

# Expansão do Universo

**Ricardo Moreno, Susana Deustua**

União Astronómica Internacional, Colégio Retamar (Madrid, Espanha), Space Telescope Science Institute (Baltimore, USA)

## Resumo

Esta oficina contém atividades simples, nas quais trabalharemos o conceito de expansão do Universo. Na primeira atividade estudaremos o efeito Doppler. Na segunda, terceira e quarta experimentaremos qualitativamente, através da expansão de um arame, uma borracha, de um balão e de uma superfície de pontos respetivamente. Na quinta e na sexta calcularemos a constante de Hubble e veremos, de forma quantitativa, a expansão de uma superfície. Na sétima atividade detetaremos a radiação de fundo de micro-ondas. Na oitava simularemos lentes gravitacionais.

## Objetivos

- Compreender o que é a expansão do Universo.
- Compreender que não há um centro do Universo.
- Compreender a Lei de Hubble.
- Compreender o significado e simular lentes gravitacionais.

## A Origem do Universo

A teoria sobre a origem do Universo mais aceita hoje em dia é conhecida com o nome de *Big Bang*: um evento singular, original, que iniciou uma expansão do próprio espaço. Mas não são as galáxias que se movem “através do espaço”, é o espaço entre elas que se expande, arrastando as galáxias. Por essa razão não é possível discutir acerca do centro do Universo, como também não é possível afirmar que um país está no centro da superfície terrestre.

A velocidade de recessão de uma galáxia e a distância que estão de nós é proporcional. A constante que as relaciona é chamada constante de Hubble. A lei de Hubble relaciona de forma linear a distância de uma galáxia com a velocidade com que esta se afasta de nós.

A primeira prova do *Big Bang* veio com a observação do desvio para o vermelho (*redshift*) nos espectros das galáxias, e a prova que proporcionou o reconhecimento definitivo da teoria do *Big Bang* foi a deteção da radiação de fundo de micro-ondas.

## Desvio para o vermelho (*redshift*)

Se no laboratório observarmos, com um espectroscópio, a luz que chega de um gás quente, por exemplo, o hidrogénio, veremos linhas de cores que são típicas desse gás, a comprimentos de onda fixos. Se fizermos o mesmo com a luz que chega de uma galáxia remota, veremos essas

linhas, mas ligeiramente deslocadas (figura 1). É o fenómeno denominado desvio para o vermelho, pois na maioria das galáxias o deslocamento é para essa cor.

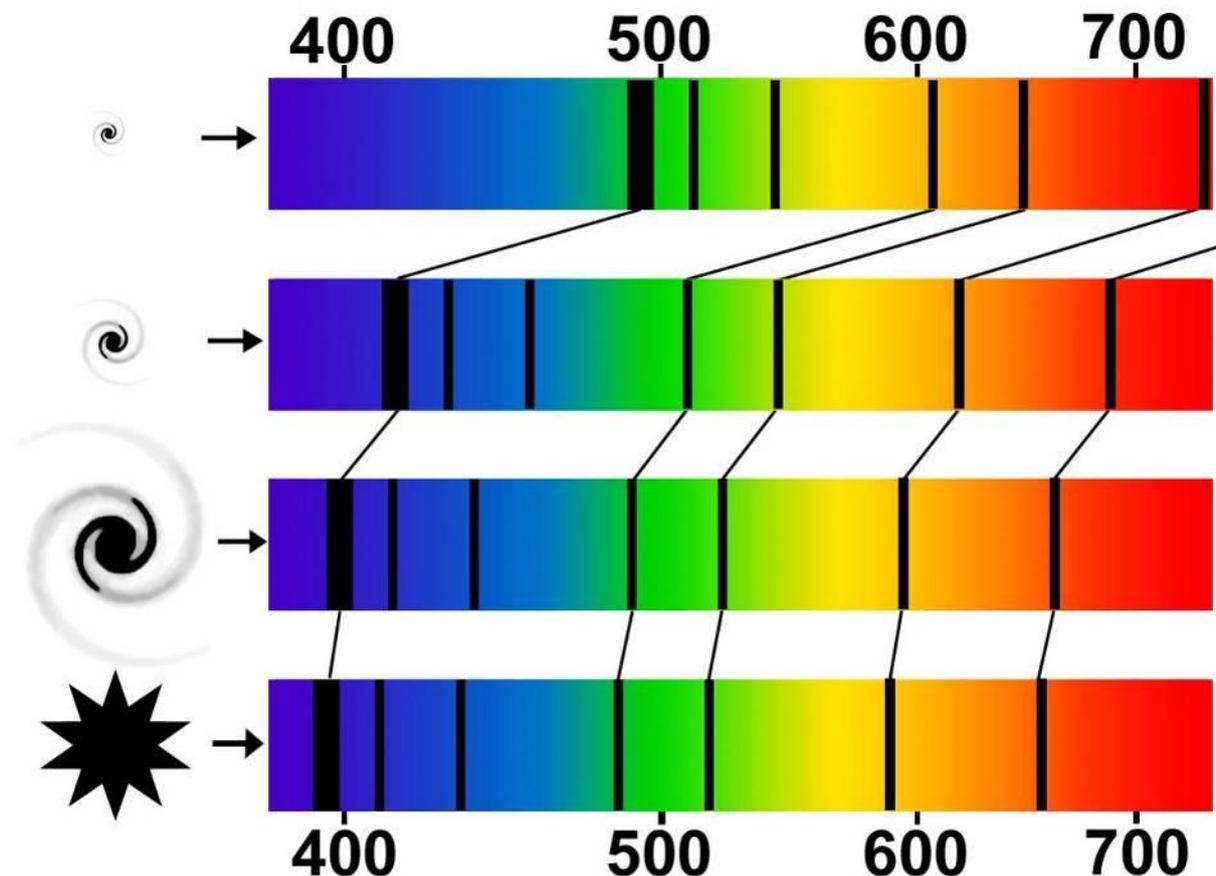


Fig.1: Quanto mais afastada está a galáxia, mais o seu espectro se desvia para o vermelho, demonstrando que se afasta de nós a maior velocidade.

Este desvio para o vermelho da luz é devido ao afastamento da galáxia em relação a nós, de forma semelhante a mudança de tom de um apito de uma locomotiva, e quanto maior for essa mudança maior será a velocidade.

Estudando o espectro das galáxias do nosso grupo local, verificámos que a Grande Nuvem de Magalhães se afasta de nós a 13 km/s, e a Pequena Nuvem de Magalhães se aproxima a 30 km/s. Andrómeda aproxima-se a 60 km/s, enquanto a M 32 (uma satélite sua) se afasta a 21 km/s. Por outras palavras, as galáxias próximas possuem movimentos relativos pequenos e de forma irregular.

Mas se observarmos o enxame de Virgem, a uma distância média de 50 milhões de a.l., veremos que todas se afastam a velocidades entre 1 000 e 2 000 km/s. E no superenxame de Coma, ou Berenice, a 300 milhões de a.l., as velocidades de afastamento oscilam entre 7 000 e 8 500 km/s. Se olharmos na direção oposta, obtemos que a M 74 se afasta de nós a 800 km/s e M 77 a 1 130 km/s. E se o alvo forem galáxias mais longínquas, e fracas, a velocidade de recessão é ainda maior: NGC 375 afasta-se a 6 200 km/s, NGC 562 a 10 500 e NGC 326 a 14 500 km/s. Todas as galáxias mais próximas se afastam de nós. Estarão chateadas conosco?

## Atividade 1: O efeito Doppler

O efeito Doppler é o fenômeno que permite variar o comprimento de onda de um som quando a fonte está em movimento. Verificamos isso no som de motos ou carros numa corrida: o som é diferente ao aproximar-se e ao afastar-se. Outro exemplo familiar é um carro de bombeiros que passa junto a nós, no apito de um comboio em movimento, etc.

É possível reproduzir este efeito girando, num plano horizontal uma fonte de som, por exemplo um despertador. Introduzimos o despertador numa bolsa de tecido (figura 2a) e amarramo-lo com uma corda. Ao girá-lo sobre as nossas cabeças (figura 2b), é possível escutá-lo quando se aproxima do observador;  $\lambda$  diminui e o som é mais agudo. Quando se afasta,  $\lambda$  aumenta e o som é mais grave. A pessoa que está no centro de giro não verifica o fenômeno.



