

ASTROFÍSICA E COSMOLOXÍA

*José M. Fernández de Labastida y del Olmo**
 Universidade de Santiago
 de Compostela

Nun balance de fin de século como o que se presenta neste artigo é natural comezar preguntándose cáles eran os coñecementos que se tiñan sobre o universo hai cen anos. A realidade é que daquela eran ben escasos comparados cos que manexamos hoxe en día. Nesa época a penas dispoñiamos dun coñecemento rudimentario da nosa galaxia e aínda non se sabía a resposta a preguntas tan básicas como, por exemplo, por qué as estrelas brillan. O coñecemento do universo era moi limitado: non existían nin as ferramentas para observalo nin a Física na que interpreta-las observacións. O século que agora dá cabo caracterizouse polo descubrimento de novas clases de obxectos a medida que os instrumentos para observa-lo universo foron evolucionando. Paralelamente, foron descubríndose os fundamentos da Física, o que permitiu o espectacular desenvolvemento da Astrofísica. Non esquezamos que o obxectivo desta disciplina é interpreta-las observacións astronómicas dos obxectos que poboan

o universo, como as estrelas e as galaxias, en termos de modelos físicos.

A Cosmoxía persegue os mesmos fins que a Astrofísica pero tratando o universo dunha forma unificada, como un todo. Ámbalas dúas forman parte da Astronomía, que se define como a ciencia que estudia a orixe, a evolución, a composición, a distribución e o movemento da materia maila radiación presente no universo. No século que agora termina experimentámola chamada terceira idade da Cosmoxía, froito do descubrimento da Teoría Xeral da Relatividade por Albert Einstein. Fican moi atrás a visión xeocéntrica do universo da primeira idade, culminada por Ptolomeo no século II, e a visión heliocéntrica de Copérnico no século XVI. Hoxe sabemos que vivimos nun universo que evoluciona arreo e que contén miles de millóns de galaxias dentro da esfera que somos quen de observar. Ademais, dispoñemos dun modelo, o do *big bang*, o da grande explosión, baseado non só na Teoría da Relatividade Xeral que

* Catedrático de Física Teórica.

describe a interacción gravitatoria, señón tamén nas teorías físicas correspondentes ó resto das interaccións fundamentais. Este modelo proporciona unha explicación cualitativa e cuantitativa da evolución do universo desde unha fracción de segundo despois do seu nacemento ata o presente, uns catorce mil millóns de anos máis tarde. Todo este progreso no noso coñecemento era impensable hai cen anos.

Neste artigo presentarase primeiramente un balance dos principais avances na Astrofísica; describirémos-las propiedades físicas da materia e a radiación que poboan o noso universo. A continuación, equipados con ese coñecemento, estudarase o modelo cosmolóxico estándar, o modelo do *big bang*, revisando os seus fundamentos e limitacións. Para finalizar, analizaranse algunhas das preguntas clave que deberán ser afrontadas no século que agora comeza.

1. OS INSTRUMENTOS

A Astrofísica diferénciase das demais ciencias experimentais en que nela non se poden preparar, modificar ou controla-los obxectos que estudia. Debido a isto depende profundamente do grao de desenvolvemento dos seus instrumentos de observación para medir aspectos dos sinais que nos chegan do espazo exterior. Estes sinais están constituídos fundamentalmente por radiación electromagnética. Só en contadas ocasións puidemos estudar

corpos extraterrestres nos nosos laboratorios; é o caso das rochas lunares e dos meteoritos ou rochas provenientes doutras zonas do sistema solar que caen na Terra. Nas últimas décadas tamén se estudaron sinais vidos do exterior, constituídos por neutrinos e por raios cósmicos, termo utilizado para as partículas de moi alta enerxía que teñen a súa orixe alén do sistema solar. Sen embargo, ata o momento, non é moita a información extraída do seu estudio. O noso coñecemento do universo débese fundamentalmente ás observacións baseadas na radiación electromagnética.

A radiación electromagnética procedente de fóra do noso planeta chéganos nun rango de enerxías que cobre gran parte do espectro electromagnético, desde ondas de radio con lonxitudes de onda de metros ata raios gamma con lonxitudes de onda de billonésimas de metro. A luz visible corresponde a unha pequena franxa deste amplo espectro que abrangue doce ordes de magnitude. Ata os anos trinta as nosas observacións eran puramente ópticas e polo tanto só se coñecían obxectos que emitían luz visible, como as estrelas, e obxectos sobre os que a luz visible se reflectía, como os planetas e os satélites. Nas últimas décadas o uso de novos instrumentos capaces de medir radiación electromagnética proveniente do espazo exterior noutras zonas do espectro permitiu mellorar de forma espectacular o noso coñecemento do universo.

A lonxitude de onda da radiación emitida por un corpo está relacionada coa súa temperatura. Os obxectos temperados emiten radiación infravermella (lonxitudes de onda de dez milésimas de metro) e os máis quentes, radiación de alta enerxía en forma de raios X o raios gamma. Un mesmo obxecto presenta un aspecto moi diferente dependendo da zona do espectro electromagnético no que se estea observando. Por exemplo, no rango do espectro visible, unha das maiores estruturas observadas no universo, un cúmulo de galaxias, aparece como un conxunto de miles de millóns de estrelas brillantes, cunha temperatura de aproximadamente 10.000 graos. Sen embargo, se esa estrutura é observada no rango do espectro correspondente ós raios X, o que se observa é un plasma intergaláctico a moi altas temperaturas: 10 millóns de graos. Por outra parte, se a observación se fai no infravermello, atópase po tépedo intergaláctico a temperaturas duns centos de graos. A información obtida nos distintos rangos constitúe un importante ingrediente para entender os fenómenos que teñen lugar nos variados obxectos que poboan o noso universo.

A Astrofísica necesita medi-la posición, a intensidade, a lonxitude de onda, a polarización e a variación no tempo dos sinais que nos chegan. Para iso utiliza unha variedade de instrumentos que se centran fundamentalmente en detectar os sinais de natureza electromagnética. Sen embargo, debido á presenza da atmosfera terres-

tre, só parte destes sinais chega á superficie da Terra. A maior parte do espectro electromagnético da radiación proveniente do espazo exterior non pode observarse desde a superficie terrestre debido a que a atmosfera é opaca ou moi pouco transparente fóra das rexións do espectro visible e de parte do de ondas de radio. A necesidade de obter información no rango máis amplo posible do espectro obrigou a colocar algúns destes instrumentos en órbita arredor da Terra.

Os instrumentos que se deseñan para formar imaxes de obxectos moi distantes denomínanse telescopios. Os primeiros foron os de tipo óptico, que proporcionan imaxes no rango do espectro visible. Nesta categoría están desde os sinxelos telescopios deseñados por Galileo no século XVII ata o moderno telescopio espacial Hubble. Os telescopios para formar imaxes no rango das ondas de radio, os radiotelescopios, comezaron a construírse nos anos trinta. Hoxe dispomos de avanzados radiotelescopios como o de Arecibo en Porto Rico e o Very Large Array (VLA) en Novo México. Existen tamén telescopios infravermellos, en xeral situados a grandes alturas para evitar que non todo o sinal infravermello chegado do exterior sexa absorbido pola atmosfera. Para explorar outras zonas do espectro electromagnético deseñáronse distintos tipos de telescopios que se colocaron en globos, naves espaciais e satélites artificiais. Gracias a eles dispoñemos na actualidade de

información no rango do ultravioleta, os raios X e os raios gamma.

O problema máis importante co que se enfrontan os telescopios é que a cantidade de enerxía que nos chega dunha determinada fonte é moi pequena. Por exemplo, a enerxía que recibimos dalgunha das estrelas máis brillantes durante os últimos mil anos é aproximadamente a mesma que se necesita para levantar este volume uns centímetros. Por iso os instrumentos de detección deben deseñarse de xeito que sexan sensibles ós sinais máis minúsculos. Os constituíntes elementais da radiación electromagnética son os fotóns. Moitos dos obxectos do noso universo producen emisións que supoñen a recepción duns poucos fotóns. Actualmente os telescopios contan con sistemas electrónicos que permiten grava-lo impacto de case tódolos fotóns que lles chegan. Isto, máis a colocación de telescopios no espazo exterior, resolveu en gran medida o problema relacionado coas baixas intensidades dos sinais que impactan nos nosos instrumentos de medida.

A interacción electromagnética recollida nun telescopio xera unha serie de datos que son recompilados en forma de espectro. Un espectro é unha gráfica na que se debuxa a intensidade do sinal recibido en relación coa súa lonxitude de onda nun determinado rango, que depende do tipo de telescopio. Nos telescopios ópticos, este rango é o do espectro visible e tipicamente as gráficas resultantes presentan as chamadas liñas espectrais. A presenza

destas liñas débese a que os átomos sofren transicións de enerxía que xeran a emisión e absorción de fotóns a lonxitudes de onda concretas. A cada átomo pode asociarse un conxunto de liñas espectrais que o identifica. Por iso, a partir das gráficas xeradas por un telescopio óptico, podemos coñecer-la natureza da fonte que orixinou o sinal recibido. Por exemplo, gracias a estes estudos, sábese que as estrelas conteñen abundantes cantidades de hidróxeno e helio. Os sinais recibidos constitúen unha firma do estado dun obxecto pois non só permiten obter información sobre os seus constituíntes, senón tamén sobre a súa distribución a partir das intensidades correspondentes a cada liña espectral. Calquera modelo que se formule dun obxecto debe conducir a un espectro de liñas espectrais como os observados. Na actualidade dispoñemos de modelos que fan predicións acordes coas observacións.

2. OS OBXECTOS

A Astrofísica non se limita a realizar unha descrición do observado; trata de entender-lo observado de maneira que usando as leis da Física é posible inferir de qué están feitos os obxectos e cómo evolucionan co transcurso do tempo. Isto faino propoñendo modelos que a miúdo conducen á realización de novas observacións para confirmalos. Se retomámo-lo exemplo do cúmulo de galaxias discutido anteriormente, as medidas realizadas indican que as galaxias se moven a altas

velocidades. Un modelo que describa a evolución do cúmulo deberá explicar se a forza gravitatoria entre galaxias é suficiente para mantelas xuntas, mesmo movéndose a velocidades tan extremas. Ata hoxe non se coñece ningún modelo satisfactorio para explicar este fenómeno, a non ser que á parte das galaxias se introduza no sistema unha enorme cantidade de materia adicional. Esta materia, comunmente chamada materia escura, ha supoñe-lo 90 % da materia do cúmulo para dispoñer dun modelo consistente. Nas zonas do espectro electromagnético observadas non hai rastro desta materia escura. Trátase dun dos problemas abertos máis interesantes da Astrofísica. A solución pode ser simplemente que existan obxectos similares ós planetas vagando entre as galaxias en enormes cantidades, ou, pola contra, que descoñezámo-la existencia de novos tipos de materia presentes no noso universo. As especulacións relativas a esta segunda posibilidade teñen sido numerosas nas últimas décadas.

