



10^{21} m

Foi preciso esperar pelo advento da fotografia, em finais do século XIX, para se poderem ver estrelas, nebulosas e galáxias nunca vistas por olhos humanos.

RUI JORGE AGOSTINHO
Centro de Astronomia e Astrofísica
e Departamento de Física da Universidade de Lisboa
rui.agostinho@clix.pt

DO SISTEMA SOLAR

A medição das dimensões do Cosmos começou pela "nossa casa": o sistema solar. As primeiras tentativas centraram-se nas distâncias da Terra-Lua-Sol, e só com o modelo copernicano se conseguiu utilizar a triangulação entre os planetas para determinar as suas distâncias. Assim, com Copérnico, Tycho Brahe e depois Kepler, criou-se e refinou-se uma nova unidade de medida, que era apropriada para medir as posições entre os astros: a unidade astronómica (UA), que tem o valor do semi-eixo maior da órbita terrestre. Nesta unidade os nove planetas do sistema solar espriam-se até aos 40 UA, mas sabemos hoje que a classe dos pequenos transneptunianos (do qual Plutão é o primeiro exemplo) ocupa o espaço até às 55 UA, em órbitas excêntricas e inclinadas.

Uma das consequências do modelo esférico copernicano era que as estrelas fixas deveriam reflectir o movimento terrestre em torno do Sol. Estarão longe demais? Serão mesmo fixas? Uma estrela próxima deveria apresentar uma mudança de posição em relação às mais distantes, tal como as coisas próximas parecem mover-se em relação às montanhas longínquas, quando viajamos de automóvel. James Bradley mostrou em 1720 que o movimento aparente anual da estrela dupla (duas estrelas na mesma linha de visada com uma muito mais próxima que a outra) Draconis é de uma pequena elipse pois reflecte o movimento de translação da Terra.

AO COSMOS

O UNIVERSO LENTICULAR

William Herschel, nos finais do século XVIII, com o seu Grande Telescópio de 40 pés de distância focal, confirmou o que Galileu Galilei tinha descoberto: essa zona esbranquiçada no céu está polvilhada de estrelas e pequenas nebulosas. Em 1768 já conhecia cerca de 68 nebulosas. Em 1781 Charles Messier publicou o seu famoso catálogo de 103 objectos difusos (nebulosas, galáxias e enxames globulares de estrelas) e discutia-se se estes estariam entre as estrelas ou para lá destas. A descoberta da enorme densidade de estrelas na banda central da Via Láctea revela uma distribuição não uniforme das estrelas.

A contagem sistemática de estrelas feita por Herschel levou-o a afirmar que o Sol estará no centro de uma estrutura elíptica, em que o raio maior é cinco vezes a sua espessura. O Cosmos não é esférico! Durante a sua vida catalogou cerca de 2500 nebulosas, e reparou que há concentração destas (mais de um terço) na constelação da Virgem. Isto levou Herschel a admitir que existe um sistema estelar (a Galáxia) que parece estar na periferia deste super-grupo mais vasto centrado na constelação da Virgem. É a primeira indicação de aglomeração de galáxias.

A PARALAXE

A medição das distâncias pelo método da paralaxe exigia instrumentação de grande qualidade óptica e estabilidade

mecânica, pois trabalhava-se com ângulos inferiores ao segundo de arco. Em 1839 Friedrich Bessel tinha acumulado centenas de dados sobre a estrela 61 Cisne e mediu a sua paralaxe de $\approx 0,314''$, ou seja a distância $d = 660\,000$ UA ($d(\text{pc}) = 1/\theta''$): muito para além do sistema solar! Dois meses depois Thomas Henderson publicou a paralaxe de Centauro, o que a colocou a menos de $200\,000$ UA. Wilhelm Struve começara os estudos de estrelas duplas e paralaxes em 1824 em Dorpat. A sua nomeação para responsável da construção do grande observatório de Pulkova (em S. Petersburgo) atrasou-lhe os trabalhos de investigação e por isso, publicou a paralaxe de Vega (Lira) só em 1839. Com o valor de $0,261''$ fica a $790\,000$ UA. O Cosmos expandiu-se no conhecimento humano: o Universo deixou de ser esférico, mas criámos um heliocentrismo à escala universal!

Após 1855, Struve, astrónomo de renome internacional (director do observatório astronómico mais importante do mundo), ajudou Filipe Folque e o tenente de armada Frederico Oom (por mandato do Rei D. Pedro V) a planejar os diversos telescópios e o edifício do Observatório Astronómico de Lisboa. Os grandes instrumentos foram adquiridos aos melhores mestres europeus: Repsold de Hamburgo (círculo meridiano de passagens) e Merz de Munique (grande refractor equatorial de 39 cm de diâmetro e 7 m de distância focal), no final do século XIX. Frederico Oom treinou-se nos trabalhos de observação em Pulkova sob a directa orientação de Struve. Regressou a Lisboa onde se torna o primeiro director e desenvolveu trabalhos nestas áreas (posições, paralaxe, estrelas duplas), granjeando reconhecimento internacional para este observatório.

