

# A astrofísica

Ana Ulla Miguel



**Esenciais**

Breviarios de divulgación do saber



Ana Ulla Miguel, Doutora en Astrofísica pola Universidade de La Laguna, é dende 1997 profesora do Departamento de Física Aplicada da Universidade de Vigo, tendo ocupado con anterioridade diversos postos en centros nacionais e estranxeiros.

Os seus intereses de investigación inclúen a evolución estelar, a astrobioloxía e a astronomía cultural.

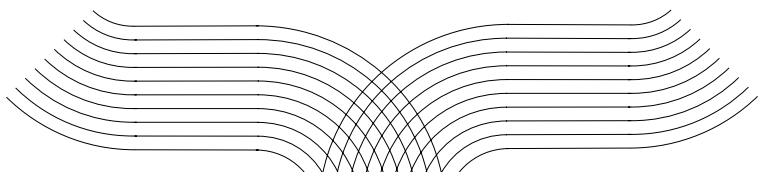
Colabora, xunto con colegas das Universidades da Coruña (UDC) e Cantabria (UNICAN), no Grupo Galego para o satélite Gaia (da ESA).

Recibiu, ex aequo con Minia Manteiga Outeiro (Catedrática de Astrofísica da UDC), o premio Galega destacada 2013 da Asociación Diálogos 90, e o III Premio Muller Científica 2020, do IES Val Miñor (Nigrán).

Servizo de Publicacións

---

Universida<sub>de</sub>Vigo



# Esenciais

Breviarios de divulgación do saber

n.º 05

## Edición

Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo  
Edificio da Biblioteca Central  
Campus de Vigo, 36310

## Director da colección

Jorge Luis Bueno Alonso

## Consello asesor científico da colección

Marta García González, Benigno Fernández Salgado, Enrique J. Varela,  
Ignacio Pérez Juste, Marta Pérez Rodríguez, Ana María Bernabeu Tello

## Deseño e coordinación da imaxe da colección

Ana Soler Baena

## Diseño gráfico

Área de Imaxe da Universidade de Vigo  
Vicerreitoría de Comunicación e Relacións Institucionais

## Fotografía de portada

Adobe Stock

## Maquetación e impresión

Andavira Editora, S. L.

## ISBN

978-84-8158-894-1

## DL

VG 263-2021

© Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo, 2021

© Ana Ulla Miguel

Reservados todos os dereitos. Nin a totalidade nin parte deste libro pode reproducirse ou transmitirse por ningún procedemento electrónico ou mecánico, incluídos fotocopia, gravación magnética ou calquera almacenamento de información e sistema de recuperación sen o permiso escrito do Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo.

Esta editorial é membro da , o que garante a difusión e a comercialización das súas publicacións a nivel nacional e internacional.

Servizo de Publicacións

Universida<sub>de</sub>Vigo



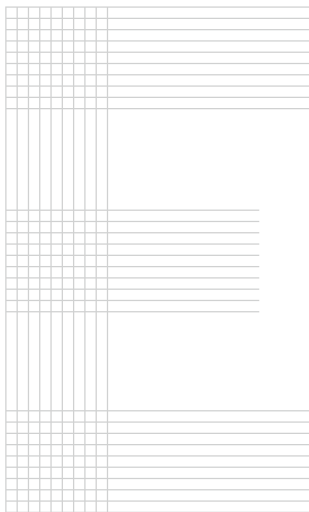


## Esenciais

Breviarios de divulgación do saber

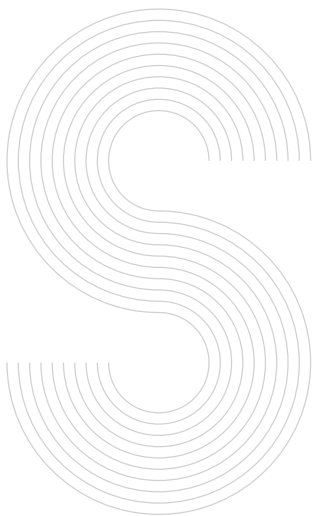
Esta colección pretende ofrecerlle ao público xeral unha serie de pequenas e concisas introducións aos temas básicos do coñecemento das mans das persoas expertas que ten a UVigo capaces de sintetizar dun xeito rigoroso, mais sinxelo e divulgativo, as discusións centrais dos temas xerais dun eido concreto. Unha combinación que presenta feitos, análises, novas ideas e aspectos esenciais.

Independentemente da área de estudo, e do concepto que se vai definir, a serie presentará libros de pequeno formato aos que poida achegarse o público lector, tanto especializado coma non especializado, para ter un primeiro contacto informado e ameno cos temas que nos preocupan.



# A astrofísica

Ana Ulla Miguel







*Pero si de la investigación sale todo...*

Da miña nai, o día da miña lectura de tese de doutoramento en 1993, no contexto dunha conversa con varias persoas sobre recortes en investimentos.

*Pois é o zapato dunha vaca: coma a ferradura dun cabalo, pero para as vacas.*

Do meu pai paseando polos montes de Valadares (Vigo), sobre un cacho de ferro oxidado que atopamos no chan, cando eu tiña 12 anos.

Este libro é para os meus pais, Manuel e Dorita, por apoiar sempre o meu gusto polo saber e por me inculcar as bases da disciplina e determinación necesarias para podelo adquirir.

# Índice

Limiar .....	11
Capítulo 1	
<b>Astronomía, astrofísica, luz e castañas</b> .....	15
RESPOSTA CURTA a) A astroloxía NON é unha ciencia .....	17
RESPOSTA CURTA b) A luz é a MENSAXEIRA .....	19
Capítulo 2	
<b>O universo incerto</b> .....	25
Expansión e CMB .....	27
Materia e enerxía escuras .....	28
Baleiro cuántico .....	30
Multiversos .....	34
Capítulo 3	
<b>Algo de cuántica e máis incerteza</b> .....	37
Dualidade onda-corpúsculo .....	38
Superposición .....	41
Entrelazamento .....	42

Capítulo 4	
<b>Vida e morte das estrelas</b> .....	45
Evolución estelar .....	46
A mosca no hangar .....	50
$E = \Delta m \cdot c^2$ .....	53
Capas de cebola .....	57
 Capítulo 5	
<b>Coa morte negra, branca ou de neutróns</b> .....	61
Ananas brancas .....	61
Estrelas de neutróns .....	64
Buracos negros .....	67
 Capítulo 6	
<b>Anfífilos e vesículas</b> .....	71
A vida é? .....	74
A transición do inerte ao vivo é? .....	77
Panspermia .....	81



## Capítulo 7

### **Outros mundos e a busca de vida fora** ..... 83

Sobre a busca de vida DENTRO do Sistema Solar ..... 83

Fosfina ..... 87

Oumuamua ..... 88

Sobre a busca de vida FORA do Sistema Solar ..... 89

SETI@HOME ..... 97

Bibliografia recomendada ..... 99

Agradecimentos ..... 101

# Limiar

O universo é todo, absolutamente todo, incluídas nós, as persoas. E nós, coñecémonos pouco co universo e os elementos astronómicos que o integran. Por exemplo: máis do 30 % da poboación mundial hoxe non sabe, porque non a viron, o que é a Vía Láctea, en Galicia tamén chamada *O Camiño de Santiago* (no ceo). Cantas estrelas se ven nunha noite despexada dende unha cidade media, debido á contaminación luminosa? Unha ducia? Corenta? O ceo nocturno non é así; a ollo nu, nunha noite despexada e sen luar, calquera persoa debería ver doadamente máis de 3.000 estrelas. Un 70-80 % da humanidade, afectada en maior ou menor medida por esta forma sibilina de contaminación, non ten acceso a ceos escuros de noite o que, na práctica, significa non ter acceso ao universo e á súa inmensidade.

Porque temos GPS, reloxos de pulso, compases, almanaques ou smartphones vivimos de costas ao universo e quizais pensamos que non necesitamos máis a contemplación directa e a guía e orientación astronómica que as estrelas proporcionan. Trabucámonos de parte a parte: a modernidade non é incompatíbel con nin debe substituír o coñecemento elemental.

É imposíbel apreciar, demandar, entender e protexer aquilo que non se coñece, do que non se ten información directa, ou que non vemos cos nosos ollos. E iso estamos a facer co ceo estrelado e co universo: desconectar. Rachando en menos de 100 anos ligazóns que veñen do neolítico ou antes. Tamén deixamos, aparentemente cando menos, de facérmonos preguntas sobre o ceo escuro, ese que non vemos. Pero actuando así, imos exactamente en contra dos nosos intereses, saúde e benestar.

Íríamos asiduamente a un balneario de augas termais se puidésemos? Por que iríamos? Pois durmir noite tras noite baixo un manto

de estrelas non é unha cuestión estética ou romántica (que, tamén), senón unha cuestión de saúde privada e pública. Ver moitas estrelas cada noite vén sendo como durmir nun balneario estelar; así o chamo eu. Hai que ver as estrelas para entendela.

E, beberíamos auga marrón que saíse pola billa da cociña? Por que non a beberíamos? Que, polo nivel de luz ambiental, se poida ler o xornal de noite na rúa, coma se fose día, é signo de gran progreso e modernidade? Que a luz intrusa dos farois a medio quilómetro da nosa casa produza sombras no leito onde durmimos, éo? Calquera forma de contaminación é má para a saúde, e ver moitas estrelas cada noite é un indicio certo de non contaminación e, polo tanto, de boa saúde. E tamén hai que ver as estrelas para entendela.

Hai suficiente número de resultados científicos e médicos publicados sobre os efectos nocivos e perniciosos para a saúde (humana, e de moitas especies) provocados pola contaminación luminosa nocturna en particular. Non hai que cargarse o planeta Terra de múltiples maneiras; haino que coidar, coidando o universo de paso. Un achegamento de coñecemento básico á astronomía e a astrofísica pódenos, se queremos, botar unha man con isto porque, non nos equivoquemos, por máis que haxa máis de 4.000 exoplanetas coñecidos e por máis inmenso que o universo sexa, de momento non temos onde ir.

Agradezo enormemente a Jorge Luis Bueno, director do Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo, por darme a oportunidade de colaborar na colección *UVIGO ESENCIAIS: Breviarios de Divulgación do Saber* con este libro, o cal pretende tender posíbeis pontes para ese achegamento básico ao coñecemento astrofísico e astronómico hoxe. Nun contexto tremendamente cambiante e de enormes progresos científicos e tecnolóxicos, o formato elixido é o da enumeración dunha escolma de preguntas escollidas por min.

Como non é realista poñer enriba da mesa todas as preguntas posíbeis neste vasto campo de coñecemento, sabendo que nin sequera se incluírán todas as relevantes, téntase adoptar ao longo do libro a perspectiva dunha persoa curiosa con interese por saber un pouco máis en astrofísica e, así, proponse unha sucesión limitada de preguntas, unhas clásicas, outras máis vangardistas, na esperanza de que o resultado resulte de utilidade e contribúa, seica, a abrir canles de reflexión sobre os fenómenos físicos observados ... relativos á

existencia (da enerxía ou a materia), o futuro (cosmolóxico) ou o noso lugar (no universo) no tempo e no espazo, entre outras cuestións.

Todo comeza coa reflexión que un neno faría sobre as estrelas e as castañas.

Nada do que sei de astrofísica, ou poida chegar saber no futuro, tería sido posíbel sen o apoio firme no seu día dos meus pais, Manuel e Dorita, da miña familia, Beni, Tomi e Mateo Manuel, e da interactuación con moitas outras persoas ao longo do camiño das que sempre aprendín algo de proveito. Destaco só o nome de Minia Manteiga Outeiro, primeira Catedrática de Astrofísica en Galicia (UDC), como referente de enorme altura científica, ademais de colaboradora, amiga e persoa de ben onde as haxa.

### **Ana Ulla Miguel**

*Vilaboa (provincia de Pontevedra), 18 de febreiro de 2021,  
o día que amartizou a sonda Perseverance.*





## Capítulo 1

# Astronomía, astrofísica, luz e castañas

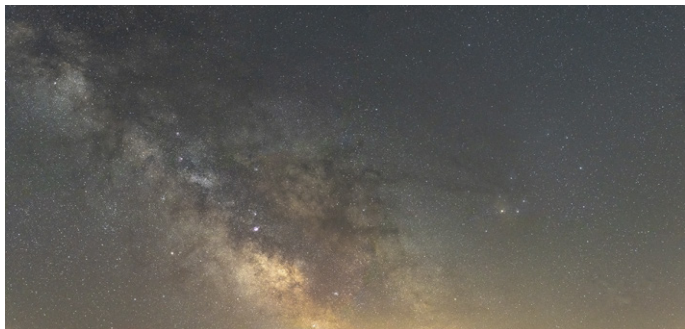
—*Mamá: cando caían as estrelas ao chan vounas coller para darchas.*

—*E logo han caer as estrelas ao chan meu amor?*

—*Si, claro, como as castañas.*

Esta conversa é literal e tivo lugar co meu fillo de tres anos e medio unha mañá de outono despois de erguernos para ir ao colexio, cando mirou pola ventá, aínda era noite, e veu o ceo asolagado de estrelas xa que, por fortuna, vivimos nunha zoa de Galicia onde a contaminación luminosa aínda non fai completos estragos. Tamén debemos dicir que era época de magostos.

O meu fillo sabía que, sendo astrónoma, teño especial paixón pola observación e coñecemento do ceo, así que agradecín moito a súa



*Fig. 1. Ceo nocturno sobre Muras (provincia de Lugo).*

*Cortesía de Marcos López Alonso.*

amábel e entrañábel oferta. Pero, tamén me deu que pensar sobre a pertinencia científica das preguntas, calquera preguntas, que a xente lexitimamente teña sobre o universo no que vivimos. Ese universo ao que nos podemos asomar a través do ceo estrelado (fig. 1).

Pensemos nunha época na que non había nin rañaceos, nin coches, nin ordenadores, nin luz eléctrica: nas noites despexadas, a beleza do ceo nocturno debía ser rutineiramente abraiante. Nesa época, se non dominar cando menos si coñecer ben e entender a súa contorna, e en definitiva o universo que os rodeaba, era fundamental para a supervivencia. Había de haber moitas preguntas e un vínculo forte das persoas con eses ceos. E é que este mesmo tipo de admiración, capacidade de curiosidade e necesidade de respostas válidas aos fenómenos observados que provoca na infancia a contemplación do ceo de noite é consubstancial á humanidade mesma dende os seus inicios.

De que elementos estaba composto o universo dos seres humanos primitivos? Basicamente, do ceo, da terra e das augas. Da observación continuada dos ceos en particular as nosas xeracións predecesoras obtiveron información precisa sobre fenómenos astronómicos regulares e predicíbeis, como a sucesión día-noite, as estacións do ano ou as fases da Lúa, e neses coñecementos adquiridos aséntanse, coma é sabido, os calendarios e os puntos cardinais. Do coñecemento astronómico básico obtivo, e obtén, a humanidade un sistema útil, práctico e vixente de orientación espazo-temporal.

Dos ceos proviñan tamén fenómenos inesperados (por exemplo, choivas de estrelas), ameazantes (lóstregos) ou abraiantes (aurora boreal), e en calquera caso sempre necesitados de explicacións. O ceo abranguía todos os fenómenos, atmosféricos ou astronómicos, no espazo superior a terra e máis o océano, sen unha diferenciación da súa procedencia causal. A falla dun método científico, esas primeiras explicacións necesarias foron de tipo fantasioso ou mitolóxico e os ceos foron as máis das veces a morada de deuses e de ánimas.

Neste senso podemos dicir que a astronomía é a ciencia máis vella, básica, globalizada e humanística de todas as ciencias xa que, baixo un mesmo ceo, non hai cultura ou civilización ao longo da historia que non posúa un conxunto de lendas ou mitos astronómicos e, en definitiva, un modelo cosmogónico para explicar o universo o arredor.

A nosa sociedade moderna occidental non é unha excepción, pero posuíndo por un lado un modelo cosmolóxico e un conxunto de leis que explican racionalmente as propiedades físico-químicas do universo e, por outro, un desapego cada vez maior da contemplación e entendemento popular do ceo en si.

Antes de continuar cos vindeiros capítulos, clarificaremos as seguintes dúas cuestións:

- a) Os termos astronomía, astrofísica e astroloxía, teñen que ver entre eles?; son sinónimos?
- b) Como sabemos, dende o punto de vista científico, o que dicimos que sabemos do universo e as súas características?

**PREGUNTA: a) os termos astronomía, astrofísica e astroloxía, teñen que ver entre eles?; son sinónimos?**

RESPOSTA CURTA: astronomía, astrofísica e astroloxía NON son sinónimos. **A astroloxía NON é unha ciencia.**

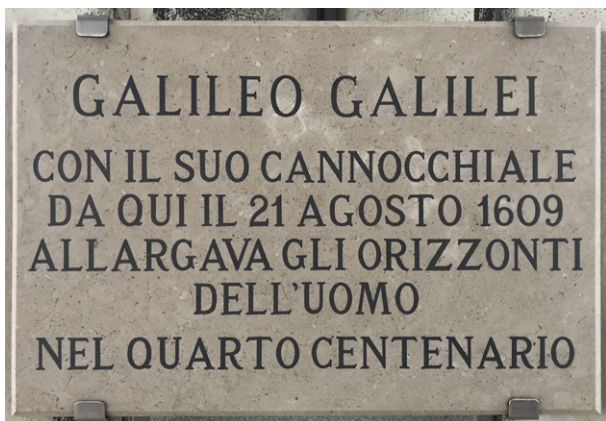


Fig. 2. Inscripción sobre Galileo Galilei na Praza de San Marcos (Venecia). De Wikipedia Commons baixo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International.

Astro-nomía significa etimoloxicamente lei/orde das estrelas, dos termos gregos **ἀστήρ** (aster = estrela) e **νόμος** (nomos = regra, norma, orde, lei). No Dicionario da Real Academia Galega (RAG) defínese o termo como «Ciencia que estuda os astros, a súa formación, evolución etc., e o espazo en que se moven».

Podemos dicir que a astronomía observacional moderna comezou en 1609 co telescopio que Galileo Galilei (fig. 2) apuntou ao ceo ese ano por primeira vez con fins astronómicos. As marabillas que Galileo descubriu literalmente revolucionaron o noso entendemento do universo coñecido e esa revolución continúa hoxe.

Astro-física tamén ten orixe grego, de **ἀστήρ** (aster = estrela) e **φύσις** (physis = natureza), sendo o estudo relativo á natureza das estrelas. Na RAG defínese como «Parte da astronomía que estuda a natureza física dos astros».

En realidade, non está de todo claro na comunidade astronómica se a astrofísica deriva ou non da astronomía ou se se poden usar ambos os termos como sinónimos ou equiparábeis, pero de acordo coa comisión de terminoloxía da Sociedad Española de Astronomía (SEA, [www.sea-astronomia.es](http://www.sea-astronomia.es)), a astronomía sería

*«La ciencia natural del universo, en su concepto más general. La astronomía se dedica a estudiar las posiciones, movimientos, estructura y evolución de los astros y para ello se basa casi exclusivamente en la información contenida en la radiación electromagnética o de partículas que alcanza al observador, aunque empiezan a utilizarse también las ondas gravitatorias. La astronomía abarca dos ramas principales: la astronomía clásica (que comprende la mecánica celeste y la astronomía de posición) y la astrofísica (que comprende todo lo demás).»*

e a astrofísica sería unha das súas dúas ramas principais, estando o desenvolvemento da astrofísica ligado aos grandes avances da física, científicos e tecnolóxicos, acontecidos dende finais do SXIX. O que si está claro é que ambas son disciplinas científicas, e que a astroloxía non se pode usar como sinónimo nin equiparar de ningún xeito a ningunha delas, porque a astroloxía non é unha ciencia.

O termo astro-loxía tamén provén do grego **ἀστήρ** (aster = estrela) e **λόγος** (lógos = compendio, tratado, discurso) e está definida na RAG

como «Arte de adiviñar o futuro mediante o estudo dos astros, analizando as influencias que estes exercen sobre os homes».

É importante polo tanto non confundir termos: a *arte de adiviñar* non é, e nunca foi, unha ciencia e confundir o termo *astroloxía* cos de astronomía ou astrofísica (ou equiparar en modo algún termos derivados destes entre eles) equivalería a demostrar o mesmo nivel de descoñecemento e incultura ca o de confundir a unha persoa graduada en química cunha alquimista. Así que, por favor, a unha astrofísica non a chamedes astróloga... nin viceversa.

### **Pregunta: b) como sabemos, dende o punto de vista científico, o que dicimos que sabemos do universo e as súas características?**

RESPOSTA CURTA: analizando a radiación electromagnética (luz) que viaxa polo universo. **A luz é a MENSAXEIRA.**

O que coñecemos popularmente como «luz» (fig. 3) constitúe a pequena parte do espectro de radiación electromagnética (fig. 4) que viaxa polo universo, que é detectábel polos nosos ollos. Falariamos nese caso da luz branca (ou visíbel) que, ao atravesar un prisma de

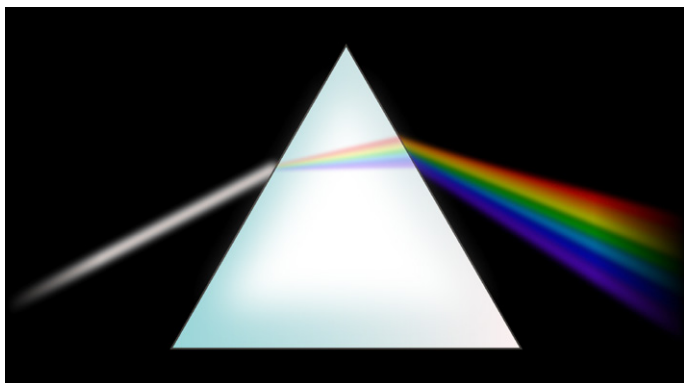


Fig. 3. Espectro de luz branca dispersada por un prisma.

De Prism-rainbow.svg: Suidrootderivative work: Sceptre, CC BY-SA 3.0

<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, vía Wikimedia Commons.

cuarcita ou outros medios refractores, se descompón nas cores do arco da vella: do violeta/azul ao vermello.