Os obxectos que compoñen o universo son variados en formas e tamaños. Sen embargo, todos, desde os máis pequenos ós máis grandes, están fortemente dominados pola forza da gravidade. Na evolución destes obxectos a gravidade ten un papel fundamental impondo unha tendencia universal que o obriga a facerse cada vez máis pequeno. A súa vida consiste basicamente nunha continua loita por vencer esta tendencia, a miúdo usando as outras interaccións fundamentais. Se

nalgún momento da vida dun obxecto esa tendencia universal debida á gravidade non pode resistirse, este colapso indefinidamente e convértese nun burato negro. Un obxecto desta natureza fórmase cando se fai tan pequeno en relación á súa masa que a gravidade no interior dunha esfera centrada nel é tan grande que nada pode escapar, nin sequera a luz.

A forma en que os distintos obxectos do universo vencen a tendencia universal ó colapso propiciada pola gravidade é variada. A forza debida á gravidade nun obxecto é tanto máis grande canto maior é a masa do obxecto. Diferentes tipos de forzas de presión contrarrestan nos planetas e nas estrelas a forza gravitatoria orixinando ciclos evolutivos. Estes comprenden desde a vida tranquila dos planetas inactivos ata as violentas conductas das estrelas moi masivas. No caso dos cúmulos de galaxias, a forma en que se compensa a tendencia universal da gravidade é diferente. Aquí os constituíntes interaccionan só gravitatoriamente e o xeito de evita-lo colapso débese a que estes están en órbita.

O SISTEMA SOLAR

Despois destas consideracións xerais sobre os obxectos que poboa o universo, principiámo-la súa descrición. Por volta do noso planeta encontrámonos co sistema solar. Este consta dunha estrela, o Sol, os planetas e outros obxectos como satélites, asteroides e cometas. Entre os planetas, habitamos un con características moi espe-

ciais que permitiron a existencia da vida.

Coma no caso de calquera outro obxecto do universo, a evolución dun planeta está dominada fundamentalmente pola gravidade. Os planetas son corpos pequenos abondo como para que a forza da gravidade que tende a comprimilos sexa tan feble que non se poida producir no seu interior a fusión nuclear do hidróxeno en helio, fenómeno omnipresente na maior parte da vida dunha estrela. Igual có resto dos obxectos do universo, os planetas formáronse por acrecencia e a súa evolución depende fundamentalmente do seu tamaño. Os planetas pequenos como Mercurio ou Plutón son corpos que levan inactivos moito tempo. Debido á súa masa tan pequena, a enerxía térmica producida despois do colapso gravitacional que orixinou a súa formación foi moi pequena. Por outra parte, a súa capa rochosa externa é tan fina que a pouca enerxía térmica que houbo xacando foi expulsada axiña. En xeral, as superficies destes planetas, unha vez formadas, permanecen inalteradas para sempre agás cando algún obxecto colisiona con eles.

Amais dos planetas pequenos, satélites como a Lúa, e asteroides como os que poboan o cinto existente entre Marte e Xúpiter, levaron unha vida igualmente monótona. As condicións que agora existen nestes obxectos son practicamente as mesmas cás presentes na súa formación hai 4500 millóns de anos. Constitúen polo tanto un interesante conxunto de fósiles cósmicos.

Existen outros obxectos pequenos no noso sistema solar que, a pesar de selo, tiveron unha evolución menos monótona cós que acabamos de describir. Cando un corpo pequeno se atopa preto doutro meirande, a forza gravitatoria exercida polo grande sobre o pequeno produce neste unha serie de deformacións, de natureza similar ás mareas, que determinan totalmente a súa evolución. Os cometas son corpos que sofren este fenómeno. Estes obxectos son pequenos anacos de xeo (duns dez quilómetros de lonxitude) que ó achegárense ó Sol segregan po e gas. Outro exemplo de corpos sometidos a un fenómeno similar son os aneis dos planetas de gran tamaño, como Xúpiter e Saturno. A enorme masa destes planetas orixina deformacións nos satélites que a rodean producindo a súa destrución. O resultado é a formación dunha gran cantidade de pequenos corpos que están en órbitas arredor dos planetas e que vistos desde lonxe semellan formar un anel.

Os planetas de tamaño medio como Marte, Venus ou a Terra teñen unha capa externa o suficientemente mesta como para que a enerxía térmica interna sexa expedita lentamente, durante unha gran fracción do tempo transcorrido desde a súa formación. A calor que flúe desde o interior produce fenómenos como os volcáns, os movementos tectónicos e a exección de gases que xeran atmosferas.

Os outros catro planetas do noso sistema solar, os de gran tamaño, Xúpiter, Saturno, Urano e Neptuno,

presentan propiedades moi distintas ás dos anteriores. Son fundamentalmente gasosos, formados por hidróxeno e helio, cunha composición máis parecida á do Sol ca á da Terra. Todos eles teñen un núcleo rochoso. O seu aspecto exterior é moi cambiante e é nestes planetas onde se producen os fenómenos máis virulentos do noso sistema solar, tirante o Sol.

De tódolos obxectos do noso sistema solar, o Sol ten un papel crucial. É o obxecto máis masivo (máis de 300.000 veces a masa da Terra ou unhas 1000 veces a de Xúpiter), arredor do cal están en órbita os planetas. Trátase dunha estrela de tamaño medio da que temos moita información debido á súa proximidade. As súas características son comúns ás dos obxectos que a continuación se describen.

AS ESTRELAS

O interior dun obxecto cunha masa superior ó oito por cento da do Sol (unhas oitenta veces a masa de Xúpiter) quece tanto que se producen procesos de fusión nuclear no seu interior durante un longo período de tempo. Os obxectos que experimentan este fenómeno denomínanse estrelas. Ó contrario cós planetas, que só reflicten parte da luz que reciben, as estrelas, froito do proceso de fusión nuclear presente no seu interior, emiten luz propia e brillan. Como ocorre en xeral con tódolos obxectos que poboan o universo, nunha estrela compiten dúas forzas, a da gravidade e a nuclear. Esta última xera unha presión interna que contra-

resta o colapso gravitatorio. Tal proceso permanece en equilibrio durante un longo período de tempo, miles de millóns de anos, emitindo pola súa vez enerxía ó espazo interestelar. Esa enerxía é a que observamos en forma de radiación electromagnética e, no caso do Sol, é a responsable da nosa existencia. Na vida dunha estrela chega un momento en que as fontes xeradoras dos procesos de fusión no seu interior se esgotan e a forza gravitatoria vence e produce o seu colapso. Se a masa final da estrela é pequena, esta termina sendo unha anana branca ou unha estrela de neutróns. Se, pola contra, a masa é moi grande, a estrela sofre colapsos indefinidamente ata se converter nun burato negro.

Incluso cando son observadas cos telescopios máis potentes, as estrelas aparecen ante nós coma puntos de luz; mesmo así é posible obter bastante información sobre elas. Unha das propiedades de uso máis común é o brillo. Tomándoo como referencia xerouse a noción de magnitude dunha estrela: as estrelas máis brillantes son as de primeira magnitude. A noción clásica de magnitude foi evolucionando, e hoxe en día responde a unha cantidade definida con precisión en termos do fluxo de enerxía nun determinado rango de frecuencias proveniente da estrela que atravesa a superficie dun telescopio.

Outras propiedades importantes das estrelas son a distancia á que se atopan da Terra, a temperatura, a luminosidade, a masa e o radio. Para as estrelas máis próximas, a distancia mídese

por triangulación, usando o diámetro da órbita terrestre como lonxitude básica e medindo o desprazamento da posición dunha estrela cando se observa desde dous puntos opostos da órbita. A distancia a estrelas máis afastadas obtense a partir das estrelas chamadas Cefeidas. Para describir cómo se mide a partir delas é preciso falar primeiro doutras propiedades como a temperatura e a luminosidade das estrelas.

A temperatura dunha estrela obtense a partir de medidas do seu espectro e da súa cor, axustándoas a modelos que describen o estado das estrelas. A temperatura utilízase para clasificar as estrelas nunha secuencia espectral; cada clase denótase por letras concretas do alfabeto. Percorrendo o espectro desde as máis quentes ás máis frías estas son: O, B, A, F, G, K e M. Ás veces estas letras veñen precedidas doutras cando se trata dunha clasificación dentro dun determinado tipo de estrelas; por exemplo, se se trata de ananas brancas, cada letra viría precedida dun D. Tamén se utilizan subíndices numéricos para subdividirlas clases: os menores corresponden ás maiores temperaturas.

As propiedades máis significativas na vida dunha estrela son a masa, a luminosidade e o radio. A masa é difícil de medir; só en situacións nas que unha estrela está en órbita arrededor doutra é posible determinala súa masa utilizando a terceira lei de Kepler. Esta lei relaciona o período e o radio da órbita coa masa do sistema. A luminosidade é a potencia de emisión total da

estrela e determínase a partir do fluxo de enerxía que esta emite e da distancia; se f é o fluxo e d a distancia, a luminosidade L toma a forma: $L = 4\pi d^2 f$. Finalmente, o radio mídese a partir da temperatura e a luminosidade, usando a relación termodinámica que relaciona a emisividade e dun corpo negro coa súa temperatura T , $e = \sigma T^4$, onde σ é a constante de Stefan-Boltzman. Tendo en conta que a luminosidade é e multiplicado pola área da superficie da estrela, $4\pi R^2$, sendo R o seu radio, obtense para o cadrado deste, $R^2 = L / 4\pi \sigma T^4$.

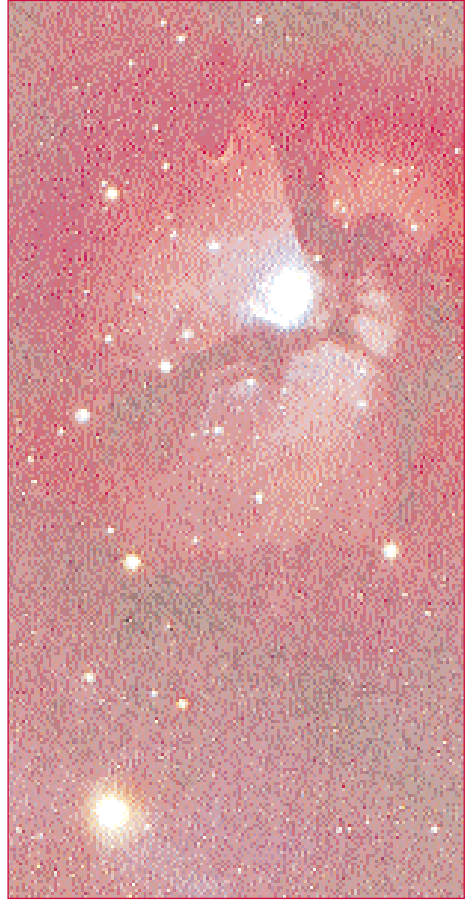
As medidas que normalmente se efectúan dunha estrela son o fluxo, a distancia e a temperatura; a partir delas obtense —mediante as relacións anteriores— a luminosidade e o radio. Sen embargo, en moitas ocasións hai que proceder de forma diferente. Por exemplo, o procedemento baseado na triangulación para medir distancias só é factible para estrelas próximas. A distancia a estrelas máis afastadas obtense partindo da medida do fluxo f . O procedemento neste caso consiste en localizar unha estrela Cefeida na zona onde se quere medi-la distancia. Estas estrelas son variables e o seu comportamento axústase a unha relación sinxela entre o seu período de variación e a súa luminosidade; medindo este período obtense a luminosidade que permite deducir-la distancia a partir da medida do fluxo e a relación considerada no parágrafo anterior, $L = 4\pi d^2 f$. Unha Cefeida é unha útil vara de medir para determinar distancias no universo.

