

O PARADOXO DE OLBERS

Antonia Mujeriego Sauquillo

Nos últimos anos o interese polos temas astronómicos e polos problemas cosmolóxicos en xeral experimentou un pulo espectacular. Non é preciso buscar revistas especializadas para coñece-los últimos avances ou os intentos por desvela-las múltiples cuestións que se presentan ó intentar "comprender" o Universo, xa que practicamente tódolos xornais inclúen nas súas páxinas de ciencia ou sociedade, novas tales como o descubrimento do helio orixinado nos primeiros minutos do Universo e artigos onde se informa, por exemplo, de como o telescopio espacial Hubble, corrixida a súa "miopia", proporcionou imaxes do nacemento dunha estrela.

Todas estas noticias fálannos de científicos traballando con custosos instrumentos, mais non tódalas observacións precisan de refinados aparatos e sen embargo tamén son importantes. Unha delas deu lugar ó que na historia da cosmoxía se coñece como o paradoxo de Olbers. Mesmo se pode dicir que

por moitos anos desempeñou o papel dun verdadeiro test cosmolóxico.

O fenómeno ó que se refire o paradoxo é coñecido por todos e todos podemos observalo a cotío: pola noite o fondo do ceo é escuro. Isto é algo que todos sabemos e non nos resulta chamativo.

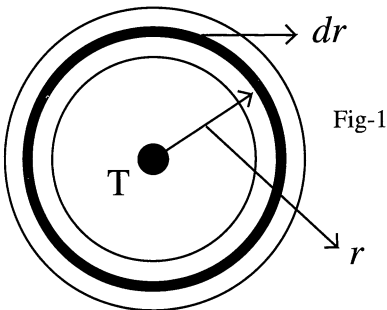
Non é en absoluto evidente, sen embargo, que o ceo nocturno deba ser escuro. Resulta difícil asegurar quen foi o primeiro en expoñe-la cuestión e en decatarse de que a resposta debía estar relacionada cunha importante propiedade do noso Universo. O certo é que no 1823 Wilhem Olbers, médico e astrónomo de Bremen, publicou un breve artigo e, dende entón, o razoamento que continúa o traballo e a súa conclusión denomínase paradoxo de Olbers.

Olbers, de acordo co modelo do Universo aceptado na súa época, intentou explicar por que o ceo nocturno é escuro. De xeito breve, a argumentación de Olbers foi a seguinte:

Suposicións de partida:

1. O espacio é infinito e obedece á xeometría euclidiana.
2. A densidade media de estrelas é constante a través do espacio e do tempo.
3. Tódalas estrelas teñen a mesma luminosidade (é dicir, a mesma taxa de emisión de enerxía luminosa) e esta non varía co tempo.
4. O Universo é infinitamente vello.
5. As leis coñecidas da física son aplicables ó Universo no seu conxunto.

Con estas suposicións, consideradas perfectamente naturais nos seus tempos, Olbers calculou a cantidade de luz que recibía a Terra procedente das estrelas. O devandito cálculo pode resumirse como segue: sexa n o número de estrelas por unidade de volume do Universo e L a luminosidade (enerxía que radia a estrela por unidade de tempo).



Consideremos un casquete esféri-

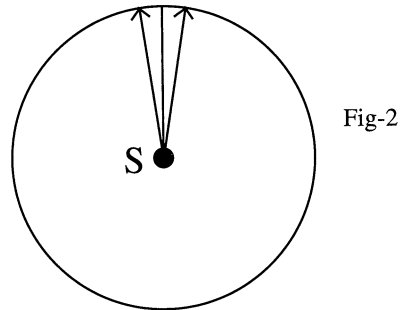
co de radio r e espesor dr con centro na Terra e tal $r \gg dr$.

O volume do casquete será $V=4\pi r^2 dr$ e o número de fontes luminosas que existen neste casquete vén dado por:

$$N=n \cdot V=4\pi r^2 dr$$

Se dende un punto da Terra miramos perpendicularmente o casquete esférico, ¿que cantidade de enerxía recibiremos por unidade de superficie?

O cálculo é doado: a enerxía emitida por unha fonte na unidade de tempo distribuiríase uniformemente sobre unha superficie de radio r , centrada na fonte e que pasa a través da Terra.



