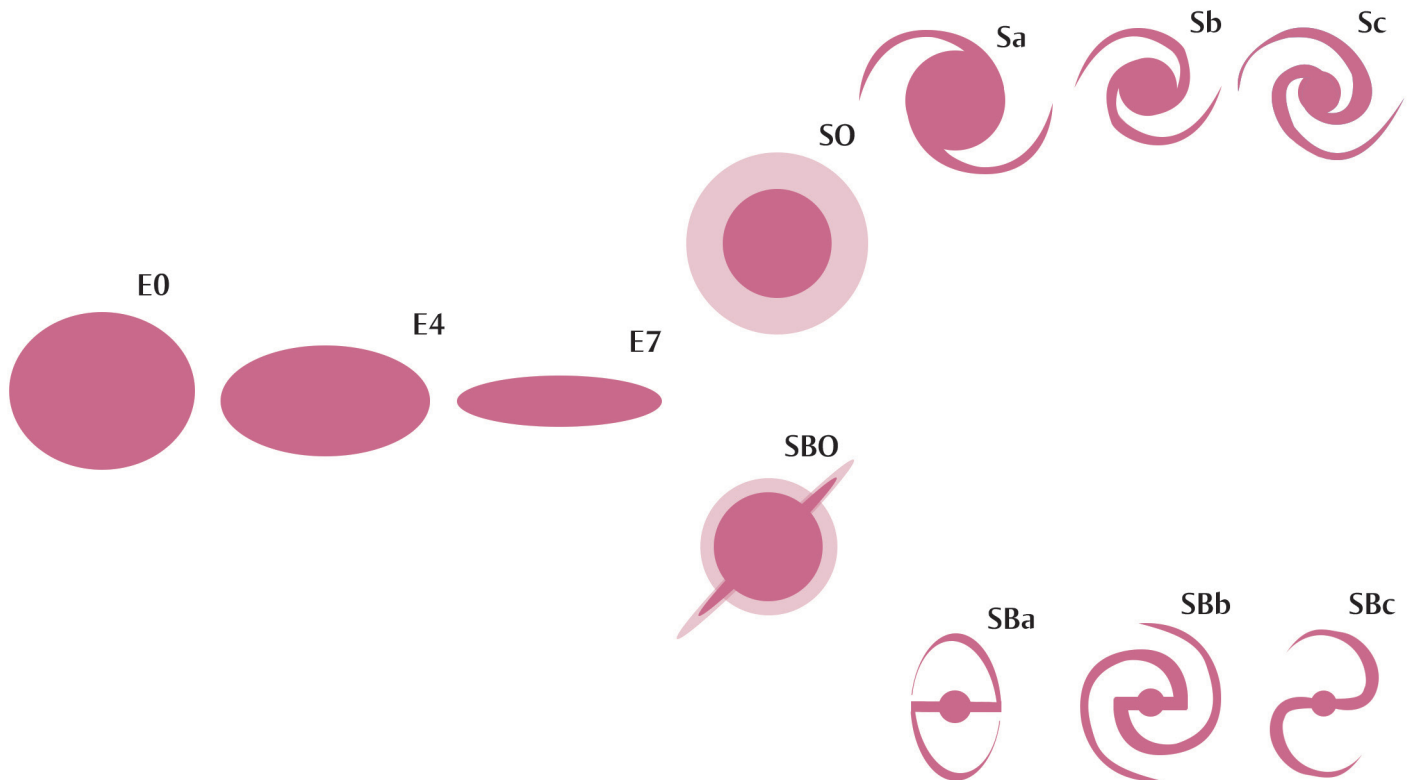
Galáxia Grande Nuvem de Magalhães é uma típica galáxia irregular I (**Irr I**).



A galáxia **M 82** é classificada como irregular II (**Irr II**).



A CLASSIFICAÇÃO GERAL DE HUBBLE: O “DIAGRAMA DIAPASÃO”



O CONTEÚDO FÍSICO DE UMA GALÁXIA E SUA CLASSIFICAÇÃO DE HUBBLE

O que forma uma galáxia? Estrelas, gás e poeira interestelares, nebulosas de emissão, nebulosas de reflexão, estes são os componentes básicos de uma galáxia. No entanto, quando estudamos as galáxias procuramos conhecer não as propriedades de seus elementos individuais mas sim suas propriedades globais.

Um fato interessante é que praticamente todas as características observáveis das galáxias estão diretamente relacionadas com a sua classificação de Hubble.

A CLASSIFICAÇÃO DE HUBBLE ATUAL

Com o desenvolvimento das técnicas observacionais verificou-se a necessidade de melhorar a classificação geral de Hubble. Para isso, embora mantendo o tradicional esquema de classificação com a forma de um “diagrama diapásio”, algumas modificações foram incluídas.

A classificação de Hubble mais moderna adiciona algumas classes, tais como **Sd** e **SBd** além de criar uma sub-classificação entre as classes conhecidas como mostramos abaixo:

- **Sab**: entre as classes **Sa** e **Sb**
- **Sbc**: entre as classes **Sb** e **Sc**
- **Scd**: entre as classes **Sc** e **Sd**

O mesmo tipo de subdivisão ocorre na categoria das galáxias barradas.

Ficamos então com uma nova classificação de Hubble com a seguinte forma:

										Sa	Sab	Sb	Sbc	Sc	Scd	Sd
									S0							
E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7		SBO							
										SBa	SBab	SBb	SBbc	SBc	SBcd	SBd

A nova classificação mantém também as duas classes irregulares ou seja, **irregulares I** e **irregulares II**.

ALGUMAS GALÁXIAS INTERESSANTES

NGC4013

O Hubble Space Telescope obteve esta imagem da galáxia NGC 4013, um objeto que está perfeitamente de perfil em relação a nós.

A galáxia NGC 4013 é uma galáxia espiral, muito parecida com a nossa Galáxia, que está situada a 55 milhões de anos-luz de nós na constelação Ursa major. A imagem nos revela que enormes nuvens de gás e poeira se estendem ao longo, e também bem acima, do disco principal da galáxia.

Se esta galáxia fosse vista de frente ela pareceria um cata-vento circular, com seus braços espirais bem estendidos.

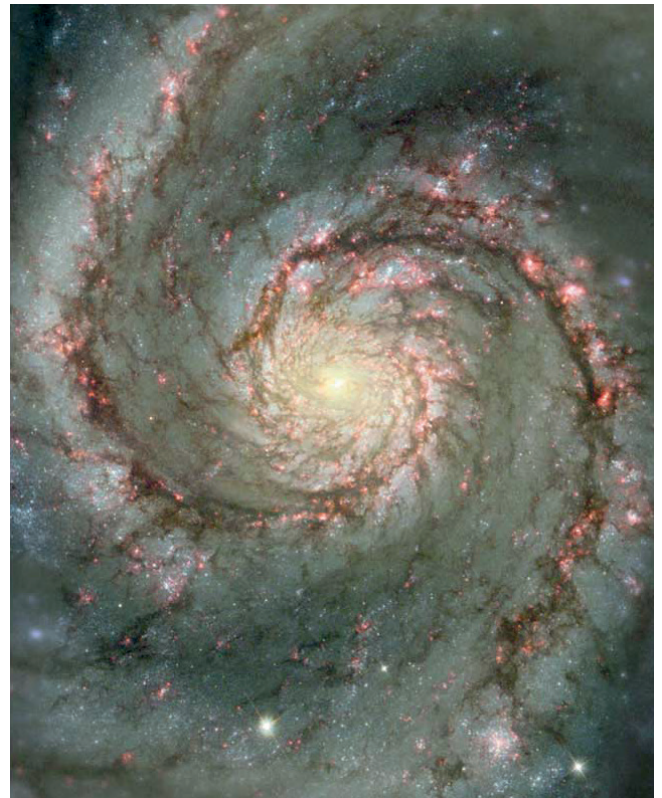


M51

Esta é a galáxia Whirlpool, uma galáxia espiral clássica, do tipo Sc, situada a 15 milhões de anos-luz de nós na constelação Canes Venatici. Esta galáxia, também conhecida como M 51 ou NGC 5194, tem 65000 anos-luz de diâmetro. Ela é uma das mais brilhantes galáxias em todo o céu.