A luz ten unha natureza dual, denominada dualidade onda-corpúsculo, ou onda-partícula, xa que está integrada por fotóns que viaxan en forma ondulatoria pero interactúan corpuscularmente con átomos ou partículas materiais no seu camiño. Os fotóns son as partículas elementais (*quantos de enerxía*) portadoras da acción electromagnética; carecen de masa e viaxan no baleiro a velocidade constante de aprox. 300.000 quilómetros por segundo (km/s).

A lonxitude das ondas electromagnéticas ou, inversamente, a frecuencia, en cada rexión do espectro determina a enerxía que a radiación electromagnética transporta. A dita enerxía está relacionada coa cor e coa temperatura da radiación de xeito que, seguindo co exemplo do arco da vella, a luz cara a cor azul e violeta (ondas curtas) é máis enerxética cá luz cara ao vermello ou infravermello (ondas longas), que é máis fría e menos enerxética. Ou sexa, aínda denominando pictoricamente as cores vermello-alaranxadas coma cores *cálidas*, pola súa natureza física a luz/radiación de cor azul ten maior temperatura (é máis quente) e a vermella tena menor (é máis fría): ao revés do código de cores das billas da auga. Este fenómeno susténtase nunha lei

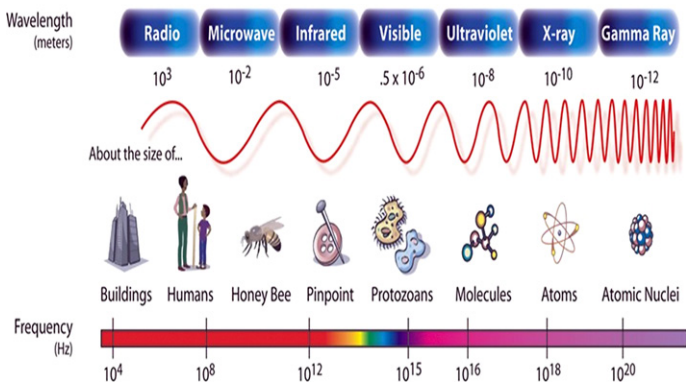


Fig. 4. Esquema do espectro electromagnético, dende o radio ata os raios gamma. De DiamondbackLucas, CC0, vía Wikimedia Commons.

de natureza cuántica, chamada *lei de corpo negro*, que explicaremos brevemente no cap. 3.

Así, e cubrindo todo o rango do espectro electromagnético, tamén temos *luz* dende os raios gamma (moi enerxética, con moi alta temperatura, alta frecuencia, de ondas extremadamente curtas e penetrantes nos medios) ata as ondas de radio (moi pouco enerxética, con moi baixa temperatura, baixa frecuencia, de ondas con lonxitudes longas e moi pouco penetrantes). Por clarificar un pouco máis, os raios gamma dunha gammagrafía ósea no hospital, a doses altas, poden chegar provocar alteracións do ADN, mentres que unha onda de radio dun megahercio (MHz) tería a lonxitude aproximada de tres campos de fútbol e sería moi pouco enerxética. Os raios gamma ou as ondas de radio, como *luz* que son, tamén viaxan no baleiro a 300.000 km/s.

Por que sabemos que hai estrelas, galaxias, po interplanetario ou nubes de formación estelar no universo? Porque, ou ben emiten luz propia (nalgunha desas lonxitudes de onda do espectro), ou ben interactúan coa luz, emitida por outras fontes, que viaxa polo universo. A luz é polo tanto a «mensaxeira» e, analizando a luz procedente do exterior que detectamos no planeta Terra, extraemos información, propiedades ou características, de diferentes rexións ou compoñentes do universo, en xeral moi distantes de nós.

Como podemos analizar a luz e extraer toda esa información para chegarmos a conclusións con validez científica sobre o universo? Con dispositivos tecnolóxicos e técnicas cada vez máis e máis sofisticados: con grandes telescopios en terra e no espazo, con detectores e instrumentación astronómica de enorme precisión, con técnicas de observación enxeñosas e depuradas e con ferramentas de cálculo automático (ordenadores e programas e algoritmos) cada vez de maior capacidade. Necesariamente, coa aplicación do método científico en todo o seu rigor e coa colaboración nacional e internacional de individuos ou entidades, ás veces en grandes consorcios de investigación.

Se é tanto o coñecemento que podemos adquirir observando a luz que provén do ceo, non nos pode sorprender que todas as culturas e civilizacións escollesen sempre lugares privilexiados de observación (observatorios), avanzando ao mesmo tempo no deseño de aparellos (telescopios) cada vez mellores, e España sen dúbida non é menos. Sendo un telescopio basicamente un colector e amplificador de luz,

canto maior o seu diámetro sexa, sinais máis febles e distantes poderán ser detectadas con nitidez para avanzar no seu estudo e entendemento. Como exemplo, inclúese unha imaxe do que aínda hoxe por hoxe é o maior telescopio óptico-infravermello do mundo con 10,4 m de diámetro de espello primario, o Gran Telescopio Canarias (GTC - fig. 5), situado no Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) ao borde do volcán da Caldeira de Taburiente, na Illa de La Palma. O ORM, que depende do Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), é un dos maiores e máis importantes observatorios internacionais do hemisferio norte. De paso, a orografía do enclave é impresionante.

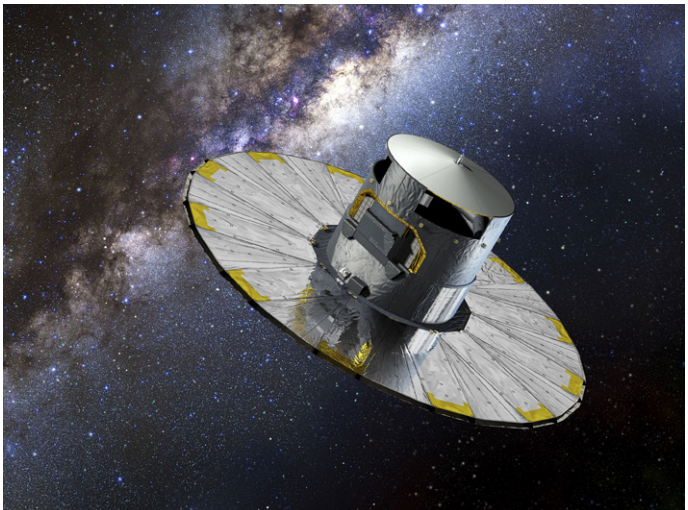


*Fig. 5. Gran Telescopio Canarias (GTC) no Observatorio de Roque de los Muchachos (La Palma), sobre o mar de nubes.  
Crédito: Pablo Bonet/IAC.*

E, un exemplo de gran consorcio de colaboración internacional producindo recentemente resultados espectaculares sobre a galaxia na que nós vivimos, a Vía Láctea, sería sen dúbida o do satélite Gaia (fig. 6) da Axencia Espacial Europea (ESA). Aprobada no ano 2001, esta ambiciosa misión astrométrica pertencente ao programa Horizonte 2000+, cun custo aproximado de 650 millóns de euros e a participación duns 450 científicos/as e tecnólogos/as de 24 países



(maioritariamente europeos), foi lanzada con éxito en decembro de 2013. O seu obxectivo principal é o de elaborar o primeiro mapa multi-dimensional da Vía Láctea, coas posicións, distancias e movementos propios duns 1.800 millóns de estrelas, para obtermos o coñecemento máis avanzado posíbel da súa estrutura e propiedades dinámicas. Gaia supuxo, e supón, un extraordinario reto tecnolóxico, tanto pola precisión sen precedentes acadada nas súas medicións, como polo tratamento e análise do volume inxente de datos diariamente xerado. As medicións e resultados que Gaia está aportando influenciarán practicamente todos os ámbitos da astronomía e a astrofísica para as vindeiras décadas. No consorcio internacional responsábel do tratamento de semellante volume de datos, DPAC (Data Processing and Analysis Consortium), participa o Grupo Galego para Gaia (GGG), un grupo de traballo e investigación interdisciplinario integrado por enxeñeiros informáticos e una astrofísica da Universidade da Coruña (UDC), unha astrofísica da Universidade de Cantabria (UNICAN), e máis eu na de Vigo (UVIGO).



*Fig. 6. Imaxe artística do satélite Gaia da Axencia Espacial Europea (ESA). De By Source (WP:N FCC#4), Fair use, <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=39342811>>.*

Posibelmente un dos resultados máis espectaculares da misión Gaia, froito desta gran colaboración internacional, infórmanos dos eventos de canibalismo galáctico acontecidos na Vía Láctea, e a influencia dos mesmos na historia formativa e evolutiva da nosa galaxia. Estudando os movementos intrínsecos de diversos grupos de estrelas púidose deducir que, hai aproximadamente uns 10.000 millóns de anos, unha incipiente Vía Láctea se fusionou con outra galaxia hoxe denominada Gaia-Enceladus.

Deste xeito, algúns resultados propoñen que a galaxia anana Saxitario, a cal orbita hoxe a Vía Láctea, puido ter atravesado o disco da nosa galaxia polo menos tres veces nos últimos 6.000 millóns de anos, tendo influenciado os ditos choques a actual estrutura espiral característica do noso disco, e mesmo a formación do Sol hai uns 4.700 millóns de anos. Pola súa banda, o proceso de absorción gradual de Saxitario no futuro por parte da Vía Láctea, está xa en marcha hoxe.

E aínda outro resultado confirma a sospeita, en vigor dende os anos 1950, sobre a forma alabeada que amosa o plano do disco da Vía Láctea, isto é, que o disco está algo curvado cara arriba nun dos seus lados e cara abaixo no outro. Da mesma forma, esta deformación alabeada non é estática no tempo se non que precesa (similarmente ao bamboleo do eixo de xiro dunha buxaina cando rota). A misión Gaia seguirá activa varios anos e seguramente continuará posibilitando a obtención de moitos outros grandes resultados de investigación.

De entre os moitos aspectos sobre os que sería posíbel facer preguntas dende unha perspectiva astronómica ou astrofísica, nos vindeiros capítulos falaremos do universo coñecido e algunhas das súas características máis salientábeis (cap. 2), do papel dos constituíntes máis pequenos e as súas leis (cap. 3), das estrelas, como elementos crave na evolución química do universo (caps. 4 e 5), e finalizaremos falando da busca de vida fora do planeta Terra, como unha das grandes preguntas humanas de todos os tempos (caps. 6 e 7).

## Capítulo 2

# O universo incerto



*Fig. 7 (a, b, c). De esquerda a dereita: (a) Liña oceánica dende San Vicente do Mar (provincia de Pontevedra); (b) Ceo sobre o Observatorio Astronómico de Forcarei (OAF, provincia de Pontevedra) con imaxe do cometa C/2007 N3 Lulin. Realización: Francisco Violat. Cortesía da Fundación Ceo, Ciencia e Cultura (FC3)—; e (c) Negrura absoluta.*

Cando confrontámonos coa inmensidade do océano (fig. 7a), ou coa inconmensurabilidade do universo (fig. 7b) ou có baleiro máis absoluto (fig. 7c), en que pensamos? Seica na incerteza da vida. Pódenos dar por pensar tamén en como canto de inmenso será o universo inconmensurábel, ou como canto de absoluto será o baleiro máis absoluto. Cuestións estas importantes e con evidentes connotacións filosóficas ou existenciais, pero que tamén é lícito formularnos dende unha perspectiva puramente científica como xa dixemos, xunto con moitas outras preguntas sobre o mundo, o tempo ou a existencia da materia.

A física (do grego φύσις // physis = natureza) ten fama de difícil porque verdadeiramente trata con algúns conceptos abstractos e difíciles, e trata con eles de maneira moi ambiciosa. Querémolo entender todo. Se pode ser, queríamos unha teoría que o explique TODO e, de feito, a dita teoría estase a procurar: a teoría do todo (ToE: Theory

of Everything)), así se chama. Podemos definir a física, entón, como o conxunto de saberes científicos que estuda, analiza e explica como funciona o universo, enteiro e por partes, e todos os fenómenos que nel observamos e a natureza dos mesmos. O noso universo, no que nós vivimos, o que detectamos, e do que formamos parte.

E a física, en concreto a astrofísica, e dentro da astrofísica a cosmoxía, dínos que o universo, con ser inmenso, non é infinito: é un sistema físico finito, posibelmente sen fronteira ou ilimitado, que xurdiu hai aproximadamente 13.700-13.800 millóns de anos dun grande estoupido, denominado Big Bang, e acontecido nun punto singular (fig. 8). O universo polo tanto nese intre era extremadamente denso e extremadamente quente (e extremadamente pequeno!), e dende entón está en expansión, tendo pasado ao inicio da súa vida por unha fase de expansión particularmente rápida e particularmente curta coñecida por etapa «inflacionaria». Todo o que hoxe vemos, se puidésemos rebobinar o tempo 13.700-13.800 millóns de anos cara atrás, estivo contido dentro dun simple punto, de acordo coa dita teoría.

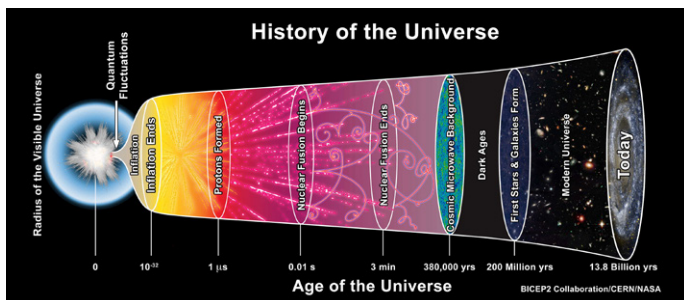


Fig. 8. Etapas evolutivas do universo (en inglés).  
Proxecto BICEP2 Collaboration CERN/NASA. De  
TheAstronomyBum, CC0, vía Wikimedia Commons.

En 1931 Georges Lemaître formulou explicitamente a teoría do «átomo primixenio», pola cal o mundo (e o universo) tería xurdido dun único *quantum*, e que foi precursora da teoría do Big Bang (1948). O termo Big Bang foi acuñado por Fred Hoyle en 1949, con intención peyorativa posto que el defendida unha teoría contraria, na que o universo sería estacionario e inmutábel, sen orixe nin final.

## Expansión e CMB

Pero, hai probas de que a teoría do Big Bang é correcta e válida? Si, varias, das que salientaremos as seguintes dúas: 1- a expansión das galaxias do universo observada por Edwin Hubble en 1929 e 2- a radiación de fondo cósmico de microondas (CMB, das súas siglas en inglés) descuberta por Arno Penzias e Robert Wilson en 1965, tendo sido predita por George Gamow, Ralph Alpher e Robert Hermann en 1948. Esta radiación correspóndese coa temperatura reliquia que lle queda hoxe ao universo, e que é de aproximadamente  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  (uns 3 K), con relación á temperatura que tiña o universo uns 400.000 anos despois do Big Bang. Penzias e Wilson recibiron o Nobel de Física en 1978.

En 2014 o Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (EE. UU.) publicou, como resultado das observacións do seu radiotelescopio BICEP2 instalado no Polo Sur, a detección de ondas gravitacionais xeradas polo Big Bang as cales se corresponderían máis ou menos coa «onda expansiva» do estoupido inicial. Esta detección non puido finalmente ser confirmada pero as investigacións nesta liña continúan xa que, de confirmarse nun futuro, constituirían unha importante evidencia sobre a teoría da expansión inflacionaria.

Se o noso universo xurdiu entón dun estoupido, a seguinte pregunta que poderíamos expor sería: onde estoupou?; que lugar do espazo ocupa o universo? E a resposta é ningún lugar porque o universo é todo: é o tempo, o espazo, a materia, a enerxía e todas as forzas e interaccións entre estes elementos. O noso universo crea espazo e tempo, a medida que se expande; poderíamos dicir que os contadores de tempo e espazo estaban a cero no intre exacto do Big Bang. O universo non ocupa polo tanto un espazo: crea espazo de xeito continuo a medida que medra.

Outra pregunta clásica é: onde está o centro do universo? A doitaba ser a Terra... pero, dende a cosmoloxía moderna, a resposta é que non hai centro. Cal sería o centro dun punto sen volume que se expande? No intre inicial, o universo era un punto que ao mesmo tempo era todo: ese punto-todo é o que está en continua expansión e, polo tanto, ou ben o universo non ten centro, ou ben o centro, en expansión, é o universo en si.

Tamén o contador de materia estaba a cero no Big Bang. Do universo-punto inicial xurdirían as estrelas, nebulosas, planetas ou galaxias e toda a materia que podemos observar e medir hoxe. Pero, de paso, o universo inclúe compoñentes das que sabemos pouco ou nada, como son as chamadas enerxía escura e materia escura. A materia que detectamos (planetas, estrelas, galaxias...) está formada por átomos, os átomos dos elementos químicos habituais (hidróxeno, carbono, magnesio...), e denomínase materia bariónica, pero constitúe soamente o 4 ou 5 % do total do que o universo é. Isto quere dicir que o que non detectamos, a enerxía escura e a materia escura, constitúen conxuntamente o 96 ou 95 % restante. Visto así, parecería que vivimos nun universo un pouco inquietante....

Sobre este punto, nas miñas conferencias, eu normalmente emprego o seguinte símil: supoñamos que vivimos nun edificio de 100 veciños e veciñas en total pero, habitualmente, só nos cruzamos cinco, ben no ascensor, ben no portal, e sempre somos as mesmas cinco persoas. Sabemos que debe haber mais habitantes, e estimamos que serán as 95 persoas restantes, porque escoitamos bater as portas, correr auga nas cisternas, vemos moverse as cortinas nas ventás, ou polo nivel de lixo recollido a diario nos contedores. Polo tanto, temos indicios certos de presenza doutros habitantes no noso edificio pero ver, non vemos ese outro 95 % de seres. Así que nos preguntamos: son seres coma nós, constituídos polos mesmos tipos de partículas subatómicas, ou son de constitución diferente?; non son seres, senón algún tipo de forzas ou enerxías?; ou, convivimos quizais con pantasmas? Visto así, parecería que vivimos nun edificio un pouco inquietante....

## **Materia e enerxía escuras**

De xeito resumido, o problema principal coa materia e enerxía escuras sería o seguinte: a forza gravitacional (pola que caen as cousas ao chan, ou pola que non pode escapar a luz dun buraco negro), que vén descrita a escalas intermedias polas leis de Isaac Newton e no seu contexto máis amplo pola teoría xeral da relatividade de Albert Einstein, é a que controla a evolución do universo a grande escala. A materia escura é unha forma misteriosa de materia non detectábel porque, a diferenza da materia bariónica que si o fai, non interactúa coa radiación/luz que viaxa polo universo, pero causa efectos

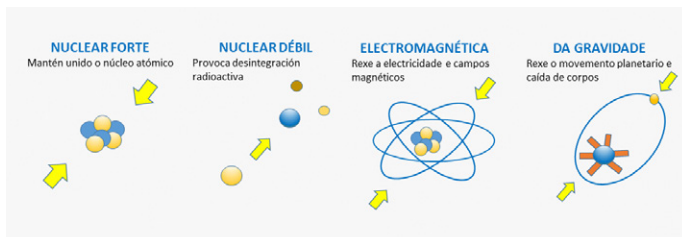
gravitacionais na formación e evolución das galaxias ou dos cúmulo de galaxias. Supón arredor dun 25 % do universo.

Sendo a gravitación unha forza central e atractiva, toda a masa do universo tendería a frear a expansión que debería estar a se desacelerar tantos milleiros de anos despois do Big Bang. Pero, cando a finais do SXX se intentou medir con precisión esa desaceleración, descubriuse que a taxa de expansión está en realidade a medrar e que o universo se expande aceleradamente dende hai uns 4.000-5.000 millóns de anos. Esta situación non sería explicábel se o noso universo estivese formado soamente por materia (bariónica e escura) e, ou ben habería que reconsiderar o alcance de actuación da teoría da relatividade, ou ben existe unha compoñente «repulsiva», previamente descoñecida, á que se chamou enerxía escura, que contrarresta a acción gravitacional e que domina no universo (supón arredor dun 70 % da súa composición) hoxe. Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam G. Riess recibiron o Nobel de Física en 2011 polo descubrimento da expansión acelerada.

A natureza da enerxía escura é descoñecida. Pero un grupo de investigadores liderado por Artyom Astashenok, publicou en 2019 unha teoría pola cal a enerxía escura simplemente non existiría. A dita teoría alternativa suporía que no universo estaría ocorrendo un fenómeno equivalente, pero inverso, ao de atracción entre dúas placas metálicas no baleiro coñecido como «efecto Casimir», e que é permitido polas leis da mecánica cuántica. Isto é: no universo a materia estaríase a repeler, acelerando, como consecuencia, a expansión do universo en si. As incógnitas son moitas e o debate segue aberto.

Seguindo coas nosas preguntas, podemos dicir entón que o universo xurdiu da nada, do baleiro? Do baleiro pode ser; pero da nada non, porque baleiro e nada non son sinónimos. Dende o punto de vista da física polo menos, non son sinónimos.

No meu primeiro curso na carreira de Física, hai moitos anos, asistín a unha conferencia que para min foi impactante, impartida polo Catedrático de Física Teórica e especialista en física de partículas Carlos Pajares: falou das catro forzas fundamentais (fig. 9) que interactúan no universo a todas as escalas, e que son: 1) gravitacional (as cousas caen ao chan), 2) electromagnética (funcionan os aparellos eléctricos), 3) nuclear forte e 4) nuclear débil (existen os átomos e a radioactividade). Tamén falou do Big Bang, e falou do «baleiro cuántico».



*Fig. 9. Esquema das catro forzas fundamentais do universo. Cortesía de Benigno González.*

A mecánica cuántica é a parte da física que estuda os sistemas atómicos e subatómicos, os seus compoñentes, e as súas leis e propiedades; a cuántica estuda o máis pequeno do universo. Pero eses compoñentes pequenos son as pezas fundamentais de construción do universo mesmo porque todo, ata onde sabemos, todo no universo está constituído por esas mesmas pezas fundamentais, que son as partículas elementais subatómicas.