Para obter a distancia á que está unha galaxia remota basta atopar nela unha Cefeida e medir o seu período e brillo.

Unha vez descritas as propiedades básicas que observamos das estrelas, estamos en condicións de analizar a súa evolución. As estrelas fórmanse cando as nubes de gases interestelares resultan inestables e sofren un colapso gravitacional. Os detalles do proceso que orixina o nacemento dunha estrela non se coñecen ben porque teñen lugar no interior dunha nube de gas que non emite luz. A información de que dispoñemos conseguiuase basicamente a partir da radioastronomía. Téñense formulado varios mecanismos para explicar cal é a orixe da inestabilidade que causa o colapso gravitacional. Unha das propostas sostén que as inestabilidades se deben ás ondas de choque que produce unha supernova achegada ao medio interestelar. As supernovas son estrelas próximas ó seu estadio final que sofren unha enorme explosión cando empeza a extinguirse o proceso interno de fusión.

O modelo máis asentado da formación do sistema solar baséase no colapso dunha nube de gas que andaba rotando, de xeito que parte dela non se incorporou ó Sol senón que formou un disco ó seu redor. O material deste disco condensouse en materia sólida. Estes sólidos colisionaron entre eles debido á forza da gravidade, e froito dunha continua acrecencia formáronse os planetas e os satélites. Os planetas no interior do sistema solar están for-

mados fundamentalmente de material rochoso debido a que a parte interior do disco era a que estaba máis quente.



As estrelas fórmanse cando inmensas nubes de gas colapsan baixo a súa propia gravidade.

Unha vez que unha estrela completou a fase de colapso gravitacional e o seu interior quece ata unha temperatura superior ós catro millóns de graos,

as reaccións de fusión comezan. Estas forman unha cadea na que catro protóns forman un núcleo de helio emitindo dúas partículas cargadas positivamente: dous positróns. A cadea de reaccións é exotérmica, e proporciona a calor suficiente como para manter unha estrela como o Sol no seu estado actual durante uns 10.000 millóns de anos. As estrelas máis masivas queiman o seu combustible nuclear moito máis de prása e teñen unha vida máis curta. O desenvolvemento da Física nuclear permitiu construír modelos que describen o proceso que se produce no interior da estrela e cómo parte da súa enerxía é transferida ó espacio exterior. Estes modelos predín a temperatura, a luminosidade e o tamaño para unha estrela dunha determinada masa. Os resultados teóricos concordan de forma moi satisfactoria coas observacións.

A fase da vida dunha estrela na que queima de forma regular o seu combustible nuclear é coñecida como a fase da secuencia principal. A orixe desta denominación radica na situación que as estrelas ocupan durante esta fase no diagrama de Hertzsprung-Russell. Neste diagrama a ordenada é a luminosidade, que medra cara a arriba; a abcisa é a temperatura, que decrece cara á dereita. As estrelas que se atopan na fase mencionada distribúense ó longo dunha franxa característica coñecida como a secuencia principal. Cando unha estrela comeza a ter unha idade avanzada abandona esta franxa e

sitúase noutras zonas características do diagrama.

AS XIGANTES VERMELLAS

A maioría das estrelas do universo teñen aproximadamente o mesmo radio. Este obtense a partir da lei de radiación do corpo negro, como xa indicamos, unha vez medidas a luminosidade e maila temperatura. En xeral, as estrelas máis luminosas son as de máis alta temperatura. Existen sen embargo excepcións a esta regra; de feito, algunhas poden observarse a simple vista. Varias das estrelas máis brillantes do ceo nocturno son claramente vermellas e moi luminosas. A cor avermellada implica baixa temperatura e, polo tanto, de acordo coa regra xeral, deberían ser pouco luminosas. Este comportamento distinto débese a que se trata de estrelas en idade avanzada que xa abandonaron a secuencia principal. Os seus radios son da orde de varios centos de veces o radio do Sol. Por esta característica, e pola súa cor, estas estrelas denomínanse xigantes vermellas. O seu tamaño é tan grande que se o centro dunha delas estivese localizado no centro do Sol, a Terra estaría no seu interior.

Os modelos físicos que explican a evolución das estrelas predín un comportamento como o observado. Unha estrela permanece na secuencia principal ata que esgota o seu combustible nuclear. Cando deixan de producirse procesos de fusión nuclear no seu interior, a zona central da estrela contráese e faise moi densa. A estrela deixa de ser

homoxénea e, debido a que o peso das moléculas no interior é maior có das do exterior, prodúcese un gradiente de presión que expulsa unha enorme capa de hidróxeno para fóra. O tamaño da estrela medra considerablemente e as capas externas arrefríanse. A estrela resultante corresponde a unha luminosidade maior cá que tiña, pero cunha temperatura inferior.

As xigantes vermellas teñen unha vida bastante efémera. Nestas estrelas seguen a producirse reaccións de fusión do hidróxeno nunha capa que rodea o núcleo central. Este núcleo está formado fundamentalmente de helio e nel prodúcense reaccións nucleares que involucran elementos máis pesados. Tres núcleos de helio fúsiónanse para producir un núcleo de carbono e este, pola súa vez, trala captura de núcleos de helio adicionais, produce elementos como o osíxeno e o ferro. O ferro é o elemento do sistema periódico cun núcleo mellor ligado; en tódalas reaccións de fusión nas que participa, os elementos resultantes son máis pesados có de partida e entón é preciso subministrar enerxía para que se produzan. Existen procesos de fusión exotérmicos para elementos máis lixeiros có ferro pero todos son endotérmicos para os máis pesados. Neste último caso só a fisión pode producir enerxía. A fisión, ó contrario que a fusión, é un proceso no que un núcleo se descompón en núcleos máis lixeiros. A fisión é a responsable dos procesos que ocorren na explosión dunha bomba atómica ou na xeración de enerxía dun reactor

nuclear. Por outra parte, a fusión é a responsable da bomba H ou de hidróxeno, baseada no mesmo proceso nuclear que se produce no interior das estrelas.

Fixemos unha descrición das estrelas considerándoas como obxectos illados no medio interestelar. Pero a miúdo forman os chamados sistemas binarios nos que unha estrela está en órbita respecto a outra, de forma semellante a como os planetas do sistema solar están en órbita arredor do Sol. Cando as estrelas se atopan moi preto, a máis masiva delas, e que polo tanto evoluciona máis de présa, non se converte nunha xigante vermella —segundo o proceso descrito— porque non hai espazo para a súa enorme capa externa. No canto de engulir a estrela acompañante, o que se produce é un continuo depósito de masa nela. O intercambio de masa prolóngase polo resto da vida combinada das estrelas, orixinando fenómenos moi enerxéticos e explosivos nos estadios finais.

AS ANANAS BRANCAS

Logo duns cantos centos de millóns de anos, os procesos de fusión nuclear presentes nunha xigante vermella tamén se esgotan e a estrela sofre un novo colapso gravitacional. Neste colapso a estrela faise tan densa que o seu interior se poboa da denominada materia dexenerada. Un dos principios fundamentais da Mecánica cuántica, o principio de incerteza, implica que as posicións das partículas non poden coñecerse con precisión. Só é posible

determina-la rexión do espacio que poden ocupar. É coma se existise un movemento intrínseco de maneira que pode considerarse que as partículas posúen unha presión propia. Así mesmo, o principio de exclusión de Pauli, tamén de natureza cuántica, limita o número de electróns que poden estar presentes nun determinado nivel atómico (para máis detalles, consúltese o artigo "Mecánica cuántica", de J. Sánchez Guillén neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). A densidades moi altas supérase un límite a partir do cal a materia posúe unha presión de natureza puramente cuántica. Este tipo de presión, denominada presión de dexeneración, non depende da temperatura e, aínda que presente, é desprezable a densidades ordinarias. Sen embargo, cando a densidade é moi alta, a presión de dexeneración faise dominante. As primeiras partículas que sofren o efecto desta presión son os electróns, resistíndose a ser comprimidos polo colapso gravitatorio. Cando o núcleo dunha estrela chega a un estado no que este é contrarrestado pola presión de dexeneración debida ós electróns, a estrela convértese nunha anana branca. Este nome débese a dúas propiedades. No colapso que se orixina a estrela sofre unha notable redución de tamaño. Unha estrela cunha masa coma a do Sol reduce o seu tamaño unhas 1000 veces. As ananas brancas son brancas porque inicialmente están moi quentes debido á enorme compresión; despois dese estado inicial arrefrían lentamente e logo duns miles de millóns de anos apáganse.

Permanecen frías eternamente sopor-tando unha densidade de máis de dez toneladas por centímetro cúbico.

AS ESTRELAS DE NEUTRÓNS

Non tódalas estrelas terminan converténdose en ananas brancas; só as máis lixeiras, aquelas que no seu estado inicial tiñan unha masa inferior a oito veces a masa do Sol, evolucionan da forma descrita. As estrelas máis masivas chegan á súa fase final cunha masa superior ó chamado límite de Chandrasekhar (1,4 veces a masa do Sol) e o colapso gravitacional correspondente condúceas a un estado distinto ó dunha anana branca. Neste tipo de estrelas a forza gravitacional resulta tan grande que non pode ser contrarrestada pola presión de dexeneración debida ós electróns. A estrela colapsa ata alcanzar unhas densidades tan altas que os electróns e os protóns se combinan para formaren neutróns. Estes neutróns forman pola súa vez materia dexenerada, orixinando unha presión abunda para contrarresta-la forza gravitacional. Isto ocorre cando a masa da estrela no seu estado final, aínda que elevada, non supera tres veces a masa do Sol. O produto deste proceso é a creación dunha estrela de neutróns. As estrelas de neutróns son moi densas, teñen un tamaño moi reducido, pode ser tan pequeno coma o da illa de Sálvora, aínda que conteñan unha masa superior á do Sol.

No colapso gravitatorio que orixina unha estrela de neutróns emítese de forma brusca unha enorme cantidade

de enerxía en forma de raios X, raios gamma e neutrinos. Esta emisión é a responsable de que a capa externa da estrela, enriquecida pola nucleosíntese previa, explote de forma violenta nunha supernova. Neste proceso expúlsanse elementos pesados ó medio interestelar. O remanente despois da explosión é un núcleo atómico xigante formado por neutróns que se fai invisible nun curto período de tempo e que acadada densidades da orde dos centos de millóns de toneladas por centímetro cúbico. Nunha galaxia como a nosa estímase que se produce unha explosión correspondente a unha supernova cada trinta anos. Así e todo, non sempre é posible observala porque o po interestelar a miúdo o impide. En 1987 produciuse a observación dunha supernova na Gran Nube de Magallanes, unha galaxia irregular satélite da nosa, que moitos astrónomos catalogaron como a observación máis espectacular desde a invención do telescopio. O seu estudio supuxo un notable avance no noso coñecemento sobre as propiedades das supernovas.