Fig. 2a: Relógio despertador, bolsa e corda.



Fig. 2b: Girando sobre as nossas cabeças os espectadores ouvem a diferença de tom.

Este é o efeito Doppler devido à deslocação. Porém, não é o que as galáxias possuem, com a expansão. As galáxias não se movem através do espaço, é o espaço entre elas que se expande.

## Atividade 2: O “alongamento” dos fotões

O Universo, ao expandir-se, “estica” os fotões. Quanto mais tempo durar a viagem do fotão, maior é “alongamento” que este sofre.

É possível fazer um modelo deste “alongamento” com um cabo semirrígido, usado nas instalações elétricas das casas. Corte aproximadamente um metro de cabo, depois dobre-o com as mãos fazendo vários ciclos de uma senoide, representando várias ondas (figura 3a).

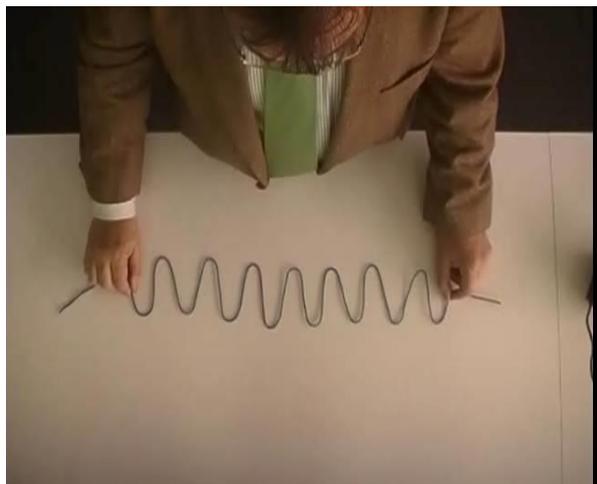


Fig. 3a: Ondas feitas com cabo semirrígido.

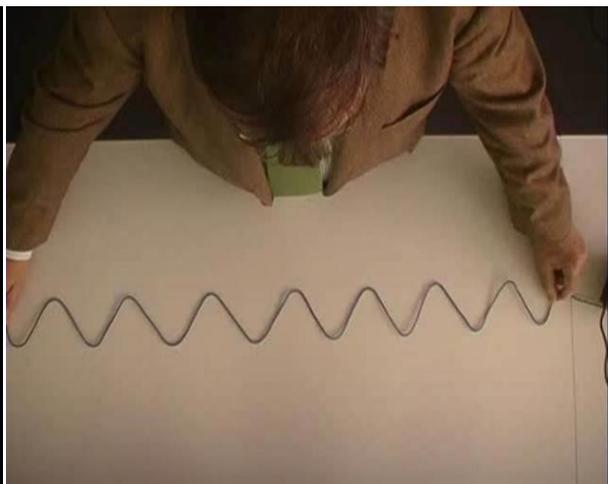


Fig. 3b: As mesmas ondas, esticadas, com um comprimento de onda maior.

Pegue o cabo com as duas mãos, estique-o (figura 3b), e observe que o comprimento de onda aumenta, tal como ocorre na radiação que chega de uma galáxia. Quanto mais longe estiver de nós, mais tempo teve para se esticar e se desviar mais para o vermelho (maiores comprimentos de onda).

## Lei de Hubble

Foi Edwin Hubble (figura 4) quem, a partir destes dados, estabeleceu em 1930 a lei que tem o seu nome: quanto mais distante está uma galáxia mais depressa se afasta de nós. Isto indica que o Universo se expande em todas as direções, pois todos os corpos que estão no Universo vão-se afastando uns dos outros. Se observarmos o afastamento de todas as galáxias em relação a nós não significa que estejamos no centro: o mesmo seria observado por um extraterrestre em qualquer lugar do Universo, como acontece numa explosão de fogos-de-artifício: todas as partículas luminosas vão-se afastando entre si movidas pela explosão da pólvora.

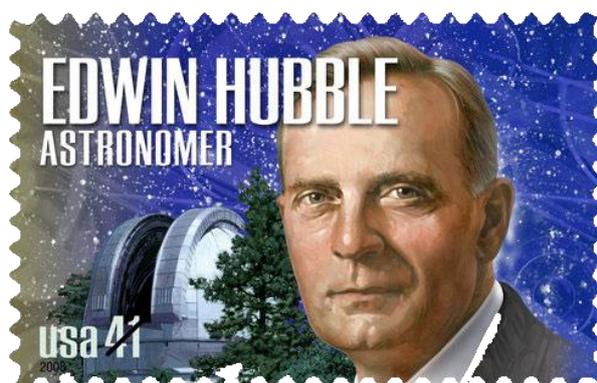


Fig. 4: Edwin Hubble.

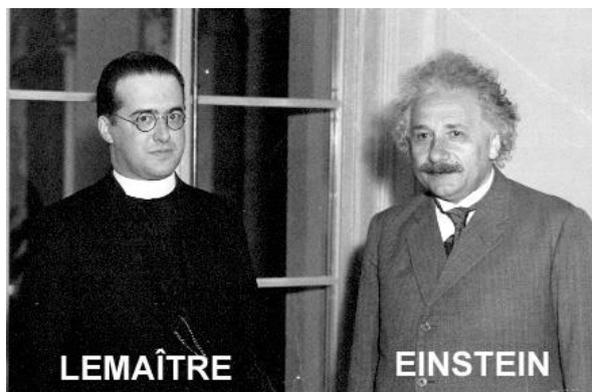


Fig. 5: George Lemaître e Albert Einstein.

No entanto, o modelo real não é o modelo de galáxias a movimentar-se através do espaço, mas é o espaço entre elas o que se expande, arrastando às galáxias.

Se o espaço se expande em todas as direções, significa que voltando atrás no tempo, a matéria esteve concentrada, em algum momento inicial, onde tudo começou.

Foi assim que o padre belga George Lemaître (figura 5) estabeleceu o mais aceito modelo do Universo: houve uma grande explosão original e ainda estamos envolvidos nela. Nessa expansão é o próprio espaço que se vai dilatando. Para entender este fenómeno, imaginemos um bolão de borracha com uma série de pontos desenhados na sua superfície, representando as galáxias (figura 6). À medida que vai crescendo, o espaço elástico entre os pontos desenhados vai aumentando. Da mesma forma, à medida que o tempo passa, o espaço vai-se expandindo e a matéria contida nele vai-se separando entre si.