## Baleiro cuántico

De acordo coa mecánica cuántica o baleiro estaría constituído por ondas electromagnéticas flutuantes e por partículas que entran e saen do estado da existencia. As propiedades, interaccións e incluso o tipo de partículas elementais que existan, dependen do tipo de baleiro no que estean inmersas, xa que hai varios tipos de baleiros, uns máis enerxéticos ca outros. Os baleiros de moi alta enerxía son inestábeis —ou falsos baleiros— e nós vivimos no chamado «Baleiro Verdadeiro», que sería o de menor enerxía de todos e polo tanto o máis estábel... Logo, con ser o de menor enerxía, a enerxía do noso baleiro sería cero? Non; está calculada e equivale á masa de tres átomos de hidróxeno por  $m^3$ .

Naquela conferencia, Carlos Pajares contou que, nunha das flutuacións do baleiro cuántico, que estatisticamente e en media producen continuamente aniquilacións pola recombinación entre partículas e antipartículas, non se completou a recombinación e a correspondente parte da materia orixinou o Big Bang. Isto explicaría sen dúbida que o universo tivese xurdido dun punto do baleiro; o que en matemáticas



se podería considerar equivalente a unha singularidade ou punto singular.

Chegados aquí, podemos intentar responder á pregunta anterior de «canto de absoluto é o baleiro máis absoluto»? E, de entrada, vemos que ningún dos baleiros cuánticos coñecidos están cheos de absolutamente nada. Son todos enerxéticos en maior ou menor medida.... Ningún estaría, en rigor, completamente «baleiro».

Outra cuestión que xorde sería se o noso universo estaría polo tanto inmerso nun baleiro?; máis aló dos confíns do universo, o que hai é baleiro? Ou hai outra cousa? Ou hai algunha outra posibilidade? Que me conste aquí aínda non hai respostas, porque aínda non temos capacidade de detectarmos algo (ou nada) fora dos confíns do universo observado.

E, xorden como mínimo ao meu entender, dúas preguntas máis, preguntas que son enormes:

- 1 Nesa flutuación primixenia que fallou, onde foi parar o «Big Bang de antimateria», potencialmente simétrico (ou non) co noso universo material, no que agora vivimos e que si detectamos? Conviwe en paralelo con nós, dalgún xeito ou en algures, un universo de antimateria que non detectamos?
- 2 Se o baleiro cuántico está en continua flutuación estatística, que nos garante que houbo so un Big Bang? Por que non houbo centos, milleiros, millóns? De feito, por que non está habendo Big Bangs continuamente, se o que nos rodea é baleiro cuántico? A realidade é que evidencia non temos de que non haxa centos ou milleiros ou millóns de universos máis, pero tampouco temos evidencia de que si os haxa, polo menos ata o de agora.

En 1920 os astrónomos estadounidenses Harlow Shapley e Heber Curtis protagonizaron un importante debate sobre se o noso universo coñecido circunscribíase exclusivamente á nosa galaxia, a Vía Láctea, ou se as Nebulosas de Andrómeda (M31) e do Triángulo (M33) non eran obxectos difusos pertencentes á Vía Láctea, e de feito eran galaxias similares á nosa pero externas a ela. Ese tipo de nebulosas serían os denominados *Universos-Illa*, sendo esta denominación acuñada en realidade, de forma case visionaria, polo filósofo prusiano Immanuel Kant en 1755, máis de 100 anos antes do debate.

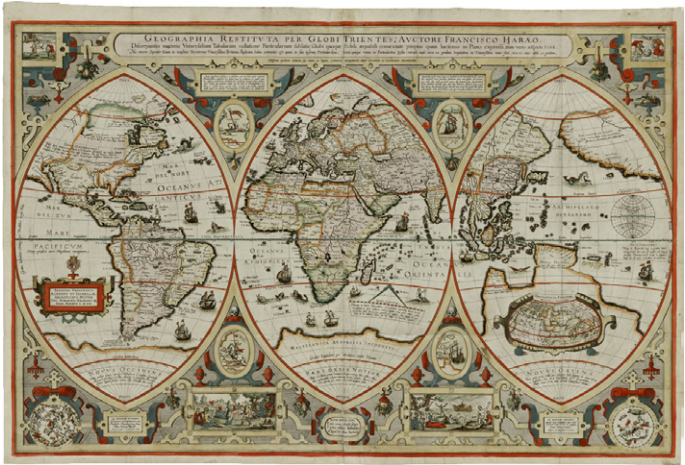
Andrómeda en concreto foi descuberta polo astrónomo persa Azophi no ano 961 e en 1864, William Huggins observou o seu espectro, e observou que non se parecía ao que cabería esperar nun obxecto nebuloso e si ao dun feixe de estrelas. Polo tanto, M31 era un obxecto formado por estrelas pero, inexplicabelmente, seguiu sendo considerada durante moito tempo como unha nebulosa dentro da Vía Láctea. En 1885 Ernst Hartwig descubriu unha supernova na rexión central de Andrómeda. Foi catalogada como S Andromedae, ou SN 1885A, sendo ata hoxe a única rexistrada nesta galaxia. En 1917 Heber Curtis descubriu unha nova en Andrómeda, e 11 máis escudriñando placas fotográficas antigas.

En 1924 Shapley recibiu unha carta de Hubble na que lle comunicaba o descubrimento dunha estrela variábel (coñecida como Cefeida) na nebulosa M31 que, automaticamente adquiría a condición de Galaxia de Andrómeda quedando resolto o debate con Curtis. E o noso universo coñecido, de repente, claramente ampliou as súas dimensións... e a súa composición. Hoxe, da man da cosmoloxía sabemos que no noso universo hai como mínimo 100.000 millóns de galaxias con como mínimo 100.000 millóns de estrelas en cada galaxia, con Andrómeda como a galaxia externa veciña nosa máis preto, a só uns 2,5 millóns de anos-luz de distancia.

Que queremos dicir con todo isto? Que mentres non foron observábeis as restantes galaxias e, sobre todo, non foi determinada a súa verdadeira natureza, non sabiamos que existían e polo tanto, a todos os efectos, o noso universo era só a nosa galaxia. E antes, o noso universo foi a Terra, a Lúa, o Sol, os planetas errantes e a esfera de estrelas fixas. E antes o continente americano non existía (fig. 10); un inmenso océano (Atlántico) separábanos del e, aínda que si existía, a todos os efectos e xa que non o podíamos observar, era un *continente-universo* separado do noso. Pero, tecnicamente, convivindo no mesmo noso universo «superior» (a Terra): con nós, sen sabelo, dun lado do océano inmenso e o «universo americano» do outro.

Polo tanto, se a teoría das fluctuacións do baleiro cuántico é certa, como poder pode haber unha morea de universos, *fóra* do noso universo. Pero tamén *dentro*, se a teoría inflacionaria para os primeiros intres posteriores ao Big Bang é certa. Debido ás fluctuacións inflacionarias poderíanse ter creado como *Universos-Burbulla* nesa fase, dos que o noso soamente sería un máis. Do estudo das ondas gravitacionais de

experimentos similares aos do radiotelescopio BICEP2 no Polo Sur, que antes mencionamos, poderíase chegar descubrir un día se isto é certo e se hai ou non máis universos-burbulla (estilo continente americano na comparación anterior) creados durante a inflación posterior ao Big Bang.



*Fig. 10. Geographica restituta per globi trientes. De Norman B. Leventhal Map Center, via Wikipedia Commons. This image was originally posted to Flickr by Norman B. Leventhal Map Center at the BPL at <https://www.flickr.com/photos/24528911@N05/2709981627>. It was reviewed on 2 July 2012 by FlickrreviewR and was confirmed to be licensed under the terms of the cc-by-2.0.*

Así que, con outro símil oceánico, o NOSO universo podería estar sendo en realidade coma un banco de peixes no océano inmenso, que non sabe que existen –porque non os detecta– outros bancos de peixes, similares (ou distintos) a el... Por non dicir que nun océano inmenso pode haber moitas máis cousas que bancos de peixes, cousas detectadas ou non. Este tipo de ideas constitúen a chamada «teoría dos multiversos» que pertence aos ámbitos da cosmoxía e da mecánica cuántica á vez. A dita teoría é moi complexa e ten en realidade moitas variantes.

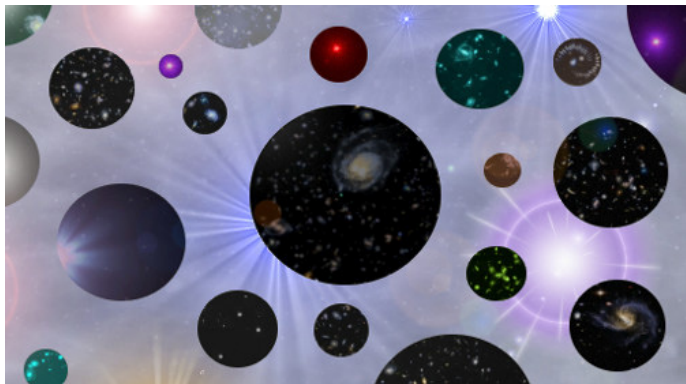
## Multiversos

O termo multiverso foi acuñado polo psicólogo William James en 1895 e, como sinónimo de «universos paralelos», ten uso en varios campos incluída a ciencia ficción. A primeira consideración sería deste concepto dentro da física tivo lugar en 1957, da man do físico estadounidense Hugh Everett e a súa teoría dos «moitos mundos», dentro da mecánica cuántica, a base principal da cal nos di resumidamente o seguinte: hai certas observacións que non se poden predicir completamente, pero cunha ampla gama de posíbeis observacións, cada unha delas existe cunha certa probabilidade de que ocorra. Cando observamos medimos unha desas posibilidades, e en certo modo facemos polo tanto que ocorra ESE universo, correspondendo todas as restantes posibilidades a universos paralelos (fig. 11) ao que foi medido, pero que non serán detectados por nós. Esta situación levaríanos a infinitas bifurcacións en cada momento. Temos polo tanto que a cuántica explica as interaccións subatómicas pero tamén a posíbel existencia de universos paralelos. No vindeiro capítulo falaremos resumidamente dalgúns dos postulados da mecánica cuántica que nos axuden afondar un pouco neste complexo campo de coñecemento.

Everett deixou a física ao pouco de doutorarse en vista da pouca acollida que a súa teoría obtivo, cando hoxe son postulados respectados ao terse proposto, como unha liña de investigación plausíbel, a posibilidade de poder obter outras probas experimentais para os mesmos: hai un certo tipo de alteracións na radiación de CMB (fondo cósmico de microondas) que poderían corresponder a pegadas deixadas por posíbeis interaccións entre universos (burbulla) nas etapas cosmolóxicas temperás despois do Big Bang. De poderse corroborar, corresponderían coa existencia hoxe de universos adxacentes ao noso, apoiando chegado o caso, a teoría dos multiversos de Everett. Pero, os resultados cosmolóxicos observacionais non son aínda concluíntes —similarmente ás antes mencionadas ondas gravitacionais— e este debate segue aberto.

Para rematar o presente capítulo, e aínda que quedarían sen tratar moitas outras posíbeis preguntas sobre o universo, podemos intentar saber algo sobre o seu futuro, isto é: como será a evolución do universo e se vai seguir en expansión, por un tempo finito ou ilimitado.

Realmente aquí hai moitas incertezas e varias teorías (fig. 12), non todas coincidentes, propostas para o futuro a longo prazo do universo.



*Fig. 11. Imaxe artística do multiverso inflacionario. De Mjmauler baixo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International, vía Wikimedia Commons.*

Ata o descubrimento da expansión acelerada, e posto que a materia bariónica dicimos que constitúe só unha pequena parte da masa total do universo, sería a cantidade total de materia escura que estea definitivamente presente a que determinaría o seu futuro evolutivo, isto é: se non hai suficiente materia escura, o universo non se mantería ligado gravitacionalmente e simplemente podería continuar expandíndose indefinidamente, aínda que a velocidades cada vez máis desaceleradas. En cambio, se hai suficiente masa total, poderíase chegar a frear a expansión e, incluso, deterse e comezar unha contracción que fixese eventualmente ao universo colapsar sobre si mesmo. Ese posible modelo de contracción futura recibiría o nome de «Big Crunch». Pero, en tal escenario, o noso universo colapsaría, ata cando?; regresando ao intre do Big Bang? E se iso ocorrese, dende ese punto recomenzaría outro (ou o mesmo) universo en expansión? Este outro escenario corresponderíase cun modelo «cíclico» de universo.

Pero dende o descubrimento da expansión acelerada e coa inclusión da enerxía escura como variábel evolutiva, en ausencia de evidencias observacionais que indiquen algunha posibilidade de freado futuro, o

sino do universo parece ser un desgarramento total da súa estrutura: con todo afastándose aceleradamente de todo, un día podería chegar en que dende o balcón non mirásemos nin unha soa estrela, só unha negrura absoluta, porque incluso a nosa veciña máis próxima estaría demasiado lonxe para ser vista. Esta situación de ceo totalmente negro, coñecida como «Big Rip», suporía en última instancia que remataríamos vivindo nun universo primeiro de átomos e logo de partículas subatómicas eternamente separadas. O espazo-tempo deixaría de existir e a densidade sería practicamente cero, nunha situación potencialmente inversa ao momento do Big Bang.

Non sendo doado podermos saber cando, algunhas estimacións din que a ocorrencia deste escenario de Big Rip tería lugar nuns 20.000 millóns de anos dende o momento presente. E, aínda tomando en consideración as moitas cuestións abertas que a existencia de enerxía escura formula, o Big Rip parece ser hoxe por hoxe unha teoría aceptada pola comunidade científica para o futuro final do universo aínda que, como dicimos, non a única.

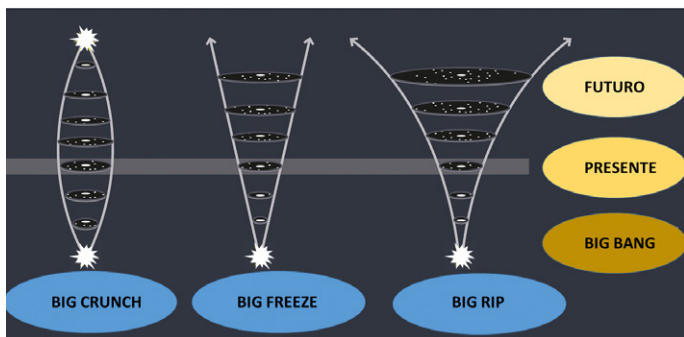


Fig. 12. Esquema de posibles modelos de futuro para o universo. Cortesía de Benigno González.

## Capítulo 3

# Algo de cuántica e máis incerteza

Para intentarmos entender o nivel de incerteza *estrutural* no que vivimos no universo, e por se todo o antedito non fose suficiente, é conveniente repasar algúns dos postulados fundamentais da mecánica cuántica xa que son moi pouco intuitivos para nós e moi diferentes dos da mecánica clásica. A mecánica clásica foi postulada por Newton no SXVII e constitúe a parte da física que explica o movemento —por exemplo, dos planetas ou da caída dos corpos—. En sistemas macroscópicos, as predicións das ecuacións cuánticas coinciden coas clásicas, pero cando as distancias son subatómicas a mecánica cuántica revela os aspectos máis sorprendentes da Natureza e, como dicíamos, estraños para a nosa intuición e entendemento.

O nome *mecánica cuántica* foi empregado por primeira vez por Max Born en 1924 na súa publicación titulada «Zur Quantummechanik». Richard Feynman, na década de 1960, dicía que a relación que hai entre as leis da física clásica e as leis cuánticas é a mesma que entre un obxecto e a súa sombra: a sombra permítenos coñecer de xeito aproximado a forma do obxecto pero non é posíbel reconstruír o obxecto orixinal, en detalle, soamente a partires da sombra. Análogamente, na mecánica clásica hai *sombras* das leis da cuántica que son as que verdadeiramente se atopan na base de todos os sistemas do universo. E, en principio, tamén na base dos posíbeis multiversos, como antes vemos.

A principal diferenza radica en que as magnitudes físicas, e en particular a enerxía, dos sistemas están *cuantizadas*. Por exemplo: así como a enerxía de rotación dunha roda en movemento podería adquirir calquera velocidade angular de rotación e polo tanto, en principio, calquera valor da enerxía cinética de rotación, unha molécula rotante

–que constituiría un rotador cuántico– soamente podería ter certos valores de enerxía de rotación, valores concretos e predicíbeis por ecuacións bastante complexas da mecánica cuántica. E, así, o paso dun estado de enerxía cuántica a outro estado enerxético soamente se pode producir a saltos (quantos), e non de maneira continua como na mecánica clásica.

## Dualidade onda-corpúsculo

A dualidade onda-corpúsculo, que antes mencionabamos para a natureza da luz, foi postulada por Louis-Victor de Broglie en 1924 de xeito que aplica a todas as partículas elementais: electróns, protóns, positróns, etc., ademais dos fotóns, teñen asociada unha onda dunha certa frecuencia, de xeito que poden viaxar como ondas pero interactuar como partículas/corpúsculos. Neste contexto, un dos principais éxitos da mecánica cuántica radicou na explicación do espectro de emisión dos átomos, que se corresponde con sinais de luz emitidos

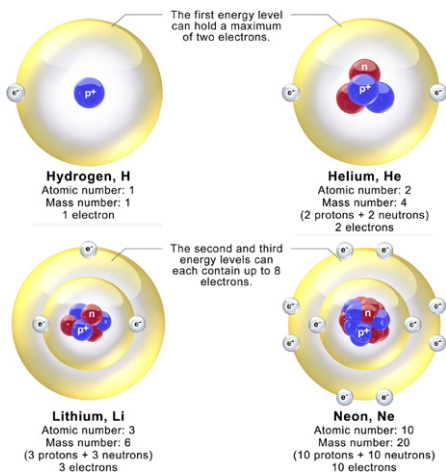


Fig. 13. Esquema de estrutura atómica, con niveis orbitais da cortiza electrónica, para os átomos de H, He, Li e Ne (de esquerda a dereita, e de arriba a abaixo). De BruceBlais baixo licencia Creative Commons Attribution 3.0 Unported, vía Wikimedia Commons.



por estes cando un electrón da cortiza salta dun orbital enerxeticamente máis alto a outro máis baixo, acompañado da emisión dun fotón. As ditas emisións están cuantizadas, ao igual que as enerxías dos propios orbitais atómicos. Na figura adxunta (fig. 13) indícase de maneira esquematizada un exemplo de estrutura atómica.

A chamada Ecuación de Schrödinger, sería a expresión matemática que da conta da función de ondas de cada partícula e que leva asociada unha función de probabilidades pola cal, en realidade, cada partícula pode estar en todos os seus estados posíbeis á vez cunha certa probabilidade para cada un deles. Así, para as cortizas electrónicas xa non falamos de órbitas dos electróns arredor do núcleo atómico —como no átomo de Bohr—, senón de «*orbitais* de probabilidade», que son como nubes de probabilidade, onde un electrón se poida atopar nun certo momento.

Na base da mecánica cuántica están algúns postulados e leis sen dúbida moi importantes, pero so con nomes xa inquietantes ao ouvido, como por exemplo

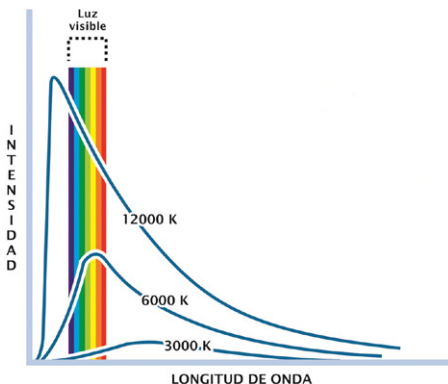
- Lei de [Planck para a emisión do] **corpo negro**
- Principio de **exclusión** [de Pauli]
- Principio de **incerteza** [de Heisenberg]
- Principios de **superposición** e **entrelazamento**

os cales explicaremos resumidamente a continuación.

- 1 En física coñécese como *corpo negro* a unha fonte de radiación que se comporta como un emisor perfecto (sen, por exemplo, perdas de calor de ningunha clase); alternativamente, tamén podería ser un corpo que absorbese absolutamente toda a radiación que lle chegase dende fora. Obviamente trátase dunha aproximación ideal aos sistemas reais, como pode ser unha estrela. Se representamos graficamente a intensidade da radiación emitida por ese corpo negro fronte a lonxitude das súas ondas para todo o espectro electromagnético, observaríamos que existe unha relación directa entre a posición do máximo da distribución e a temperatura do corpo emisor. Esta relación matemática é a chamada lei de corpo negro e ilústrase na figura adxunta (fig. 14) para diferentes temperaturas. Foi proposta por Max Planck en 1900 e permite distinguir claramente que aqueles sistemas emisores máis quentes teñen o seu máximo de emisión a lonxitudes de onda máis curtas

(azuis/violeta) ca as máis frías, cuxos máximos atópanse a lonxitudes de onda máis longas (vermellas). Ou, alternativamente, a frecuencias máis longas ou máis curtas, respectivamente, xa que a lonxitude de onda e a frecuencia son magnitudes inversamente proporcionais, como xa indicamos anteriormente.

A lei de Planck, de orixe cuántico, ten unha enorme utilidade macroscópica por exemplo na estimación da temperatura das estrelas: a ollo nu, distínguese na noite que Betelgeuse é (unha superxigante) vermella e polo tanto sabemos que é máis fría ca Rigel que é (unha superxigante) azul. Ambas as dúas estrelas son da constelación de Orión, que é unha das máis características constelacións de inverno no hemisferio norte. Posto que a temperatura superficial das estrelas é a que define en que lonxitude de onda se emite o seu máximo de radiación, e polo tanto a súa cor, as estrelas vermellas terán temperaturas de poucos milleiros de graos Kelvin (1.000-3.000 K), mentres que para temperaturas arredor dos 10.000-30.000 K as estrelas serán azuis ou incluso ultravioleta. O noso Sol é amarelo, cunha temperatura superficial no rango dos 5.000-6.000 K. En xeral cada estrela emite en realidade en certa medida en todas as lonxitudes de onda do espectro, pero cunha emisión maior no seu máximo de cor/temperatura.