As estrelas de neutróns foron descubertas debido a observacións astronómicas de raios X, raios gamma e ondas de radio. Neste último contexto descubríronse os púlsares, obxectos emisores de pulsos compostos por ondas de radio de forma regular. O período destes pulsos é moi estable e, en xeral, de segundos. Un dos púlsares máis famosos é o da nebulosa do Cangrexo que nos chega unhas trinta veces por segundo. As observacións no

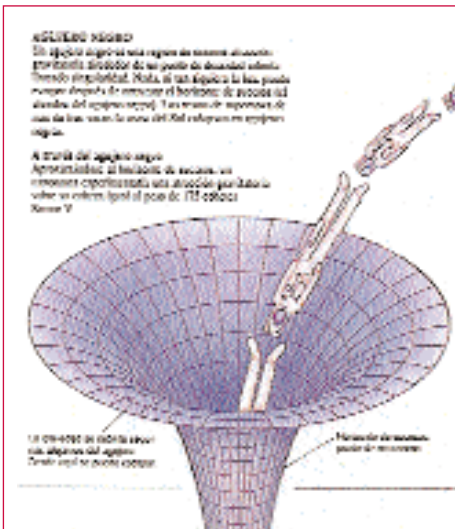
decrecemento desta frecuencia suxiren que a súa orixe tivo lugar hai novecentos anos. Probablemente a orixe deste púlsar corresponde á supernova observada polos astrónomos chineses no ano 1054. Observouse que os pulsos provenientes dos púlsares tamén conteñen raios gamma e raios X.

Os púlsares foron identificados como estrelas de neutróns en rotación, formadas despois da explosión correspondente a unha supernova. Para que un obxecto rote coa frecuencia que o fai un púlsar este ha ser moi compacto. O pulso de radiación electromagnética que emite débese á emisión producida por partículas que se moven a velocidades relativistas no enorme campo magnético producido pola estrela. O pulso varre unha zona do espacio de forma similar a como o fai a luz do faro da illa de Sálvora. Debido á dirección da emisión, non sempre se observa o pulso proveniente dun púlsar, por iso existen remanentes de explosións debidas a supernovas das cales non se identificou o púlsar correspondente.

OS BURATOS NEGROS

As estrelas cunha masa inicial superior a cincuenta veces a masa do Sol chegan á súa fase final con masas que superan o límite das tres masas solares correspondente ás estrelas de neutróns. Cando unha estrela chega á súa etapa derradeira cunha masa superior a este límite, o seu núcleo colapsa indefinidamente e créase un burato negro. Os buratos negros foron propostos no contexto da Teoría Xeral da

Relatividade, en 1916, e identificados por primeira vez en 1970. Os buratos negros son difíciles de observar porque o campo gravitacional que xeran é tan intenso que a radiación electromagnética non pode escapar del. Isto orixinou que a busca de buratos negros sexa un importante campo de investigación. Aínda que a luz non pode escapar dun burato negro, este pode formar parte dun sistema binario de estrelas, absorbindo materia da súa estrela compañeira. Esta materia, antes de ser atrapada, quece e xira derredor do burato negro emitindo enormes cantidades de raios X. Ata o momento téñense observado varios sistemas binarios que posúen estas características. Un deles é Cygnus X-1 que, á parte de ser unha intensa fonte de emisión de raios X, estimouse que a súa masa é oito veces



Simil xeométrico dun burato negro. (Tomado de *Quest* Edit. Rialp).

a masa do Sol. A masa determínase a partir do período e das variacións na luminosidade da estrela que a acompaña.

A masa do burato negro está concentrada nunha rexión moi pequena do espacio e exerce unha forte atracción gravitacional sobre as partículas que andan preto. É tan forte que a velocidade de escape por volta del é superior á da luz e polo tanto ningunha partícula situada no interior desa zona pode escapar á súa atracción. A distancia ó centro do burato negro á cal a velocidade de escape é a velocidade da luz coñécese como o radio do burato negro, e a superficie esférica correspondente como o horizonte. O radio depende da masa do burato negro e pode ser moi pequeno; para un burato negro de masa igual á do Sol, o radio é duns tres quilómetros. A estrutura do interior do burato negro é descoñecida. Se só utilizámo-la Teoría Xeral da Relatividade, trátase dun punto singular de densidade infinita. Sen embargo, non se pode confiar totalmente nesta teoría cando se describen situacións con densidades tan elevadas como as que teñen lugar nesa situación. O feito mesmo de que apareza unha singularidade é unha manifestación de que a teoría é incompleta. Cómpre dispoñer dunha teoría da interacción gravitatoria que teña en conta os efectos cuánticos para poder ter unha descrición máis realista do interior destes obxectos.

Nos anos setenta fixéronse progresos notables no estudio dos aspectos

tos cuánticos dos buratos negros. Os traballos de Yakov B. Zel'dovich e Stephen Hawking conduciron a predicir que os buratos negros sofren un proceso de evaporación. Estes primeiros estudos cuánticos indican que o burato negro pode non ser tan negro coma se pensaba. O fenómeno de evaporación prodúcese debido á emisión dun tipo de radiación comunmente coñecido hoxe como a radiación de Hawking. Para explicar en qué consiste, comecemos lembrando outra das consecuencias do principio de incerteza. Segundo este principio mecánico-cuántico, é posible viola-la lei de conservación da enerxía, sempre que se faga en espazos de tempo moi curtos. O universo é quen de producir masa e enerxía pero só se estas desaparecen axiña. Noutras palabras, poden darse fluctuacións do baleiro de xeito que se creen parellas de partículas e antipartículas que despois dun breve período de tempo se aniquilen. Cando unha destas fluctuacións ten lugar preto do horizonte dun burato negro pode ocorrer que unha das partículas caia no seu interior e a outra escape; a que escapa leva así unha enerxía neta do burato negro e un observador no exterior interpreta que este está emitindo partículas. Este fenómeno ocorre seguido e o resultado é a emisión dun fluxo de partículas: a radiación de Hawking.

A enerxía que se emite na radiación de Hawking fai que o burato negro vaia perdendo masa. O ritmo ó que se emite esta radiación é tanto máis grande canto menor é a masa do bura-

to negro. Co transcurso do tempo o burato negro radia cada vez con máis intensidade e mingua cada vez máis rápido. Describi-lo que ocorre nos procesos finais da evaporación é entrar aínda máis no terreo do especulativo. Non se descarta que simplemente se evapore totalmente e, polo tanto, o burato negro desapareza. Téñense realizado estimacións sobre o tempo que tardaría un burato negro en evaporarse. Para un que teña aproximadamente o dobre de masa que o Sol, a predicción é duns 10^{70} anos (un un seguido de setenta ceros), enorme comparada coa idade do universo (tan só da orde de 10^{10} anos). Esta cifra, unida ó feito de que ademais nas primeiras épocas a emisión de radiación de Hawking é a máis débil, implica que o efecto é irrelevante desde o punto de vista da Astrofísica. A finais dos anos setenta apuntouse a posible existencia de buratos negros primordiais. Estes formaríanse no *big bang*, con masas pequenas comparadas coa do Sol, que se terían evaporado completamente na actualidade. Estes obxectos, de existiren, terían deixado unha pegada en termos de radiación gamma que non se observou ata hoxe. Desde un punto de vista experimental pódese afirmar que non se ten evidencia da evaporación de ningún tipo de burato negro.

A VÍA LÁCTEA

As estrelas que poboan o universo aparecen agrupadas de maneira que forman estruturas máis extensas. Estas estruturas clasifícanse en

cúmulos de estrelas, galaxias, cúmulos de galaxias e cuásares. O Sol forma parte da galaxia denominada Vía Láctea, que ten unha cantidade de masa visible da orde de 100.000 millóns de veces a masa da dita estrela. A evolución destas estruturas está regulada pola interacción gravitatoria. Dentro dunha galaxia, as estrelas aparecen a miúdo agrupadas en cúmulos de estrelas. Un exemplo que quizais resulte familiar é o cúmulo das Pleiades, sete das cales poden observarse a simple vista nas noites claras do outono cando se elevan no leste despois do solpor. Estas sete son parte dun cúmulo dunhas cen estrelas que se descubren cando se mira cun telescopio. Nos cúmulos como o das Pleiades, un conxunto de estrelas nacen xuntas e seguen a mesma órbita arredor da galaxia á que pertencen durante uns cantos centos de millóns de anos, ata que forzas similares ás das mareas as arredan. Na nosa galaxia existen cúmulos de estrelas moito maiores, con decenas de miles de estrelas, que están en órbita lonxe do plano que forma a galaxia. Nesas rexións as forzas separadoras son máis febles e eses cúmulos manteñen a súa estrutura durante períodos de tempo moito máis longos.

A Vía Láctea é unha galaxia de forma espiral, co Sol situado nun dos seus brazos, aproximadamente a dous tercios da súa lonxitude total. O noso sistema solar tarda uns douscentos cincuenta millóns de anos en dar unha volta arredor do seu centro. Igual cá maioría das galaxias espirais, a Vía

Láctea é moi delgada e contén unha gran cantidade de po e gas interestelar (aproximadamente un dez por cento da súa masa total). Nela obsérvase un subsistema formado por materia máis antiga, estruturalmente diferente, que se denomina halo galáctico. A materia deste halo móvese en órbitas elípticas que tenden a conducila contra o centro da galaxia.

O centro da Vía Láctea contén un obxecto de características singulares en relación coas do resto dos seus compoñentes. É difícil estudiala natureza deste obxecto xa que os sinais que nos chegan desa zona teñen que atravesar rexións densas en material interestelar. A información que posuímos débese á detección de ondas de radio. Todo indica que no centro hai un potente emisor destas ondas non superior en tamaño ó noso sistema solar. Moitos astrónomos comparten a opinión de que quizais no centro da nosa galaxia se atope un burato negro cunha masa da orde dun millón de veces a masa do Sol.

Os coñecementos sobre a nosa Vía Láctea revelan a existencia dun problema nos nosos modelos físicos. A partir do estudio do movemento das estrelas situadas en planos perpendiculares ó plano da galaxia, conclúese que a materia observada non é suficiente para explica-las súas traxectorias. Os cálculos indican que fai falta o dobre da materia observada para dispor dunha explicación satisfactoria. A situación complícase aínda máis se se analiza o movemento de obxectos a grandes distancias do centro da galaxia. Neste caso

cómpre dispor de dez veces a masa observada. Todo isto indica que a Vía Láctea contén materia que non observamos, denominada comunmente materia escura. Non coñecemos na actualidade cál é o seu contido, pero unha posibilidade é que estea formada por obxectos subestelares nos que as reaccións nucleares non desempeñan un papel importante quantando o seu interior. Estes obxectos, con masas entre dez e cincuenta veces a masa de Xúpiter, son coñecidos como ananas marróns e na última década téñense observado algúns candidatos. Sen embargo, polo momento non se posúe información sobre a súa abundancia.