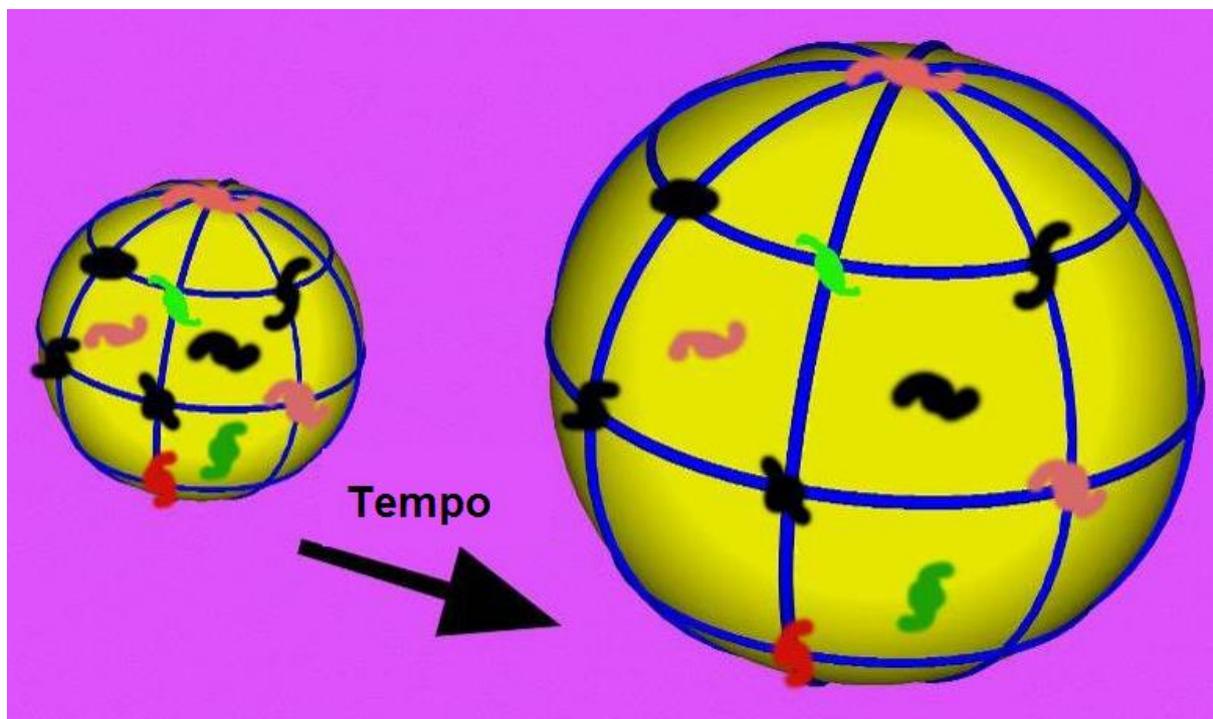


Fig. 6: Com o passar do tempo, o espaço vai-se expandindo e a matéria contida nele vai-se afastando.

Portanto, a velocidade aparente de recessão de uma galáxia e a distância a que está de nós é proporcional. A constante que as relaciona é chamada de constante de Hubble. A Lei de Hubble relaciona a distância de uma galáxia com a velocidade aparente com que se afasta:

$$v = H d$$

Para determinar seu valor bastaria saber a velocidade e a distância de algumas galáxias. A velocidade com que uma galáxia parece afastar-se é facilmente medida com precisão através do desvio para o vermelho, mas a distância a que está, especialmente no caso das mais longínquas, é mais difícil. Os cientistas não estão de acordo com o valor da constante de Hubble. Conforme usem um ou outro método, resultam valores diferentes, que geralmente oscilam entre 50 e 100 km/s por Megaparsec. O valor mais aceito atualmente é aproximadamente 70, o que indica uma idade para o Universo de 13 700 milhões de anos.

### Atividade 3: O Universo numa borracha elástica

Edwin Hubble descobriu que todas as galáxias parecem estar a afastar-se de nós. Quanto mais longe estão, mais rapidamente se afastam. A chamada Lei de Hubble estabelece que a velocidade aparente de afastamento de uma galáxia relativamente a nós é proporcional à sua distância. É uma consequência lógica da expansão do Universo. E ainda que todas as galáxias pareçam estar a afastar-se de nós, não significa que estejamos no centro do Universo.

Com uma régua faça marcas, de 1 cm em 1 cm, sobre uma borracha. Cada marca uma representará uma galáxia (A, B, C, etc.). A nossa galáxia será a primeira. Coloque a borracha próxima da régua (figura 7a) de modo a que a nossa galáxia coincida com a marca 0 cm. As outras galáxias A, B, C... coincidirão com as marcas 1, 2, 3, 4... cm.

Estique a borracha (figura 7b) de tal forma que nossa galáxia se mantenha na marca de 0 cm, e que a seguinte (A) se situe sobre a de 2 cm. A distância desta galáxia em relação à nossa duplicou. O que aconteceu à distância entre as restantes galáxias, B, C, D, e a nossa? Também duplicou?



Fig. 7a: Borracha sem estar esticada.



Fig. 7b: Borracha esticada.

Suponha que o tempo que durou o esticar da borracha foi de 1 segundo. As velocidades com que as outras galáxias se distanciaram relativamente à nossa são todas iguais, ou umas afastam-se mais depressa que outras? Como é que um habitante da próxima “galáxia” vizinha vê a nossa galáxia e as restantes? Também lhe parecerá que todas se afastam da sua?

#### Atividade 4: O Universo num balão

Na expansão do Universo, é o espaço entre as galáxias que se expande. As próprias galáxias não se expandem, nem a nossa casa se expande. O que está fortemente unido pela gravidade, não aumenta de tamanho.

Há uma experiência simples que permite mostrar este facto. Basta usar um balão, apenas parcialmente cheio. Depois colamos com adesivo sobre sua superfície alguns pedacinhos de esferovite (também podem ser moedas). A seguir enchemos o balão até chegar ao máximo. Os pedacinhos de esferovite vão separar-se uns de outros (figuras 8a e 8b). Alguns parecerão

afastar-se mais do que outros, mas nenhuns se aproximarão. É um modelo muito simples da expansão do Universo.



Fig. 8a: Pedacos de esferovite colados no balão parcialmente enchido.



Fig. 8b: Os pedacos de esferovite afastam-se quando o balão está mais cheio.

## Atividade 5: Cálculo da constante de Hubble

A Lei de Hubble afirma que a velocidade,  $v$ , de uma galáxia é proporcional à distancia,  $d$ , que se encontra de nós:  $v = H d$ . A constante  $H$  é denominada constante de Hubble, e pode ser calculada a partir das distâncias e das velocidades das galáxias. Aplicando a fórmula anterior:

$$H = \frac{v}{d}$$

No diagrama da figura 9 é mostrado o espaço, representado por uma quadrícula azul a tracejado, conosco no centro e várias galáxias, a azul, a uma certa distância de nós. Depois de algum tempo, cerca de 10 segundos, o espaço expandiu-se e ficou representada a vermelho, tanto a grelha (em linhas contínuas) como as galáxias.

Preencha a tabela 2 e em cada fila coloque os dados relativos a cada galáxia. Por exemplo, as coordenadas são obtidas com as quadrículas azul (a tracejado) ou vermelha (linhas contínuas), conforme seja a galáxia A ou a A', respetivamente, e a distância  $d$  obtém-se medindo com uma régua o comprimento, em cm, entre nós (no centro) e o centro dessa galáxia. Os dados da coluna  $\Delta d$  obtêm-se subtraindo as distâncias obtidas para A' e A. Na última coluna é necessário usar, no denominador, a distância antes da expansão (por exemplo, a de A, não a de A').

Comprovarás que:

- As coordenadas de cada galáxia não variam com a expansão (as galáxias não se movem através do espaço).
- O valor de  $H$  é bastante constante, independentemente das galáxias.