A superficie desta esfera é $4\pi r^2$, polo tanto a cantidade de enerxía por unidade de tempo que cruza a unidade de superficie esférica é

$$I = \frac{L}{4\pi r^2}$$

Esta mesma é a contribución de

cada unha das N fontes luminosas que existen no casquete. Polo tanto a enerxía luminosa total que recibe a Terra por unidade de superficie e por unidade de tempo, procedente das estrelas contidas no casquete será:

$$N \cdot I = 4\pi r^2 \cdot n dr \frac{L}{4\pi r^2} = nLdr$$

Se o Universo é infinito en extensión, estará formado por infinitos casquetes esféricos, tales que a superficie exterior dun deles cadre coa superficie interior do seguinte. A enerxía que recibe a Terra dunha capa non depende do radio da mesma, é dicir, tódalas capas contribúen por igual e, posto que o número de capas existentes no Universo é infinito, a enerxía total que recibe a Terra por unidade de tempo e por unidade de superficie será infinita, ou o que é o mesmo, o ceo debería de ser infinitamente brillante. Non é preciso que sexa moita a luminosidade dos obxectos do Universo, a súa vasteza fai que o ceo sexa infinitamente brillante, tanto se miramos o sol como se non.

O propio Olbers, sorprendido pola conclusión, intentou suavizala argumentando que dado que as estrelas non son fontes puntuais, senón que teñen dimensión finitas, a luz das estrelas lonxanas debería verse entorpecida polas restantes estrelas. Isto leva á conclusión de que en realidade o brillo do ceo debe ser igual ó brillo da superficie dunha estrela típica. Mais unha estrela típica é o Sol, polo tanto todo o ceo deberá brillar coma a superficie do Sol e en consecuencia a temperatura do

ceo visible sería de varios miles de graos.

É claro que algo debe estar equivocado porque, afortunadamente, tódolos días, antes ou despois, vemos que o Sol se pon e o ceo se escurece. Como a dedución parece correcta, todo apunta a que unha ou varias das suposicións de partida deben ser falsas. Pero as suposicións eran consistentes co modelo de Universo aceptado, polo que Olbers, convencido da súa validez, intentou resolver-lo paradoxo admitindo a existencia de materia interestelar. Esta materia, moi enrarecida, absorbería a luz procedente das estrelas lonxanas e impediría que nos queimásemos vivos.

A nosa experiencia sobre días anubrados pode facer que nos sintamos inclinados a aceptar esta idea. Mais realmente se o Universo estivese formado, dende tempo infinito, por infinitas estrelas e unha lene materia absorbente, dado que a enerxía non pode ser destruída, a temperatura da materia interestelar tería ido aumentando, lentamente, ata acadala mesma temperatura das estrelas e, en consecuencia, radiaría coma elas. Non parece, polo tanto, que esta nova suposición resolva o problema e resulta pois inevitable a revisión das suposicións orixinais de partida. Ou o que é o mesmo, o modelo do Universo ten que ser revisado.

¿Un Universo de estrelas?

No século XVII os obxectos astronómicos que formaban o Universo eran estrelas, tal e como supuxo Olbers.

Mais xa no 1864 J. Herschel publicou unha lista de 5.096 nebulosas¹ descubertas e catalogadas polo seu pai, F. W. Herschel, e por el mesmo ó longo de moitos anos de pacientes observacións. Para saber de que se trata, abonda agardar unha noite despexada e sen lúa e dirixir uns prismáticos ou un telescopio cara á constelación de Andrómeda. Alí apreciaremos unha pequena nube luminosa, que se denominou nebulosa de Andrómeda.

Durante tempo abondo estableceuse unha polémica, en ocasión máis que apaixonada, sobre a natureza destas manchas nebulosas de forma espiral ou elíptica. ¿Eran realmente nubes de gas ou, pola contra, tratábase de conxuntos de estrelas que non pertencían á Via Láctea, é dicir, de verdadeiras galaxias²?

No 1920 a cuestión estaba en punto morto. Nin os argumentos de Curtis, a favor da natureza galáctica das nebulosas espirais, nin os de Shapley, en contra desta interpretación, eran determinantes. Mais no 1924 Hubble escribiu a Shapley unha nota na que lle dicía: "interesárame saber que atopei unha cefeida³ na nebulosa de Andrómeda". Con isto a discusión rematará. Hubble mediu o período da cefeida e isto permi-

tiulle coñecer a súa distancia. O Universo agrandouse de súpeto.

Nos anos seguintes a tarefa consistiu en clasificar as nebulosas catalogadas, atendendo á súa natureza galáctica. ¡Así pois o Universo estaba formado por galaxias e as máis próximas a nós aparecen no ceo como nebulosas espirais!