*Fig. 14. Representación da lei de corpo negro para diferentes temperaturas. Procedencia: La ciencia del cielo (2010, ISBN: 9788415078029). Realización: Marcos Costoya. Cortesía de Ediciones Nigra Trea, S. L.*

- 2 O Principio de exclusión foi establecido en 1925 por Wolfgang Ernst Pauli para contribuír a explicar a estrutura atómica, inicialmente impoñendo unha restrición ao número total de electróns que se podían distribuír en cada estado cuántico dos orbitais. O estado destas partículas ven descrito polos chamados números cuánticos que inclúen información sobre, entre outras, as súas propiedades magnéticas ou o seu sentido de xiro (coñecido como spin). Este principio establece que en ningún caso poden coincidir dúas partículas no mesmo estado cuántico con todos os seus números cuánticos idénticos. Así, en cada orbital atómico, cun nivel de enerxía específico, so poderá haber ata dous electróns á vez, necesariamente cos seus números cuánticos de spin opostos, isto é, xirando un electrón a dereitas e o outro a esqerdas.
- 3 O principio de incerteza de Heisenberg dinos que, a diferenza do que acontece na mecánica clásica, é imposíbel coñecer en ningún intre e con total determinación a posición e a velocidade dunha partícula na súa traxectoria; por exemplo, seguindo cos electróns da cortiza atómica, ou sabemos onde está o electrón nun momento dado ou sabemos a que velocidade vai —e polo tanto que enerxía ten—, pero NON o valor de ambas as magnitudes (posición e velocidade) simultaneamente. Como contraposición, na traxectoria dun coche ou dun satélite podemos saber en todo momento a posición espacial que ocupa e a velocidade que leva.
- 4 Entre as propiedades mais sorprendentes que teñen os sistemas cuánticos poderíamos destacar estas dúas:
  - a superposición de estados ou estados simultáneos;
  - o entrelazamento entre partículas distantes.

## Superposición

É un principio fundamental da mecánica cuántica polo cal un sistema físico (por exemplo un electrón) existe en parte en todos os seus estados posibles simultaneamente, cunha certa probabilidade matemática para cada estado, pero soamente cando se MIDE/OBSERVA a partícula, a súa Ecuación de Schrödinger *colapsa* aleatoriamente sobre unha desas posibles configuracións, e determinaríamos o valor da magnitude correspondente a esa medida. Non se pode predicir en maneira ningunha o estado final do sistema que será medido. Como

diciamos, isto é moi diferente do que ocorre na mecánica clásica onde, coñecidos os valores previos da posición ou a velocidade dun corpo (coche, satélite), podemos predicir con certeza os valores do resto de variábeis en cada momento da traxectoria.

En 1935 Erwin Schrödinger formulou un experimento coñecido como o *Gato de Schrödinger* (fig. 15) para intentar ilustrar a superposición cuántica de estados que, resumidamente, diría o seguinte: un gato estaría pechado nunha caixa opaca, cun dispositivo de gas venenoso que tería un 50 % de probabilidade de actuar en determinado prazo; transcorrido o tempo, o gato tería polo tanto un 50 % de probabilidades de seguir vivo. Dende un punto de vista clásico, sería imposíbel ter un único gato vivo e morto á vez dentro dunha caixa, non si? Pero dende o punto de vista da mecánica cuántica, a descrición da situación do gato sería a dunha superposición de dous estados, «vivo» e «morto» simultaneamente, só podéndose comprobar o seu estado final unha vez aberta a caixa. Nese intre, a *función de ondas do gato* colapsaría nun dos dous estados, dando como resultado da nosa observación que o gato estaría vivo ou estaría morto.

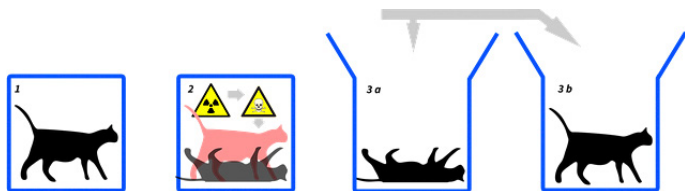


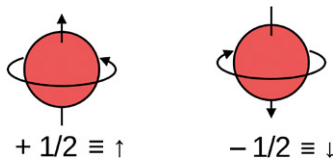
Fig. 15. Esquema do paradoxo do Gato de Schrödinger. De Master of the Universe 322, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, vía Wikimedia Commons.

## Entrelazamento

É un sorprendente fenómeno cuántico que tampouco ten equivalente clásico, no cal os estados cuánticos de dous ou mais sistemas se deben describir mediante un estado único (unha única función de ondas de Schrödinger) que involucra a todos os obxectos entrelazados do sistema, aínda cando os obxectos estean separados espacialmente. Un exemplo de partículas entrelazadas xorde cando un electrón

descende dous niveis enerxéticos dentro da cortiza atómica, xerando a emisión de dous fotóns entrelazados; ou tamén no caso dunha colisión electrón-positrón, que xeraría dous fotóns entrelazados. E se dous electróns están entrelazados, un con spin de xiro a dereitas, automaticamente o outro recibirá «un sinal» de que xire á esquerdas (fig. 16) . Aínda que, para nós como observadores, será imposible predicir cal dos dous xiros será observado cando midamos o fenómeno.

As fortes correlacións que acontecen por entrelazamento fan que as medidas realizadas sobre un sistema parezan estar influíndo INSTANTANEAMENTE a outros sistemas, a pesares de atoparse en posicións moi separadas no espazo. Sería así posible, entre estados entrelazados, a transmisión de información mediante a chamada *teleportación cuántica*. Por propiedades coma estas, Einstein referíase ás veces á mecánica cuántica como «cálculos de maxia negra».



**Fig. 16. Propiedade de spin (xiro) do electrón. Esquema adaptado de Maschen, en dominio público, vía Wikimedia Commons.**

Maxia negra ou non, algunhas aplicacións prácticas destes fenómenos van hoxe a enorme velocidade polo camiño do seu emprego na computación ou criptografía cuánticas, entre outras tecnoloxías, co que sería de esperar nun futuro non moi distante avances tecnolóxicos seguramente revolucionarios grazas a este tipo de propiedades. En concreto, despois de conseguirse en 2019 por primeira vez a teleportación de información (fotóns) dentro dun diamante ou entre dous chips de ordenador, en 2020, investigadores das Universidades de Rochester e Purdue conseguiron a teleportación de electróns individuais, o cal abre a porta á creación de procesadores ou sensores cada vez máis rápidos e eficientes.

Por outra banda, como di o cosmólogo Max Tegmark, cadaquén de nós estamos constituídos tamén por partículas elementais *desas* (electróns ou nucleóns), supeditadas todas á superposición e ao

entrelazamento cuánticos, así que, como podemos estarmos seguros e seguras de que non hai diferentes versións da nosa persoa en múltiples universos paralelos?

Vemos que a mecánica cuántica instala a incerteza e a indeterminación no corazón mesmo da física, como parte intrínseca das súas leis e principios fundamentais. Esa física que dicimos explica o universo no que vivimos, con todo o que hai e todo o que o universo ten, e que explica de paso a nosa existencia dentro del. Así que, e por canto parece, hai que convivir coa incerteza e convén sabérmolo facer a múltiples niveis.

Igualmente, a nosa vida na Terra está intrinsecamente ligada á vida do Sol e á enerxía que proporciona, estando todo isto rexido tamén polas leis da física. Aínda que está por demostrar, a existencia de vida noutras localizacións externas ao planeta está presumibelmente tamén ligada ás vidas das estrelas e ás características dos (exo) planetas que teñan arredor. Entón, o futuro do Sol é certo ou incerto?; afectaralle á Terra como evolucione o Sol?; de verdade a Humanidade está completamente soa no universo?; ou, hai vida nos exoplanetas? Nos vindeiros capítulos trataremos algúns aspectos relativos a estes fascinantes temas: a vida (e morte) das estrelas e a existencia de vida no universo. Temas, a día de hoxe, prometedores pero con aínda moitas respostas incertas.

## Capítulo 4

### Vida e morte das estrelas

O hidróxeno (H) e o helio (He) son os primeiros elementos químicos da táboa periódica (fig. 17). Sendo os máis lixeiros, foron os primeiros en formarse no universo primitivo: hoxe hai aproximadamente un 75 % de H e un 25 % de He primordiais. De onde saíron os restantes elementos, máis pesados?; onde ou como se fabrican?

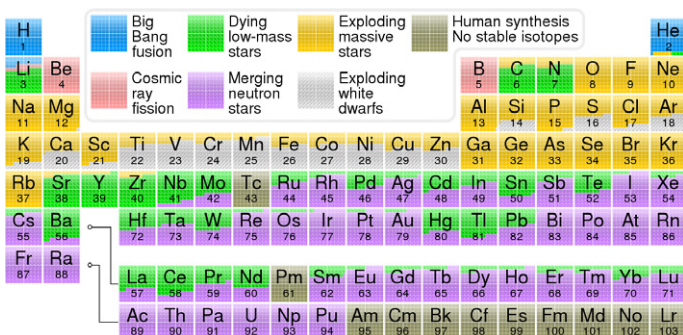


Fig. 17. Táboa periódica dos elementos, asegundo a orixe de produción (en inglés). De Cmglee baixo licenza Creative Commons Genérica de Atribución/Compartir-Igual 3.0, vía Wikipedia. Outra información en <http://blog.sdss.org/2017/01/09/origin-of-the-elements-in-the-solar-system/> de Jennifer Johnson.

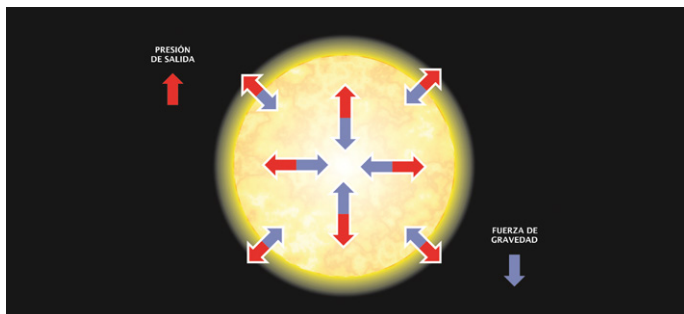
As estrelas nacen, evolucionan e morren. Brillan na noite porque xeran enerxía no seu interior por fusión termonuclear, e parte da dita enerxía rádaiase en forma de luz dende as súas capas máis externas, as cales

constitúen a súa atmosfera (chamada fotosfera). Esas reaccións nucleares son a principal fábrica de elementos químicos do universo, e as estrelas morren cando o seu combustíbel nuclear interior se esgota e xa non son quen de fabricar máis elementos.

O tempo de vida total dunha estrela vén determinado pola súa masa ao nacer (morrendo, en contra do que a nosa intuición seguramente diría, as máis masivas antes ca as de baixa masa) e, a súa estrutura nas diferentes etapas temporais, por unha loita constante de forzas para se manter coma unha esfera gasosa en equilibrio. As forzas actuantes serían (fig. 18) a gravidade, que provocaría o colapso cara o centro da estrela polo peso das súas capas de materia, e a presión exercida polo gas quente cara o exterior xunto coa presión da radiación exercida polos fotóns xerados no núcleo, que conxuntamente contrarrestan o dito colapso. Para que a estrela se manteña estábel, este equilibrio (hidrostático) de forzas débese cumprir en cada punto do interior.

## Evolución estelar

A «evolución estelar» sería a rama da astrofísica que estuda e explica estes procesos e na *evolución estelar* está parcialmente escrita a evolución química do universo mesmo.



*Fig. 18. Esquema do equilibrio de forzas no interior estelar: as frechas vermellas, cara a superficie, indican a presión do gas e da radiación, e as frechas azuis, cara o interior, indican o peso das capas de materia, que farían colapsar a estrela cara o centro. Procedencia: La ciencia del cielo (2010, ISBN: 9788415078029). Realización: Marcos Costoya. Cortesía de Ediciones Nigra Trea, S. L.*



Unha estrela é, polo tanto, un sistema físico de gas autogravitante, con condicións de temperatura e presión extremas no seu interior, buscando sempre un equilibrio estrutural estábel. Como dixemos, dependendo da masa total que a estrela tiña ao nacer, acadaranse unhas ou outras condicións, que permitirán a xeración de elementos químicos máis ou menos pesados no decurso da súa evolución. Estímase que aproximadamente o 90 % das estrelas son de baixa masa, similares ao noso Sol, e o 10 % restante serían as chamadas estrelas masivas (ou de alta masa) con, como mínimo, unhas 8 veces a masa solar.

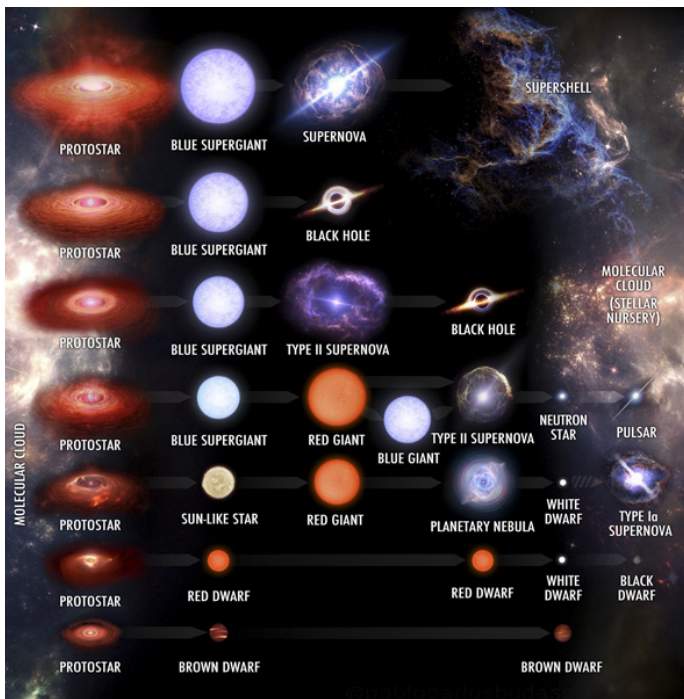


Fig. 19. Esquema das fases da evolución estelar, para estrelas de distintas masas. De Pablo Carlos Budassi vía Wikipedia, baixo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International.

As principais etapas ou fases na vida dunha estrela de baixa masa denomínanse: Formación Estelar/Protoestrela, Secuencia Principal, Xigante Vermella, Rama Horizontal e Rama Asintótica de Xigantes, Nebulosa Planetaria (NP) e Curva de arrefriamento das Ananas Brancas.

Mentres, as estrelas masivas evolucionan máis rápido e, despois das etapas de Protoestrela e Secuencia Principal (neste caso, de curta duración), pasarán polas fases de Superxigante Vermella e Supernova (SN), coa posíbel formación dun Buraco Negro ou unha Estrela de Neutróns como resultado da súa morte (fig. 19).

Todas as estrelas nacen como protoestrelas, por colapso de gromos fragmentados do gas, no interior de grandes nubes de hidróxeno molecular, tamén chamadas as ditas nubes «rexións de formación estelar» ou «rexións HII». Estas rexións están usualmente situadas nos brazos espirais das galaxias. A coñecida Nebulosa de Orión (fig. 20) sería un exemplo de rexión de formación estelar; poderíase dicir que estas rexións son como as placentas para o nacemento das estrelas, a partires dos ditos gromos, que son coñecidos como «Glóbulos de Bok».

Os glóbulos foron descubertos por Bart Bok na década de 1940, quen propuxo o seu papel como casulos das protoestrelas, pero non foi ata finais do SXX, empregando observacións cunha nova tecnoloxía infravermella (IR), que puido corroborarse a dita teoría. Ao se tratar de rexións de gas molecular moi opacas non era posíbel detectar en luz visíbel a emisión, aínda fría, das protoestrelas en formación no seu interior.

Una vez iniciado o proceso de formación da protoestrela, sería a acción da gravidade a que faría aumentar a presión e temperatura por contracción no seu interior, ata que se puidese iniciar a fusión do H en He no seu centro. Nese momento a xa *estrela* entraría na etapa de Secuencia Principal (SP), onde pasará a meirande parte da súa vida. A fase de contracción protoestelar pode durar varias ducias de millóns de anos, e a fase na SP milleiros de millóns (dependendo da masa): para o Sol, por exemplo, estímase unha vida total de 10.000 millóns de anos ata chegar á fase de anana branca (AB). As estrelas vemos que viven moitos anos.

Hoxe sábese tamén que durante a etapa protoestelar teñen lugar interesantes procesos de formación de discos protoplanetarios

relacionados coa formación de futuros planetas ou sistemas planetarios, arredor da estrela en formación, de xeito similar a como o noso propio sistema solar se debeu formar no seu momento. As técnicas de detección astronómica progresaron en grande medida nos últimos anos, de xeito que se poden apreciar e medir detalles moi precisos da presenza de tales discos.



*Fig. 20. Nebulosa de Orión (nube de formación estelar). De NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team, via Wikipedia. Dominio público.*

A evolución futura despois da SP, como dixemos, será diferente para as estrelas masivas (máis de) ou as de baixa masa (menos de, 8 masas solares). As de baixa masa morren arrefriándose como ananas brancas despois de ter pasado polas etapas evolutivas intermedias posteriores á de SP, incluíndo a de Nebulosa Planetaria. Nesas

etapas, prodúcense varios elementos químicos, incluíndo carbono e nitróxeno, que finalmente serán expelidos na nebulosa en expansión. Mentres, as estrelas masivas morrerán como SN producindo no seu remanente elementos máis pesados cá o ferro. Así, ao longo da vida estelar, créanse elementos químicos cada vez máis pesados como «cinzas» resultantes da combustión nuclear de elementos lixeiros, nas sucesivas etapas. E vemos que, ao morrer, todas as estrelas con independencia da súa masa, expelerán ao medio interestelar materiais enriquecidos en elementos químicos máis pesados cá o helio, pero por procesos (de NP as estrelas de baixa masa, e de SN as masivas) distintos e con rangos diferentes de pesos atómicos.

## A mosca no hangar

Antes de abordar a cuestión da produción enerxética por fusión termonuclear nos interiores estelares, e a conseguinte evolución química, preguntámonos sobre as vidas en si das estrelas; sobre o longas que son esas vidas, con duracións de millóns, e milleiros de millóns, de anos. En tal contexto, poderíamos preguntar como se pode obter información das etapas evolutivas polas que pasan, en todos eses millóns de anos: detectamos en astrofísica os cambios temporais de cada estrela; dalgunhas; de todas as de certa clase...? Dende 1609, en que consideramos comezou con Galileo a astronomía observacional moderna, non houbo tempo material (aprox. 400 anos), nin técnicas axeitadas, de apreciar cambios evolutivos claros na vida de ningunha estrela, nin aínda que a humanidade enteira tivese adicado todo o seu tempo á observación do ceo. Logo, como se fai?

Empregaremos o seguinte símil, que a min me explicaron durante a carreira e eu considero moi acaído, para ilustrar esta cuestión: supoñamos que unha mosca, que vive uns tres días en total, quixese coñecer as propiedades evolutivas dos seres humanos, que viven uns 100 anos. Observando tres días unha soa persoa, a mosca morrería sen poder extraer realmente ningunha conclusión científica relevante sobre a vida dos humanos, porque non podería ter apreciado cambios significativos. Se observase non obstante durante tres días un hangar cheo de moitas persoas en cada grupo de idade, dende bebés ate anciáns, incluíndo nais parindo e enterros de persoas recentemente finadas, podería seguramente extraer algunhas conclusións interesantes e acertadas sobre o proceso de envellecemento de cada persoa

dende que nace, medra e madura, ata que morre. Podería, da mesma forma, obter outra información sobre características de xénero, raza, grupos familiares ou incluso comportamentos sociais. Así que, se as moscas fosen astrónomas, será por número de estrelas (persoas, no símil) no ceo para observar!

Dende a astrofísica, como facemos entón para coñecer cientificamente algúns aspectos relevantes da vida das estrelas? Usamos bastante estatística e unha ferramenta para o estudo da evolución estelar, coñecida como DIAGRAMA HERTZSPRUNG-RUSSELL (DHR - fig. 21). Este diagrama, que foi atopado independentemente por Ejnar Hertzsprung e Henry N. Russell e publicado na década de 1910, é hoxe por hoxe unha das máis potentes ferramentas de estudo en astrofísica permitindo traballar cun alto conxunto numérico de estrelas e clasificalas, segundo a súa temperatura superficial e luminosidade. Ambas as magnitudes físicas aportan información fundamental sobre o momento vital de produción enerxética (temperatura/cor) que, combinada coa taxa de gasto/emisión da dita enerxía (luminosidade), colocan cada estrela nunha rexión (xuventude, madurez, morte) da súa vida no diagrama.

Así, vemos que no DHR, as estrelas ocupan posicións concretas e ben definidas correspondentes coas fases evolutivas antes mencionadas (SP, xigantes, ananas brancas, etc.). Obsérvase tamén que a gran maioría se atopan na Secuencia Principal o cal é lóxico se, como dixemos, aí é onde pasarán a meirande parte da súa vida producindo reaccións nucleares de fusión do hidróxeno en helio. Na SP, basicamente maiores temperaturas correspóndense con maiores luminosidades, e o noso Sol é hoxe unha estrela da SP, cunha temperatura duns 5.700 K en superficie.

Quedan fora da SP outros grupos importantes de estrelas como as xigantes vermellas, de grande luminosidade pero baixa temperatura, ou as ananas brancas, de pouca luminosidade pero alta temperatura. Obtendo certas medicións de calquera estrela, a súa localización no DHR infórmanos, nalgúns casos con grande precisión, do seu estado evolutivo e polo tanto da fase da súa vida na que se atopa. Así, unha certa estrela pasará por diferentes fases ou etapas, ocupando no tempo as correspondentes posicións do diagrama e estando estas conectadas polo que se coñece en astrofísica como *trazas evolutivas*. As trazas poden dar conta das idades das estrelas.