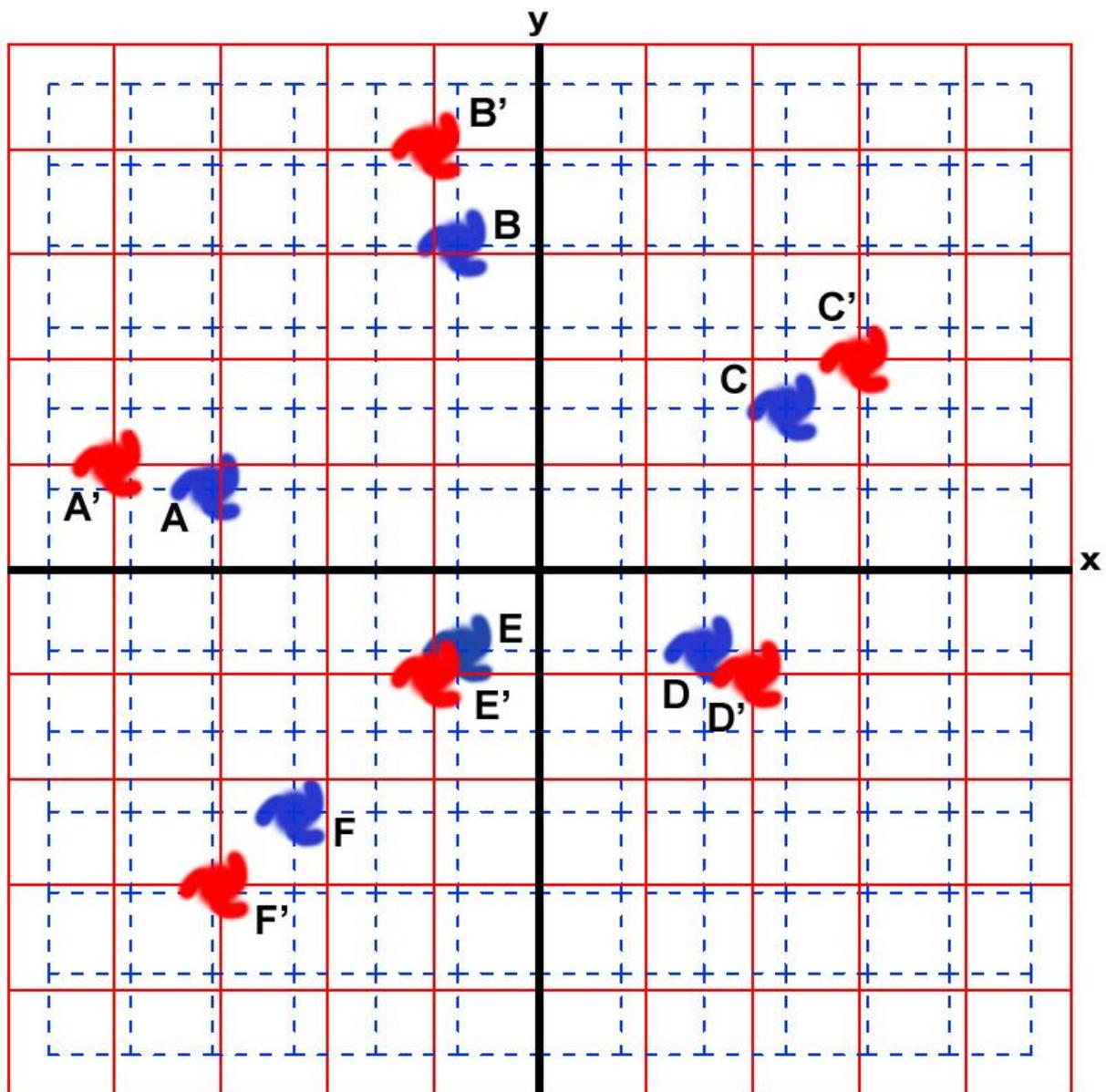


Fig. 9: O quadriculado de traço contínuo (vermelho) é a mesma que a do traço descontinuo (azul), mas expandida. As galáxias estão fixas nas quadriculas.

| Galáxia | Coordenadas<br>$x, y$ | $d =$ distância<br>da origem | $\Delta d$ | $v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$ | $H = \frac{v}{d}$ |
|---------|-----------------------|------------------------------|------------|---------------------------------|-------------------|
| A       | (-4, 1)               |                              |            |                                 |                   |
| A'      | (-4, 1)               |                              |            |                                 |                   |
| B       | (-1, 4)               |                              |            |                                 |                   |
| B'      | (-1, 4)               |                              |            |                                 |                   |
| C       | (3, 2)                |                              |            |                                 |                   |
| C'      | (3, 2)                |                              |            |                                 |                   |
| D       | (2, -1)               |                              |            |                                 |                   |
| D'      | (2, -1)               |                              |            |                                 |                   |
| E       | (-1, -1)              |                              |            |                                 |                   |
| E'      | (-1, -1)              |                              |            |                                 |                   |
| F       | (-3, -3)              |                              |            |                                 |                   |
| F'      | (-3, -3)              |                              |            |                                 |                   |

Tabela 1: Com as coordenadas escritas como exemplo.

| Galáxia | Coordenadas<br>$x, y$ | $d =$ distância<br>da origem | $\Delta d$ | $v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$ | $H = \frac{v}{d}$ |
|---------|-----------------------|------------------------------|------------|---------------------------------|-------------------|
| A       |                       |                              |            |                                 |                   |
| A'      |                       |                              |            |                                 |                   |
| B       |                       |                              |            |                                 |                   |
| B'      |                       |                              |            |                                 |                   |
| C       |                       |                              |            |                                 |                   |
| C'      |                       |                              |            |                                 |                   |
| D       |                       |                              |            |                                 |                   |
| D'      |                       |                              |            |                                 |                   |
| E       |                       |                              |            |                                 |                   |
| E'      |                       |                              |            |                                 |                   |
| F       |                       |                              |            |                                 |                   |
| F'      |                       |                              |            |                                 |                   |

Tabela 2: Para preencher com os dados da figura 9.

## O Big Bang

Atualmente, a teoria da origem do Universo como uma grande explosão é a mais aceita na comunidade científica, embora ainda seja questionada porque há detalhes que ainda não foram explicados. Em 1994 a revista americana *Sky & Telescope* fez um concurso para rebatizá-la. Receberam 12 000 propostas, mas nenhuma conseguiu suplantá-la que já existia: teoria do *Big Bang*. O nome foi colocado depreciativamente pelo astrónomo Fred Hoyle que, com determinados preconceitos antirreligiosos, tinha a impressão que esta era demasiado consistente com a ideia de um Criador.

Com a observação de um Universo em expansão, deduz-se que, voltando atrás no tempo, houve um princípio no qual a explosão ocorreu, dando origem ao espaço e ao tempo tal como agora os conhecemos. Podemos perguntar como aconteceu e porque é que aconteceu. A ciência não dá resposta isto porque apenas trabalha em função do que existe. A ciência pode tentar explicar como é que as coisas funcionam, desde o *Big Bang*, mas não porque é que a matéria existe. Esses tipos de questões é para os filósofos, que estudam a metafísica (para além da física).

Algumas tentativas de explicar a causa recorrem a conceitos físicos como flutuações quânticas do vácuo, confundem o vazio com o nada: o vazio quântico existe, pois possui espaço e alguma energia. O conceito de nada, como significado de ausência de tudo, incluindo o espaço, não é científico, é metafísico. No nada, nada pode nem existir nem flutuar. Outras teorias falam de multiuniversos mas, por definição, são impossíveis de comprovar (se pudéssemos observar de alguma forma outro universo, esse faria parte do nosso, já que o nosso Universo é toda a matéria que está, de alguma maneira, ao nosso alcance). Por essa razão, essas teorias também não são realmente científicas.

Voltemos à ciência. No instante inicial, toda a matéria e energia encontravam-se numa singularidade, infinitamente pequena e densa. O *Big Bang* foi a explosão do espaço no começo do tempo, e a partir desse momento a matéria começou a *funcionar* com leis que estavam inscritas no seu *interior*, e que conduziram o Universo ao estado atual.

### **Atividade 6: Não há um centro de expansão**

Na figura 10 aparece um desenho com muitos pontos, que simulam galáxias num determinado momento. Faça uma primeira fotocópia, em papel transparente, e depois outra, noutra papel transparente, mas levemente ampliada (por exemplo, 105%).

Se sobrepostas num retroprojeter de transparências, obter-se-á uma imagem (figura 11a) que representa a expansão o espaço no tempo: fazendo coincidir um dos pontos, nas duas transparências, observa-se muito bem que o deslocamento de todos os outros pontos é radial, e é tanto maior quanto mais afastado estiver do ponto coincidente. Parece que os pontos se afastam mais depressa quanto mais longe estiverem do ponto coincidente.

Mas se o ponto coincidente for outro (figura 11b), ocorre o mesmo. É o que acontece no espaço: a partir da nossa galáxia vemos que todas se afastam de nós, mais rapidamente quanto mais longe estiver do observador. Parece que estamos no centro do Universo, mas não é assim, já que um observador situado noutra galáxia veria o mesmo e ele pareceria estar no centro. Realmente, não há nenhum centro.