¿Explica isto o paradoxo? É claro que non. Se nos razoamentos de Olbers substituímo-la palabra "estrelas" por "galaxias", o resultado é o mesmo. Mesmo pode pensarse que reforza a súa posición de que o Universo é infinito, porque agora estamos a falar de distancias enormes comparadas coas dimensións da nosa galaxia.

¿O espacio é euclidiano?

Olbers supuxo que o espacio era euclídeo, polo que se pode pensar que tal vez, se o espacio non o é, poida evitarse o paradoxo. Mais non é esta a solución, xa que sempre que se manteña a hipótese da homoxeneidade do espacio, este, aínda que de natureza non euclidiana, debe seguir sendo uniforme, polo que a superficie dunha esfera de radio r trazada ó redor dun punto calquera debe ser unha función de r , é dicir, $f(r)$ aínda

1. nebulosas: extensos obxectos astronómicos con aparencia de nube. Algunhas son galaxias e outras verdadeiras nubes de po e gas interiores á nosa galaxia.

2. Galaxias: grandes conxuntos de estrelas unidas gravitacionalmente, que poden conter ata 10^{12} masas solares. Adoitan clasificarse, segundo a súa forma, en espirais, espirais barradas ou irregulares.

3. Cefeidas: estrelas variables brillantes, que posúen unha relación definida entre a luminosidade absoluta, o período de variabilidade e a cor. Chámanse así pola estrela Cephei. Úsanse como indicadoras de distancias para as galaxias relativamente próximas.

que non sexa $4 \pi r^2$, e polo tanto a luz que provén das fontes luminosas contidas nunha capa verase reducida nun factor $f(r)$, pero continuará sendo **nLdr**, exactamente coma antes.

¿Existen movementos sistemáticos no Universo?

Unha das características atribuídas ó Universo na época de Olbers era a non existencia de movementos a gran escala. Pero pouco a pouco novas observacións ían debucando un Universo distinto.

Hubble, despois de poñer de manifesto a natureza galáctica da nebulosa de Andrómeda e calculado a súa distancia, proseguíu os seus traballos para determina-las distancias a outras galaxias. Pola súa banda, V. M. Slipher (1875 - 1969), no observatorio Lowell de Arizona, comezou o estudio dos espectros⁴ das galaxias, concluíndo que tódalas liñas estaban desprazadas cara a lonxitudes de onda longa correspondentes á rexión do espectro ocupada pola cor vermella.

A explicación deste desprazamento só podía proporcionala o efecto Doppler⁵, e isto significa que as galaxias se están a alonxar de nós. Non se debe deducir sen embargo, que a Terra ocupa un lugar privilexiado no Universo. Isto é algo que foi rexeitado na cosmoloxía por Copérnico. Así pois, se a interpretación é correcta, no Universo todo punto

se está a alonxar de calquera outro; polo tanto, sexa cal sexa o lugar desde o que observémo-los espectros das galaxias circundantes, verémo-las súas liñas desprazadas ó vermello.

Este descubrimento invalida outra das suposicións orixinais de Olbers. ¿Pero que significado ten isto en relación coa luminosidade do ceo nocturno? Se un obxecto luminoso se alonxa de nós a gran velocidade, a luz que observamos del semellará que provén dun corpo máis frío, é dicir, máis débil. ¿Abonda este debilitamento para escurece-lo ceo nocturno? E. H. Harrison demostrou de maneira sinxela que este efecto non debilita tanto a luz das galaxias como para explica-la escuridade do ceo.

¿O Universo é infinito?

No 1929 Hubble publicou un traballo co título "Unha relación entre a distancia e a velocidade radial das nebulosas extragalácticas". Nel, tras comparalas velocidades das galaxias (calculadas a partir do efecto Doppler) coas distancias ás mesmas (medidas a partir do estudio das súas estrelas cefeidas), estableceu o que hoxe coñecemos como lei de Hubble.: A velocidade coa que as galaxias se alonxa de nós é proporcional á súa distancia. O factor de proporcionalidade desta relación chámase desde entón constante de Hubble e anótase por H. A determinación da

4. Espectro: Distribución da enerxía de radiación electromagnética en función da lonxitude de onda ou da frecuencia.

5. Efecto Doppler: fenómeno en virtude do cal unha onda aumenta a súa frecuencia e, polo tanto, diminúe a súa lonxitude de onda, cando o foco emisor da mesma se achega ó observador. Ocorre o contrario, é dicir, diminúe a frecuencia e aumenta a lonxitude de onda, se o foco emisor se alonxa do observador.

devandita constante non é tarefa fácil e, de feito, non se coñece o seu valor exacto. Na actualidade admítese que o seu valor está comprendido entre **50 e 100 $\text{km.s}^{-1} \cdot \text{Mpc}$** .