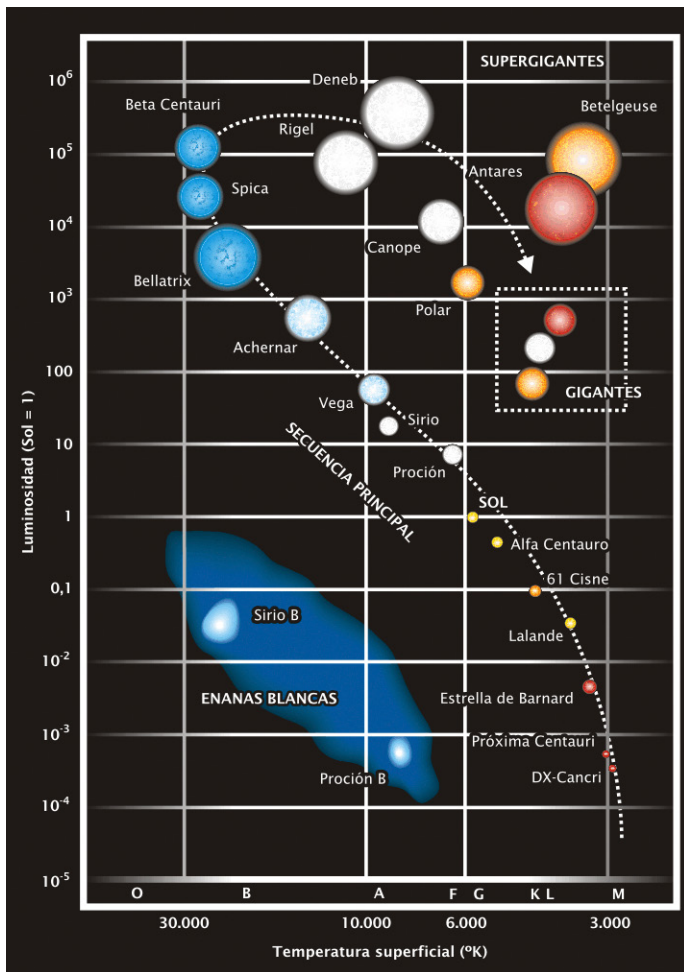


Fig. 21. Diagrama Hertzsprung-Russell (DHR), coa posición dalgunhas estrelas coñecidas, incluído o Sol. Procedencia: La ciencia del cielo (2010, ISBN: 9788415078029). Realización: Marcos Costoya. Cortesía de Ediciones Nigra Trea, S. L.

## $E = \Delta m \cdot c^2$

Retomando a cuestión da produción enerxética, como obteñen as estrelas a inmensa enerxía que radian ao longo da súa vida? Quedou claro que a SP é unha etapa moi importante xa que nela ocorre a fusión nuclear do H en He nos seus interiores, producindo enormes cantidades da enerxía renovábel que, en parte, logo radian ao exterior pola fotosfera. Lembremos que o H é o elemento máis lixeiro e abundante do universo, polo que integra maioritariamente a composición das estrelas en xeral. Incluiremos unha pequena descrición deste proceso de produción enerxética por fusión de hidróxeno, resumindo tamén algunhas das características salientábeis de cada unha das fases evolutivas para as estrelas de baixa e de alta masa.

Dadas as condicións de presión e temperatura tan altas existentes no interior estelar, pode ter lugar a fusión de núcleos atómicos para dar lugar a outro(s) núcleo(s) resultante(s), cunha certa emisión de enerxía «sobrante». De acordo coa ben coñecida ecuación da equivalencia da masa e a enerxía de Einstein,  $E = \Delta m \cdot c^2$ , esa enerxía calcúlase tendo en conta que o núcleo atómico resultante (de He) ten unha masa menor cá suma das masas dos núcleos iniciais (de H) por separado (fig. 22). A diferenza de masa ( $\Delta m$ ) entre os núcleos a fusionar e o núcleo final producido, transfórmase en enerxía ( $E$ ) multiplicándoa por  $c^2$ , sendo  $c$  a velocidade da luz (aprox. 300.000 km/s, como sabemos).

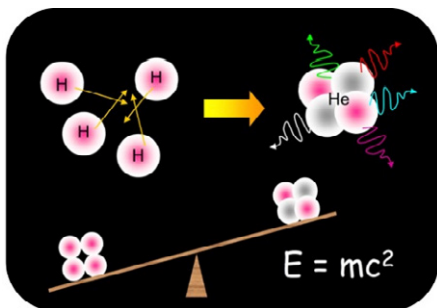


Fig. 22. Esquema do balance enerxético na produción de He por fusión de H, na etapa de Secuencia Principal (SP). Cortesía de Benjamín Montesinos Comino.

A reacción nuclear básica e dominante é a da fusión de **catro** núcleos de hidróxeno **nun** de helio, necesitándose para isto temperaturas duns 15 millóns de graos no interior estelar. Este é o proceso común durante a SP e, polo tanto, sería o proceso que está ocorrendo agora mesmo no interior do Sol. Aproximadamente, o Sol transforma 620 millóns de toneladas de hidróxeno en 616 millóns de toneladas de helio por este proceso, cada segundo!; os outros 4 millóns de toneladas de materia ( $\Delta m$ ) son convertidas en enerxía (E), parte da cal é radiada ao exterior pola fotosfera solar, e que nós detectamos como «luz do Sol».

Que acontece dentro da estrela cando, no decurso dos anos, todo o hidróxeno se esgota e se produciu, como cinzas da combustión, un núcleo interno de helio inerte? Perderíase o balance de forzas antes mencionado, e a gravidade faría colapsar a estrela, elevándose novamente a presión e a temperatura no interior, ata acender novas reaccións nucleares que deteñan o colapso e restablezan o equilibrio hidrostático e estrutural da estrela (fig. 18). As ditas reaccións serían, nese caso, as de fusión do helio resultando na produción de núcleos de carbono e oxíxeno, a temperaturas de 100 millóns de graos. E, cando se esgotase o helio como combustíbel nuclear? Perderíase novamente o equilibrio e, para fusionar o carbono inerte producido na etapa previa, sería necesario acadar temperaturas de 600 millóns de graos, por contracción gravitacional, no interior estelar. Tal temperatura non será alcanzábel nos interiores das estrelas de baixa masa (menores a 8 masas solares), o que quere dicir que as reaccións de fusión do carbono so terán lugar nas estrelas máis masivas.

Dicimos que unha estrela sae da Secuencia Principal e entra na *FASE de Xigante Vermella* cando se esgotou o hidróxeno interior, e as rexións máis profundas consisten nun núcleo de helio inerte, rodeado dunha capa na que aínda hai fusión de hidróxeno. O núcleo de He contráese ao tempo que as capas externas se expanden, para intentar restablecer o equilibrio global. Todo isto supón grandes transformacións para a estrela, que inicia nesta etapa o camiño do seu final: tratarase dunha estrela de grande tamaño (xigante) e polo tanto luminosa, máis fría que na SP (a súa temperatura superficial diminúe considerablemente, ata uns 3.000-4.000 graos Kelvin), e de cor vermella. Estímase que o Sol acadará esta etapa dentro duns 4.500-5.000 millóns de anos, non estando aínda totalmente claro se a súa superficie como xigante encherá daquela só a órbita de Venus ou tamén a da



Terra. Para o Sol e estrelas similares, a fase de xigante vermella pode durar uns 100 millóns de anos en total.

Así que, con relación ás preguntas formuladas ao final do capítulo anterior, si temos certa idea sobre a medida en que a futura evolución do Sol lle poida afectar ao planeta Terra: no peor dos casos, a atmosfera solar engulirá o noso planeta e, no mellor, o Sol será de grande coma a órbita de Venus. E será unha estrela vermella (e non amarela) e significativamente máis fría cá actual.

Cando se acadan os 100 millóns de graos no núcleo dunha xigante vermella e fusiona o helio termonuclearmente, dicimos que a estrela entrou na *FASE de Rama Horizontal de Xigantes*. A enerxía interna xérase pola fusión do H en capa arredor do núcleo, no que tamén está fusionando o He. O radio da estrela diminúe un pouco e aumenta a temperatura superficial. Estímase a duración desta fase para unha estrela de tipo solar, nunhas decenas de millóns de anos.

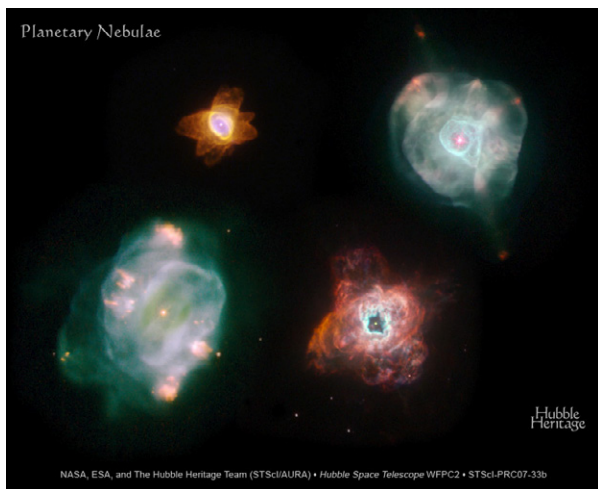
E, que acontece cando se esgota o helio como combustíbel nuclear? A estrela entra na *FASE da Rama Asintótica de Xigantes*, cun núcleo de carbono inerte como produto da previa fusión do helio. Ese núcleo contráese, ao tempo que está rodeado por una capa con fusión nuclear do helio restante, rodeada á súa vez pola capa con fusión do hidróxeno residual inicial, e as tres situacións aportan enerxía á estrela. O resultado é unha enorme expansión da superficie da estrela, con temperaturas menores que na etapa de xigante vermella, e cun intenso proceso de perda de masa. A radiación estelar emerxente interactúa cos grans de po (por exemplo, silicatos) ou moléculas (por exemplo, auga) que se producen nunha envoltura densa e opaca e cada vez máis desligada gravitacionalmente do núcleo interno da estrela, favorecendo a expansión e expulsión da envoltura ao medio circundante.

Unha estrela nesta fase pode perder ata 0,001 masas solares por ano (o cal serían uns  $2 \times 10^{27}$  kg = 2.000.000.000.000.000.000.000.000 kg), equivalente a lanzar ao espazo 5.500.000.000.000.000.000.000 kg de materia por día, cunha velocidade de expansión para a envoltura duns 10 km/s (36.000 km/h). Tipicamente a fase de Rama Asintótica dura uns centos de milleiros de anos.

A seguinte etapa evolutiva sería a de *Nebulosa Planetaria*, pola que tamén pasará o Sol dentro duns 5.000 millóns de anos. Debemos dicir

que esta fase non ten nada que ver con planetas: o nome mantense por razóns históricas xa que este tipo de nebulosas foron descubertas na segunda metade do s. XVIII (a primeira, a Nebulosa Dumbbell (M27), por Charles Messier), co mesmo aspecto difuso que amosaban os planetas xigantes do Sistema Solar vistos polos telescopios desa época. As NP son evolutivamente en realidade estrelas quentes, correspondendo ao núcleo da estrela orixinaria despois de ter pasado polas etapas de xigante previamente descritas, envoltas por unha nebulosa brillante en expansión. As estrelas centrais de ditas nebulosas son as chamadas ananas brancas.

O fenómeno de NP é relativamente curto no tempo, cunha duración da orde dunhas ducias de milleiros de anos, habendo aproximadamente 3.000 obxectos deste tipo detectados na nosa galaxia. Vemos que se trata dun número pequeno comparado ao número total de estrelas de todo tipo que se estima existen (aprox. 100.000 millóns) na Vía Láctea. As NP amosan moi diversas morfoloxías e constitúen algúns dos obxectos mais belos do universo, como se pode apreciar na figura adxunta (fig. 23).



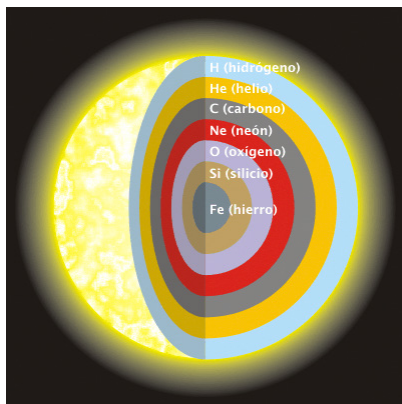
*Fig. 23. Exemplos de nebulosas planetarias. De NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), vía Wikimedia Commons. Dominio público.*

O destino final das estrelas (de baixa masa) despois de pasar estas etapas sería o de rematar arrefriándose como ananas brancas. Aínda que inicialmente con temperaturas altas (incluso superiores aos 10.000 K), as ABs ocuparían posicións do cuadrante inferior esquerdo no DHR (fig. 21) e evolucionarían cara a temperaturas e luminosidades cada vez máis baixas, e coas nebulosas que un día as rodearon diluídas no medio, ao cal enriquecerán cos elementos químicos producidos.

## Capas de cebola

No caso das estrelas masivas, ás veces con 10, 20 ou máis veces a masa do Sol, a súa evolución e morte serán significativamente distintas ás das estrelas de baixa masa. Despois da queima de H nunha SP de curta duración, evolucionarán no DHR en decenas de milleiros de anos (ou menos) mantendo constante a súa luminosidade, pero descendendo en temperatura, como *Superxigantes azuis*, e entrando a continuación na etapa de queima de He como *Superxigantes vermelhas*, no cuadrante superior dereito do diagrama (fig. 21). Trátase das estrelas de maior tamaño coñecido. Este tipo de estrelas sofren ao mesmo tempo intensos procesos de perda de masa das súas capas máis externas.

As temperaturas dos seus interiores si poderán chegar a acadar os 600 millóns de graos necesarios para fusionar o carbono e dando como produtos oxíxeno, magnesio e neon. Para unha temperatura de 1.000 millóns de graos tamén tería lugar a fusión do oxíxeno e como resultado deste tipo de reaccións, cada vez máis enerxéticas e velozes, obtéñense elementos como o sodio, xofre, fósforo, níquel, titanio ou cromo desembocando finalmente na produción de ferro. Dicimos que nese momento a estrela ten una estrutura interna en *capas de cebola*, cos elementos químicos cada vez máis pesados como produtos da fusión precedente, amoreándose cara o centro ocupado este por ferro ou ferro e níquel. De dentro a fóra as capas serían: silicio, oxíxeno, neon, carbono, helio e hidróxeno, como se ve na figura adxunta (fig. 24). Tipicamente, esta cebola tería o tamaño da Terra, mentres o radio exterior da fotosfera sería o equivalente ao da órbita de Xúpiter!



*Fig. 24. Esquema da estrutura interna en «capas de cebola» do núcleo dunha estrela masiva antes de estoupar como supernova. Procedencia: La ciencia del cielo (2010, ISBN: 9788415078029). Realización: Marcos Costoya. Cortesía de Ediciones Nigra Trea, S. L.*

O ferro, sendo un elemento moi estábel, necesitaría un aporte enerxético externo para poder fusionar nuclearmente e, polo tanto, non fusiona nunha situación inestábel onde a forza de gravitación fai colapsar a estrela masiva nun estoupido de supernova en cuestión de segundos. Como resultado, o núcleo dará lugar á formación dunha estrela de neutróns ou dun buraco negro (dependendo da masa da estrela proxenitora) e, a velocidades de milleiros de km/s, a maioría da masa estelar inicial será lanzada ao espazo circundante en forma de *remanente* (de supernova). Estes remanentes enriquecen o medio interestelar cos metais máis pesados, incluídos os de pesos atómicos superiores aos do ferro que en xeral non se poden formar fóra das supernovas. Co paso do tempo, os remanentes de SN expáñdense e dilúense, pasando eventualmente a reciclarse na formación doutras estrelas, que nacerían así xa ricas en metais. Supoñemos que este foi o caso do noso Sistema Solar o que xustificaría, por exemplo, que a Terra teña un núcleo interno de ferro cun 5-10 % de níquel e outro elementos.

Adicionalmente, en 2017 anunciouse a detección de ondas gravitacionais e raios gamma procedentes da fusión de dúas estrelas de

neutróns na galaxia NGC 4993, a uns 130 millóns de anos-luz de nós, fenómeno coñecido como «kilonova» e, aínda que predito teoricamente, non antes observado. Na materia posteriormente detectada, e expulsada a uns 60.000 km/s ao medio circundante, inclúense ouro, platino ou uranio como elementos máis pesados có ferro e sintetizados neste tipo de evento. Así, as teorías máis recentes favorecen que sexan as kilonovas, e non as supernovas, as principais produtoras de aproximadamente a metade dos elementos máis pesados có ferro coñecidos. O ouro das xoias hoxe na Terra logo sabemos que foi moi posibelmente fabricado por estrelas de neutróns fundidas.

Por outra banda, os remanentes de supernova son tamén obxectos moi belos. Un dos máis famosos é a Nebulosa do Caranguexo (Crab Nebula), o cal se corresponde cun estoupido de SN acontecido no ano 1054 e documentado por astrónomos chinos e árabes como visible de día a simple vista. No centro do remanente está o púlsar PSR B0531+21, cuxa existencia foi predita por Franco Pacini na década de 1960. Un púlsar é unha estrela de neutróns xirando a grande velocidade, cun potente campo magnético, e producindo pulsacións curtas e moi regulares detectábeis dende os raios-X ate as ondas de radio. No caso concreto de PSR B0531+21 o seu período de xiro é de so 33 milisegundos, o cal implica que emite estes pulsos unhas 30 veces por segundo e, polo tanto, a estrela xira a 30 revolucións por segundo! Na figura adxunta (fig. 25) podemos ver imaxes da nebulosa en diferentes rangos do espectro electromagnético, evidenciando a presenza do púlsar central en rotación a lonxitudes de onda de raios-X.

O primeiro púlsar, PSR B1919+21, foi descuberto en 1967 por Jocelyn Bell Burnell, con emisións de radio moi regulares duns 1,337 segundos de período durante os seus traballos de tese de doutoramento. Tratábase daquela dunha nova clase de estrelas por cuxo descubrimento o seu director de tese, Anthony Hewish xunto ao seu colaborador Martin Ryle, recibiron o Nobel de Física en 1974.

Como dixemos, as SN xogan tamén un importante papel na produción de buracos negros estelares pero, estes obxectos, que son?; existen de verdade?; e, pódense ver ou non?

De entrada, os buracos negros (estelares) non son buracos, ou non polo menos no senso habitual cotián: son estrelas moi evolucionadas cunha densidade de masa tan compacta (colapsada) que a acción

gravitacional que exercen no seu entorno non deixa escapar nin a luz que elas mesmas eventualmente produzan. Por iso dicimos que son negros, porque non os podemos ver. Pero si podemos detectar os efectos devastadores que provocan no seu entorno, xa que os buracos negros son auténticos caníbales para as estrelas ou materia que chegue orbitalos o suficientemente preto.

Así, os buracos negros (BN), xunto coas ananas brancas (AB) e as estrelas de neutróns (EN) correspóndense con fases evolutivas de morte estelar realmente peculiares, onde a materia se amosa nun estado moi distinto ao das estrelas «normais». Para eles incluiremos no seguinte capítulo un resumo dalgunhas características relevantes, e tentaremos dar algunhas respostas a algunhas preguntas.

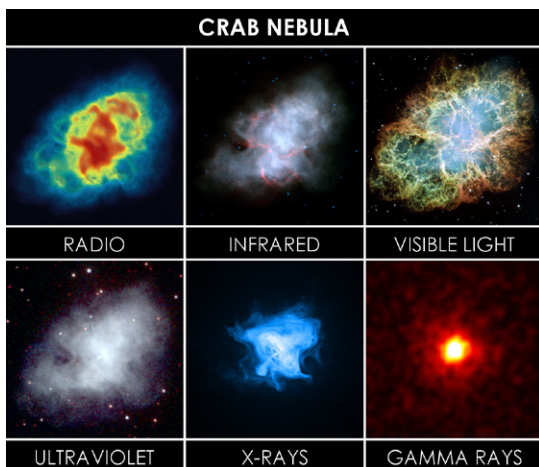


Fig. 25. Imaxe do remanente da supernova do caranguexo (Crab Nebula) dende radio ata raios gamma (de esquerda a dereita). Ademais da beleza do remanente en lonxitudes de onda ópticas (luz visíbel), evidénciase en raios-X a presenza do púlsar central en rotación. De Wikimedia Commons, sobre traballo de Torres997, baixo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Créditos das imaxes individuais: Radio: NRAO/AUI and M. Bietenholz; NRAO/AUI and J.M. Uson, T.J. Cornwell - Infrared: NASA/JPL-Caltech/R. Gehrz (University of Minnesota) - Visible: NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University) - Ultraviolet: NASA/Swift/E. Hoversten, PSU - X-ray: NASA/CXC/SAO/F.Seward et al. - Gamma: NASA/DOE/Fermi LAT/R. Buehler.

## Capítulo 5

# Coa morte negra, branca ou de neutróns

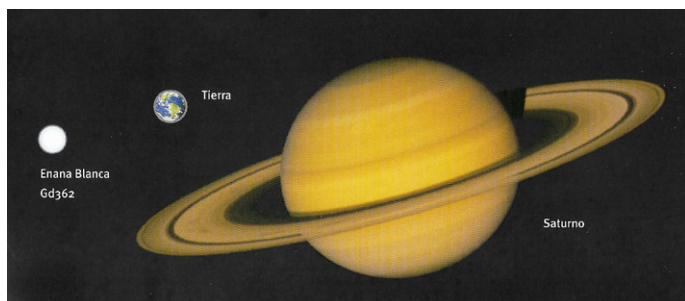
Nos buracos negros, nas ananas brancas e nas estrelas de neutróns a materia preséntase moi compactada e, de novo para explicar os seus comportamentos, a mecánica cuántica ten cousas que dicir. Estas tres formas de morte estelar constitúen uns formidábeis laboratorios naturais para o estudo astrofísico da natureza e propiedades da materia baixo condicións físicas das máis extremas do universo, circunstancia que coñecemos como de *materia dexenerada* ou *materia colapsada*.

Vexamos agora, como dicíamos, algunhas características interesantes das estrelas moribundas en tal estado de materia dexenerada.