UNIVERSOS-ILHA

Foi preciso esperar pelo advento da fotografia, em finais do século XIX, para se poderem ver estrelas, nebulosas e galáxias nunca vistas por olhos humanos. Agora as contagens podem ser muito mais exactas, e uma discussão iniciou-se entre von Seeliger, J. Kapteyn e van Rhijn, no início do século XX. Pela contagem de estrelas, Kapteyn concluiu que a Via Láctea é um esferóide achatado, cinco vezes maior no raio do que na espessura: cerca de 10 kpc de raio e 2 kpc de espessura. O Sol está a 650 parsecs (pc) do centro. Concluiu também que a densidade de estrelas diminui com a distância ao centro galáctico.

Em 1917 Harlow Shapley estudou a distribuição dos enxames globulares de estrelas e descobre que estes estão organizados numa estrutura aproximadamente esférica, cujo centro parece estar na direcção do Sagitário e a 15 kpc do Sol. Sabemos hoje que o Sol está a 8 kpc do centro galáctico. Estes enxames contêm cerca de 10^5 - 10^6 estrelas, o que permite observá-los a grandes distâncias. As dimensões são exageradas pois o enfraquecimento do brilho das estrelas pela poeira converte-se numa atribuição de maiores distâncias.

Em 1923, Edwin Hubble vislumbrou estrelas individuais na galáxia de Andrómeda, entre as quais descobriu 12 ceifeiras. Com a recente calibração da relação Período-Luminosidade (P-L) para estas estrelas, deduzia que Andrómeda deve estar a cerca de 280 kpc de distância (650 kpc hoje): por isso essa galáxia é exterior à nossa, tão grande quanto a Via Láctea mas como esta constituída por estrelas. Fica saldado de vez o debate sobre os Universos-Ilha de Immanuel Kant, e o Cosmos assume proporções nunca vistas. A Via Láctea não é mais do que uma pobre galáxia entre tantas outras. A relação P-L de Shapley tem problemas e isso afecta a escala de distâncias e a constante de Hubble.

O UNIVERSO EM EXPANSÃO

Hubble seguiu as pegadas de Vesto Slipher que até 1925 tinha obtido espectros de 40 "nebulosas espirais". Os espectros pareciam todos deslocados para o vermelho. Hubble determinou distâncias para estas galáxias e quantificou os resultados: as galáxias estão em recessão, com uma velocidade que é proporcional à sua distância, um resultado publicado em 1929. Concluiu-se que o Universo como um todo está em expansão. A Teoria da Relatividade Geral de Einstein assume um papel fundamental, e a noção de Cosmos passa a ser a de um Universo dinâmico. Esta descoberta é tão fundamental que a própria Lei de Hubble servirá no futuro para estimar distâncias às galáxias mais distantes. Claro que há fortes problemas de calibrações, resolvidos apenas no final do século XX. Uma das consequências mais imediatas da expansão do Universo é a noção de um começo de tudo, ou seja, de idade do Universo. Já não se tem apenas a idade obtida por via geológica para a Terra no século XIX, na ordem dos vários milhares de milhões de anos, é o próprio Universo que tem uma idade. O inverso do valor da constante de Hubble (540 (km/s) Mpc) repunha a idade do Universo em acordo com esta.

UMA NOVA ASTROFÍSICA

A descoberta das nebulosas de emissão por W. Huggins, no final do século anterior, e os trabalhos de J. Hartmann em 1904 sobre riscas de Ca II, mostraram que há matéria gasosa interestelar. Em 1930 R. Trumpler comparou os brilhos intrínsecos dos enxames globulares concluindo que as suas estrelas tendem a ficar avermelhadas com a distância, estimando um factor de obscurecimento de 0,7 mag/kpc. O efeito das poeiras interestelares é cada vez melhor conhecido e permite corrigir os resultados de Kapteyn, Shapley e da lei de Hubble.

O problema da longevidade das estrelas ficou resolvido quando R. Atkinson e F. Houtermans em 1929 sugeriram que reacções termonucleares poderão ser a fonte energética estelar preponderante. Em 1938 Hans Bethe descreveu o ciclo p-p e von Weizsäcker e Bethe independentemente descobriram o ciclo CNO. O aparecimento de modelos de interiores de estrelas nos anos 40 em diante, com a física das secções eficazes nucleares e dos processos de transporte de energia, em paralelo com o novo poder computacional, revelaram-se uma ferramenta capaz de entender a evolução estelar. É este entendimento e o refinar das técnicas de observação, que permitirá ir calibrando os parâmetros astrofísicos e grandezas fundamentais de um modo cada vez mais auto-consistente.