A imagem abaixo mostra o campo onde se encontra a galáxia M 51. A galáxia menor que aparece abaixo e a esquerda de M 51 está bem atrás dela. Pode-se concluir que, a partir da observação, a poeira pertencente ao braço espiral de M 51 está obscurecendo a luz desta pequena galáxia.

Os astrónomos acreditam que a estrutura espiral de M 51 foi produzida pela sua interação gravitacional com esta galáxia menor vista na imagem.



ALGUMAS GALÁXIAS INTERESSANTES

“OBJETO DE HOAG”

Quando, em 1950, o astrônomo Art Hoag descobriu este objeto extragaláctico não usual, os astrônomos logo começaram a questionar se isto se tratava de uma ou duas galáxias.

Este objeto, hoje conhecido como “Objeto de Hoag” possui características muito interessantes. No seu lado externo vemos um anel dominado por estrelas azuis brilhantes enquanto que próximo ao seu centro vemos uma bola de estrelas muito vermelhas que, provavelmente, são muito velhas. Entre estas duas regiões há um espaço que parece ser quase completamente escuro.

O “Objeto de Hoag” tem 100000 anos-luz de diâmetro e está situado a 600 milhões de anos-luz de nós na constelação Serpens.

Até hoje os astrônomos não sabem como o “Objeto de Hoag” se formou. Alguns outros objetos semelhantes a este foram encontrados e são conhecidos como “galáxias com anel”. Nesta mesma imagem, obtida pelo Hubble Space Telescope, vemos visível no espaço entre as duas estruturas do “Objeto de Hoag” (na posição que o ponteiro de um relógio apontaria a 1 hora) uma outra “galáxia com anel”, muito mais distante do que o “Objeto de Hoag”.

NGC 253

Descoberta por Caroline Herschel em 1783. Ela é a galáxia mais brilhante do grupo de galáxias Sculptor e é a galáxia “starburst” mais próxima de nós (o significado do termo “starburst” será discutido mais tarde quando tratarmos das chamadas “galáxias ativas”).

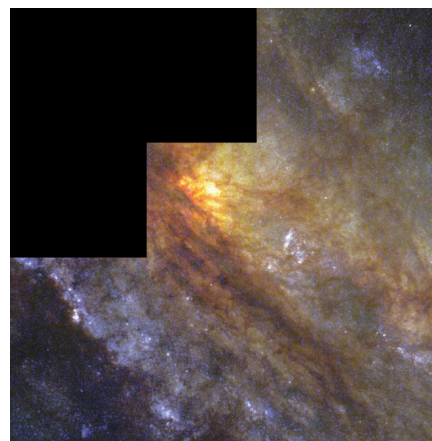
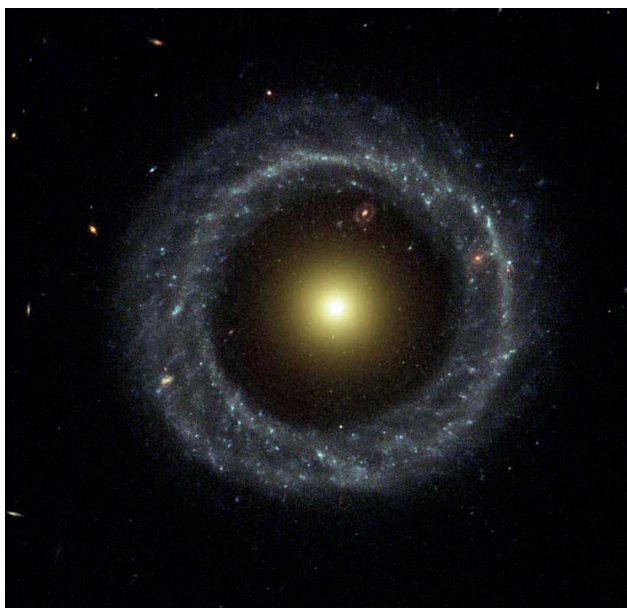
O grupo de galáxias Sculptor fica localizado em torno do pólo sul galáctico sendo, por este motivo, conhecido também como “Grupo Polar do Sul”.

Acredita-se que o grupo de galáxias Sculptor seja o grupo mais próximo do Grupo Local, o aglomerado de galáxias ao qual a nossa galáxia pertence.

É também uma das galáxias mais brilhantes situadas fora do Grupo Local de galáxias. Ela está situada a 10 milhões de anos-luz de nós.

A imagem abaixo, obtida pelo Hubble Space Telescope, mostra a região central da galáxia NGC 253. Esta é uma região de intensa, e violenta, formação de estrelas (uma característica das galáxias “starburst”).

A imagem detalhada obtida pelo Hubble Space Telescope permite identificar estruturas complexas na região central de NGC 253 como, por exemplo, aglomerados estelares, faixas de poeira, filamentos de gás brilhante e regiões de gás denso. Também foi identificado nesta região um aglomerado estelar super compacto e muito denso.



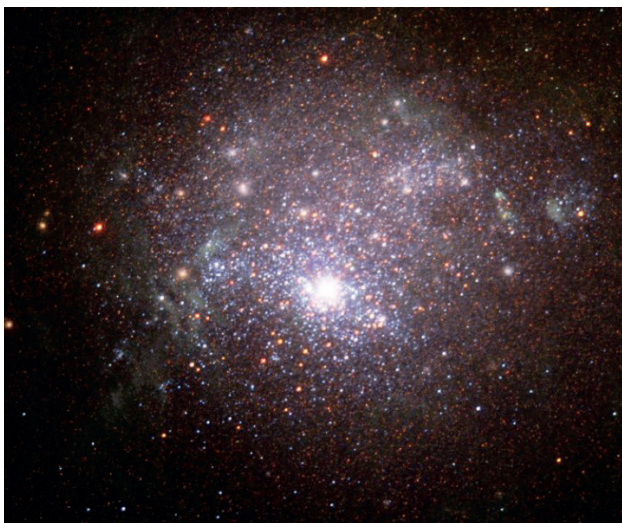
ALGUMAS GALÁXIAS INTERESSANTES

NGC 1705

Esta galáxia irregular anã, está localizada a 17 milhões de anos-luz da Terra. Ela é classificada como galáxia “anã” por possuir um diâmetro pequeno, apenas 2000 anos-luz. Seu aspecto é bastante semelhante àquele apresentado pelas duas galáxias satélites da nossa Galáxia, a Grande Nuvem e a Pequena Nuvem de Magalhães.