Máis có valor da devandita constante, é interesante salientar unha implicación importante da lei de Hubble: a lei lévanos a considerar que o Universo non é infinito. En efecto, se as galaxias se están a alonxar unhas doutras, isto significa que nun tempo anterior todas elas deberon estar máis preto. Supoñendo que a velocidade coa que se separan permanecese constante, daquela, o tempo que todo par de galaxias precisou para chegar á súa separación actual é a distancia entre ámbalas dúas dividida pola súa velocidade relativa. Mais como esta velocidade é proporcional á súa separación, este tempo é precisamente a inversa da constante de Hubble. Polo tanto hai **$1/H$** segundos, entre dez e vinte mil millóns de anos, tódalas galaxias estaban xuntas e esta sería a idade do Universo. A verdadeira idade do Universo sería menor, xa que, presumiblemente, a velocidade das galaxias non se mantivo constante, senón que foi diminuindo debido á súa atracción gravitatoria mutua.

En síntese, como consecuencia da lei de Hubble, debemos abandonar outra das suposicións de partida nas argumentacións de Olbers.

¿Seguimos tendo paradoxo?

Un século despois de que Olbers dese a coñece-la argumentación que formulaba o paradoxo, a situación cambiara. O modelo de Universo era o dun enxame de galaxias en expansión. É con este modelo como se pode explicar, finalmente, por que o ceo nocturno é escuro.

En primeiro lugar, debemos pensar que cando ollámo-lo ceo estamos, de certo, ollando o pasado, xa que sendo a velocidade da luz finita, ó observa-la luz dunha estrela que se atope situada a un millón de anos luz⁶, teremos a imaxe de dita estrela tal como era hai un millón de anos.

En segundo lugar, os correntos ó vermello observados nos espectros das galaxias infórmanos de que o Universo se expande, o que leva directamente a pensar que no pasado os seus compoñentes deberon estar moito máis comprimidos. Como a temperatura dun fluído aumenta cando se comprime, debemos deducir que no pasado lonxano a materia do Universo debía estar máis quente. Retrocedendo ata os primeiros instantes, o Universo debía ser tan quente e denso que non poderían existir galaxias nin estrelas. Mesmo non poderían existir átomos. Nesa época o Universo semellaría unha "sopa" ardente de partículas e radiación. Para comprender a situación da radiación nestes primeiros instantes, debemos abandona-la imaxe clásica en termos de ondas e adopta-lo

6. Ano-luz: a distancia que percorre un raio de luz nun ano. Sendo a velocidade da luz de aproximadamente **$3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$** , 1 ano-luz equivale a 9,46 billones de quilómetros.

concepto cuántico, segundo o cal a radiación está constituída por partículas chamadas fotóns.

Con esta imaxe, un raio de luz consiste nun gran número de fotóns que se desprazan conxuntamente. É certo que os fotóns son unhas partículas un pouco peculiares, de masa cero e carga eléctrica cero, pero son realmente partículas e cada un deles posúe unha enerxía e un momento definidos e ata teñen espín.

Neste Universo denso e moi quente, a pesar da expansión, os fotóns non poderían percorrer grandes distancias sen interaccionar cos electróns. Un sistema destas características, no que o ritmo de absorción e dispersión das partículas individuais era moito maior cá velocidade de expansión cósmica, evolucionaría, lentamente, dun estado de equilibrio térmico perfecto a outro, o que significa que a súa temperatura sería sempre uniforme. Polo tanto, durante un certo tempo a temperatura do Universo foi uniforme e a radiación non puido fuxir.

Mais como consecuencia da expansión, o Universo foise arrefriando ata acadar unha temperatura o suficiente baixa como para permiti-la captura dos electróns libres polos núcleos. Nese momento os fotóns puideron quedar "libres", ou o que é o mesmo: o Universo fíxose transparente. A temperatura á que lle ocorreu isto debeu de ser de 3.000°K .

Supoñamos que non tivesen lugar o efecto de enroibamento e perda de enerxía de radiación. ¿Que veríamos ó mira-lo ceo? A nosa ollada atoparía a luz procedente das galaxias e, aínda máis lonxe, chegaríanos a luz dos cuásares⁷ Pero por moi grande que sexa o número de galaxias e cuásares este é finito, de xeito que non acadan tapa-la visión cara a fóra. A meirande distancia veriámola radiación que "fuxiu" cando o Universo se fixo transparente, é dicir, atoparíamos unha parede que brillaría cunha temperatura de 3.000°K .