### **Ananas brancas**

Despois do seu paso pola SP e a etapa de xigantes vermellas, a súa composición química modificouse significativamente, acompañada dun espectacular aumento na densidade, ata acadar valores da orde dunha tonelada por centímetro cúbico; isto é, un millón de veces a densidade da auga. Debido á enorme compresión das capas estelares máis internas, os electróns das cortizas, desligados dos núcleos atómicos, formarán un plasma no que están moi preto os uns dos outros. Deste xeito, comeza actuar entre eles o Principio (cuántico) de Exclusión de Pauli, que explicamos no capítulo 3. Temos tamén unha situación sen reaccións nucleares que puidesen deter o colapso gravitacional das capas masivas superiores cara o centro da estrela. Han ser, polo tanto, os propios electróns, exercendo unha intensa repulsión electrónica, os que deterán o dito colapso mediante a chamada «Presión de Fermi dos electróns dexenerados».

Esta presión é proporcional á alta densidade do plasma, e a masa será inversamente proporcional ao radio da estrela; isto quere dicir que canto máis masiva é unha anana branca máis pequena será. O radio típico dunha AB coa mesma masa ca o Sol sería de menos de 3.000 km: uns 400 km menos da distancia Vigo-Tromsø (norte de Noruega) por carreiteira. Tamén hai un límite máximo, de 1,4 masas solares (coñecido como Límite de Chandrasekhar), que a masa das AB non pode sobrepassar sen se converter nunha estrela de neutróns ou nun buraco negro.



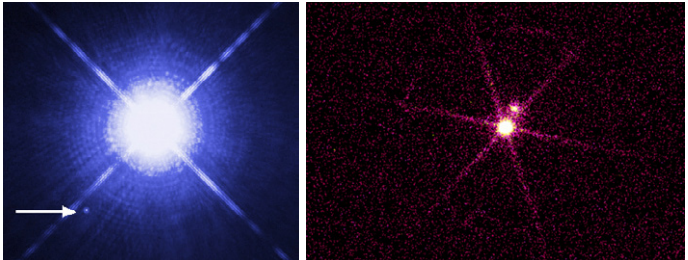
**Fig. 26. Tamaño comparativo da anana branca GD362, con relación á Terra e a Saturno. Procedencia: *La ciencia del cielo* (2010, ISBN: 9788415078029). Realización: Marcos Costoya. Cortesía de Ediciones Nigra Trea, S. L.**

Sirio, situada na constelación do Can Maior e sendo a estrela máis brillante do ceo nocturno, contén a segunda anana branca descuberta: o astrónomo Friedrich Bessel descubriuna en 1844 sen saber o que descubría xa que detectou movementos de vaivén para o obxecto, como si estivese en órbita arredor doutro obxecto, máis masivo, pero «invisíbel». En 1862 ese segundo obxecto foi efectivamente observado por Alvan Graham Clark cun telescopio de 45 cm de diámetro, pero non foi ata ben entrado o SXX en que se puido determinar a súa natureza de anana branca. Hoxe coñécese este sistema binario como Sirio A e Sirio B (fig. 27), tendo o mesmo un período orbital de aproximadamente 50 anos.

En 1783 William Herschel descubriu o sistema binario 40 Eridani B/C, no que hoxe sabemos a estrela B se corresponde coa primeira AB descuberta, nun sistema duns 252 anos de período, o cal forma en



realidade un sistema triplo con 40 Eridani A, á súa vez duns 8.000 anos de período.



*Fig. 27 (a, b). Esquerda: (a) Imaxe directa de Sirio A e Sirio B (indicado cunha frecha) tomada có Telescopio Espacial Hubble (HST). De NASA. Dominio público. Dereita: (b) Sistema observado en raios-X polo satélite Chandra, sendo neste caso a AB (Sirio B) o obxecto máis brillante. De NASA/SAO/CXC, vía Wikimedia Commons. Dominio público.*

Estímase que un 10 % de todas as estrelas da Vía Láctea poidan ser ananas brancas, as cales se clasifican en varios grupos de acordo coa composición química das súas fotosferas: tipo DA, de hidróxeno; DB, de helio; DQ, con carbono; DZ, con metais; ou as DC, que non amosan ningún tipo de liñas químicas nos seus espectros.

Unha curiosa particularidade das ananas brancas, predita na década de 1960, é que os seus interiores cristalizan, dende o centro, a medida que se arrefrían. En 2005, estudando as propiedades oscilatorias da AB BPM 37093 na constelación do Centauro, un equipo do WET (Whole Earth Telescope) liderado por Antonio Kanaan, no que eu participei, determinou que o seu interior é compatible con modelos de cristalización de ata o 90 % en volume. Isto podería significar que o interior desta AB fose de diamante, cun diámetro duns 4.000 km e unha masa total duns  $5 \times 10^{29}$  kg —ou sexa, un diamante cun 25 % da masa do Sol nun tamaño algo menor ca Mercurio—. En 2013 descubriuse outra AB co interior potencialmente de diamante (cristalizado), neste caso orbitando ao púlsar PSR J2222-0137.

En 2020, na revista Nature, publicouse o descubrimento dun consorcio internacional liderado por Andrew Vanderurg, do primeiro planeta orbitando unha anana branca (WD 1856+534), analizando datos do

satélite TESS da NASA combinados con datos dos observatorios de Canarias. Neste curioso sistema exoplanetario, a AB ten un tamaño menor ca o do seu planeta, o cal a orbita en soamente 34 horas, isto é: sería equivalente, aproximadamente, a se Xúpiter (planeta) orbitase a Terra (estrela) cada 1,4 días (ano)!

Podemos dicir tamén, que as ananas brancas moi masivas en certo tipo de sistemas binarios de curto período, poden producir supernovas (denominadas de tipo Ia) se, no decurso da evolución conxunta, a estrela compañeira dóalle suficiente materia das súas capas exteriores, e a AB sobrepasa o límite de masa de Chandrasekhar. Nalgúns casos, este tipo de SN prodúcese tamén pola fusión de dúas ananas brancas nun sistema dobre dexenerado ultracompacto, con períodos orbitais de minutos, ao superar a combinación de ambas as masas o límite de Chandrasekhar.

## Estrelas de neutróns

Diciamos que unha estrela de alta masa (de polo menos 8 masas solares), ao final da súa vida desenvolve un núcleo de ferro incombustíbel rodeado de sucesivas capas «de cebola» de elementos químicos pesados, e verase abocada a estoupar como SN. En ausencia de máis reaccións nucleares nin ningún outro mecanismo de soporte da estrutura estelar, o interior da estrela sufrirá un colapso cunha enorme liberación de enerxía gravitacional. Parte desta enerxía disociará o ferro nos seus protóns e neutróns, isto é, rachando os núcleos dos átomos de ferro, e o colapso persistirá ata a total dexeneración dos neutróns (para os que tamén actuará o Principio de Exclusión de Pauli). As capas superiores serán bruscamente expulsadas ao medio interestelar, mentres o núcleo compacto da estrela permanecerá enteiramente formado por un plasma de neutróns dexenerados (fig. 28a). Así se forma unha estrela de neutróns (EN).

Tamén existirá para estas estrelas una masa límite máxima (coñecida como masa de Tolman-Oppenheimer-Volkoff - TOV) por riba da cal teríamos inequivocamente a formación dun buraco negro estelar. Podemos en certa maneira dicir que as EN corresponden a un caso extremo de ananas brancas pero, a diferenza co Límite de Chandrasekhar, o límite TOV non está completamente definido, estimándose o seu valor entre 1,5 e 3 masas solares.

As EN teñen radios típicos de 10 km! (o seu diámetro total sería polo tanto, aproximadamente, a distancia Vigo-Vilaboia por carreiteira, na provincia de Pontevedra) e densidades tan altas que un pequeno terrón da súa materia pesaría millóns de toneladas! Con tamaños tan pequenos e a súa baixa luminosidade, as EN illadas son practicamente imposíbeis de detectar no universo. Pero os púlsares son EN con campos magnéticos dipolares moi intensos, tipicamente de millóns de gauss (polo tanto, millóns de veces máis intensos ca o campo magnético terrestre), xirando a velocidades de milleiros de quilómetros por segundo, e emitindo sinais de radio moi regulares varias veces (incluso centos de veces) por segundo (fig. 28b). Foi este efecto observacional, que se explicaría de xeito similar a como funciona un faro costeiro coa súa luz xirando regularmente, o que permitiu a Jocelyn Bell Burnell a detección dos púlsares (en 1967, como antes indicamos) e, polo tanto, das estrelas de neutróns.



*Fig. 28 (a, b). Esquerda: (a) Esquema da estrutura interna dunha estrela de neutróns. De NASA – Dominio público, vía Wikimedia Commons, con crédito: Medium69-William Crochot. Dereita: (b) Esquema do funcionamento dun púlsar. Procedencia: La ciencia del cielo (2010, ISBN: 9788415078029). Realización: Marcos Costoya. Cortesía de Ediciones Nigra Trea, S. L.*

Xa en 1939 Walter Baade e Fritz Zwicky postularan a posíbel existencia das EN, pero foron Thomas Gold e Fred Hoyle os primeiros investigadores en relacionar as propiedades observadas dos púlsares, despois do seu descubrimento, coa súa natureza como estrelas de neutróns. Só este tipo de estrelas tan compactas, e formadas por materia dexenerada como agora sabemos, eran o suficientemente pequenas para poderen rotar tan rapidamente.

Sabemos hoxe que o ritmo de rotación dos Púlsares decrece lentamente co tempo, a medida que envellecen. Así, asóciase os Púlsares máis rápidos con EN xoves ou recentemente formadas e os máis lentos coas vellas, nun rango de períodos de rotación que abrangue aproximadamente dende os 1,4 milisegundos ata os 23,5 segundos. Esta diminución na rotación dos púlsares débese ao ritmo de disipación da súa enerxía en cada volta, con ritmos de desaceleración de menos dunha parte en billóns de segundos por segundo.

Obsérvase tamén non obstante o paradoxo de que algúns púlsares vellos amosan períodos de rotación de milisegundos, apuntándose a posíbel explicación en termos de acrecentamento de materia por parte do púlsar dentro dun sistema binario, o cal o faría “rexuvenecer”. Os púlsares binarios son en xeral grandes emisores de raios-X, ao converter a este tipo de radiación a enerxía gravitacional do gas da estrela compañeira, a cal adoita ser unha xigante cun potente vento estelar, atrapado polo púlsar.

Como curiosidade, a primeira detección confirmada de (exo)planetas arredor dunha estrela distinta do Sol, produciuse arredor do púlsar PSR1257+12. Aleksander Wolszczan e Dale A. Frail, usando datos do radiotelescopio de Arecibo (dependente da Fundación Nacional de Ciencias, NSF, de EE. UU., e en parte famoso pola película *Contact*, 1997), publicaron na revista *Nature* en 1992 a detección de dous, e posibelmente tres, planetas orbitando este púlsar de 6,2 milisegundos. Unha posibilidade proposta para a formación destes corpos é que fosen produto do barrido das atmosferas de xigantes gasosos, con grandes núcleos rochosos, existentes previamente ao estoupido de SN que produciu o púlsar en si.

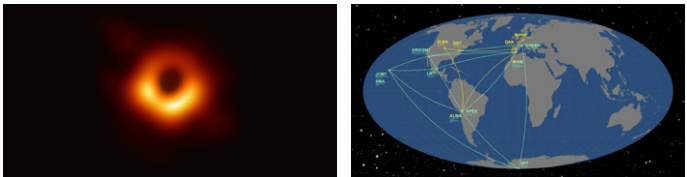
En 2015 a IAU (Unión Astronómica Internacional) propuxo una votación pública para nomear “exo-mundos” onde este púlsar e os seus tres exoplanetas recibiron os nomes de Lich, Draugr, Poltergeist e Phobetor, respectivamente. Draugr sería o máis interior e menos masivo —unhas 50 veces menos masivo cá Terra—, cun período orbital de aproximadamente 25 días, sendo os outros dous planetas unhas catro veces máis masivos cá Terra, e con períodos duns 66 e 98 días, respectivamente. Non se descarta tampouco que exista un cinto de asteroides no sistema.

En 2019, nun concurso similar, a IAU aprobou coma nomes para a estrela HD 149143 e o seu único planeta coñecido ata a data, Rosalía de Castro e Río Sar, respectivamente, a proposta da Agrupación Astronómica Ío de A Coruña. E, en decembro de 2020 colapsou, por fallos na estrutura, e quedou fora de servizo o radiotelescopio de Arecibo, unha antena de 305 m de diámetro en Porto Rico, que fora referente na observación radioastronómica mundial por máis de 50 anos.

## Buracos negros

E, os buracos negros (BN), que quedaramos que son? Os buracos negros son obxectos fascinantes e misteriosos a partes iguais, pero non son ciencia ficción posto que as evidencias observadas das consecuencias da súa existencia no universo están, a día de hoxe, probablemente documentadas. Distinguimos entre dous tipos principais de BN: os estelares e os supermasivos galácticos.

En abril de 2019 publicouse a primeira imaxe do burato negro supermasivo no centro da galaxia M87, situada a máis de 50 millóns de anos luz da Terra (fig. 29a). Para isto foron necesarios anos de traballo e colaboración dun consorcio internacional (Telescopio do Horizonte de Sucesos, ou EHT en inglés), empregando basicamente o diámetro da Terra como observatorio, con oito radiotelescopios distribuídos en tres continentes (fig. 29b). O tratamento dos datos obtidos foi extremadamente laborioso, pero abre a porta a grandes avances neste campo con futuras observacións similares.



*Fig. 29 (a, b). Esquerda: (a) Imaxe do buraco negro central na galaxia M87, obtida co Telescopio do Horizonte de Sucesos (EHT, das siglas en inglés) en 2017. De ESO (<https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>). Dereita: (b) Localización dos telescopios participantes no EHT e o Global mm-VLBI Array (GMVA). De: ESO/O. Furtak (<https://www.eso.org/public/images/ann17015a/>). Ambas as imaxes baixo licenzia Creative Commons Attribution 4.0 International, vía Wikimedia Commons.*

E, en 2020, o Nobel de Física foi concedido a dous investigadores e unha investigadora polos seus estudos sobre BNs: a Reinhard Genzel e Andrea Ghez por probar a existencia dun BN duns catro millóns de masas solares no centro da Vía Láctea, en base á observación, tamén durante anos, das distorsións producidas nas órbitas de estrelas preto del; e a Roger Penrose por demostrar a existencia de BNs como singularidades resultantes da aplicación da teoría da relatividade xeral de Einstein (quen, nunca chegara admitir a mera existencia real desta mesma predición).

Andrea Ghez é a cuarta científica en ser premiada có Nobel de Física, nos seus 119 anos de historia, despois de Marie Curie (1903), Maria Goeppert-Mayer (1963) e Donna Strickland (2018).

Insistimos: sabemos logo que son os BNs? Mentres que, como consecuencia dun estoupido de SN, se o núcleo estelar resultante supera as tres masas solares, a formación dun BN estelar é inminente (a compresión gravitacional dos neutróns dexenerados xa non podería ser compensada pola súa Presión de Fermi), non está aínda clara a orixe dos BNs supermasivos nos interiores das galaxias. Unha posibilidade sería por acrecentamento masivo de materia sobre BNs estelares previamente formados nos centros galácticos ou, unha recente teoría propón, a súa creación directamente por colapso de materia cando o universo tiña poucos centos de millóns de anos de idade, pero o certo é que o debate neste terreo segue aberto.

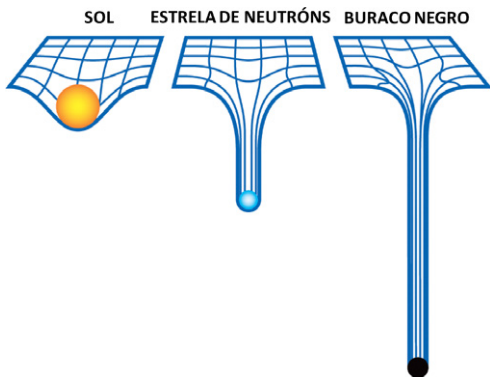
Para un estoupido de supernova, onde parece que a formación de buracos negros estelares está máis clara, a materia non expulsada ao exterior colapsaría no núcleo da estrela sobre si mesma, en principio infinitamente, e formando polo tanto a singularidade predita pola teoría da relatividade xeral. Así que, con relación á nosa pregunta anterior, a resposta é non: sabemos que existen, pero non sabemos en realidade o que hai no interior dos BNs.

Interésanos clarificar en todo caso que a *imaxe dun BN* non se pode obter, posto que a acción gravitacional no seu interior é tan intensa que nin a luz podería escapar. O que se obtivo na famosa imaxe de 2019 de M87, é unha imaxe dos arredores do chamado «Radio de Schwarzschild» que se corresponde coa distancia á cal a velocidade de escape da materia (dende o interior) igualaría ao valor da velocidade da luz. Como nada no universo viaxa máis rápido cá luz, a

partires desa distancia xa nada (nin a luz mesma) podería escapar do BN central.

O campo gravitacional xerado sería ademais tan intenso que calquera cousa, materia ou enerxía, procedente do exterior, que se aproximase suficientemente a este radio, sería atrapada polo BN cara ao seu interior, deixando de ser observada e desaparecendo do universo coñecido. Este radio marca polo tanto a fronteira ou horizonte do obxecto ata onde podemos observar os sucesos que teñan lugar no seu entorno: coñécese tamén como *Horizonte de Sucesos* do buraco negro.

E, por se non chegaba de complexidade, en realidade non é exactamente a gravidade (a da lei universal postulada por Newton no SXVII, para a caída de corpos masivos ou o movemento planetario) a que fai aos fotóns do interior non poderen escapar dun BN. E, en rigor, non podería xa que os fotóns son partículas elementais, de natureza cuántica, que non posúen masa; masa sobre a cal, outro corpo masivo puidese actuar gravitacionalmente.



*Fig. 30. Asegundo a aplicación da teoría da relatividade xeral, esquema da deformación do espazo-tempo arredor dun BN, na dereita da imaxe, en comparación á do Sol (esquerda) e dunha estrela de neutróns (centro). Adaptado de Ksshhd, baixo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 Internationa, vía Wikimedia Commons.*

Grazas á teoría da relatividade xeral, sabemos que a masa dun obxecto deforma o espazo e o tempo nas súas proximidades, facendo caer

a materia (ou a luz) ao interior. Sería similar a cavar un pozo no espazo, en cuxo interior se atopa o corpo que o xera; canto máis masivo o corpo, máis fondo o pozo e, polo tanto, maior a deformación causada sobre o entorno (fig. 30).

Os buracos negros son corpos masivos e, case máis importante, extremadamente compactos que deforman espazo-temporalmente o seu arredor, actuando en condicións relativistas sobre todo o que se lles achegue suficientemente ao horizonte de sucesos. E son, posiblemente, os laboratorios de física máis formidábeis do universo xa que neles actúan a un tempo a relatividade xeral e a mecánica cuántica sen que saibamos exactamente que fan ambas as dúas xuntas dentro. Fascinantes e misteriosos, si, a partes iguais.



## Capítulo 6

# Anfífilos e vesículas

Poñéndonos en contexto, a Terra é a todas luces moi importante para nós, porque é o noso fogar no universo. E non temos outro: diciamos xa no limiar isto tamén.

A Terra é un dos 8 planetas principais do chamado Sistema Solar, orbitando unha estrela bastante corrente chamada Sol, xunto con varios planetas ananos e múltiples asteroides, cometas e outros corpos menores (fig. 31). O 99,85-99,86 % da masa total do sistema empregouse na creación do propio Sol e a porcentaxe restante, inferior ao 0,2 %, en todo o demais: planetas, cometas, asteroides... serían considerados en realidade escombros (debris, en inglés) sobrantos. Os planetas principais, divídense en 4 xigantes exteriores gasosos, Xúpiter, Saturno, Urano e Neptuno, e 4 interiores de tipo terrestre, Mercurio, Venus, Terra e Marte. A Terra é polo tanto o terceiro planeta interior, de tipo rochoso, do Sistema Solar, e está sempre acompañado polo seu único satélite natural que chamamos Lúa. A Lúa contribúe á estabilidade orbital do planeta.

A palabra *planeta* provén do grego **πλανήτης** (planétés) e etimoloxicamente significa vagabundo ou errante. Na antigüidade, os cinco planetas observábeis a ollo dende a Terra, Mercurio, Venus, Marte, Xúpiter e Saturno, non parecían seguir traxectorias regulares coma as estrelas e por iso foron designados coma errantes. Hoxe sabemos que a Terra, Urano e mais Neptuno, logo serían errantes tamén.

O planeta Terra é tamén moi importante por outro motivo: a día de hoxe, é o único lugar do universo onde nos consta que haxa vida en calquera formato, entendida a vida dende un punto de vista biolóxico. Daquela, inmediatamente xorden moitas preguntas sobre a vida,



como por exemplo: é que non hai vida en ningún outro sitio, ou haina pero nós aínda non demos con eses sitios?; non demos, porque non podemos, pero poderemos algunha vez?; se damos con eles, que tipo de vida atoparemos: vida similar á da Terra ou distinta? En definitiva, queremos saber se *estamos solos en la galaxia, o acompañados* (Siniestro Total, 1984) e se habería outros fogares posíbeis para nós... fogares extra-terrestres, aos que algún día quizais ir.

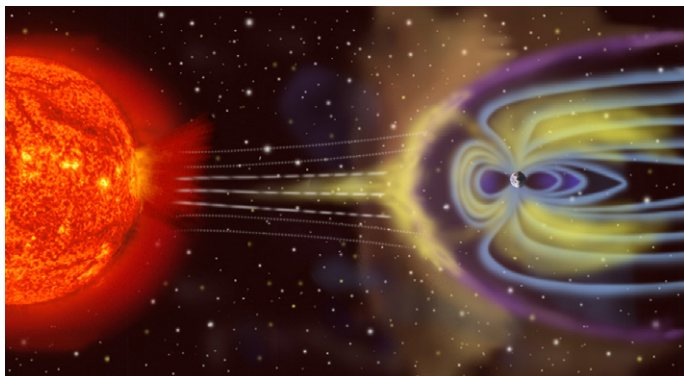
Na ciencia ficción ou no cine, onde vai que teríamos mundos aos que ir vivir e asentarnos pero da man da ciencia e a tecnoloxía actuais aínda non é o caso: nin á Lúa. Nos vindeiros parágrafos tentaremos analizar algúns dos aspectos relevantes relativos á cuestión, nada menor, da vida e da habitabilidade no universo. Sen pretender sermos exhaustivos, buscaremos algunhas pistas e/ou algunhas respostas dentro ou fóra do Sistema Solar, na procura desa *outra* vida. Poñéndonos en contexto.