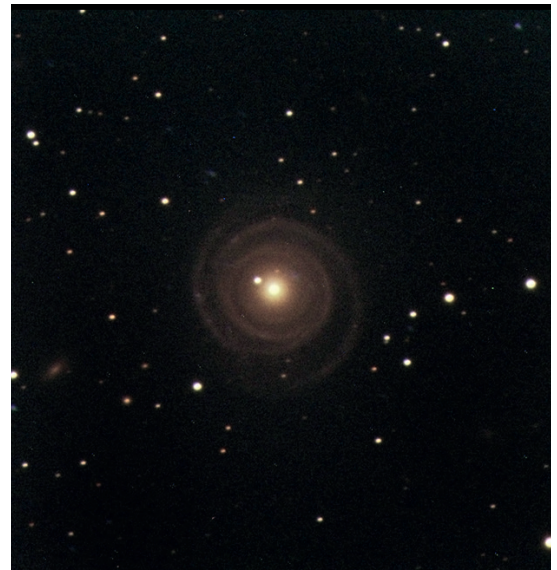
Esta imagem, obtida pelo Hubble Space Telescope, mostra que a maioria das estrelas azuis, quentes e jovens desta galáxia estão concentradas em um grande aglomerado central. As estrelas vermelhas, mais frias e mais velhas, estão mais uniformemente distribuídas.

Esta galáxia provavelmente se formou há cerca de 13 bilhões de anos.



NGC 4622

Está localizada na constelação Centaurus a cerca de 100 milhões de anos-luz de nós. Seus braços espirais mais externos mostram aglomerados estelares azulados muito brilhantes e faixas de poeira escura. Embora inicialmente os astrônomos pensassem que esta galáxia estivesse girando no sentido levogiro (ou seja, no sentido contrário àquele dos ponteiros de um relógio), estudos mais recentes mostram que ela está rodando no sentido dextrogiro (no mesmo sentido que os ponteiros de um relógio). Tudo indica que uma colisão no passado com uma pequena galáxia companheira fez com que ela tivesse este estranho arranjo de braços espirais, único entre as grandes galáxias espirais.



ALGUMAS GALÁXIAS INTERESSANTES

NGC 4650A

Um objeto estranhamente distorcido que foi observado pelo Hubble Space Telescope. Esta galáxia está localizada a 165 milhões de anos-luz de nós, na constelação Centaurus, no hemisfério sul.

Este sistema complexo parece ser composto por pelo menos duas partes. Existe um disco achatado de estrelas com uma região central brilhante e densa. Existe também um anel, fortemente inclinado, formado por gás, poeira e estrelas distribuídas de modo esparso.

As observações mostram que as estrelas que estão no disco e as estrelas e gás que estão no anel realmente se movem em dois planos diferentes, aproximadamente perpendiculares.

Acredita-se que esta distribuição seja resultante de uma colisão de galáxias ocorrida no passado.



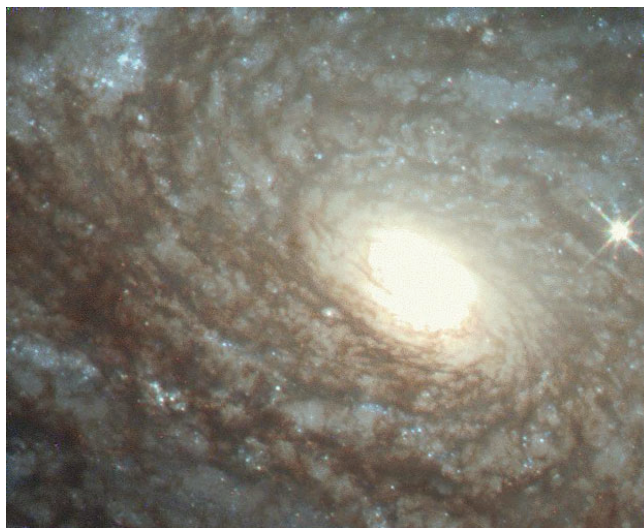
NGC 4414

Localizada em Coma Berenices a 60 milhões de anos-luz, esta é a galáxia espiral NGC 4414.

Esta galáxia mostra vários aspectos clássicos de uma galáxia espiral, incluindo faixas espessas de poeira, uma região central rica em estrelas vermelhas velhas e braços espirais desenrolados brilhando com suas estrelas azuis jovens.

Apesar de possuir muitas estrelas variáveis Cefeidas, os astrônomos ainda têm dúvidas sobre a verdadeira distância em que ela se encontra.

A estrela brilhante que aparece no lado direito da imagem detalhada pertence à nossa Galáxia.



ESO 510-G13

Fotografada pelo Hubble Space Telescope, ela está localizada a cerca de 150 milhões de anos-luz de nós, na constelação Hydra do hemisfério sul. Tem esse nome por ter sido observada pela primeira vez pelos telescópios do European Southern Observatory (ESO), um conglomerado de observatórios europeus localizados no Chile. As galáxias espirais normais, tais como a nossa Galáxia, quando são observadas de perfil mostram seus braços espirais e sua poeira com uma forma bem achatada, uma faixa estreita que se distribui ao longo da galáxia. A forma da galáxia ESO 510-G13 é bastante estranha. Ela também está de perfil, mas mostra que o seu disco de poeira está retorcido.

Este disco retorcido nos indica que a galáxia ESO 510-G13 colidiu com uma galáxia vizinha no passado. Neste momento ela está “engolindo” a galáxia menor. Daqui a milhões de anos a galáxia ESO 510-G13 estabilizará assumindo a forma de uma galáxia espiral de aparência normal.

Nas regiões mais externas da galáxia ESO 510-G13, especialmente no lado direito da imagem, vemos que o disco retorcido contém não somente poeira escura mas também nuvens brilhantes de estrelas azuis. Isto mostra que estrelas jovens e quentes estão sendo formadas no seu disco.



GALÁXIAS “STARBURSTS”

Desde meados da década de 1970 os astrônomos sabem que existe um pequeno número de galáxias cujos núcleos contém uma grande quantidade de estrelas do tipo espectral O e B, assim como muito gás ionizado. Estas galáxias mostram que suas regiões centrais estão passando, ou passaram, por intensos processos de formação estelar, que chamamos de “bursts”, e que produzem enormes quantidades de estrelas jovens muito luminosas.

Conseqüentemente, estas galáxias também possuem muitas supernovas, tendo em vista o processo de rápida evolução das estrelas de grande massa. Os astrônomos chamam estas galáxias de **galáxias starbursts** e o processo de intensa formação de estrelas que ocorre nestas galáxias recebe o nome de **starbursts**.

O satélite artificial Infrared Astronomical Satellite (IRAS), um projeto bem sucedido realizado pelos Estados Unidos, Holanda e Inglaterra e lançado em 1983, mostrou que os “starbursts” podem ser processos comuns que ocorrem naturalmente durante a evolução das galáxias. Além disso, o IRAS mostrou que os “starbursts” são processos intensamente luminosos, quase sempre ocorrendo a emissão de uma quantidade de energia semelhante àquela dos quasares, em comprimentos de onda na região espectral do infravermelho.