AS GALAXIAS

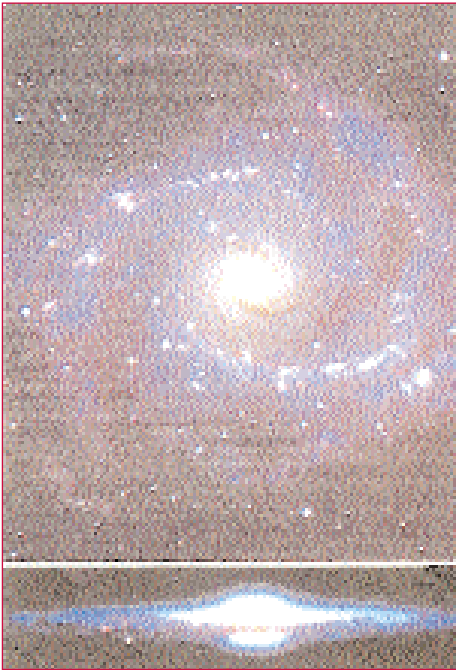
A forma espiral da Vía Láctea non é a única que as galaxias adquiren. Segundo a súa feitura, as galaxias clasifícanse en espirais, elípticas e irregulares. Estas formas teñen que ver coas súas propiedades: as galaxias espirais con brazos máis soltos e as irregulares conteñen un maior número de estrelas novas e máis cantidade de gas interestelar. Pola contra, nas galaxias elípticas o gas interestelar está ausente e as súas estrelas teñen unha avanzada idade común. Estas peculiaridades fan que as galaxias espirais sexan máis azuladas cás elípticas.

A característica que lle atribuímos á Vía Láctea de posuír dúas poboacións de estrelas, unha no halo e outra no disco, é compartida por moitas outras galaxias. A evolución do halo é sinxela: tódalas estrelas se formaron simulta-

neamente e todas elas van envellecendo á vez, sendo as máis masivas as primeiras en se converter en gigantes vermellas. No disco, sen embargo, a vida é menos rutineira. Neste caso, a materia interestelar producida cando as xigantes vermellas evolucionan a ananas brancas e a estrelas de neutróns permanece no disco e xera a formación de novas estrelas. Parte da materia segregada polas xigantes vermellas é rica en elementos pesados e por iso as estrelas novas conteñen maiores cantidades de carbono, nitróxeno, osíxeno e ferro cás estrelas de maior idade. No halo encóntrase unha proporción moito máis pequena de elementos pesados ca no disco.

As galaxias conteñen en xeral os dous tipos de poboacións de estrelas: halo e disco. As elípticas non adoitan conter disco e nas espirais cos brazos moi soltos o halo acostuma estar ausente. A evolución das galaxias elípticas é moi sinxela: tódalas estrelas envellecen ó tempo e abandonan a secuencia principal en momentos distintos dependendo da súa masa inicial. Nas galaxias espirais as estrelas máis antigas expulsan materia interestelar que se recicla para formar novas estrelas. Nalgunhas estrelas espirais observouse que a poboación de estrelas novas é moi elevada.

No que respecta á formación das galaxias, todo parece indicar que hai dous factores predominantes: as propiedades intrínsecas da galaxia e o contorno no que se encontran. Respecto ó primeiro, é natural que a masa e o



Dúas vistas de galaxias espirais. Arriba a NGC 2997 e debaixo un perfil da NGC 4565 onde se mostra con claridade a protuberancia central e o fino bordo externo do disco. A nosa galaxia, a Vía Láctea, é deste tipo.

momento angular inicial desempeñen un papel importante. As galaxias cunha velocidade angular elevada teñen unha maior tendencia a seren espirais. Unha velocidade angular pequena favorece en cambio a formación dunha galaxia elíptica sen disco. O contorno tamén é determinante no proceso de formación. Observouse que as galaxias que forman un grupo de galaxias non moi grande tenden a ser elípticas. As galaxias elípticas de gran tamaño encóntranse xeralmente no núcleo de cúmulo de galaxias moi poboados.

OS CÚMULOS DE GALAXIAS

Coma as estrelas, as galaxias aparecen agrupadas. Sen embargo, contrariamente ó caso das estrelas, a distancia entre galaxias dun mesmo cúmulo é só un factor entre dez e trinta veces a dimensión lineal das galaxias. Os cúmulos de galaxias observados presentan un enorme rango no que respecta ó número de galaxias que conteñen. Algúns están formados por un conxunto pequeno de galaxias, como é o caso do Grupo Local ó que pertence a Vía Láctea, consistente en tres galaxias espirais de gran tamaño (unha delas a Vía Láctea) e máis dunha ducia de galaxias máis pequenas. Outros chegan a conter miles de galaxias enormes e infinidade de galaxias máis pequenas. Xeralmente, nestes cúmulos o centro está poboado de galaxias elípticas de gran tamaño, con masas de ata cen veces a da Vía Láctea. Nos cúmulos máis poboados observouse a existencia de materia intercumular que supón aproximadamente o dez por cento da masa total.

Os cúmulos de galaxias aparecen pola súa vez agrupados nos denominados supercúmulos, con forma de acio. Entre estes acios aparecen enormes zonas baleiras onde a penas se atopan unhas poucas galaxias illadas. Esta estrutura parece producirse en tódalas direccións e pénsase que é universal. Os estudos realizados sobre a dinámica dos cúmulos e supercúmulos de galaxias conducen a concluír que a materia que se observa neles é insuficiente para mantelos ligados gravita-

cionalmente. O mesmo ca no caso das galaxias, destes estudos dedúcese que unha gran parte da materia do universo non foi observada. Esta materia escura constitúe o noventa por cento da masa total dun cúmulo ou supercúmulo. A natureza desta materia non observada é un dos grandes problemas con que se enfrontan hoxe en día a Astrofísica e a Cosmoxía.

OS CUÁSARES

A principios dos anos sesenta descubríronse uns obxectos que non encaixaban en ningunha das estruturas estudias ata aquel momento. Tratábase de obxectos de tamaño reducido situados a enormes distancias, que brillaban tanto coma galaxias próximas completas. A gran distancia asociada a estes obxectos debíase ó alto desprazamento cara ó vermello que presentaba o seu espectro electromagnético. Como se describe polo miúdo na próxima sección, existe unha relación entre a distancia dun obxecto e o desprazamento cara ó vermello do seu espectro; canto máis arredado, maior é o dito desprazamento. Por outra parte, a escala de tempo en que estes obxectos presentaban variacións indicaba que se trataba dunha estrutura de tamaño reducido, segundo observacións recentes, do tamaño do sistema solar. Para unha distancia tan grande, o brillo observado implicaba que estes obxectos tiñan unha luminosidade da orde dun millón de veces a do Sol.

Desde o seu descubrimento, baralláronse diversos modelos para expli-

ca-los cuásares. Hoxe en día adquiriu solidez o modelo que asocia os cuásares a núcleos de galaxias moi activos. Os cuásares semellan máis unha estrela ca unha galaxia porque a emisión proveniente do seu núcleo é tan grande que ensombrece calquera outra procedente das súas estrelas veciñas. As observacións apuntan a que a fonte de enerxía fundamental deste núcleo é un burato negro xigante de ó pé de mil millóns de veces a masa do Sol. Cando se produce acrecencia de materia por este burato negro xigante, xéranse chorros de partículas a altas enerxías con efectos que se teñen observado cos radiotelescopios.

Os cuásares posúen unha luminosidade tan grande que poden ser detectados a enormes distancias. O cuásar máis distante que se observou está situado a uns 14.000 millóns de anos-luz. Cando observamos un obxecto tan remoto estamos mirando cara a atrás no tempo xa que a luz procedente del tardou 14.000 millóns de anos en chegar ata nós. O estudio destes obxectos achega polo tanto información sobre cómo era o universo daquela. As observacións indican que nesa época os cuásares eran moito máis abundantes ca en tempos máis próximos. O feito de non atopar cuásares a distancias maiores ós 14.000 millóns de anos fai pensar que estes, e posiblemente tamén as galaxias, non se formaran anteriormente. Tales datos conducen a concluír que o noso universo evolucionou moito desde a súa existencia e que o seguirá facendo no futuro. O estudio desta

evolución desde un punto de vista global é o obxectivo principal da Cosmoloxía, que será o tema central da seguinte sección.

3. A VISIÓN GLOBAL

Unha vez descritos os obxectos que poboan o universo, podemos facernos preguntas sobre o universo como un todo. Cuestións deste tipo levan sendo unha constante ó longo da historia. Desde tempos moi remotos o home interrogouse sobre cál é a orixe do universo, cómo evoluciona (ou máis ben se evoluciona ou non) e qué pasará con el no futuro. Unha simple ollada ó ceo nunha noite clara transmite a sensación de estarmos contemplando unha enorme cantidade de obxectos inmóbiles. Unha observación perseverante ó longo dunha vida humana indica que a posición dos obxectos no ceo é basicamente constante. A idea de que o universo evoluciona como un todo é moi recente, propúxose neste século hai uns oitenta anos. A dispoñibilidade nesa época de novos telescopios e espectrógrafos moito mellores cós seus predecesores (aínda que moi primitivos se os comparamos co estándar actual) permitiu obter información ata entón descoñecida sobre os obxectos que ocupan o noso universo.

Astrónomos como Edwin Hubble obtiveron o espectro da radiación electromagnética emitida desde galaxias moi distantes. A sorpresa das medidas efectuadas foi que os

espectros aparecían desprazados cara a lonxitudes de ondas máis longas. Este fenómeno coñécese como o desprazamento ó vermello. Trátase dunha manifestación do chamado efecto Doppler, aplicable a calquera fonte de radiación (ben sexa acústica ou electromagnética) en movemento. A miúdo temos experimentado nas rúas da nosa cidade cómo o ton da sirena dunha ambulancia cambia cando pasa preto de nós. As ondas acústicas que recibimos son emitidas primeiro por unha fonte que se achega a nós e despois por unha que se arreda. Este fenómeno ocorre cos obxectos do universo en movemento respecto a nós. A lonxitude de onda da radiación que nos chega é superior á esperada, o que indica que a fonte correspondente se aparta de nós.

Se unha estrela en repouso con respecto ó noso telescopio emite luz, a distancia entre as fronteas de ondas que lle chegan é a mesma cá lonxitude de onda da luz emitida pola estrela. Se a estrela se esta aproximando a nós, a distancia entre as fronteas de onda é máis pequena (a luz viaxa sempre á mesma velocidade nun determinado medio) e o noso telescopio mide unha lonxitude de onda inferior á da luz emitida. Prodúcese nese caso un desprazamento no espectro cara ó azul. Pola contra, se a estrela emisora se está afastando do telescopio, as fronteas de onda chégannos máis distanciadas e a lonxitude de onda que medimos é superior á da luz emitida. Prodúcese entón un desprazamento ó vermello. A partir da diferenza en lonxitude de

onda obtense facilmente a velocidade da fonte emisora respecto ó telescopio.