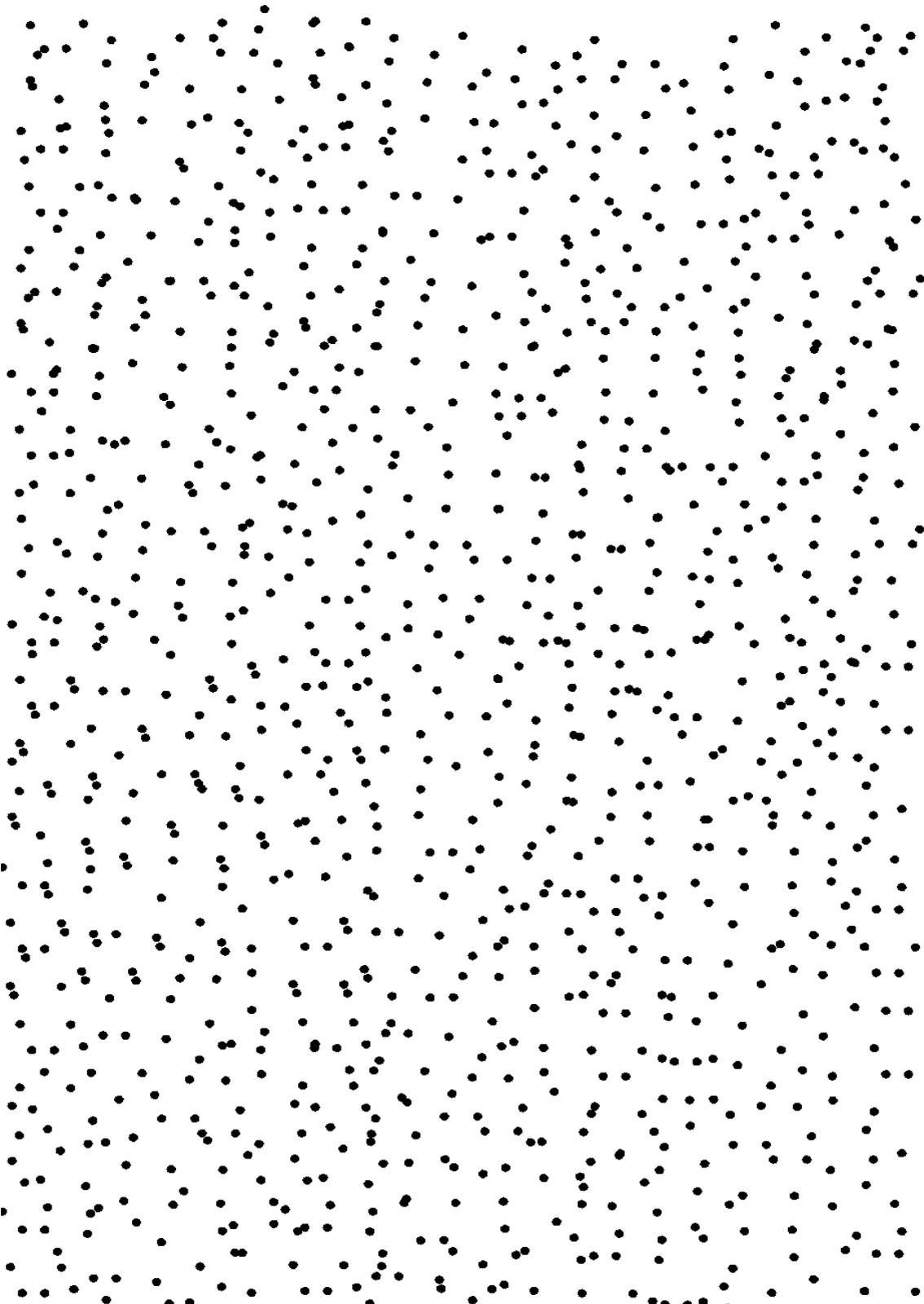


Fig. 10: Fotocopiar esta página numa transparência, e depois noutra, ampliada (por exemplo 105%).

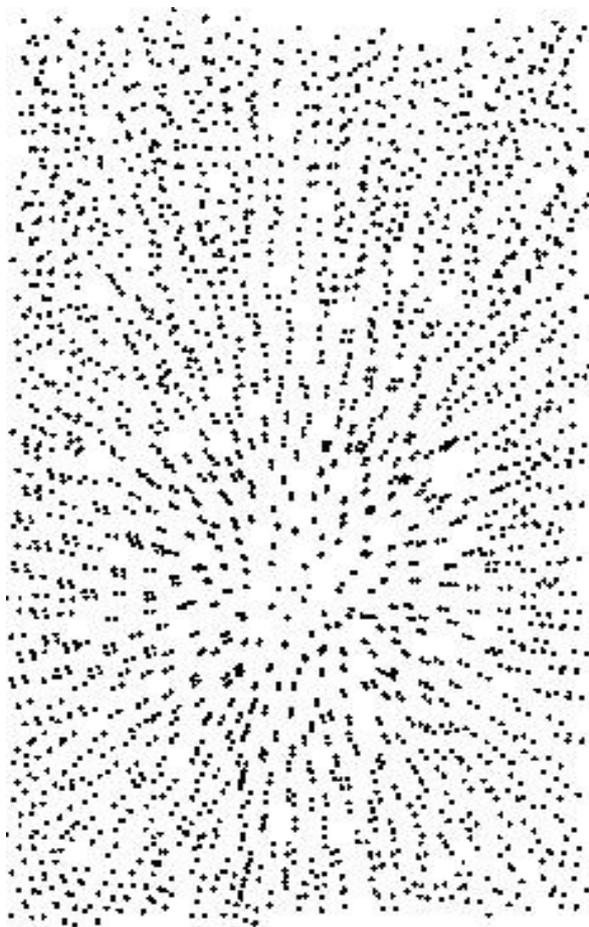


Fig. 11a: Sobreposição de duas transparências, uma delas ampliada.

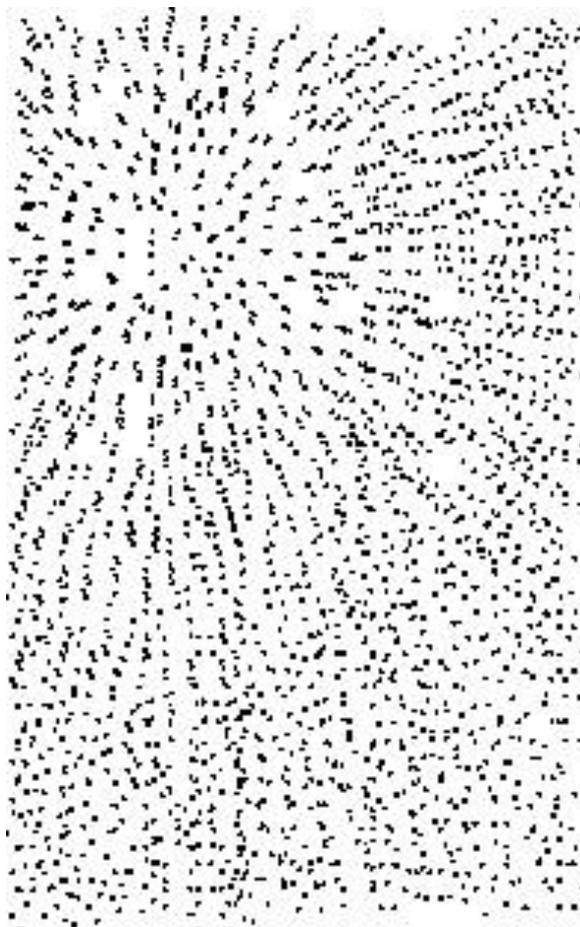


Fig. 11b: Se fazemos coincidir outro ponto, também parece que tudo se afasta dele: não há um centro de expansão

## Evolução do Universo

Para termos uma ideia da história tardia do Universo, podemos supor que todo o tempo desde o *Big Bang* até agora é condensado num ano, de 1 de janeiro a 31 de dezembro.

A nossa Via Láctea seria formada em maio. No início de setembro o Sol seria formado e a Terra teria forma esférica no final do mês. Mesmo que algumas células vivas muito simples tenham aparecido na Terra logo de seguida, as células com núcleo, como as atuais, apareceriam apenas em 2 de dezembro. Seria também no início de dezembro que o oxigénio apareceria na nossa atmosfera. No dia 12 apareceriam os primeiros organismos pluricelulares. No dia 19 surgiriam as plantas e peixes, e no dia 23 as árvores, insetos e répteis. No dia 25 surgiriam os dinossauros, que durariam até o dia 30. No dia 30 os mamíferos já habitariam sobre a Terra, e a partir do dia 31, às 11 da noite, surgiria o homem. É no último minuto que se pintariam as grutas de Altamira. Cinco segundos antes da meia-noite seria o momento do nascimento de Jesus Cristo. O último século seriam as últimas duas décimas de segundo.