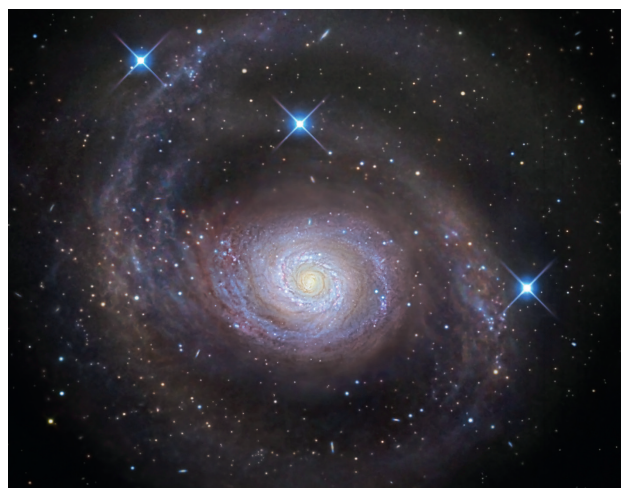
IRAS, lançado em 1983.



ALGUMAS GALÁXIAS “STARBURSTS”

M 94

Galáxia espiral que está situada na constelação Canes Venatici, a cerca de 15 milhões de anos-luz de nós, e tem cerca de 30000 anos-luz de diâmetro. Nota-se que o centro desta galáxia é muito brilhante. Circundando o seu núcleo vemos destacar-se um anel de estrelas recentemente formadas, as responsáveis pelo forte brilho que tem o seu interior.



NGC 3310

Esta é a galáxia starburst NGC 3310, localizada a cerca de 50 milhões de anos-luz de nós na constelação Ursa Major e tem 20000 anos-luz de diâmetro. Nesta galáxia espiral está sendo produzida uma enorme quantidade de estrelas.

As novas estrelas desta galáxia são muito luminosas e tão quentes que fazem a galáxia inteira brilhar não apenas na luz azul mas também na região ultravioleta do espectro eletromagnético, que os nossos olhos não são capazes de detectar.

Esta imagem no ultravioleta foi obtida pelo Hubble Space Telescope. Alguns astrônomos acreditam que a galáxia colidiu, há cerca de 50 milhões de anos, com uma galáxia anã sua companheira. Como consequência desta fusão ondas de densidade varreram o seu disco espiral, fazendo com que várias nuvens moleculares gigantes iniciassem o processo de colapso gravitacional. Estas regiões se transformaram em locais de intensa formação de estrelas.



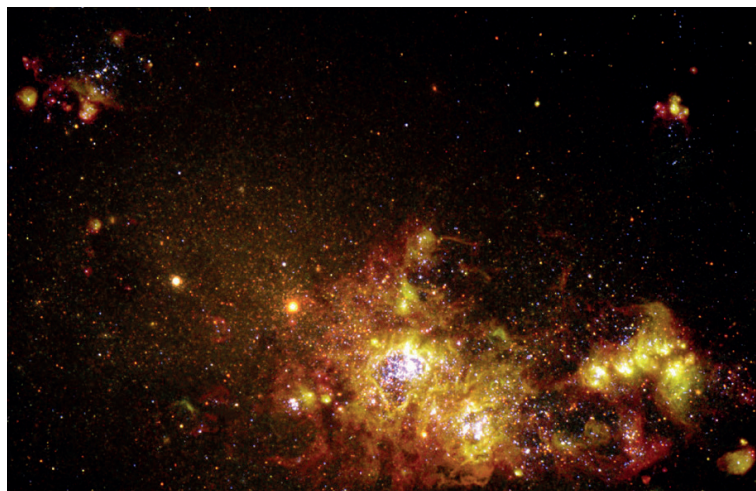
ALGUMAS GALÁXIAS “STARBURSTS”

NGC 4214

Esta galáxia, NGC 4214, está localizada a cerca de 13 milhões de anos-luz de nós. Esta nossa vizinha está, neste momento, formando aglomerados de novas estrelas a partir do seu gás e poeira interestelares.

Nesta imagem, obtida pelo Hubble Space Telescope, podemos ver as regiões em que as estrelas estão sendo formadas. A imagem é dominada por nuvens de gás brilhante que circunda aglomerados estelares muito luminosos. Os aglomerados mais jovens estão localizados no lado direito, em baixo, da imagem. Eles aparecem como cerca de meia dúzia de amontoados de gás muito brilhante. Estas nuvens gasosas brilham intensamente devido à forte radiação ultravioleta emitida pelas estrelas que recentemente se formaram dentro deles. Estas estrelas jovens, com temperaturas que vão de 10000 a cerca de 50000 Kelvins, aparecem com uma cor entre o esbranquiçado e o azulado.

Vemos também a impressionante região central de NGC 4214, um aglomerado de centenas de estrelas azuis de grande massa, cada uma delas mais de 10000 vezes mais brilhante que o Sol.



GALÁXIAS EM COLISÃO

Embora o Universo pareça ser muito vazio e as galáxias estejam a distâncias imensas uma das outras, processos de colisão entre galáxias ocorrem tanto nas nossas vizinhanças como em partes bastante distantes do Universo.

As galáxias grandes, tais como a nossa própria galáxia, frequentemente colidem com alguma galáxia vizinha pertencente ao mesmo aglomerado de galáxias. Na maior parte dos casos a colisão se dá entre uma galáxia de grande tamanho e uma galáxia “anã”. O resultado disso é que a galáxia grande “engole” a outra, incorporando-a à sua estrutura.

Algumas vezes pode ocorrer a colisão entre duas galáxias grandes. Neste caso elas se fundem e formam uma única galáxia elíptica.

É claro que a colisão entre duas galáxias, grandes ou pequenas, provoca uma intensa formação de estrelas, devido às ondas de densidade que percorrem o sistema durante e após a fusão delas. Apesar de ser uma “colisão”, é provável que nenhuma estrela nas duas galáxias colida diretamente. No entanto, o gás, a poeira e seus campos magnéticos interagem bem diretamente.

No entanto, o processo de colisão “frequente” entre duas galáxias é muitíssimo mais lento do que as colisões a que estamos acostumados. Por exemplo, o processo de colisão entre duas galáxias grandes leva cerca de 1 bilhão de anos!

Se o processo é tão lento, como podemos estudar as colisões entre galáxias? Já que não podemos sentar e assistir uma colisão entre galáxias o que temos

que fazer é estudar as colisões que estão acontecendo. Os astrofísicos estudam com atenção as regiões onde esta interação parece estar provocando fenômenos que podem ser detectados pelos seus equipamentos, na Terra ou em satélites. Uma grande possibilidade é estudar estas colisões na região espectral do ultravioleta, uma vez que as estrelas que se formam durante a colisão são gigantescas, muito quentes, e emitem muita radiação ultravioleta. Outro processo para estudar a colisão entre galáxias é por meio de simulações destas colisões feitas em computadores.

GALÁXIAS EM COLISÃO

NGC 2207 e IC 2163

A imagem obtida pela Wide Field Planetary Camera 2 do Hubble Space Telescope, mostra o processo de colisão entre duas galáxias espirais situadas na constelação Canis Major. A galáxia maior, com mais massa, mostrada à esquerda desta imagem, é a NGC 2207 e a menor delas, situada à direita da imagem, é IC 2163.