A LEI DE HUBBLE

Nos anos vinte observouse que os espectros da radiación electromagnética emitida polos obxectos que poboaban o noso universo se achaban sempre desprazados cara ó vermello. Edwin Hubble descubriu que ademais existía unha relación sinxela entre a velocidade respecto á Terra da fonte emisora e a distancia á que esta se encontraba. Concretamente, se v é a velocidade e d a distancia, os datos obtidos axustábanse á relación $v = H d$, onde H é unha constante, denominada constante de Hubble en honor ó seu descubridor.

A lei de Hubble foi confirmada experimentalmente ó longo dos setenta anos transcorridos des que foi proposta. O seu descubrimento demostra que o universo se expande. A súa forma funcional non implica que a Terra sexa o centro do universo. O universo en expansión no que vivimos é coma un biscoito de froitas que se está a expandir no forno. Cada un dos anacos de froita observa cómo os máis se separan del. Para cada galaxia, tódalas demais se están apartando respecto a ela.

A constante de Hubble está relacionada coa idade do universo. Se supoñemos que a velocidade de expansión do universo non cambiou (hipótese bastante razoable segundo o noso coñecemento actual), o tempo t que lle levou expandirse, de tal maneira que unha galaxia concreta estea situada a

unha distancia d da Terra, vén determinada pola ecuación (tan familiar) que relaciona distancia, velocidade e tempo: $d = v t$. Combinando esta relación coa lei de Hubble obtense que $t = 1/H$, é dicir, o inverso da constante de Hubble é a idade do universo. O valor da constante de Hubble non se coñece moi ben porque é unha cantidade difícil de medir. Por unha parte, as galaxias que conducen a unha medición máis exacta de H son as que están máis arredadas pois o movemento aleatorio destas respecto á Terra resulta desprezable. Por outra, precisamente para esas galaxias a medición da distancia é máis complicada.

Durante moitos anos a idade do universo estivo cifrada entre 10.000 e 20.000 millóns de anos. As observacións realizadas nos últimos anos polo telescopio espacial Hubble permitiron reducir notablemente a incerteza neste valor. Os últimos resultados publicados froito da análise dos datos obtidos con este telescopio calculan que a idade do universo é de 14.000 millóns de anos, cunha incerteza de 1.000 millóns de anos arriba ou abaixo. Isto constitúe unha significativa mellora respecto ós acoutamentos anteriores, que só foi posible gracias á colocación dun telescopio no espacio.

O BIG BANG

A explicación máis sinxela da lei de Hubble consiste en postular que inicialmente todo o universo estaba concentrado a moi alta densidade. A explosión desa configuración tan densa

produciu a expansión do espacio e que cada un dos obxectos no universo se estea separando de tódolos demais. Este modelo, coñecido como do *big bang* ou da grande explosión, predí que a evolución do universo comezou hai aproximadamente 14.000 millóns de anos. A idea de que o universo ten un principio orixina moitas preguntas de carácter filosófico. A máis obvia é que había antes do *big bang*. Os nosos coñecementos actuais non teñen resposta a esta pregunta pero o feito de que se puidera expresar en relación co modelo do *big bang* inquietou a moitos científicos. Ata os anos sesenta, cando a lei de Hubble era a única de carácter cosmolóxico que se coñecía, formuláronse unha variedade de modelos onde o universo non evolucionaba. Esta situación cambiou nos anos sesenta co descubrimento dunha serie de pegadas do *big bang* que facían este modelo cada vez menos incuestionable.

O rastro do *big bang* máis importante atopado ata agora é a radiación de fondo de microondas. Como en moitas outras ocasións, o descubrimento produciuse no marco da realización dun proxecto de investigación que non espertaba moito interese. En 1965, Arno Penzias e Robert Wilson andaban embarcados nun proxecto dos laboratorios Bell, tratando de identificar tódalas fontes de ruído de fondo nunha antena con calibración de alta resolución. O obxectivo era que unha vez realizada a identificación puideran coñecer con precisión o fluxo recibido pola antena procedente dunha fonte de

microondas. Penzias e Wilson non deron identificado certa cantidade de ruído de fondo. Pouco despois descubriuse que ese ruído era o eco da grande explosión inherente ó modelo do *big bang*. O sinal detectado resultou se-lo mesmo en tódalas direccións nas que se mediu, e axiña se observou que se axustaba ó espectro de emisión dun corpo negro a unha temperatura duns 2,7 K. Un corpo negro é un obxecto que absorbe toda a radiación que lle chega. Nos últimos anos mediuse a radiación de fondo de microondas con gran precisión. As observacións recentes realizadas polo espectrómetro FIRAS do COBE (*Cosmic Background Explorer*) indican que as desviacións do espectro dun corpo negro son menores a 300 partes por millón, e que a temperatura é $2,727 \pm 0,002$ K. Ademais, observouse que esta temperatura é basicamente a mesma, independentemente da dirección na que se mida. Isto dinos que o universo é isótropo.

O significado da radiación de fondo de microondas descuberta por Penzias e Wilson entendeuse rapidamente gracias a Robert Dicke, aínda que a existencia dun fenómeno desta natureza fora predicada con anterioridade por George Gamow. Nas épocas máis temperás do universo, este estaba moi quente e polo tanto era moi rico en fotóns. Cando o universo acadou a idade dun millón de anos arrefriara abondo como para que a materia deixase de estar ionizada, producíndose o desencaixamento da radiación e a materia. A radiación presente nese

momento observámola hoxe moi fría, co espectro típico dun corpo negro que alcanza a súa maior intensidade no rango das microondas. Se observásemo-la radiación de fondo cara a atrás no tempo, veríamos cómo a súa temperatura aumenta. A medida que nos achegásemos a épocas máis temperás, observariámola radiación cada vez máis quente e o universo máis denso, ata chegar un intre no que puídesse crearse materia. Nese momento estaríamos no estado no que a radiación e a materia comezaban a acercarse a unha situación de equilibrio.

A validez da lei de Hubble e a detección da radiación de fondo de microondas demostran que o universo estivo expandíndose durante un longo período de tempo. Outro dato importante en favor da teoría do *big bang* é a observación dunha abundancia dos elementos máis lixeiros do universo consistente coas predicións baseadas na nucleosíntese da teoría do *big bang*. Cando o universo tiña unha idade de aproximadamente uns minutos, a temperatura era tan alta que se produciron elementos lixeiros como o helio e o litio por medio de reaccións nucleares. A teoría predí que arredor de 1/4 da masa do universo debería corresponder ó helio, que concorda coas observacións experimentais.

A HOMOXENEIDADE E A ISOTROPÍA

Ademais de isotrópico —como demostran as observacións da radiación de fondo de microondas—, o universo é tamén homoxéneo. Un univer-

so homoxéneo é aquel no que as súas propiedades son as mesmas en calquera punto. Isto só é certo de forma aproximada para o noso universo, pero é unha aproximación excelente cando se estudian grandes rexións. Isotropía e homoxeneidade son dous dos puntos de partida do modelo do *big bang*. A descrición matemática deste modelo asenta na solución ás ecuacións da relatividade xeral de Einstein que se obtéñen ó impoñer-las ditas propiedades. Estas ecuacións relacionan a xeometría do espacio-tempo co seu contido de materia (para máis detalles, consúltese o artigo "A teoría da relatividade", de A. Vázquez Ramallo neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). A solución, coñecida como a solución de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, vén dada en termos dun factor de escala cósmico que contén a información de cómo evolucionan tódalas lonxitudes físicas do universo (distancias entre galaxias, lonxitudes de onda dos fotóns, etc.) co transcorrer do tempo. En realidade, existen tres tipos de solucións ás ecuacións da relatividade xeral de Einstein coas hipóteses mencionadas. No primeiro tipo, o universo expándese tan de vagar que a atracción gravitatoria sería capaz de frea-la expansión e chegaría un momento a partir do cal as galaxias empezaría a achegarse unhas ás outras. O universo sufriría un colapso e tería un final. No segundo tipo, a expansión é tan rápida que a atracción gravitatoria non podería parala, as galaxias estarían separándose constantemente. Por último, no terceiro tipo, o universo

expáñdese coa velocidade xusta para evita-lo colapso. No primeiro tipo de modelo o universo non é infinito no espacio, trátase dun universo pechado. A gravidade é forte abondo como para curva-lo espacio, que se pecharía sobre si mesmo. Nos outros dous tipos o espacio é infinito e o universo non ten fin, trátase de universos abertos, o primeiro curvado e o segundo plano.

Que o noso universo poida ser pechado non quere dicir que puidera ter un bordo onde remata. Para imaxinarmos qué se quere dicir por un espacio finito no primeiro tipo de solucións, debemos considerar unha analoxía cunha dimensión menor. A superficie da Terra é bidimensional e finita, sen bordos. Por moito que viaxemos pola superficie da Terra nunca chegaremos a un punto onde esta termine; de feito, é posible que topemos co punto de partida. O mesmo ocorre nas solucións do primeiro tipo pero nunha dimensión superior. Trátase dun universo tridimensional, finito e sen bordos. Coma na Terra, poderíamos viaxar e chegar ó punto de partida. Sen embargo, xa que a velocidade á que podemos facelo non pode ser superior á da luz, tardaríamos tanto que lle daría tempo ó universo a se comprimir de novo e dar cabo.

É importante salientalo feito de que aínda que inicialmente as hipóteses de isotropía e homoxeneidade foron introducidas por Einstein para simplifica-lo problema matemático, resultou que proporcionan unha descrición do universo bastante atinada tanto a tempos temperáns coma na

actualidade cando se calcula a media sobre distancias suficientemente grandes. Pero dos tres tipos de solucións posibles só un corresponde ó noso universo. Para saber cál, cómpre coñece-la súa densidade media. Se a densidade é inferior a un certo valor crítico, a gravidade será insuficiente para frea-la expansión. Se a densidade é superior ó valor crítico, a gravidade parará a expansión nalgún momento futuro e comezará o colapso do universo. Medí-la densidade do universo é difícil porque hai que incluí-la materia escura da cal se sabe moi pouco. As estimacións realizadas nas últimas décadas indican unha densidade inferior á crítica e favorecen unha solución do segundo ou terceiro tipo.