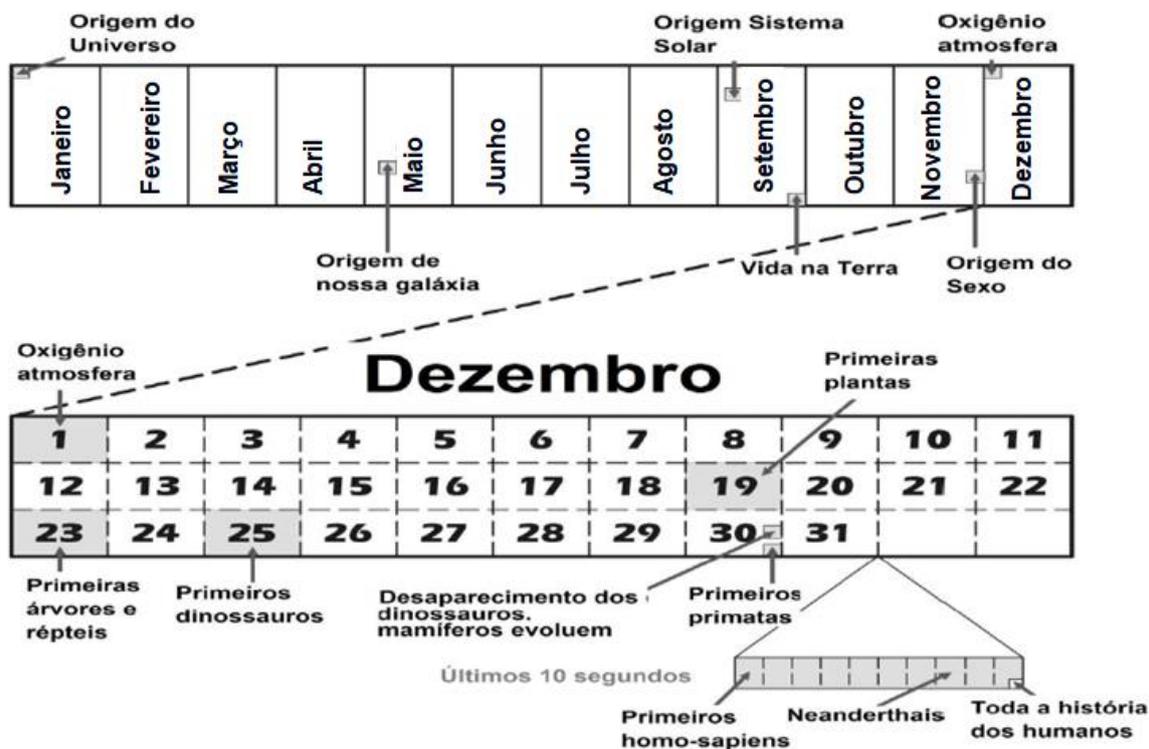


Fig.12: A história do Universo num ano. Toda a história humana (civilização) ocorre nos últimos 21 segundos.

## Radiação de fundo de micro-ondas

No começo, a temperaturas elevadíssimas, as quatro forças que conhecemos estavam unificadas. A gravidade, a força eletromagnética, a força nuclear forte e a fraca – estas duas últimas apenas atuam no interior dos átomos, e portanto são menos conhecidas das pessoas – estavam unidas. De seguida separaram-se e formaram-se os fotões, os eletrões, os prótons e as demais partículas elementares. Ao mesmo tempo que se expandia o Universo ia arrefecendo. Após 300 000 anos a temperatura baixou o suficiente para se poderem formar os átomos, principalmente hidrogénio e hélio. A densidade baixou e os fotões ficaram livres para se poderem mover em todas as direções: fez-se a luz. Os cientistas afirmam que o Universo tornou-se transparente. Esses fotões ainda viajam pelo espaço atualmente, apesar de este ter arrefecido e dilatado, pelo que o comprimento de onda aumentou muitíssimo (figura 13) e converteram-se em fotões mais frios, transmitindo uma energia de apenas 2,7 kelvin. É a chamada radiação de fundo de micro-ondas (*Cosmic Microwave Background* ou CMB).

Esta radiação de fundo foi detetada pela primeira vez em 1964 por Penzias e Wilson, nos Estados Unidos. Eles estavam a tentar eliminar todos os ruídos parasitas do seu radiotelescópio quando captaram uma emissão de 7,35 cm de comprimento de onda que estava sempre presente, independentemente da zona para a qual apontassem a gigantesca antena. Reviu-se toda a instalação e inclusive pensou-se que a causa fosse o ninho construído na antena por alguns pássaros, mas não conseguiram eliminar esse ruído de fundo. Chegou-se à conclusão que era proveniente de um corpo emissor que com uma temperatura de 2,7 kelvin – a temperatura atual do Universo – e que não se encontrava em nenhum lugar particular. Era o próprio Universo que emitia aquela radiação de fundo, uma relíquia do *Big Bang*. Qualquer pessoa pode detetá-la

com uma televisão analógica sintonizada num canal livre: um em cada dez pontos vistos no ecrã são devido à radiação de fundo de micro-ondas. São emissões no campo das micro-ondas, semelhante às dos fornos caseiros, mas com tão pouca energia que apenas poderia aquecer os alimentos a 2,7 K.

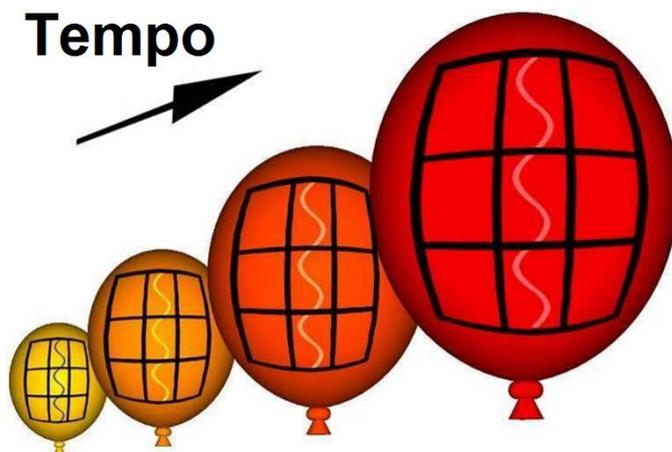


Fig. 13: Com o passar do tempo, à medida que o espaço se expande, os fótons dilatam o seu comprimento de onda. É a radiação de fundo de micro-ondas.

Ainda que parecesse uma radiação extraordinariamente uniforme, G. Smoot e outros colegas conseguiram detetar pequenas variações nas medidas realizadas pelo satélite COBE (figura 14a), na ordem de milionésimas de grau. Simultaneamente detetaram-se essas flutuações a partir da superfície terrestre, nas instalações de Tenerife, do Instituto de Astrofísica de Canárias. E no ano 2001 a NASA lançou o telescópio WMAP para estudar essa radiação de fundo com muito maior resolução (figura 14b).

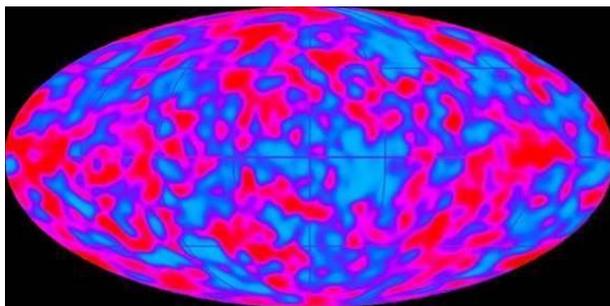


Fig. 14a: Imagem do COBE.

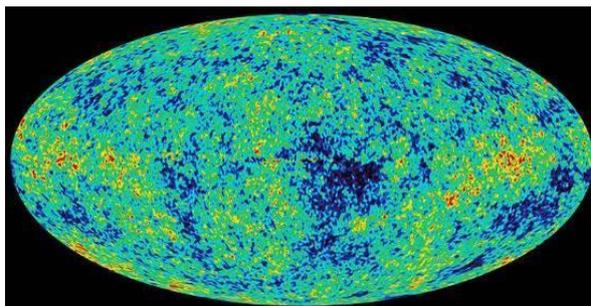


Fig. 14b: Imagem do WMAP.