O processo de interação entre elas é tão forte que intensas forças de maré produzidas por NGC 2207 modificaram a forma de IC 2163, produzindo os rastros de estrelas e gás que vemos se espalhando por centenas de milhares de anos-luz na direção da borda direita da imagem.

Os estudos feitos sobre esta colisão mostram que a galáxia IC 2163 está passando atrás da galáxia NGC 2207 movendo-se em uma direção contrária à dos ponteiros do relógio. A maior aproximação entre elas ocorreu há 40 milhões de anos. Entretanto, devido à sua pequena massa, a galáxia IC 2163 não conseguirá escapar do puxão gravitacional exercido pela galáxia NGC 2207. O destino de IC 2163 é, no futuro, ser puxada de volta na direção de NGC 2207 e, de novo, passar por ela em outro processo de colisão. Este processo de interação entre elas, mantendo-as aprisionadas nesta estranha órbita mútua, em que uma gira em torno da outra, resultará na contínua distorção de ambas. Daqui há bilhões de anos elas se fundirão em uma única galáxia com muita massa.



GALÁXIAS EM COLISÃO

NGC 4038

Esta imagem foi obtida em 20 de janeiro de 1996 por Brad Whitmore, do Space Telescope Science Institute (Estados Unidos), usando a Wide Field Planetary Camera 2 do Hubble Space Telescope, um projeto conjunto NASA/ ESA. Ela nos mostra o processo de colisão que está ocorrendo entre as galáxias Antennae, formalmente conhecidas como NGC 4038 e NGC 4039. Estas galáxias foram chamadas de “antena” por causa das longas caudas de matéria luminosa que as acompanham, parecendo as antenas de um inseto. Estas caudas foram formadas pelas intensas forças gravitacionais que atuam entre as galáxias.

Estas duas galáxias estão localizadas a 63 milhões de anos-luz de nós, na constelação Corvus do hemisfério sul.

No lado esquerdo da imagem vemos as galáxias Antennae fotografadas por um telescópio situado na Terra. No lado direito está a imagem obtida pelo Hubble Space Telescope. Ela fornece detalhes do brilhante show de “fogos de artifício” que está ocorrendo no centro da colisão destas galáxias. Estes “fogos” revelam a formação de mais de 1000 aglomerados estelares nesta região devido ao processo de colisão.

As regiões centrais destas galáxias são as “bolhas” de cor laranja situadas a direita e a esquerda do centro da imagem. Estas regiões estão riscadas por filamentos de matéria escura. Uma larga banda de poeira, distribuída de maneira caótica, se espalha entre as regiões centrais das duas galáxias. Os braços espirais são marcados pelos brilhantes aglomerados de estrelas azuis que resultam do intenso processo de formação estelar desencadeado por esta colisão.



GALÁXIAS EM COLISÃO

NGC 6745

Este é o estado em que ficou a galáxia espiral NGC 6745 após colidir com outra galáxia durante centenas de milhões de anos. A galáxia NGC 6745 tem 80000 anos-luz de diâmetro e está localizada a cerca de 200 milhões de anos-luz de nós.

A galáxia que causou esta deformação na NGC 6745 quase não aparece na imagem. Ela é uma galáxia pequena, que mostra uma pequena parte no lado direito, em baixo, da imagem e que está se afastando. A interação gravitacional entre as duas galáxias distorceu suas formas. Na parte de baixo, na direita, vemos uma região gasosa que foi arrancada da galáxia maior e está formando estrelas.



COMO LOCALIZAMOS UMA GALÁXIA NO CÉU

Existe uma quantidade formidável de estrelas na nossa Galáxia. Para localizá-las no céu precisamos utilizar um sistema de coordenadas. Para as estrelas, usamos o chamado **sistema de coordenadas equatorial**, mostrado a seguir, que nos fornece a **ascensão reta** e a **declinação** da estrela. Isso é suficiente para que qualquer astrônomo, amador ou profissional, possa localizar o objeto a ser observado no céu.

Quando queremos localizar galáxias no universo utilizamos um outro sistema de coordenadas chamado **sistema de coordenadas galácticas**. Este sistema de coordenadas nos permite ver de que modo os objetos celestes estão distribuídos em relação ao plano da nossa Galáxia.

No **sistema de coordenadas galácticas** o grande círculo fundamental é o **equador galáctico**. O equador galáctico é definido como a interseção do plano galáctico com a esfera celeste. Em relação a este equador galáctico podemos definir **pólos galácticos**, exatamente do mesmo modo como definimos os pólos celestes em relação ao equador celeste.

Definimos o **pólo norte galáctico** como o pólo que está no mesmo hemisfério que o pólo celeste norte. As posições dos pólos galácticos foram determinadas pela União Astronômica Internacional (IAU) em 1959.

Para definir a posição de um objeto por meio de coordenadas galácticas usamos:

- latitude galáctica (b) (as linhas “horizontais” na figura abaixo)
- longitude galáctica (l) (as linhas “verticais” na figura abaixo)

E como estabelecemos as coordenadas galácticas de um objeto celeste? Para isso desenhamos um grande círculo que passa pelos dois pólos galácticos e pelo objeto.

A **latitude galáctica** deste objeto é a distância angular, medida sobre o grande círculo que passa por ele, que vai do equador galáctico até a posição do objeto. A latitude galáctica varia de -90° no pólo sul galáctico até $+90^\circ$ no pólo galáctico norte. Isso nos mostra que os objetos que apresentam uma latitude galáctica zero (ou próxima a zero) estão situados no plano formado pelo disco da nossa Galáxia.

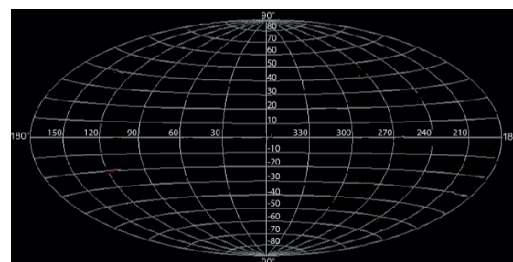
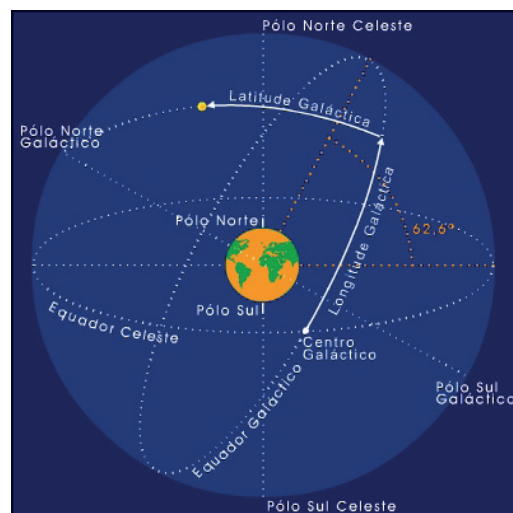
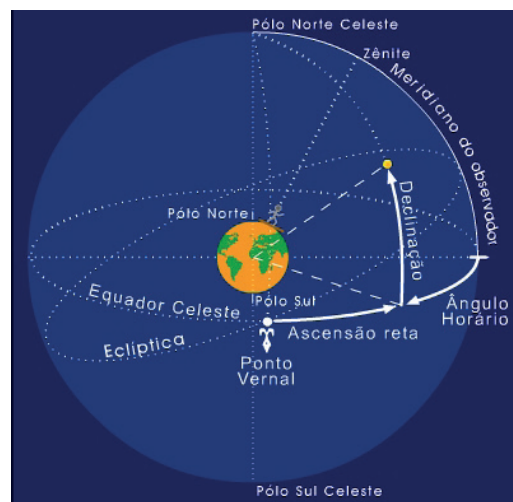
A **longitude galáctica** de um objeto é a distância angular, medida ao longo do equador galáctico, que vai do centro da nossa Galáxia até o grande círculo que passa pelo objeto. Esta medida é feita sempre na direção leste indo de 0° a 360° . A União Astronômica Internacional (IAU) fixou que o ponto zero de longitude galáctica é o centro da nossa Galáxia.