A introdução da rádio-astronomia permitiu estudar a radiação cósmica de fundo. Em 1964 A. Penzias e R. Wilson detectaram um ruído de fundo nas antenas de telecomunicações que é isotrópico, e que se vem a identificar como radiação de um corpo negro a 2,726 K (satélite COBE, 1992). Ou seja, a expansão do Cosmos após o *big-bang* deixa uma radiação de fundo que vai arrefecendo consoante o universo expande: é a relíquia dos primeiros instantes do espaço/tempo do Cosmos. O estudo desta radiação permite ver nela os traços dos grandes momentos do universo: a formação das galáxias e das grandes estruturas em pequenas flutuações de intensidade na ordem no milionésimo. A teoria do *big-bang* torna-se a mais consistente juntando os estudos da expansão, da nucleosíntese e da radiação cósmica de fundo.

NOVAS DISTÂNCIAS

A paralaxe é fundamental pois a sua distância não depende de suposições sobre as condições astrofísicas do objecto. Contudo, não se consegue ir mais longe do que os 50 pc

(mesmo com o satélite Hiparco de 1988). As variáveis (gigantes) RR Lira de luminosidade bem conhecida permitem medir as galáxias do grupo local até às centenas de kpc. As cefeidas levam-nos até ao início de pequenos grupos vizinhos de galáxias, nos poucos Mpc.

Para ir mais longe, criam-se indicadores secundários, isto é, procuram-se objectos de magnitude absoluta calibradas e intrinsecamente superbrilhantes, para se poderem observar a distâncias das centenas de Mpc. Surgiram os enxames globulares de estrelas que nos levam às dezenas de Mpc. Em 1977 a relação de Tully-Fisher descreveu o facto da velocidade de rotação de uma galáxia espiral (obtida na largura da risca de 21 cm) ser proporcional à massa da galáxia. Quanto maior for a massa maior será também a velocidade de rotação permitida. A massa é medida indirectamente através da quantidade de estrelas azuis que se formam nos seus braços (brilho emitido). A calibração da relação permite medir galáxias quase à centena de Mpc, isto é, no supergrupo da Cabeleira de Berenice e de Abel 1367.

A utilização de supernovas representa hoje um outro marco importante. As supernovas do tipo Ia são estrelas anãs brancas que, ao receberem massa de uma estrela companheira, ultrapassam o limite de Chandrasekhar ($1,4 M_{\text{sol}}$) e explodem por ignição do carbono. Esta massa limite garante uma explosão de brilho quase constante. As supernovas têm sido usadas para atingir as muitas centenas de Mpc.

As calibrações da astrofísica, o conhecimento da importância da poeira interestelar e das nuvens gasosas intergalácticas permitem reduzir (em finais dos anos 70) a constante de Hubble para o valor realista de 75 (km/s) Mpc (actual), calibrar as idades das estrelas velhas e das galáxias em cerca de 14 mil milhões de anos. Aos poucos foi-se delineando a estrutura de buracos, vazios, grupos, enxames e aglomerados de galáxias e de grupos destas. Foi-se também desatando o intrincado novelo de velocidades relativas entre estes habitantes do cosmos, e descobre-se que o Grupo Local se move em direcção ao supergrupo da Virgem a cerca de 220 km/s, que por sua vez tem uma velocidade de 630 km/s em relação à radiação cósmica de fundo (referencial por excelência do Universo); e que o Grupo Local tem uma componente de cerca de 500 km/s em direcção ao super-aglomerado da Hidra-Centauro. Em 1987 o grupo dos "Sete Samurais" descobriu que este super-aglomerado está a ser puxado para o Grande Atractor, uma estrutura com massa equivalente a $10^{16} M_{\text{sol}}$ ($\sim 10^5$ galáxias) e duas vezes mais longínqua. Contudo, o Grande Atractor também se move, atraído

pelas chamadas Grandes Muralhas! Os levantamentos recentes elevam o número conhecido de medições e *redshifts* (até aos 50 000 km/s ou $d \sim 600$ Mpc) a mais de 28 000 galáxias.

PRÓLOGO AO TERCEIRO MILÉNIO

O Universo parece ter uma estrutura esponjosa na distribuição da matéria bariónica. A calibração da magnitude absoluta de supernovas próximas de tipo Ia mostra que o Universo está em expansão acelerada em vez da desaceleração buscada por todos durante décadas. A existência de um universo de matéria exclusivamente bariónico transforma-se em apenas 5% deste, no aparecimento de 30% de massa/energia escura exótica e até 65% de energia cósmica (vácuo) de natureza desconhecida. O Universo, que todos esperavam ter curvatura, mostra-se afinal globalmente plano. A inflação e o *big-bang* continuam a ser a melhor teoria disponível.

A nova geração de telescópios ópticos com interferometria será capaz de ver a formação das galáxias até aos primeiros momentos após o *big-bang*. Poderemos medir a nucleosíntese primordial, a sua evolução em galáxias primitivas até aos dias de hoje. Poderemos seguir a formação de estrelas e planetas em directo, qual programa que se assiste ao vivo na televisão. Os novos interferómetros gigantes no milímetro permitirão observar coisas nunca antes vistas por olhos humanos. Saberemos se a expansão acelerada é apenas um efeito local ou global. Se o Universo é fractal, perfeitamente uniforme, ou assimétrico. Esperamos finalmente entender o tempo e a energia.

A porta do Universo abre-se de par em par...