Mesmo que pequenas, estas pequenas variações são as impressões dos grumos de matéria a partir dos quais se começaram a formar as galáxias. Ainda não sabemos o que originou estas flutuações de densidade. O que podemos afirmar é que estas rugas na matéria ocorreram e começaram a produzir-se as condensações das protogaláxias, apenas umas centenas de milhões de anos após o *Big Bang*. Quase ao mesmo tempo formar-se-iam as primeiras estrelas nessas galáxias primitivas.

## Atividade 7: Detecção da radiação de fundo de micro-ondas

300 000 anos após o *Big Bang*, os fótons separaram-se da matéria e começaram a viajar livremente pelo Universo. Quando o espaço se expandiu, esses fótons foram dilatando o seu comprimento de onda. Os cálculos preveem que teriam agora um comprimento de onda de cerca de 2 mm, que corresponde à região das micro-ondas e equivale ao que emitiria um corpo negro que esteja a 2,7 graus Kelvin.

Como mencionado anteriormente, Penzias e Wilson detetaram pela primeira vez, em 1964, a radiação de fundo de micro-ondas, uma radiação relíquia que é proveniente de todas as direções. O satélite COBE (figura 14<sup>a</sup>) e mais tarde o WMAP (figura 14b) realizaram medidas muito precisas desta radiação em todas as direções, detetando pequenas variações de uma área para outra, correspondendo ao que eram, então, aglomerados de galáxias.

Podemos detetar esta radiação com uma simples televisão (figura 15). Para fazer isto, sintonize a televisão para um canal livre. A imagem é composta de múltiplos pontos que mudam constantemente. Aproximadamente 10%, isto é, um em cada dez, dos pontos são provenientes da radiação do Universo.



Fig. 15: Alguns dos pontos de um ecrã de uma televisão analógica não sintonizada são provenientes da radiação de fundo de micro-ondas.

## Lentes gravitacionais

A luz segue sempre o caminho mais curto possível entre dois pontos. Porém, houver massa presente, o espaço curva, e então o caminho mais curto possível é uma curva como a observada na figura 18a. Esta ideia não é difícil para os estudantes. Realmente, podemos demonstrá-la sobre um globo terrestre (figura 16c). Evidentemente que podem entender que sobre a superfície da Terra as distâncias entre dois pontos são sempre uma curva.



Fig. 16a e 16b: Se o espaço for curvo, o caminho mais curto entre dois pontos é uma curva.



Fig. 16c: O caminho mais curto sobre a superfície terrestre não é uma reta.

Geralmente, podemos imaginar as lentes gravitacionais como uma lente qualquer, mas na qual o desvio da luz é produzido por uma grande massa, chamada defletora, que existe no caminho da luz (figura 17a).

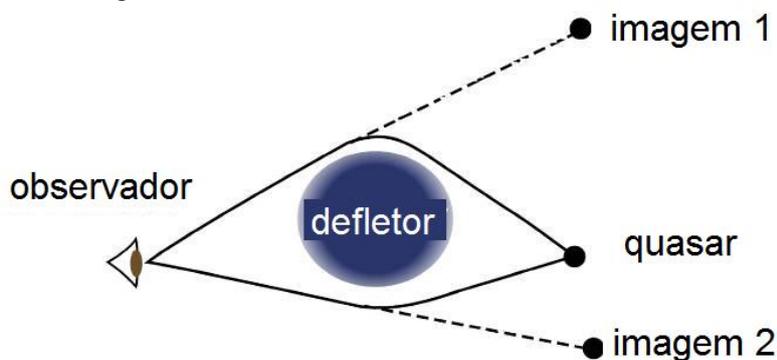


Fig. 17a: O observador tem a sensação que chegam raios luminosos de dois lugares diferentes, e vê duas imagens.

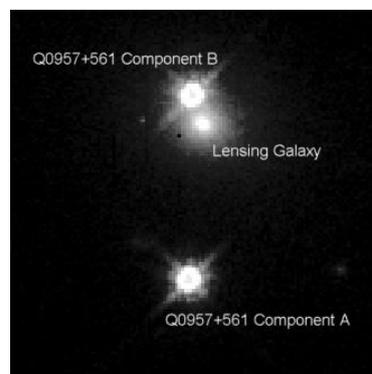


Fig. 17b: Fotografia da imagem dupla do Quasar Q0957+561. O defletor é a galáxia próxima ao componente B.

As lentes gravitacionais produzem uma curvatura nos raios de luz fazendo com que os objetos, se forem pontuais (estrelas ou quasares), pareçam estar num lugar diferente do qual realmente estão ou, inclusive, podem produzir imagens múltiplas do objeto (figura 17b). Se os objetos forem extensos (como as galáxias) as imagens aparecem deformadas como arcos brilhantes (figuras 18a, 18b e 18c).

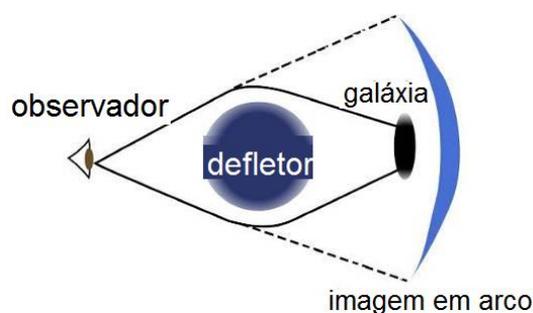


Fig. 18a: Se o corpo desviado for um objeto extenso, as imagens obtidas são um conjunto de arcos brilhantes ou um anel completo.

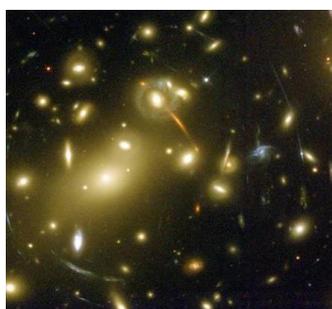


Fig. 18b: Arcos luminosos gigantes formados pelo enxame de galáxias Abell 2218.



Fig. 1c: Anel completo de uma galáxia que está por trás de um defletor brilhante.

## Atividade 8: Simulação de lente gravitacional com uma taça de vinho

Podemos simular uma lente gravitacional utilizando um copo de vinho. Esta experiência permite “mostrar” como é que a matéria pode introduzir deformações nas imagens observadas.

É fácil comprovar que esta simulação provoca a “deformação do espaço” que é observado. Basta colocar o copo sobre um papel quadriculado e observar através do vinho branco (ou sumo de maçã). Poderemos ver esta deformação (figuras 19a e 19b).



Fig. 19a e 19b: Apenas podemos ver a deformação das quadrículas se o copo estiver cheio.

Vejamos agora como simular o anel de Einstein ou a multiplicidade de imagens. Basta usar uma lanterna, posicionando-a do outro lado do copo de vinho tinto e observar o raio de luz que passa através dele.

Se observarmos a luz, podemos vê-la e movê-la da direita para a esquerda e de cima para baixo. Observamos que a luz produz imagens repetidas e nalguns casos alguns arcos. Isto é a consequência de o copo atuar como uma lente que deforma a trajetória da luz. Às vezes podemos observar uma figura amorfa, ou um ponto vermelho brilhante, quatro pontos vermelhos ou um arco entre os pontos vermelhos (figuras 20a, 20b e 20c).

Também podemos simular a lente gravitacional olhando através da base de uma taça. Se colocarmos a base da taça sobre um papel quadriculado e observarmos através dele, podemos ver a deformação das quadrículas (figura 21).

Movendo lentamente a base da taça da direita para a esquerda sobre um objeto, por exemplo, um círculo vermelho de uns 3 cm, reproduziremos os diferentes objetos reais observados nas lentes gravitacionais (figuras 22a, 22b e 22c).