Observações feitas com o satélite artificial Hipparcos permitiram que os pólos galácticos fossem determinados com grande precisão. Suas coordenadas são:

$$l_g = 0,004^\circ \pm 0,039^\circ$$

$$b_g = 89,427^\circ \pm 0,035^\circ$$

O nosso Sol está localizado a cerca de $34,56 \pm 0,56$ parsecs acima do plano da nossa Galáxia, o que equivale a cerca de $112,7 \pm 1,8$ anos-luz.



COORDENADAS GALÁCTICAS	ASCENSÃO RETA	DECLINAÇÃO	OBSERVAÇÕES
PÓLO NORTE GALÁCTICO	12h 51m 26,282s	27° 07' 42,01"	O pólo norte galáctico está localizado na constelação Coma Berenices, próximo à estrela Arcturus.
PÓLO SUL GALÁCTICO			O pólo sul galáctico está localizado na constelação Sculptor.
PONTO DE LONGITUDE ZERO (sobre o equador galáctico)	17h 45m 37,224s	-28° 56' 10,23"	o ângulo de posição do ponto de longitude zero, medido a partir do pólo norte galáctico, é de 122,932°

19

Hubble e o universo em expansão: redshift

A NATUREZA EXTRAGALÁCTICA DAS “NEBULOSAS ESPIRAIS”

Antes do século XX, a maioria dos observatórios astronômicos estavam localizados próximos a Universidades e, portanto, seus telescópios ficavam situados em altitudes bem baixas. Somente a partir de 1900 é que foi fortalecida a ideia de que esses equipamentos deveriam ficar situados no alto de montanhas.

Um dos pioneiros nisso foi o astrônomo norte-americano George Ellery Hale que reconheceu as vantagens dos sítios astronômicos em altas altitudes e já no ano 1903 decidiu construir um novo observatório de pesquisa no topo do monte Wilson, Estados Unidos.

Com o auxílio financeiro do magnata norte-americano Andrew Carnegie, em 1909 entrou em funcionamento no Mount Wilson Observatory, um telescópio refletor cujo espelho tinha 60 polegadas de diâmetro. Esse telescópio se destacou na pesquisa astronômica da época mas Hale queria mais. Ao mesmo tempo em que o telescópio refletor de 60 polegadas estava sendo construído, Hale já tinha obtido financiamento para a construção de um muito maior. Com os recursos oferecidos pelo magnata norte-americano John D. Hooker, Hale encomendou na França a fabricação do vidro que, ao ser polido, seria o espelho de 100 polegadas de um novo, e bem maior, telescópio refletor. No dia 7 de dezembro de 1908, o mesmo dia em que o espelho de 60 polegadas foi colocado em segurança no telescópio menor, o vidro fundido para o espelho do telescópio de 100 polegadas chegou em Pasadena, Estados Unidos. Vários anos de muito trabalho ainda passariam antes que o telescópio de 100 polegadas estivesse pronto para operação. Isso só aconteceu em novembro de 1917, quando o telescópio foi testado e mostrou ter excelente qualidade.

Mas, esse assunto interessa a quem quer estudar cosmologia? Ocorre que o telescópio refletor de 100 polegadas, batizado com o nome de “telescópio Hooker” em homenagem ao seu financiador, mostrou ser fundamental para o conhecimento do Universo. Seu espelho podia coletar 2,5 vezes mais luz do que era coletada pelo telescópio de 60 polegadas do mesmo Observatório. Além disso, o telescópio Hooker podia ver um volume de espaço quatro vezes maior do que o seu parceiro menor. A descoberta de que o universo estava em expansão ocorreria a partir de observações feitas nesse instrumento.

Após servir como combatente das tropas norte-americanas na Primeira Guerra Mundial, o astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble retornou aos Estados Unidos e foi trabalhar no Mount Wilson Observatory que dispunha de um novíssimo telescópio refletor de 100 polegadas, o mais poderoso telescópio existente no mundo naquela época. Com esse equipamento Hubble começou a obter imagens fotográficas de “nebulosas” e a estudar as estrelas nessas imagens.

Em 1923 Hubble, usando tanto o telescópio de 60 como o de 100 polegadas do Mount Wilson Observatory, detectou a existência de estrelas variáveis em uma “nebulosa” irregular (a galáxia NGC 6822). Isso fez com que ele iniciasse uma caçada por mais estrelas variáveis em “nebulosas” e investigasse seus períodos. Afinal, estrelas variáveis eram usadas como indicadores de distâncias. A seguir vemos a “nebulosa espiral” (atualmente “galáxia” NGC 6822) o primeiro desses objetos a revelar a presença de estrelas variáveis. Essa é uma galáxia anã vizinha à nossa e dista 1,5 milhões de anos-luz da Terra.

Ainda em 1923, Hubble foi capaz de “entender” as regiões mais externas de duas “nebulosas espirais vizinhas à nossa, que hoje conhecemos como as galáxias espirais M31 e M33. A seguir mostramos a galáxia M31 (Andrômeda) e a galáxia M33.



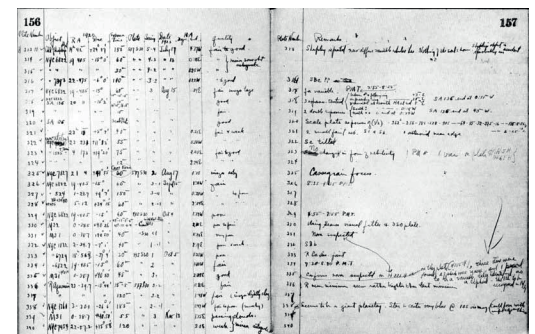
Mount Wilson Observatory.



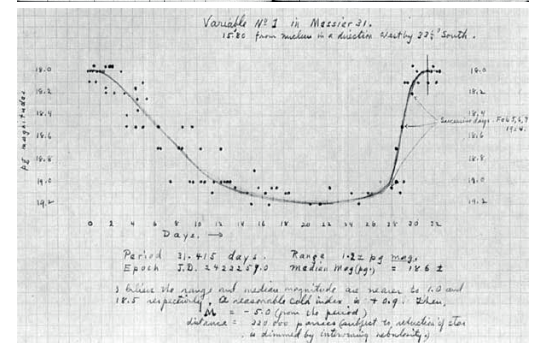
Galáxias NGC 6822, M31 e M33.