En calquera dos tres tipos de solucións existe un comezo do universo no que a densidade de materia era moi alta, infinita. Nese momento tivo lugar a grande explosión, o *big bang*, e desde entón ata os nosos días o universo expáñdese. En xeral, na Física, cando existe unha situación na que unha cantidade física se fai infinita, dise que se ten unha singularidade. A presenza de singularidades constitúe unha limitación: indícanos que a teoría non é aplicable nesa situación e que para describila correctamente debemos incluír aspectos que non estamos considerando. Desde o descubrimento destas solucións, os físicos téñense preguntado se a Teoría da Relatividade Xeral predí a existencia da singularidade inicial ou se trata simplemente dunha propiedade particular da solución

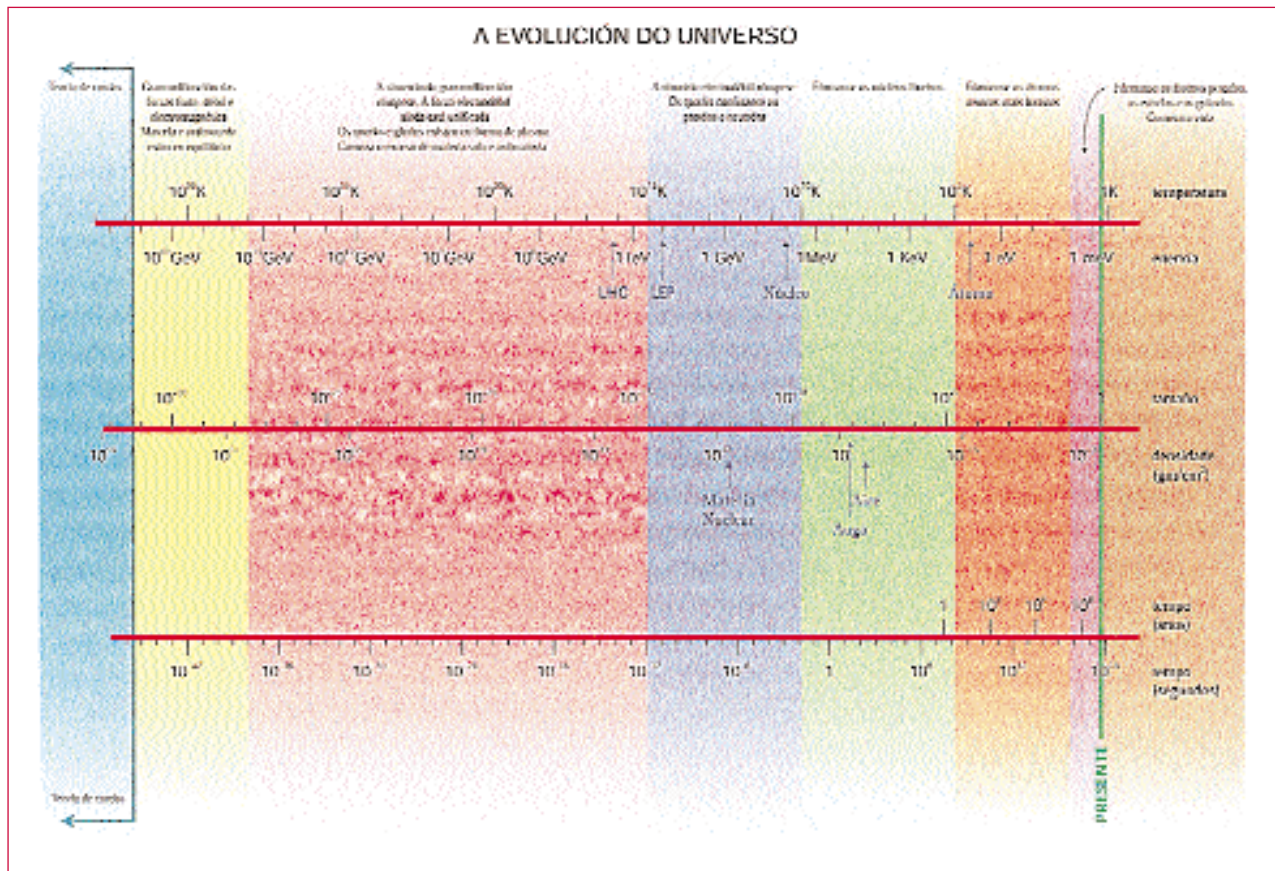
encontrada. Os teoremas sobre a existencia de singularidades de Stephen Hawking e Roger Penrose dos anos setenta responderon a esta pregunta de forma positiva. Isto indica que unha descrición baseada só na relatividade xeral é incompleta cando se teñen densidades demasiado altas. É razoable que así sexa; nesas situacións os efectos da mecánica cuántica son importantes e cómpre combina-la física do máis grande, a relatividade xeral, coa física do máis pequeno, a Mecánica cuántica, para obter unha descrición coherente. Polo momento non se sabe cómo facelo, a construción dunha teoría da gravidade cuántica é un dos grandes problemas con que a Física se enfrenta no século que agora comeza.

A EVOLUCIÓN DO UNIVERSO

Nas últimas décadas avanzaouse considerablemente na creación dun modelo que describa a evolución do universo. Hoxe en día, facendo uso das leis correspondentes ás catro interaccións fundamentais, dispónse dun que resulta moi satisfactorio a partir dun momento moi próximo á grande explosión inicial. A medida que nos achegamos ó momento inicial, $t = 0$, o universo faise tan denso que é necesario utiliza-la teoría cuántica da gravidade. Polo momento non se dispón dunha teoría deste tipo e por iso o modelo non é válido para tempos anteriores a 10^{-43} segundos. Este tempo, denominado tempo de Planck, é extremadamente pequeno, trátase dunha fracción decimal con 43 ceros. Toda a materia que

agora vemos no universo, miles de millóns de galaxias, estaba daquela comprimida no tamaño dun núcleo atómico. A densidade tan extrema que se acadaba nese intre era de 10^{92} gramos por centímetro cúbico, enorme comparada coa densidade da auga (1 gramo por centímetro cúbico) e inimaginable comparada coa densidade media do universo actual (un átomo de hidróxeno por centímetro cúbico).

Para tempos posteriores ó tempo de Planck, dispónse dun modelo que describe o estado do universo ata os nosos días, con prediccións atinadas en xeral cando se comparan cos fenómenos observados. Ás altas densidades nas que se encontraba o universo en tempos posteriores ó de Planck, a súa temperatura era enorme. A temperatura indícanola velocidade media á que se moven as partículas. Nesa época as súas velocidades eran tan elevadas que podían vencer as forzas entre elas. Producíanse moitas colisións moi enerxéticas que daban como resultado a produción doutras partículas en pares partícula-antipartícula. As partículas e antipartículas interaccionan pola súa vez e aniquílanse. Nese estado do universo primordial tiña lugar unha cadea de procesos cuánticos cunha estrutura que ía variando a medida que se producía a expansión e o universo arrefriaba. Se a temperatura baixa, a velocidade das partículas diminúe e non se producen os procesos de creación de pares; dominan entón as aniquilacións e os agrupamentos das partículas.



Evolución do universo. As distintas épocas da evolución do universo, segundo o modelo do *big bang* ou grande explosión, representáanse ó longo da liña do tempo. Paralelas a esta representáanse liñas que indican a temperatura, a enerxía cinética media das partículas e a densidade do universo. Así mesmo, inclúese información sobre o tamaño do universo tomando como unidade o seu tamaño actual.

Estes fenómenos dan lugar ó que se coñece como *big bang* nucleosíntese.

Desde o tempo de Planck ata que transcorreu o primeiro segundo, o universo expandiuse de tal forma que a súa densidade pasou dos 10^{92} gramos por centímetro cúbico a só 500.000 gramos por centímetro cúbico. Durante este período o universo consistía nunha mestura en equilibrio térmico das partículas elementais características das altas enerxías. Entre estas partículas encontrábanse as tres familias de quarks e leptóns que hoxe constitúen o piar do chamado modelo estándar das partículas elementais e as interaccións fundamentais. Os detalles do que ocorreu en gran parte desta época son bastante especulativos, xa que cos aceleradores de partículas máis potentes de que se dispón (por exemplo, o LEP no CERN ou Centro Europeo de Investigacións Nucleares) non se alcanzou a enerxía suficiente. Mesmo nas enerxías acadadas se estudaron máis colisións de partículas illadas có comportamento de agregados destas, aínda que nos últimos anos se progresou considerablemente neste último aspecto (para máis detalles consúltase o artigo "Núcleos e partículas", de C. Pajares Vales neste número da REVISTA GALEGA DO ENSINO). Na ilustración da evolución do universo pode verse cómo o novo acelerador en construción do CERN, o LHC, suporá unha mellora, pero, así e todo, encontraremos moi lonxe das enerxías propias das partículas nas épocas máis temperás do universo.

O modelo estándar das interaccións fundamentais (verificado hoxe con gran precisión ata as enerxías alcanzadas no acelerador LEP) é froito da rotura de simetría dun modelo máis fundamental. Os fenómenos de rotura de simetría prodúcense cando o sistema baixo consideración se configura nun estado que posúe unha simetría inferior á da teoría física que goberna o seu comportamento. Conforme vai arrefriando, o universo evoluciona en estados que cada vez corresponden a unha simetría menor. O modelo mormente aceptado é o chamado modelo de grande unificación onde a interacción forte aparece unificada coa electrodébil. Na etapa inmediatamente posterior ó tempo de Planck atopámonos cun universo formado por materia e antimateria en equilibrio no que tres das interaccións que agora coñecemos se encontran unificadas nunha. A medida que o universo arrefría, a enorme simetría dos modelos de grande unificación rompe e as interaccións fundamentais comezan a diferenciarse.

Antes de se cumpri-la primeira millonésima de segundo, a interacción forte xa se diferenciara da electrodébil e producíase a asimetría entre materia e antimateria. É entón cando comeza a rompe-la interacción electrodébil en débil e electromagnética, e cando os quarks empezan a confinarse en protóns e neutróns. Chégase así ós albores do primeiro segundo, cun universo unhas dez mil veces máis pequeno có actual con tódalas interaccións fundamentais diferenciadas. É importante

remarcar que o coñecemento de gran parte deste período da evolución do universo é bastante especulativo. Existen modelos alternativos e seguirán propoñéndose outros no futuro, ata que algún quede marcado por ir acompañado dalgunha pegada clara que permanecera ata os nosos días e sexa observada.

Un segundo despois do *big bang*, a temperatura do universo era de 10.000 millóns de graos e estaba composto por fotóns, electróns, positróns, neutrinos, antineutrinos, protóns e neutróns. Segundo vai descendendo a temperatura, a creación de pares de electróns e positróns deixa de ser posible e estes aniquílanse entre si deixando un remanente de electróns debido á mencionada asimetría materia-antimateria. Os neutrinos e os antineutrinos, en virtude do carácter tan feble da forza con que interaccionan, non se aniquilan e quedan poboando o universo de forma similar ós fotóns que forman a radiación de fondo de microondas. Este remanente desa época é difícil de observar debido á enorme dificultade que entraña a detección de neutrinos, e ata hoxe non se teñen indicios experimentais da súa existencia.

Aproximadamente cen segundos despois do *big bang*, a temperatura era de 1.000 millóns de graos. A esta temperatura os protóns e os neutróns comezan a combinarse en núcleos de deuterio que pola súa vez se combinan con máis protóns e neutróns para formaren núcleos de helio e outros menos lixeiros como os de litio e berilio. Os

modelos actuais que describen as interaccións fundamentais fan unha predicción para a produción de helio nesta época que, como xa se indicou, é consistente coa observada experimentalmente. É importante destacar que, nestas prediccións, un ingrediente importante é o número de especies de neutrinos. Sabemos a partir dos experimentos realizados no CERN nesta última década que só existen tres especies, valor que concorda perfectamente coa abundancia de helio observada.