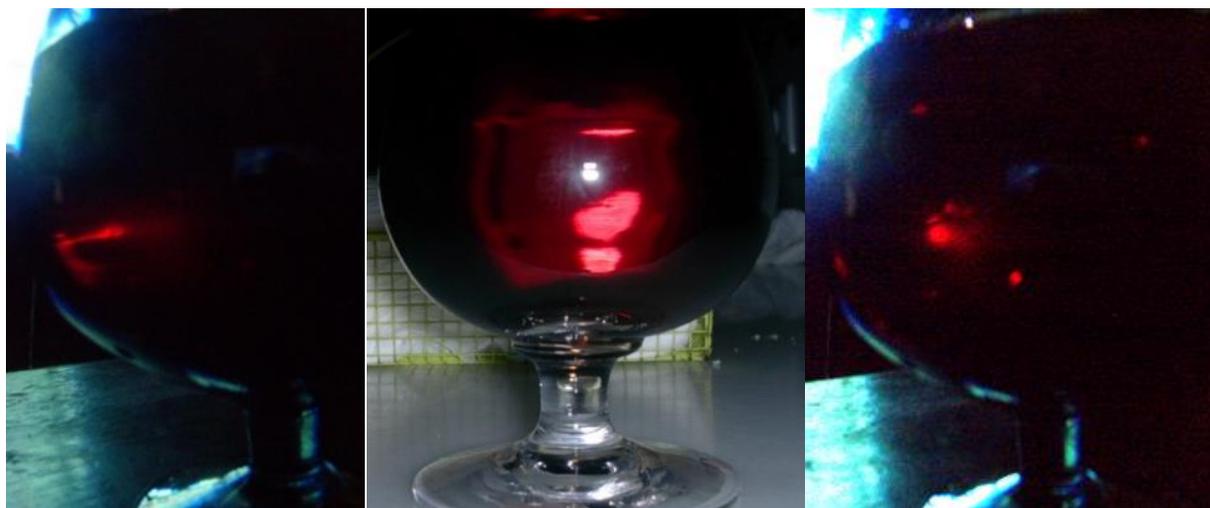


Fig. 20a: A luz da lanterna é vista como um arco entre dois pontos brilhantes vermelhos.

Fig. 20b: Como uma figura amorfa.

Fig. 20c: A cruz de Einstein.



Fig. 21: Deformação das quadrículas.



Fig. 22a, 22b e 22c: A base da taça é um simulador de diversos objetos: segmentos de arco, imagens da cruz e anel de Einstein.

**Porque é que a noite é escura?**

Este era o título de um artigo interessante que o alemão Heinrich Olbers publicou em 1823. Anteriormente, em 1610, Kepler já tinha considerado que era uma evidência que o Universo não podia ser infinito. Edmund Halley, um século depois, encontrou no céu algumas zonas especialmente brilhantes e propôs que o céu não é uniformemente brilhante, durante a noite, porque apesar de o Universo ser infinito as estrelas estão uniformemente distribuídas. Até o escritor Edgar Allan Poe (1809-1849) escreveu acerca deste fenómeno<sup>1</sup>. Este tema entrou para a história como o Paradoxo de Olbers.



Fig.23a: Johannes Kepler. Fig. 23b: Edmund Halley. Fig. 23c: Heinrich Olbers. Fig. 23d: Edgar Allan Poe.

A resposta parece trivial, mas não o é após ler o artigo de Olbers. O raciocínio apontado por Olbers levava ao paradoxo de que o céu noturno devia ser tão brilhante como o mais esplendoroso dia. Vejamos o seu argumento.

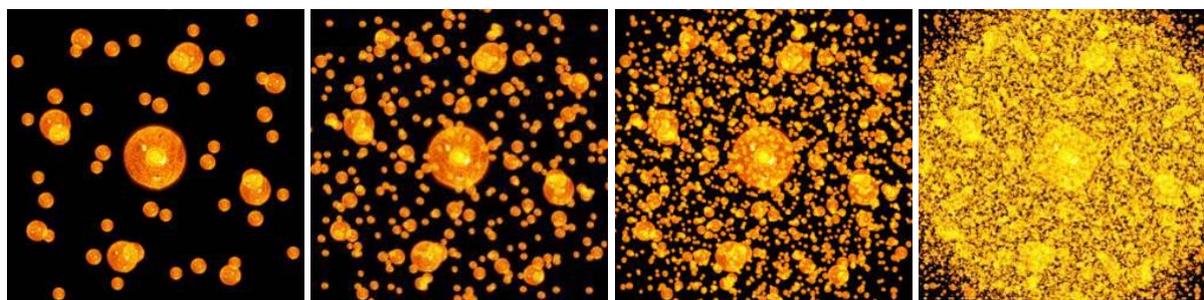
Olbers partia dos seguintes pressupostos:

1. O Universo tem uma extensão infinita.
2. As estrelas distribuem-se mais ou menos uniformemente por todo o Universo.
3. As estrelas possuem uma luminosidade média semelhante em todo o Universo.

Observemos o Universo a partir da Terra. Suponhamos uma primeira camada esférica de estrelas na abóbada celeste, a uma distância  $R_1$ . O número de estrelas que contém será  $N_1$ . Suponhamos uma segunda camada esférica, a uma distância maior,  $R_2$ . Cada uma das suas estrelas ilumina-nos menos por estar mais longe, mas ao mesmo tempo essa camada é maior e contém mais estrelas, segundo o princípio nº 2, e contraria a menor iluminação (a intensidade da luz diminui proporcionalmente a  $1/R^2$ , e à área da camada e, portanto, o número de estrelas aumenta proporcionalmente a  $R_2$ ). A conclusão é que a segunda camada ilumina a Terra da mesma forma que a primeira. De acordo com o princípio nº 1, há infinitas camadas, pelo que a conclusão é que o céu deveria aparecer brilhante durante a noite.

Outra forma de colocar esta questão: se observamos o céu à noite, com uma infinidade de estrelas, em qualquer direção que olhemos os nossos olhos deverão observar uma estrela brilhante e, portanto deveríamos ver ali um ponto brilhante. E se isso ocorre em todo o céu, ele deveria ser totalmente brilhante.

<sup>1</sup> Em “Eureka”, um ensaio científico publicado em fevereiro de 1848, ele deu a seguinte explicação para o escuro “vazio” entre as estrelas observadas: “Podemos compreender o vazio que os nossos telescópios encontram, em inúmeras direções, assumindo que a distância entre a distância ente o fundo invisível é tão imenso que ainda nenhum raio de luz proveniente de lá conseguiu chegar até nós”.



A Luz que chega de estrelas próximas.

Porém, mais longe também há estrelas que nos enviam a sua luz.

Quanto mais longe, mais estrelas há.

De qualquer ponto do céu deveria chegar a luz de uma estrela.

Fig. 24: Extraídas de *Wikimedia Commons*.

Evidentemente que isto não é verdade. Este paradoxo de Olbers despoletou muitas controvérsias e não foi possível resolvê-lo corretamente até o início do século XX, com a teoria do *Big Bang*. O raciocínio em si é correto, mas falham os princípios dos quais parte. Efetivamente que, com a expansão do Universo, a luz das estrelas longínquas sofre um desvio para o vermelho, que é maior quanto mais longe estão essas estrelas. Isto implica um enfraquecimento na intensidade de sua radiação, pelo que o princípio nº 3 de Olbers não está correto. Também sabemos que quanto mais longe estiver uma estrela, há mais tempo partiu de lá a luz, isto é, vemo-la como era há muito tempo. As estrelas mais longínquas formaram-se pouco depois do *Big Bang*, mas não podemos observar mais porque não há infinitas camadas de estrelas, ou seja, o princípio nº 1 de Olbers também é falso.

## Bibliografia

- Moreno, R. *Experimentos para todas las edades*. Ed. Rialp., Madrid. 2008.
- Moreno, R. *Taller de Astrofísica*. Cuadernos ApEA. Antares, Barcelona. 2007.
- Moreno, R. *Historia Breve del Universo*. Ed. Rialp., Madrid. 1998.
- Moreno, A, Moreno, R. *Taller de Astronomía*. Ediciones AKAL, Madrid. 1996.
- Riaza, E, Moreno, R. *Historia del comienzo: George Lemaître, padre del Big Bang*. Ediciones Encuentro, Madrid, 2010.
- Ros, R.M, *Experiments and exercises involving gravitational lenses*, Proceedings 1st ESO-EAAE Astronomy Summer School, Barcelona, 2007.
- Ros, R.M, *Gravitational lenses in th classroom*, Physics Education, 43, 5, 506, 514, Oxford, 2008.

## Fontes da Internet

- <http://www.dsi.uni-stuttgart.de>
- <http://georgeslemaitre.blogspot.com>
- <http://www-ra.phys.utas.edu.au/~jlovell/simlens>
- <http://leo.astronomy.cz/grlens/grl0.html>