Hubble percebeu que muitas das estrelas visíveis nessas galáxias mostravam curvas de luz características de variáveis Cefeidas: 22 delas na “nebulosa” M33 e 12 na “nebulosa espiral” M31, também conhecida como “nebulosa Andrômeda”.

A imagem ao lado mostra as páginas 156 e 157 do livro de anotações de observações de Edwin Hubble. Nele está documentada a descoberta da primeira estrela variável Cefeida na “nebulosa” espiral M31. Inicialmente Hubble suspeitou que havia encontrado uma “Nova”, uma estrela que rapidamente aumenta sua luminosidade que, em seguida, vai lentamente declinando. Ao lado das anotações referentes à placa fotográfica de número 331, Hubble anotou “Nova suspeita”. Ao lado das anotações da placa 335 Hubble escreveu “confirmando nova” suspeita”. Logo Hubble percebeu que ele havia encontrado não uma “nova” mas sim uma estrela variável tipo Cefeida.

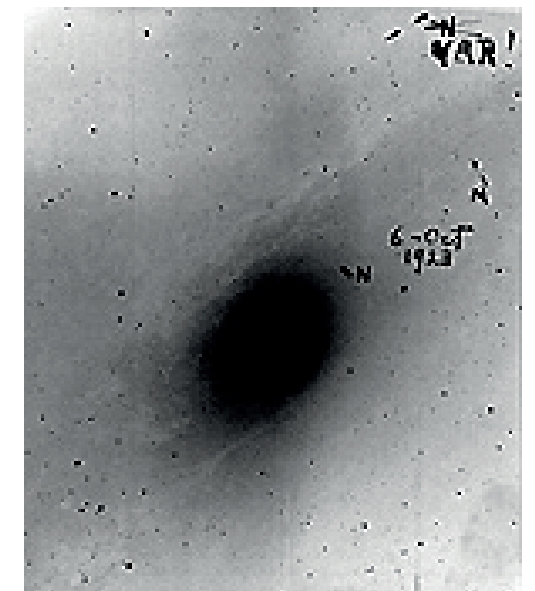


A imagem abaixo mostra a marcação feita por Hubble de “Novas” que ele encontrou em uma placa fotográfica da “nebulosa” Andrômeda. Essa placa foi obtida em uma exposição de 9 horas ao longo de duas noites em setembro de 1920 usando o telescópio refletor de 100 polegadas do Mount Wilson Observatory. A mancha escura ao centro é a região central da “nebulosa” espiral M31. Na parte superior da imagem vemos que, em uma delas, o “N” está riscado e em seu lugar está escrito “VAR”, assinalando que esta é uma estrela variável, mais tarde reconhecida como uma estrela variável Cefeida.



Imagens do livro de anotações de Hubble.

Cauteloso com o resultado encontrado, somente no início de 1924 é que Hubble o revelou em uma carta escrita a Harlow Shapley, onde anunciava a descoberta de duas primeiras estrelas variáveis encontradas na “nebulosa” M31. Abaixo vemos a curva de luminosidade da primeira estrela variável Cefeida descoberta por Edwin Hubble na “nebulosa” espiral M31 (hoje conhecida como galáxia Andrômeda). Usando essa curva Hubble pode determinar que essa “nebulosa” estava (segundo seus cálculos) a uma distância superior a 300000 parsecs da Terra. Hubble incluiu esse gráfico na carta que ele enviou a Harlow Shapley no dia 19 de fevereiro de 1924.



Hubble tornou público oficialmente suas descobertas no “dia de Ano Novo” de 1925 em um encontro científico da American Astronomical Society. Ali ele anunciou a descoberta de estrelas variáveis Cefeidas nas “nebulosas” espirais e mostrou que as determinações das distâncias desses objetos confirmavam que essas “nebulosas” espirais eram objetos celestes completamente independentes da nossa Galáxia. Embora os dados apresentados por Hubble fossem suficientes para encerrar a controvérsia sobre a localização das “nebulosas espirais” (se elas eram ou não parte da nossa própria Galáxia) isso não aconteceu.

Hubble conseguiu estabelecer, sem qualquer dúvida, que algumas das “manchas nebulosas”, em particular as “nebulosas espirais” que observávamos no céu não faziam parte da nossa Galáxia, como se supunha até então. Estes objetos também eram galáxias, conjuntos de bilhões de estrelas em mútua in-

teração gravitacional. Estas galáxias estavam bem afastadas da nossa, sendo portanto, objetos totalmente independentes da nossa Galáxia. Começava-se, então, a compreender que o Universo era formado por milhões e milhões de galáxias, de diferentes formas e tamanhos, cada uma delas com bilhões de estrelas. O Universo havia sido “descoberto”. É interessante notar que a teoria dos “Universos-ilha” proposta pelo filósofo Immanuel Kant ou seja, de que as “nebulosas espirais” são outras galáxias bastante afastadas da nossa, levou 180 anos para ser aceita!

Mas, quem disse que **todos** os problemas haviam sido resolvidos? A partir do momento em que os astrônomos passaram a compreender que o Universo era formado por muitas outras galáxias, algumas semelhantes em forma à nossa e outras completamente diferentes, muitas novas perguntas substituíram as poucas já respondidas. Uma das perguntas mais imediatas dizia respeito a qual era a estrutura desses objetos e se havia algum processo de evolução entre elas, tendo em vista se apresentarem com formas tão diferentes.

A VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA EXPANSÃO DO UNIVERSO: A RELAÇÃO DISTÂNCIA-VELOCIDADE DE HUBBLE E HUMASON

A descoberta da expansão do Universo não foi, ao contrário do que é dito, algo feito exclusivamente por Edwin Hubble. Lembre-se que soluções teóricas já existiam desde 1922 (Friedmann) e 1927 (Lemaître) mostrando a possível expansão do universo mas eram conhecidas por muito poucos físicos e menos ainda astrônomos.

Mesmo observacionalmente, Hubble não foi o primeiro a perceber o fenômeno do deslocamento para o vermelho das linhas espectrais de uma galáxia. Slipher já havia percebido e fenômenos mas foi incapaz de associá-lo à expansão do universo. Curiosamente Hubble também não fez essa associação, o que foi deixado para teóricos como de Sitter e o próprio Einstein. Em 1912 uma importante descoberta foi feita pelo astrônomo norte-americano Vesto Melvin Slipher.

Em 1909 o astrônomo Percival Lowell pediu que seu assistente Vesto Slipher obtivesse espectros de “nebulosas espirais”. Lowell havia fundado no estado norte-americano do Arizona um observatório, o Lowell Observatory. Ele suspeitava que as linhas espectrais vistas na luz proveniente de um determinado tipo de nebulosa, as chamadas “nebulosas planetárias”, também poderiam ser encontradas nos espectros das “nebulosas espirais”.

Inicialmente Slipher duvidou que isto poderia ser feito. Logo ele notou que para as nebulosas, que têm uma superfície extensa, ao contrário das imagens puntiformes obtidas das estrelas, o fator instrumental crítico não era o tamanho do telescópio (estas observações seriam feitas no próprio Lowell Observatory, cujo telescópio era muito menor do que aquele possuído pelo Lick Observatory, seu rival situado na Califórnia, Estados Unidos) mas sim a “velocidade” da câmera ou seja, o tempo de exposição necessário para fotografar os espectros das nebulosas.