Afortunadamente esta luz, a máis 'vella" do Universo, chéganos sumamente debilitada polos efectos de enroibamento, posto que a parede ardente se alonxa de nós cunha velocidade próxima á da luz (na actualidade os cosmólogos admiten ademais a existencia doutro tipo de desprazamento ó vermello de natureza distinta ó efecto Doppler, que chaman efecto cosmolóxico). Esta radiación chéganos agora en forma de ondas de radio, é dicir, para nós radia como o faría un corpo a unha temperatura de 3°K .

No 1965, A. Penzias e R. Wilson detectaron unha fronte de radiación procedente de todo o ceo a unha temperatura de $2,7$ graos por riba do cero absoluto. O seu descubrimento marcou un fito na historia da cosmología do século XX e recibiron por el o Nobel de Física no 1978. Non era para menos, ¡descubriran o eco do Big Bang!

7. Cuásar (quasar): obxecto extragaláctico compacto con aparencia estelar pero moito máis masivo e con emisión moi superior á das estrelas. Uns poucos cuásares emiten ondas de radio, aínda que as observacións indican que a cotío son emisores de raios X. Descoñécese a súa verdadeira natureza.

Despois disto, o paradoxo de Olbers xa non é tal, simplemente ocorre que, de noite, observámo-la expansión do Universo a simple vista.

¿Fin da contradicción?

Se efectivamente o Universo está en expansión, os razoamentos expostos anteriormente levan a pensar que se atopou a resposta ó por que o ceo nocturno é escuro.

Aínda que na actualidade a idea dun Universo en expansión goza de amplo consenso, durante anos abondo non foi aceptada por todos. Non é estrano porque, se pensamos un pouco, non podemos dicir que vexamos realmente as galaxias alonxándose de nós. O unico certo é que ó observa-los espectros das galaxias se comproba que tódalas súas liñas están desprazadas cara ó vermello. ¿Pero é realmente certo que os desprazamentos ó vermello teñen algo que ver con efectos Doppler e, en consecuencia, cunha expansión do Universo? Hai que responder afirmativamente.

A expansión do Universo é coherente coa teoría do Big Bang ou Gran Explosión. Pero non tódalas implicacións e preguntas a que dá lugar esta teoría poden explicarse neste momento; aínda que as novas observacións que se están a facer encaixan nesta. Por exemplo, unha das cuestións importantes que se presentan ó falar do Big Bang é explica-la aparición e formación das galaxias.

Os "mapas" do Universo confeccionados polos astrónomos amosan que as galaxias non se presentan distribuídas de xeito uniforme, senón que están dispostas irregularmente en acios e superacios con inmensos "baleiros" entre eles. Isto significa que a radiación de fondo debería presentar irregularidades das que xurdisen os acios de galaxias separados polos inmensos baleiros que vemos na actualidade.

En abril de 1991, os investigadores anunciaron que o satélite telescópico COBE detectou algunhas pequenas perturbacións na temperatura da radiación de fondo, que ata ese momento se amosara teimuda e irritantemente uniforme. Estas variacións representarían a orixe da estrutura actual do Universo.

Así pois, aínda que quedan moitas cuestións sen resolver e é máis ca probable que xurdan outras, pouco a pouco os datos veñen conforma-la teoría da expansión do Universo e, en consecuencia, desaparece o chamado paradoxo de Olbers.

Tal vez teñamos agora outro paradoxo: o de como as leis da física aplicadas ó Universo globalmente nos proporcionan un modelo de universo consistente, pero non sabemos se estas mesmas leis poden explicar algúns fenómenos locais, tales como a natureza dos chamados buratos negros e o instante cero do Universo.

BIBLIOGRAFÍA

- Kippenhahn, R.: *Cien mil millones de soles*, Biblioteca científica Salvat.
- Kippenhahn, R.: *Luz del confín del Universo*, Biblioteca científica Salvat.
- Bondi, H.: *Cosmología*, Editorial Labor.
- Disney M.: *El Universo oculto*, Editorial Gedisa, Colección Límites de la Ciencia.
- Weinberg, S.: *Los tres primeros minutos del universo*, Alianza Universidad.
- Guth, A., e outros: *Cosmología*, Libros de Investigación y Ciencia.