Diciamos que a luz é a mensaxeira porque practicamente todo o que sabemos do universo, cóntanolo a luz que viaxa por el. Por iso é tan importante analizar a luz ben e extraer toda a información que a luz transporta. Cando a luz atravesa un gas ou medio gasoso, por exemplo unha atmosfera, interactúa cos átomos e as moléculas dos diferentes elementos químicos presentes, deixando un «espectro de liñas», ou bandas, que nos informan sobre a composición química dese gas; así, poderíamos detectar se hai auga (H<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), clorofila (C<sub>55</sub>H<sub>72</sub>O<sub>5</sub>N<sub>4</sub>Mg)... etc., nesa atmosfera.

Outro preámbulo importante antes de seguir: a nosa Terra ten unha atmosfera, relativamente delgada, que nos protexe da radiación exterior e, sobre todo e moi importante, ten un campo magnético dipolar, que chamamos *magnetosfera* (fig. 32), coma un imán xigante de polo a polo que, coas súas liñas magnéticas, nos protexe aínda mais, especialmente das partículas enerxéticas do vento solar e doutras radiacións galácticas ou extragalácticas potencialmente nocivas para a vida.

Así, dende a nosa posición na Terra protexida polas nosas atmosfera e magnetosfera, co coñecemento científico e medios técnicos que temos a día de hoxe, escudriñamos o ceo na busca de signos de vida nalgún sitio do universo máis. Que tipo de vida? Vida máis ou menos

a semellanza do(s) tipo(s) de vida que coñecemos aquí: unicelular ou pluricelular, con base química no carbono, e posibelmente formada, coma na Terra, ao abeiro da auga líquida na superficie, ou baixo ela, dun exoplaneta (ou corpo) con atmosfera e quizais magnetosfera tamén.



*Fig. 32. Imaxe artística da magnetosfera terrestre, en combinación cō vento solar. De NASA, vía Wikipedia. Dominio público.*

Todo isto se está hoxe a investigar, con grande esforzo, en liñas de traballo audaces que empurran ao máximo os límites do coñecemento humano no tema. Pero, que buscamos ou podemos buscar realmente en materia de habitabilidade extraterrestre e/ou exoplanetaria?; sendo realistas, que é o que atopamos e podemos esperar atopar a medio prazo? Aquí realmente hai moitos interrogantes, de difícil resposta, comezando por asuntos tan básicos e cruciais como a propia definición do concepto *vida* en si, e as circunstancias da transición dun estado de materia inerte ao de materia viva. Comezamos logo por estas dúas cuestións.

## **A vida é?**

Do que estudáramos na escola, hai un mínimo de tres funcións que calquera ser vivo cumpre para ser considerado como tal, como serían: desenvolverse, reproducirse e evolucionar pero, ata onde sei, non

hai unha definición pechada e completa para a vida; nin dende unha perspectiva biolóxica, nin dende unha perspectiva física ou astrofísica e, por suposto, lingüísticamente trátase dun termo que ten moitas, moitas, acepcións. Do latín, *vita*, no dicionario da RAE hai 18 definicións, dicindo a primeira e a segunda o seguinte:

- 1 *Fuerza o actividad esencial mediante la que obra el ser que la posee.*
- 2 *Propiedad o cualidad esencial de los animales y las plantas, por la cual evolucionan, se adaptan al medio, se desarrollan y se reproducen;*

e, no dicionario da RAG, hai 13, das que a primeira e segunda din o seguinte:

- 1 *Conxunto de fenómenos biolóxicos (crecemento, reproducción etc.) que presentan os seres vivos.*
- 2 *Feito de estar vivo, de existir,*

de maneira que entre as 31 (18+13) acepcións inclúen 1 mención explícita á bioloxía e ningunha á física ou química que tamén, seica, teñan algo que ver no asunto.

A segunda lei da termodinámica di que un sistema físico illado tende á desorde, isto é, ao caos, a medida que o tempo pasa. A variábel física que dá conta do grao de desorde dos sistemas denomínase entropía, e sería nula para un caso de orde absoluta ou acadará un valor máximo para calquera sistema en completo equilibrio. De feito, a entropía (desorde) do universo enteiro medra continuamente e no momento que fose máxima, cun equilibrio total de presións e temperaturas en todas partes, preto do cero absoluto, chegaría a chamada *morte térmica* do universo (ou Big Freeze). E esta forma de morte cosmolóxica chegaría, segundo varios modelos, incluso antes do Big Rip que mencionamos no capítulo 2 (fig. 12).

En base a isto, poderíamos definir un sistema vivo como unha porción de materia na que se produce un incremento continuo de orde sen intervención externa. Un organismo vivo sería entón un sistema altamente ordenado que pode manter a súa orde vencendo a tendencia xeral á desorde; pode incluso aumentala, pero a costa dun aumento en maior medida do grao de desorde do seu medio circundante. A

outra condición que este tipo de sistema debe cumprir para se considerar vivo é a da replicabilidade: ser quen de constituír outros sistemas ordenados semellantes independentes. Así, cumprírase a un tempo que o grao de desorde xeral aumente, mentres a orde do sistema e dos seus sistemas descendentes tamén aumenta.

Na táboa periódica hai 118 elementos químicos, dos que 92 existen na natureza de xeito estábel. Deles, só 27 parecen formar parte das formas de vida coñecidas na Terra. É máis: a vida nun 99 %, baséase nunha manda de elementos químicos, carbono, hidróxeno, oxíxeno, nitróxeno, fósforo e xofre (CHONPS), considerados indispensábeis para a existencia de seres vivos. Eses 27 elementos combínanse para formar as chamadas biomoléculas presentes na materia viva. Exemplos de biomoléculas orgánicas, co carbono como base, serían as proteínas, azucres, graxas ou ácidos nucleicos, que os seres vivos son quen de sintetizar, pero tamén moléculas inorgánicas (sen carbono) coma a auga ( $H_2O$ ) ou o cloruro sódico (sal,  $NaCl$ ) son indispensábeis para a vida.

E, destes elementos e destas moléculas, orgánicas e inorgánicas, hai a moreas polo universo adiante...

Como exemplo, nas envolturas das nebulosas planetarias, ademais de auga, silicatos, neon ou argon, hai hidrocarburos policíclicos aromáticos (PHA, das súas siglas en inglés), que son compostos orgánicos habituais do petróleo ou do alcatrán. Os PHAs atópanse tamén nos cometas, meteoritos ou medio interestelar. E nos cometas en particular, ademais de auga e xeo, hai claramente moléculas orgánicas de interese biolóxico, como  $CO$  (monóxido de carbono),  $CH_4$  (metano),  $CH_3OH$  (metanol),  $C_2H_6$  (etano),  $HCN$  (cianuro de hidróxeno),  $NH_3$  (amoníaco),  $H_2CO$  (formaldehído),  $CH_3CN$  (acetónitrilo) ou  $C_2H_2$  (acetileno).

Sabemos que baixo certas circunstancias, nos ambientes que rodean aos planetas en etapas temperás da súa formación, ou mesmo nos inicios da formación da Terra, poderíanse producir moléculas coma o cianuro de hidróxeno ou o formaldehído; moléculas que darían lugar co tempo a estruturas precursoras do ARN, aminoácidos ou lípidos, todos na base da vida celular que coñecemos.

Pero a vida non son só conxuntos de moléculas orgánicas e inorgánicas xuntas nun sistema físico ordenado, ou, si o son?

## A transición do inerte ao vivo é?

Por poder podémonos preguntar como se produce esa transición crucial, de sistemas de materia inerte a sistemas de materia viva, pero a resposta non estaría a día de hoxe completamente definida, ademais de adentrarse nun terreo extremadamente complexo. Podémonos alternativamente preguntar se a astrofísica ten algo que aportar aquí, a esta complexidade, e atoparemos que certas pistas que nos dea si nos han valer. En concreto, da man da disciplina científica coñecida como astrobioloxía, que apenas conta con 23 anos de existencia dende a creación, por parte da NASA, do NAI (NASA Astrobiology Institute) en 1998.

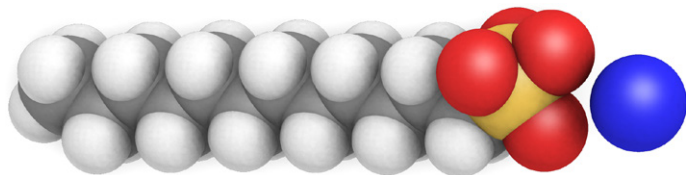
A astrobioloxía é polo tanto unha rama do coñecemento recente e transdisciplinaria que integra, dende o seu inicio, estudos e investigacións en bioloxía, química, xeoloxía, informática, antropoloxía ou filosofía, así como en astronomía, astrofísica e exploración espacial, co cometido fundamental de entender a vida, e a súa orixe e evolución, alá onde a haxa, no universo enteiro.

En 1999, creouse o CAB (Centro de AstroBioloxía) de Madrid, como un centro de investigación conxunto do CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) e do INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) e, no ano 2000, converteuse na primeira institución fóra de EE. UU. asociada ao NAI da NASA. O CAB é hoxe o centro de referencia en investigación astrobiolóxica do estado español, integrado por investigadoras e investigadores especialistas en campos que abranguen da biodiversidade microbiana, á formación e evolución de galaxias, pasando pola química prebiótica, e máis. En 2019 o NAI foi reconvertido ao NAP (NASA Astrobiology Program), ao tempo que en Europa se constituíu o EAI, European Astrobiology Institute, integrado por varios centros de investigación especializados incluído o CAB.

E, o cometido da astrobioloxía polo tanto é dar conta da vida, por detectar, do seu xurdimento e evolución noutros mundos con ambientes hostís ou extremos, por caracterizar, e das probas en forma de biomoléculas, biomarcadores ou outras evidencias, por descubrir, que inequivocamente demostren a existencia da dita vida. Como? De moitos xeitos, e con case calquera pista que axude... Por exemplo: sabedes o que é o dodecil sulfato de sodio ( $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$  – fig. 33)? Unha molécula de tipo anfífilo presente en moitos deterxentes de uso

doméstico. E, que ten que ver coa astrobioloxía e/ou coa habitabilidade no universo? Pois ten.

Vou resumir a continuación o que conto sobre ela nas miñas clases de Física no 1º curso do Grao en Bioloxía na Universidade de Vigo, nun intento por ilustrar a contribución que a astrofísica e a astrobioloxía poden facer, ou fan, ao entendemento da vida no universo.



*Fig. 33. Modelo de estrutura molecular do dodecil sulfato de sodio. A bola azul correspondería ao átomo de sodio ( $\text{Na}$ ), as vermellas de oxíxeno ( $\text{O}_4$ ), a amarela o xofre ( $\text{S}$ ), as gris escuro serían de carbono ( $\text{C}_{12}$ ) e as gris claro de hidróxeno ( $\text{H}_{25}$ ). De Manuel Almagro, vía Wikipedia Commons. Dominio público.*

Os anfífilos son moléculas carbonadas longas cunha cabeza polar hidrofílica (polo tanto, amante da auga) e unha cola hidrofóbica (que a repele). Estas colas moitas veces son tamén lipofílicas, isto é, amantes dos lípidos (ou graxas). En presenza de auga e baixo certas condicións, particularmente de pH, este tipo de moléculas anfífilas pódense autoorganizar espontaneamente formando estruturas esféricas, chamadas micelas (fig. 34a), onde as cabezas polares na superficie da esfera esconden, cara ao interior, as colas hidrofóbicas, protexéndoas da auga circundante.

Nos deterxentes, por certo, prodúcese un desequilibrio de forzas entre a atracción que exercen as partículas de lixo (normalmente de natureza graxa) sobre as colas hidrofóbicas dos anfífilos, e a atracción que senten as cabezas hidrofílicas polas moléculas da auga, dando como resultado un apresamento do lixo no interior das micelas que se formen e que, serán doadamente eliminadas aclaradas pola auga. E así os deterxentes (anfífilos) lavan ben.

Pero os anfífilos poden tamén chegar a formar estruturas esféricas aínda máis complexas, chamadas vesículas (fig. 34c), as cales constitúen a base construtiva das células dos organismos vivos. Por?



Nunha vesícula, as moléculas de anfífilos forman unha banda de dobre capa (fig. 34b), coas colas protexidas entre dúas caras de cabezas polares que, unha vez enroscada, constituirá a parede protectora dun oco central, separándoo do medio acuático exterior. Nese oco central da vesícula, chegado o caso, poderíanse desenvolver outras estruturas como por exemplo orgánulos dalgún tipo. A protección que supón a parede bicapa de anfífilos, sería así mesmo a membrana de comunicación e/ou intercambio coa auga (ou medio líquido) do exterior: coma na célula máis básica dos seres vivos que coñecemos. Así, a maioría de membranas celulares están constituídas por unha bicapa fosfolípídica, onde o grupo polar dos anfífilos (cabeza) ten un grupo fosfato, e as colas apolares hidrofóbicas son cadeas de ácidos graxos.

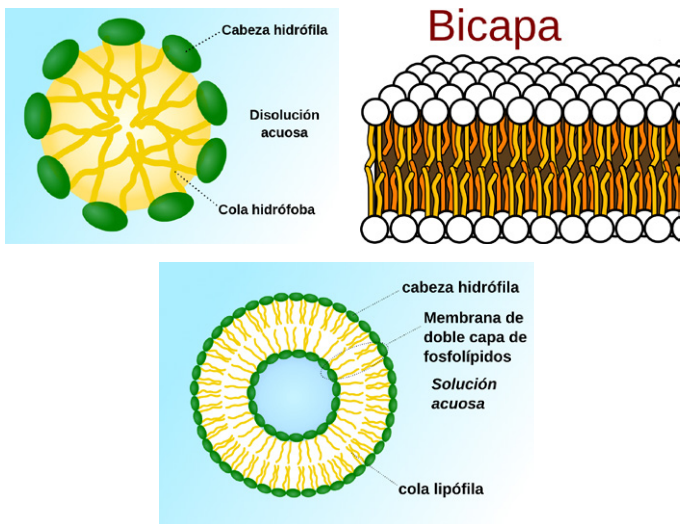
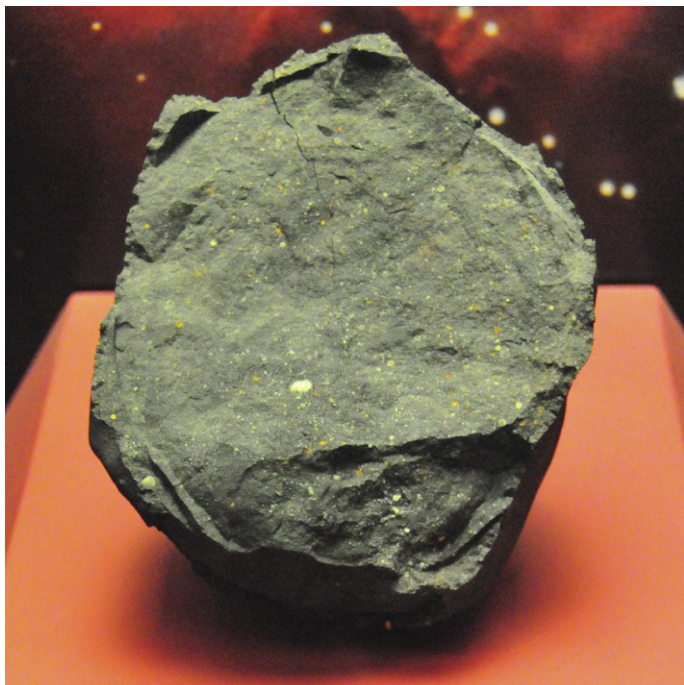


Fig. 34 (a, b, c). De esquerda a dereita: (a) Esquemas dunha micela, (b) dunha bicapa de anfífilos, e (c) dunha vesícula como estrutura precursora celular. De, respectivamente, Original English: SuperManu. Spanish: AngelHerraez, CC BY-SA 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0> (esquerda); adaptado de Jmarchn baixo licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported (centro); e de SuperManu, Rowanwindwhistler - Este arquivo deriva de: Liposome scheme-en.svg; CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80332892> (dereita). Os tres vía Wikimedia Commons.

Pero, preguntámonos de novo, que ten todo isto que ver coa astrofísica e/ou a astrobioloxía. Máis alá de que a fabricación dos elementos químicos, lembremos, corre maioritariamente a cargo das estrelas... queremos dicir.

Ao longo da historia científica sucedéronse varios experimentos de laboratorio, algúns moi famosos, no intento de crear vida a partir de moléculas simples sometidas a procesos físicos enerxéticos, como por exemplo grandes descargas eléctricas. Nalgúns casos intentouse simular as condicións dunha Terra primixenia, cunha atmosfera



*Fig. 35. Fragmento do meteorito que caeu en Murchison (Australia) en 1969, exposto no Museo Nacional de Historia Natural de Washington (EE. UU.). Adaptado de Art Bromage, CC BY-SA 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>>, vía Wikimedia Commons.*

principalmente composta de metano, amonio e auga, obténdose a formación de aminoácidos, péptidos ou bases nitroxenadas.

Nos discos protoestelares ou protoplanetarios, cometas ou nubes interestelares de hidróxeno molecular hai, como xa dixemos, xeos e mesturas moleculares moi diversas, cuxos análogos tamén poden ser sometidos en laboratorio a condicións que simulen procesos térmicos ou fotoquímicos enerxéticos. No Laboratorio de Astrofísica&Astroquímica do Centro de Investigación da NASA en Ames, en particular, conseguiron en 2001 converter moléculas simples e moi abundantes (como auga, metano, dióxido de carbono, amoníaco, etc.) someténdooas a irradiación UV, en compostos orgánicos complexos e de interese astrobiolóxico, como nucleobases, aminoácidos, hidrocarburos de tipo PAH ou anfífilos.

Nada impide ou, ao contrario, as condicións danse para iso, que este tipo de procesos con irradiación UV ocorran acotío no espazo extraterrestre en múltiples localizacións (nubes moleculares, discos protoestelares, etc.) da nosa galaxia, ou de calquera galaxia, de xeito que tales compostos orgánicos unha vez formados, e os anfífilos en particular, se poidan chegar a hospedar en ambientes propicios para o desenvolvemento da vida. Os anfífilos, tamén, viaxan a bordo de meteoritos: sabémolo dende que en 1985 David W. Deamer publicou en Nature a súa detección no meteorito Murchison (fig. 35).

## Panspermia

Este resultado daría soporte á teoría da «panspermia», do grego παν- (pan = todo) e σπερμα (sperma = semente), proposta en 1908 polo Premio Nobel de Química Svante A. Arrhenius, para dar conta do comezo da vida na Terra grazas á súa colonización por microorganismos viaxeiros procedentes do exterior. Hoxe podemos pensar que para isto deberían ter sido seres vivos de natureza verdadeiramente resistente, do tipo coñecido coma seres «extremófilos», e posto que de microbios en meteoritos non hai deteccións, esta teoría podería corresponder de maneira máis xenérica ao transporte en meteoritos dos materiais precursores da vida. Un exemplo sería o caso dos meteoritos metálicos que, compostos fundamentalmente por aliaxes de ferro e níquel, conteñen pequenas cantidades de carbono, xofre e fósforo.

E o fósforo (P), en particular, xoga un papel de enorme relevancia astrobiolóxica, xa que ata onde sabemos está en todas as formas de vida coñecidas na Terra, ademais de nas membranas fosfolípídicas, intervindo no ADN e nos intercambios enerxéticos celulares. Pero, na composición química do Sistema Solar, é o elemento menos abundante do grupo CHONPS. Ao mesmo tempo, a orixe exacta da súa produción por nucleosíntese estelar é incerta, e a súa abundancia é difícil de medir xa que produce liñas moi febles nos espectros observados.

Neste contexto, aplicando novos algoritmos de análise, desenvolvidos con participación de investigadores do grupo LIA2 da Universidade da Coruña (UDC), sobre varios centos de milleiros de espectros estelares do catálogo APOGEE, en 2020 publicouse en Nature o importante descubrimento de 15 novas estrelas ricas en fósforo da nosa galaxia. O estudo detallado destas estrelas, que tamén presentan sobreabundancias de oxíxeno (O), magnesio (Mg), silicio (Si), aluminio (Al) e cerio (Ce), poderá contribuír significativamente ao entendemento das abundancias de fósforo hoxe no planeta Terra.

Chegados a este punto, diríamos que estamos por tanto en situación de intentar buscar e detectar vida, ou calquera pista que nos leve a ela e botando man de cantas ferramentas de investigación poidamos, nun universo cheo de elementos químicos que as estrelas dese universo fabrican e espallan. Nun universo inmenso cheo de elementos e moléculas para a vida. Dende o noso contexto na Terra, cara a onde mirar?; ou, onde ir buscar vida extraterrestre primeiro: no Sistema Solar ou fóra del? A resposta é preto e lonxe á vez, xa que ambas as liñas de investigación avanza, hai anos, en paralelo.

## Capítulo 7

# Outros mundos e a busca de vida fora

Con este capítulo remataremos este libro, falando un pouco máis dalgúns resultados en investigación sobre as posibilidades de existencia de vida e a súa busca nos corpos dentro do Sistema Solar e en planetas que orbitan outras estrelas, os chamados exoplanetas ou planetas extrasolares.

### **Sobre a busca de vida DENTRO do Sistema Solar**

Dentro do Sistema Solar, Marte capitanea a lista de corpos onde se cre que haxa máis posibilidades de detectar vida, ou onde a teña habido no pasado. Pode que, hai uns 3.900 millóns de anos, máis ou menos ao mesmo tempo que a vida se desenvolvía na Terra, Marte tivese océanos, atmosfera e unha magnetosfera. Pero, sendo un planeta máis pequeno e con menos enerxía interna cá Terra, perdeu a súa magnetosfera protectora por solidificación do núcleo metálico, e con ela volatilizáronse os océanos e o 99 % da atmosfera orixinal. Hoxe queda unha fracción de auga nos casquetes polares e no subsolo dun planeta desértico e con temperaturas medias de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  en superficie.