Slipher conseguiu uma nova câmera cuja velocidade havia sido aumentada por um fator 30. Na noite de 17 de setembro de 1912 Slipher obteve um espectrograma da “nebulosa espiral” Andrômeda. Ficou evidente os deslocamentos Doppler de suas linhas espectrais. O espectrograma indicava que um resultado assombroso: a “nebulosa” Andrômeda estava se aproximando do Sistema Solar a uma velocidade surpreendentemente alta.

Slipher fez mais observações do mesmo objeto, expondo a mesma placa fotográfica ao longo de várias noites como, por exemplo, 29, 30 e 31 de dezembro



Edwin Powell Hubble (1889 - 1953).



Vesto Melvin Slipher (1875 - 1969).

de 1912. A análise dos resultados o levou a estimar que a “nebulosa espiral” Andrômeda estava se movendo na nossa direção a uma velocidade média de 300 quilômetros por segundo, a maior velocidade registrada em astronomia até aquela data. Este valor era tão grande que muitos astrônomos não acreditavam que ele fosse possível.

Nos dois anos seguintes Slipher mediu velocidades para outras “nebulosas espirais”. As primeiras poucas medições revelaram “nebulosas” se aproximando do lado Sul da nossa Galáxia e nebulosas se afastando no lado oposto.

Em 1914 Slipher publicou um artigo no qual mostrava deslocamentos Doppler de 14 “nebulosas espirais”. Ele formulou então uma “hipótese de arrasto” para explicar o que estava acontecendo. Slipher imaginou que era a nossa Galáxia que estava se movendo em relação às nebulosas, na direção do Sul (por isso víamos as “nebulosas” se aproximando) e se afastando do Norte (o que explicava o afastamento das “nebulosas medidas ao norte”). Entretanto, observações feitas com mais espirais contradiziam isso. Foram encontradas “nebulosas espirais” se afastando tanto no lado sul como no lado norte da nossa Galáxia.

Apesar das observações, Slipher permaneceu fiel à sua “hipótese de arrasto”. Ele argumentava que, talvez, um número maior de observações mostrariam pelo menos uma preponderância de “nebulosas” se aproximando pelo lado Sul da nossa Galáxia, em cuja direção ele imaginava que nossa Galáxia estava se movendo.

Este resultado modificava muita coisa. Uma vez que as chamadas “nebulosas espirais” tinham velocidades radiais tão extraordinariamente grandes, muitos astrônomos se convenceram que elas não podiam estar dentro da nossa Galáxia.

Apesar disso, a descoberta de Slipher não provava que a “teoria dos Universos-Ilha” era correta, uma vez que ela não permitia a determinação de distâncias.

Em 1922 o astrônomo alemão Carl Wirtz, baseando-se nas medições de “redshift” feitas por Slipher e no chamado “efeito de Sitter” propôs uma relação distância-velocidade. Wirtz notou que os diâmetros aparentes das galáxias podiam ser usados como indicadores de distância, uma vez que quanto maior fossem suas distâncias até nós, menores eram seus diâmetros aparentes. Com base nisso ele encontrou que a velocidade de recessão das galáxias aumentava com a distância a nós. Assim, Wirtz foi o primeiro a propor uma relação distância - velocidade. Estranhamente, seu trabalho não é reconhecido pelos livros de cosmologia que insistem em atribuir essa descoberta ao astrônomo norte-americano Edwin Hubble, como veremos abaixo.

Em 1928 Edwin Hubble compareceu a um simpósio da União Astronômica Internacional, que naquele ano ocorreu na Holanda e teve a oportunidade de discutir teorias cosmológicas com o astrofísico de Sitter. Ao retornar ao Mount Wilson Observatory, Hubble estava determinado a testar a teoria de de Sitter de que o Universo era estático. Para isso Hubble instruiu seu assistente Milton Humason, um talentoso e meticuloso observador, a estudar “nebulosas” fracas, que, presumivelmente, estariam particularmente distantes de nós.

A pergunta que eles queriam responder era: a frequência da luz proveniente dessas “nebulosas” distantes é diferente da luz proveniente das “nebulosas” mais próximas? Uma frequência mais baixa (mais lenta) corresponde a um maior comprimento de onda da luz ou seja, a luz estaria mais próxima à extremidade vermelha do espectro. Deste modo, o que Hubble e Humason estavam procurando era um deslocamento de linhas existente no espectro na direção do “vermelho”. Isso mais tarde veio a ser chamado de “red shift” (deslocamen-



Milton Humason (1891 - 1972).

to para o vermelho). Humason mais tarde explicou que tal deslocamento era o que “deveria ser esperado na teoria de espaço-tempo curvo de de Sitter”.

Humason obteve as velocidades e Hubble obteve as distâncias. Eles encontraram uma relação linear que nos dizia, aproximadamente, que quanto maior fosse a velocidade de recessão de uma “nebulosa” maior seria a distância até ela.

A figura abaixo mostra os dados relacionando distância e velocidade obtidos por Hubble e Humason para 46 “nebulosas”. Os pontos pretos e a linha contínua representam a solução obtida para as 24 nebulosas para as quais distâncias individuais haviam sido obtidas separadamente. Os pontos claros e a linha pontilhada mostram a solução obtida quando as “nebulosas” foram combinadas em grupos. A cruz mostra a velocidade média calculada para um conjunto de 22 “nebulosas” cujas distâncias não puderam ser estimadas individualmente.

Os dados obtidos por Hubble e Humason eram insuficientes e a interpretação era duvidosa nos detalhes. De fato, mais tarde foi descoberto que os valores das distâncias às nebulosas apresentadas por Hubble eram somente metade dos valores das distâncias reais. Os números apresentados por Hubble discordavam com o que os cientistas já sabiam sobre a idade do universo. Não obstante, a relação velocidade-distância foi uma extrapolação corajosa e brilhante.

Entre 1925 e 1929 Hubble publicou três longos artigos nos quais tratava as antigas “nebulosas espirais” como “Universos ilha” e demonstrava que elas estavam a enormes distâncias de nós, que variavam de 240000 a 275000 parsecs.

No entanto, somente no parágrafo final do seu artigo publicado em 1929 é que Hubble menciona de Sitter! Hubble simplesmente diz que a relação-distância velocidade poderia representar o “efeito de Sitter” e poderia ser de interesse na discussão cosmológica. Hubble enfatizou o aspecto observacional, empírico de seu trabalho. Seu principal objetivo era convencer os leitores céticos que a “relação velocidade-distância” realmente existia.

Somente em 1935, quando Hubble provou que os cálculos feitos por outros astrônomos estavam errados, é que seus resultados foram amplamente aceitos. Agora os astrônomos acreditavam que o universo estava se expandindo, um resultado que já havia sido demonstrado por Carl Wirtz em 1922. Com muita certeza podemos dizer que Hubble, em 1929, consolidou com bases observacionais firmes, a lei de expansão do Universo, mas de modo algum pode ser atribuído a ele a descoberta da expansão do universo como é costume aparecer em muitos livros, em particular livros de divulgação de autores norte-americanos.

Dados obtidos por Hubble e Humason