A produción de helio e dos demais elementos lixeiros tivo lugar durante as primeiras horas posteriores ó *big bang*. Despois, ó longo dos cen mil anos seguintes, o universo seguiu expandíndose ata que a temperatura descendeu a uns poucos miles de graos, temperatura á cal os electróns non dispoñían de enerxía suficiente para vencer a interacción electromagnética, combinándose consecuentemente en átomos. Cando este proceso se completou xa non existían partículas cargadas e a interacción entre fotóns e materia reduciuse considerablemente. Prodúcese entón o desencaixamento da materia e da radiación, non existe o equilibrio térmico entre elas. A radiación evoluciona en equilibrio térmico por si mesma ata os nosos días deixando unha pegada clara na radiación de fondo de microondas.

A partir dos cen mil anos comezan a aparecer no universo pequenas variacións da densidade na distribución da materia que conducen á formación de galaxias. Conforme transcorre

o tempo, o gas de hidróxeno e helio das galaxias disgrégase en nubes máis pequenas que comezan a colapsarse e a xerar estrelas. Hai uns 10.000 millóns de anos produciuse o colapso dunha nube de gas que deu lugar a unha insignificante estrela nun dos brazos dunha galaxia. Esta estrela tiña un planeta no que despois de transcorridos uns cantos centos de millóns de anos empezaron a producirse reaccións químicas nos seus océanos que induciron un fenómeno coñecido como a vida. Correron 5.000 millóns de anos, e logo de producírense complexos procesos de natureza biolóxica, apareceron criaturas intelixentes nese planeta. Estas criaturas puxéronlle o nome Sol á estrela e Vía Láctea á galaxia, e nun período relativamente curto de tempo foron quen de descubrir cómo evolucionara o universo do que facían parte.

A INFLACIÓN

O modelo estándar cosmolóxico que describimos ten algúns problemas inherentes. Podemos preguntarnos por exemplo por qué o universo é tan uniforme como se nos presenta. Observamos zonas do universo que semellan basicamente iguais, tan separadas unha doutra que a luz non tivo tempo para viaxar entre elas. Non foi posible que a luz puidera fluír para igualalas súas respectivas densidades e temperaturas. Como consecuencia, a uniformidade observada tivo que preceder a expansión. Outra pregunta que pon en dificultades o modelo estándar cosmolóxico é por qué a velocidade de expansión

do universo é a que é, xusto a suficiente para contrarresta-lo efecto de atracción exercido pola forza gravitatoria conxunta de toda a materia presente no universo. É preciso facer un axuste moi fino nas condicións temperás do universo para que este, despois do longo período de tempo transcorrido, non terminara nun enorme colapso ou nunha expansión tan rápida que non deixaría que se orixinaran as estrelas e as galaxias. O mesmo ca no caso das fluctuacións, é moito máis satisfactorio dispoñer dun modelo que non precise duns axustes tan finos para poder predicila situación actual, un modelo no que o universo observado sexa un produto natural baixo unha ampla banda de condicións nun pasado remoto.

As limitacións descritas non invalidan o modelo estándar cosmolóxico pero si apuntan a súa inconclusión. Co obxectivo de completalo, nos anos oitenta propúxose a teoría da inflación. Esta teoría postula que o universo atravesou nas súas épocas máis temperás un estado de expansión moi rápida, de aí o nome de inflación. Contrariamente ó caso estándar no que a expansión se deceleraba co tempo, segundo a nova teoría a expansión acelerábase durante un certo período de tempo, inducendo un distanciamento entre os obxectos cada vez máis rápido. O propio espacio se expandía máis rápido cá velocidade da luz, estando os obxectos quietos respecto ó espacio e, polo tanto, sen entrar en contradición coa relatividade. Debido a esa expansión primordial, as partículas puideron estar nalgún

momento tan preto unhas doutras que nese estado tiñan densidades e temperaturas comúns. Máis tarde, durante a inflación, algunhas partes do universo perderon contacto. O modelo predí así mesmo un universo plano, do tipo terceiro entre os tres descritos anteriormente. Desde os oitenta ten habido observacións que parecían desbota-la posibilidade dun universo plano, e a teoría da inflación sufriu diversas modificacións. Na actualidade, gran parte da comunidade científica opina que dunha ou doutra forma houbo un período de inflación que de forma natural explica por qué o universo onde vivimos é o que é no contexto do modelo estándar cosmolóxico. Por outra parte, observacións moi recentes apuntan a confirmación de que, en efecto, o universo é plano.

4. AS PREGUNTAS

No comezo dun século como no que estamos inmersos, despois do balance do progreso acontecido no que agora remata, é natural preguntarse cales son as grandes cuestións pendentes. Empezar unha tarefa deste tipo entraña grandes riscos. Practicamente tódalas preguntas que nos fixeramos no ano 1900 serían consideradas como irrelevantes uns anos despois. Sen embargo, a situación non é a mesma. O avance da ciencia que se produciu no século XX supera de sobra o de tódolos séculos anteriores xuntos. Estamos polo tanto nunha posición vantaxosa para atrevernos a facer preguntas sen

que estas queden fóra de lugar nuns poucos anos. ¿Saberemos facer uso desta vantaxe?

Un dos problemas fundamentais ó que habemos de enfrontarnos é o da materia escura. As observacións indican que practicamente o noventa por cento da materia do universo non se manifesta nunha forma que deramos detectado experimentalmente. Ten habido moitas especulacións sobre a natureza deste tipo de materia pero ningunha resultou concluínte. Este problema aparece mesturado co da constante cosmolóxica que agora brevemente describimos.

As ecuacións da relatividade xeral poden incluír un termo adicional caracterizado por unha constante que se denomina constante cosmolóxica. Este termo introduciuno Einstein para que estas ecuacións puideran ter solucións con universos estáticos, acorde co que se cría na súa época. Unha vez que se fixo firme a lei de Hubble, que favorecía un universo en expansión, esta constante resultou incómoda e intentouse durante moitos anos encontrar algunha explicación para que sexa tan pequena, consonte se segue das observacións experimentais. Todo parece indicar que a resposta a preguntas como as da materia escura e a da constante cosmolóxica poden estar encerradas en problemas de índole máis formal ou fundamental como é o da gravidade cuántica.

A Teoría Xeral da Relatividade que describe a interacción gravitatoria

mostrouse intransixente coa Mecánica cuántica, agás nos tímidos avances que se fixeron sobre os aspectos cuánticos dos buratos negros. Non se dispón polo de agora dunha teoría cuántica da gravidade completa pero si existe unha candidata moi notable: a teoría de cordas. Esta teoría, amais de cumprir esa función, tamén proporciona un marco no que as catro interaccións fundamentais se encontran unificadas, unha das metas máis perseguidas nas últimas décadas polos físicos teóricos. Na teoría de cordas, os obxectos básicos non son partículas puntuais senón obxectos que posúen unha lonxitude intrínseca, similares a anacos infinitamente delgados de cordas. Os modos de vibración destas cordas, semellantes ás notas que emite unha corda de violín, son as partículas elementais. As cordas teñen polo tanto unha infinidade de partículas; sen embargo, só unhas poucas teñen masas lixeiras, que serían as relacionadas máis directamente coas partículas que coñecemos. A teoría de cordas pode albergar no seu seo o modelo estándar das partículas elementais, que con tanta precisión se verificou experimentalmente. Isto é unha propiedade importante desta teoría pero a fundamental é que tamén contén a Teoría da Relatividade Xeral. Polo momento non sabemos moito da teoría de cordas, se ben na última década lévanse feito importantes progresos. Esta teoría foi capaz de ofrecer unha descrición microscópica dalgúns tipos de buratos negros, feito que non se lograra anteriormente. Queda moito que avanzar no desenvolvemento da teoría de cor-

das, e con seguridade ha ser un dos campos de estudio máis importante dos físicos teóricos en gran parte do século que agora comeza. Dela pode nacer unha explicación do que ocorreu no noso universo en tempos da orde do tempo de Planck que evite a singularidade e que, aínda que non resolva a pregunta de qué había antes do *big bang*, teña como consecuencia, por exemplo, a irrelevancia desta. O novo modelo desa etapa tan temperá que podería emerxer terá que afrontala resolución doutras preguntas que están aínda sen contestar, desde a orixe da materia escura ou a descrición da época de inflación, ata a explicación da asimetría entre a materia e a antimateria.

Desde un punto de vista de observación, os retos son tamén enormes. Discernir se o noso universo é pechado ou aberto é un deles. Recentemente achegáronse novos datos, os do proxecto Boomerang, que favorecerían un universo plano. É dicir, parece que a densidade do noso universo é aproximadamente a densidade crítica que fai que o universo se expanda indefinidamente pero ó ritmo máis lento posible. Estes resultados están de acordo cos modelos de inflación máis pioneiros. Outro reto importante é observa-la distribución de neutrinos de fondo remanentes das primeiras épocas da evolución do noso universo.

Un campo importante que merece a atención de físicos experimentais e teóricos, no que sen dúbida se fará un notable esforzo nos anos vindeiros, é o

dos raios cósmicos. Por este nome coñécense os fenómenos producidos por partículas a moi altas enerxías que penetran a atmosfera terrestre. Aínda que non son moitas, o fluxo destas partículas é elevado abondo como para poder ser observadas experimentalmente. O seu estudio é moi importante porque se trata de procesos de moi altas enerxías, hoxe por hoxe irreproducibles nos aceleradores dos laboratorios de física de altas enerxías.

Por último, enlazando cos aspectos máis especulativos, podemos preguntarnos se, tal e como parece predicir unha descrición do comezo do universo baseado na teoría de cordas, o universo constaba inicialmente de máis das catro dimensións, tres espaciais e unha temporal, que agora coñecemos. Se esta teoría é a apropiada, esa propiedade é inevitable. Un universo cunha dimensión espacial superior a tres é difícil de imaxinar. Se tivesemos que acepta-la súa existencia, o importante sería ser capaces de estudia-la teoría ata o punto de que puidesemos identifica-las pegadas que disto deberían permanecer hoxe. A súa observación, así como a doutros posibles tipos de

rastros relacionados coa teoría de cordas, constituirían uns dos grandes retos experimentais nas próximas décadas. Pero primeiro hai que predicilas.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Bowers, Richard L., e Terry Deeming, *Astrophysics*, Boston, Jones and Bartlett, 1984.
- Hawking, Stephen, *Historia del tiempo: del big bang a los agujeros negros*, Madrid, Alianza, D. L. 1994.
- Silk, Joseph, *The Big Bang*, Nova York, W. H. Freeman and Company, 1988.
- Thorne, Kip S., *Agujeros negros y tiempo curvo: el escandaloso legado de Einstein*, Nova York, W. W. Norton and Company, 1994.
- Wald, Robert M., *Space, Time and Gravity*, Chicago, The Chicago University Press, 1992.
- Weinberg, Steven, *Los Tres primeros minutos del universo*, Madrid, Alianza, D. L. 1996, (1977).