Ademais de moita literatura, fascinación ou especulacións sobre habitantes marcianos dende séculos atrás, as primeiras misións non tripuladas de natureza científica cara Marte comezaron nos anos 1960 co programa soviético Mars e o estadounidense Mariner. Mariner 9, a finais de 1971, sería a primeira sonda en entrar en órbita estábel arredor dun planeta distinto da Terra; en órbita marciana, neste caso. En decembro dese mesmo ano, o módulo de aterraxe da sonda soviética Mars 3 estivo activo sobre a superficie de Marte uns 20 segundos, enviando á Terra a que sería a primeira imaxe do planeta. Pero serían

as misións da NASA Viking I e II, que chegaron a Marte en xullo e setembro de 1976, respectivamente, as que proporcionarían series de datos e imaxes de enorme valor para o progreso científico no estudo de Marte (fig. 36). Tras 20 anos, en 1997, chegaron o orbitador Mars Global Surveyor e a sonda Mars Pathfinder, ambas da NASA, e en febreiro de 2021 chegaron ao planeta tres misións de tres países distintos: Hope dos Emiratos Árabes, Tianwen-1 de China e Perseverance de EE. UU. Con estas tres, serían 52 intentos dende 1960.



*Fig. 36. Primeira imaxe en cor de Marte da misión Viking I. De NASA, dominio público.*

Tras 50 anos de resultados con luces e sombras, xa que un 50 % das misións previas a Marte fracasaron, realmente o balance neto de descubrimentos e avance de coñecemento sobre Marte é sorprendente. En Marte, ademais de auga e minerais hidratados, tormentas de po de dimensións planetarias causadas por ventos de máis de 150 km/h, ou pequenos movementos sísmicos a razón de dous diarios, hai os seis elementos do grupo CHONPS que foron detectados in situ en rochas de entre 4.600 e 3.900 milleiros de anos de antigüidade. Onde hai auga *podería* haber vida, así que hoxe sabemos con certeza que Marte contou e conta con ambientes químico-físicos axeitados para o potencial desenvolvemento e mantemento da vida. O caso é que efectivamente a haxa e, de habela, descubri-la.

Pero incluso sen auga ou con moi pouca, coma no Deserto de Atacama en Chile, con auga ácida, coma no Río Tinto en Huelva, con auga

a 10.000 m de profundidade, coma na Fosa das Marianas, ou con auga quente, coma nas fontes termais do Parque de Yellowstone en EE. UU., na propia Terra hai ambientes inhóspitos destes estilos que son obxecto de intensa investigación sobre as súas condicións de habitabilidade, como análogos de Marte e/ou doutras localizacións aparentemente inhabitábeis do universo (fig. 37). Os seres extremófilos, que previamente mencionamos en conexión coa teoría da panspermia, resistentes a condicións de presión, temperatura, acidez, salinidade, radiación ou radioactividade letais para moitas outras especies, viven e progresan nestes ambientes. Son polo tanto os candidatos idóneos a habitantes de Marte e outros lares astronómicos.



*Fig. 37 (a, b). Exemplos de ambientes potencialmente habitables por seres extremófilos: (a) Río Tinto, en Huelva (esquerda) e (b) deserto de Atacama, en Chile (dereita), de estudo astrobiolóxico como análogos de Marte e/ou outras localizacións extraterrestres. De Gzzz baixo licenza Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International, e de Jess Wood baixo licenza Creative Commons Attribution 2.0 Generic, respectivamente. Ambas as imaxes vía Wikimedia Commons.*

Neste contexto, a pertinencia do envío de novas misións a Marte, con instrumentación e capacidade analítica cada vez máis avanzadas, queda plenamente xustificada e coa porta aberta a interesantes cuestións —que deixamos pendentes— como, por exemplo, a) o retorno de mostras marcianas para a súa análise na Terra; b) as futuras misións tripuladas; c) a terraformación do planeta; ou d) a explotación de recursos.

Outros corpos do Sistema Solar que puidesen albergar vida son: os satélites de Xúpiter Europa, Ganímedes e Calisto e os de Saturno Encélado e Titán, sobre os que comentaremos brevemente algunhas das súas características.

### *Europa*

O segundo satélite galileano, posúe una cortiza xeada, duns 20 km de espesor e amosando fracturas de milleiros de quilómetros de lonxitude (fig. 38), e máis un océano subsuperficial de auga líquida rica en sales, e que podería chegar ata os 150 km de profundidade. As forzas de marea pola súa proximidade a Xúpiter aportan a enerxía suficiente para que o océano se manteña líquido, e que na cortiza haxa movementos de placas de xeo posibelmente similares á tectónica de placas terrestre.

### *Ganímedes*

É, ademais da lúa máis grande do Sistema Solar, a única con campo magnético coñecido xa que tería un núcleo de ferro fundido parcialmente rodeado dun manto rochoso de silicatos. O satélite contería tamén un océano subsuperficial de auga líquida baixo unha cortiza de auga xeada.

### *Calisto*

Sendo o satélite dos catro galileanos máis afastado de Xúpiter, neste caso sospéitase que na súa superficie xeada poida haber materia orgánica, baixo una ténue atmosfera de dióxido de carbono. Aínda que non tan claramente como en Europa ou Ganímedes, esta lúa tamén podería conter un océano de auga líquida a uns 100 km de profundidade.

### *Encelado*

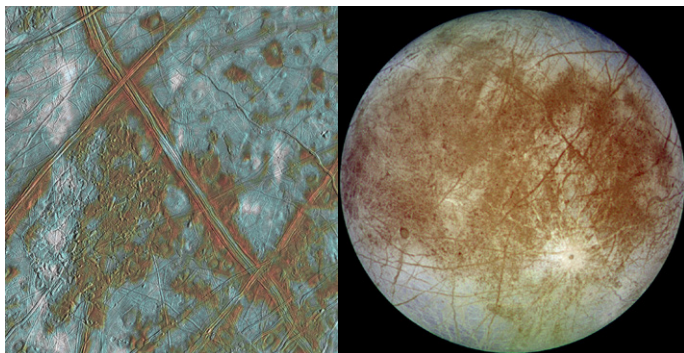
Sería un dos 82 satélites de Saturno, amosando unha tenue atmosfera sobre unha superficie xeada moi pulida, á súa vez, sobre un océano de auga líquida subsuperficial. Neste caso, trátase dunha lúa xeoloxicamente activa presentando máis de 90 geisers de varios tamaños, no polo sur, que emiten vapor de auga con compoñentes orgánicos e unha salinidade detectada similar á dos océanos terrestres.

### *Titán*

Sendo a lúa máis grande de Saturno, é tamén o único satélite do Sistema Solar cunha atmosfera significativa, unhas catro veces máis densa cá terrestre, estando composta maioritariamente de nitróxeno, metano e hidróxeno. Sospéitase que as condicións de Titán poidan asemellarse ás da Terra primitiva, cun sorprendente ciclo *hidrolóxico*



de metano, isto é, que nesta lúa chove metano e hai circulando en superficie ríos de metano líquido. Da mesma forma, baixo unha superficie presumiblemente moi rica en compostos orgánicos, hai unha capa xeada de auga e, baixo ela, un océano de auga líquida, sales e amoníaco.



*Fig. 38 (a, b). Esquerda: (a) detalle de fracturas na superficie xeada de Europa (na (b) imaxe da dereita). De NASA/Jet Propulsion Laboratory/University of Arizona e de NASA/JPL/DLR, respectivamente, vía Wikimedia Commons. Dominio público.*

Antes de seguir cos exoplanetas, faremos un pequeno inciso sobre o rebumbio levantado en 2020 pola fosfina (ou fosfano,  $\text{PH}_3$ ) de Venus, e pola suposta natureza artificial do obxecto interestelar Oumuamua (fig. 39).

## Fosfina

Trátase dun gas tóxico que pode ser insecticida, entre outros usos, e que na Terra en xeral se asocia a procesos bióticos de actividade intestinal por bacterias anaerobias. Noutros lugares onde tamén está presente, como Xúpiter ou Saturno, sábese que a súa produción é de orixe non biolóxica. As observacións publicadas de fosfina a media altura na atmosfera de Venus realizáronse con radiotelescopios dende Hawai e Chile e, aínda que prometedoras, están aínda baixo análise e non produciron un resultado concluínte: está por demostrar que a súa orixe non sexa química ou xeolóxica ou, incluso, que

as liñas espectrais detectadas non estean influenciadas por outras especies químicas. E, de ser fosfina de orixe biolóxica, quedaría un longo camiño científico para probar que tipo de bacterias ou seres vivindo nas nubes de Venus, a uns 25 km de altura sobre a superficie, fosen os seus produtores.

## Oumuamua

Que este obxecto de forma alongada, detectado en 2017, sexa de fóra do Sistema Solar é plausible, e que teña composición metálica tamén, xa que hai asteroides metálicos coñecidos. De feito, sería o segundo obxecto interestelar detectado xa que dende 2019 coñécese tamén ao cometa C/2019 Q4 (ou 2I/Borisov). O feito de que teña unha forma aplanada non é evidencia suficiente de que se trate dun artefacto non natural. Por outra banda, se unha das sondas Voyager chegase a, digamos, Proxima b e alí houbera quen a detectase, pero non tomando observacións definitivas sobre ela, sería plausible supor que tamén especularían sobre a súa natureza: a dun obxecto interestelar de forma inusual e composición metálica. Aínda que un sector científico defende en 2021 a natureza artificial extraterrestre de Oumuamua, despois dunhas 108 publicacións científicas relacionadas co obxecto, a min non me consta como no caso da fosfina, que haxa tampouco un resultado científico concluínte sobre el.



*Fig. 39. Imaxe de Oumuamua a partir de observacións realizadas có VLT (Very Large Telescope) de ESO en Chile, e con outros observatorios do mundo. De ESO/M. Kornmesser, vía Wikimedia Commons, baixo licenza de Creative Commons Attribution 4.0 International.*

## Sobre a busca de vida FORA do Sistema Solar

Diversas fontes atribúen a Anaximandro de Mileto (610/609-545 a. C.) a idea dos *mundos infinitos* pero foi a Giordano Bruno a quen queimaron no Campo dei Fiori de Roma en febreiro de 1600 por defender, entre outras cousas, a pluralidade de mundos habitados arredor de múltiples estrelas, entre as que o Sol simplemente sería outra máis.

De todas esas estrelas do ceo, unha é  $\alpha$  Centauri (ou  $\alpha$  Cen). Aínda que existen varias denominacións para moitas estrelas, este nome segue o sistema de nomenclatura astronómico estelar habitual, establecido por Johann Bayer en 1603, no que a 1ª letra do alfabeto grego ( $\alpha$  - alpha) corresponde coa estrela máis brillante da súa constelación, neste caso a constelación do Centauro. Beta ( $\beta$ ), gamma ( $\gamma$ ), delta ( $\delta$ ) Centauri, etc., serían por orde de brillo decrecente as seguintes estrelas da constelación. Como nas constelacións en xeral hai máis de 24 estrelas, unha vez rematado o alfabeto grego (coa letra omega -  $\omega$ ), empréganse números arábigos para as restantes estrelas de brillo decrecente. A constelación do Centauro, en particular, calcúlase que conteña máis de 280 estrelas.

Alpha Centauri en realidade é un sistema triplo (A-B-C - fig. 40a) que aloxa a  $\alpha$  Cen C, unha estrela anana vermella máis fría e pequena có noso Sol, tamén coñecida por Próxima Centauri. Cando dicimos «máis pequena», estamos a falar dun tamaño estelar pouco máis có de Xúpiter —en concreto unha vez e media para Próxima Cen como se pode ver na figura adxunta (fig. 40b)—, para este tipo de ananas que son en realidade das estrelas máis abundantes na galaxia.

E Próxima Cen, a pouco máis de 4 anos-luz de distancia de nós e sendo a nosa estrela veciña máis preto no Universo, saltou á palestra da fama en 2016 cando un equipo de investigación, liderado por Guillem Anglada-Escudé e Pedro Amado, publicou en Nature que está orbitada por un exoplaneta de tipo terrestre e potencialmente habitábel. O dito planeta denomínase tecnicamente  $\alpha$  Cen C b, xa que as minúsculas latinas (b, c, d...) se reservan para a nomenclatura dos planetas descubertos arredor de cadansúa estrela (distintas do Sol), anque todo o mundo coñéceo por «Próxima b».

Que queremos dicir por “de tipo terrestre e potencialmente habitábel” para Próxima b? Pois que este exoplaneta, de tamaño, masa e constitución similares aos da Terra e completando unha órbita arredor da

súa estrela cada 11 días, ten posibilidades de albergar vida por estar situado na chamada *Zoa de Habitabilidade* (ZH, ou Zoa Habitábel) da súa estrela Próxima Cen.



Fig. 40 (a, b). Esquerda: (a) Visión artística da distancia do sistema de tres estrelas de Alpha Centauri con relación ao noso Sol (en inglés). De ESO/Pale Red Dot (<http://www.eso.org/public/images/ann16002a/>). Dereita: (b) Esquema comparativo dos tamaños do Sol e Próxima (Cen), con relación a Alfa Cen A e B, Sirio A, outras estrelas, e máis o planeta Xúpiter. De ESO/M. Kornmesser (<http://www.eso.org/public/videos/eso1629b/>). Ambas as imaxes baixo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International, vía Wikimedia Commons.

Onde hai auga *podería* haber vida, co que a ZH estelar defínese como o rango de distancias orbitais compatíbeis coa presenza de auga líquida na superficie, ou subsuperficialmente, do planeta ou planetas que alí se atopan. Para isto, deben darse condicións estábeis de temperatura, presión e gravidade por longos períodos de tempo para que a vida poida desenvolverse no planeta. Así, a Terra está no centro da ZH do Sol, con temperaturas *mornas* (warm, en inglés), mentres que Venus está no borde interior quente (hot) da ZH, e Marte no seu borde exterior frío (cold). Segundo as masas do planeta e da súa estrela, diferentes tipos de estrelas terán ZHs situadas a distintas distancias, como se pode ver na figura adxunta. En particular, as ananas vermelhas coma Próxima Cen, máis frías có Sol, teñen ZHs moi preto facilitando tal situación o descubrimento de exoplanetas, por contraste de luminosidades e tamaños, entre o planeta e a estrela (fig. 41).

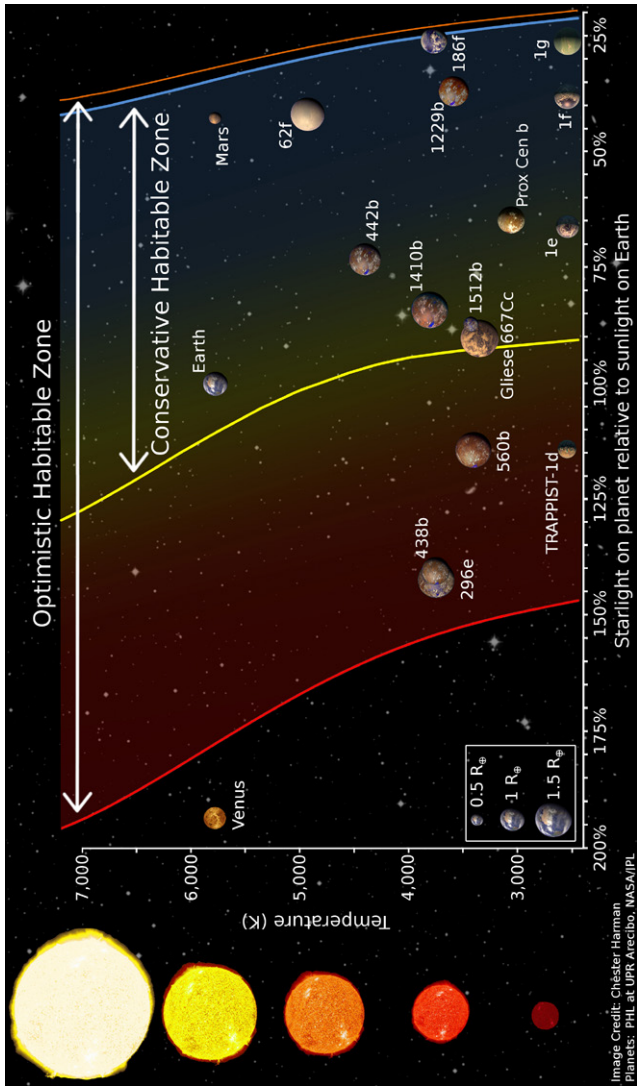


Image Credit: Chester Harman  
 Planets: PHL at UPR Arcsibo, NASA/IPL

Fig. 41. Zona de Habitabilidade para diferentes tipos de estrelas, coa localización da Terra (Earth), Próxima b (Prox Cen b) e outros planetas detectados. De Chester Harman baixo licencia CC BY-SA 4.0, via Wikipedia.

En 2019 concedeu-se o Nobel de Física a Michel Mayor e Didier Queloz polo seu descubrimento, en 1995, do primeiro planeta (que é xigante) arredor dunha estrela parecida ao noso Sol (tecnicamente, unha estrela na Secuencia Principal do Diagrama Hertzsprung-Russell, como vemos no cap. 4, fig. 21). Foi o planeta 51 Pegasi b, a uns 48 anos luz de nós, agora coñecido como Dimidio. Pero non foi o «primeiro» exoplaneta descuberto xa que, como explicamos no cap. 5, iso se produciu arredor do púlsar PSR1257+12, en 1992.

Hai tres técnicas principais para detectar exoplanetas: a de imaxe directa, a de velocidades radiais e a dos tránsitos. A técnica de imaxe directa consiste aproximadamente en sacar unha foto, algo sofisticada, tapando toda a luz da estrela que, obviamente abraia moito e enmascara ao planeta. Este método só vale para revelar a presenza de planetas xigantes a suficiente distancia da súa estrela, e produce relativamente un número baixo de deteccións. O método das velocidades radiais baséase en detectar unha especie de «bamboleo» nas liñas do espectro da luz emitida por unha estrela se está acompañada por un planeta (ou corpo masivo) que non vemos. Para os tránsitos, a semellanza do que acontece cando Venus ou Mercurio pasan por diante do Sol, cando un planeta, por pequeno que sexa, transita por diante da súa estrela produce un mini-eclipse: é esa diminución da luz total da estrela o que detectamos no tránsito. A morfoloxía específica do tránsito tamén nos informa de propiedades do exoplaneta en si, como por exemplo do seu tamaño ou incluso da posíbel presenza dunha atmosfera para o mesmo (fig. 43b). A maioría de exoplanetas coñecidos hoxe foron detectados mediante as técnicas de velocidades radiais e tránsitos, que son técnicas indirectas.

Dimidio, en 1995, foi descuberto polo método das velocidades radiais, no Observatorio da Alta Provenza (Francia) e dende entón hai milleiros de exoplanetas detectados; grandes coma Xúpiter ou pequenos coma Mercurio. Para sermos precisos, hai máis de 4.000 planetas confirmados de entre case 5.800 candidatos coñecidos. E, igual que o Sol ten 8 planetas ao redor, moitos están agrupados en sistemas coma por exemplo 55 Cancri A, cun sistema de 5 exoplanetas, tendo sido o primeiro deles detectado en 1997. En 2013 detectáronse 7 planetas arredor da estrela de tipo solar Kepler-90, a cal conta en realidade con 8 (coma o Sol), detectándose o oitavo en 2017. TRAPPIST-1 é, dende 2016, outra anana vermella famosa que tamén presenta un caso de sistema planetario curioso, con 7 exoplanetas arredor: deles,

cinco son de tamaño terrestre e dous algo menores, estando tres dos sete dentro da súa ZH (os exoplanetas e, f, g). E, dende 2018 sábese que a estrela HD 219134 tamén alberga 7 planetas, dous deles con densidades similares á da Terra.

Cada vez se detectan planetas máis e máis pequenos, a medida que avanzan a instrumentación astronómica e o refinamento das técnicas de análise de datos necesarias para tal fin. Ao principio comezouse detectando planetas xigantes arredor de estrelas grandes pero, en menos de 25 anos, xa imos por planetas pouco máis cá Terra, arredor de estrelas pouco máis cá Xúpiter —coma no caso xa comentado de Próxima b—. Indo por este camiño, logo cantos exoplanetas cremos que hai por aí en total? Podemos aportar unha estimación: supoñendo que na Vía Láctea só haxa cen mil millóns de estrelas, e que só a metade delas teña dous planetas arredor, xa habería como mínimo tantos planetas coma estrelas, nunha soa galaxia. Lembremos os casos de TRAPPIST-1 e HD 219134 (sete planetas) ou Kepler-90 e o Sol (oito): é polo tanto razoábel estimar que no universo enteiro, con cen mil millóns de galaxias ou máis, haxa moitos máis planetas ca estrelas en total.

Os novos exoplanetas descubertos clasifícanse en varias categorías comparados os seus tamaños aos dos oito planetas do Sistema Solar; e estas categorías serían: mini-terras (tamaño similar ao de Mercurio), sub-terras (ao de Marte), de tipo terrestre (con radios entre 0,8 e 1,5 o da Terra), super-terras ou mini-neptunos (entre 1,5 e 2,5 radios terrestres), xigantes tipo neptuno (con tamaño similar ao de Neptuno) e xigantes tipo xúpiter (idem para Xúpiter ou, equivalentemente, con radios seis veces maiores có radio da Terra). A figura adxunta (fig. 42) indica un resumo do número de obxectos detectados, ata 2018, en cada unha das ditas categorías, facendo alusión ao mesmo tempo á súa situación na correspondente ZH (fría, morna ou quente). Así, en 2018 coñecíanse 55 planetas potencialmente habitábeis de tamaños entre sub-terra e super-terra —recadro verde central: 1+22+32—. En outubro de 2020 este número xa era de 60, con 4 novas super-terras e 1 planeta tipo terrestre adicionais descubertos nas correspondentes ZH mornas das súas estrelas. Na marxe superior dereita da figura indícase tamén que o número total de sistemas con polo menos dous planetas era de 639 (= 425 + 140 + 47 + 17 + 7 + 2 + 1) en 2018.

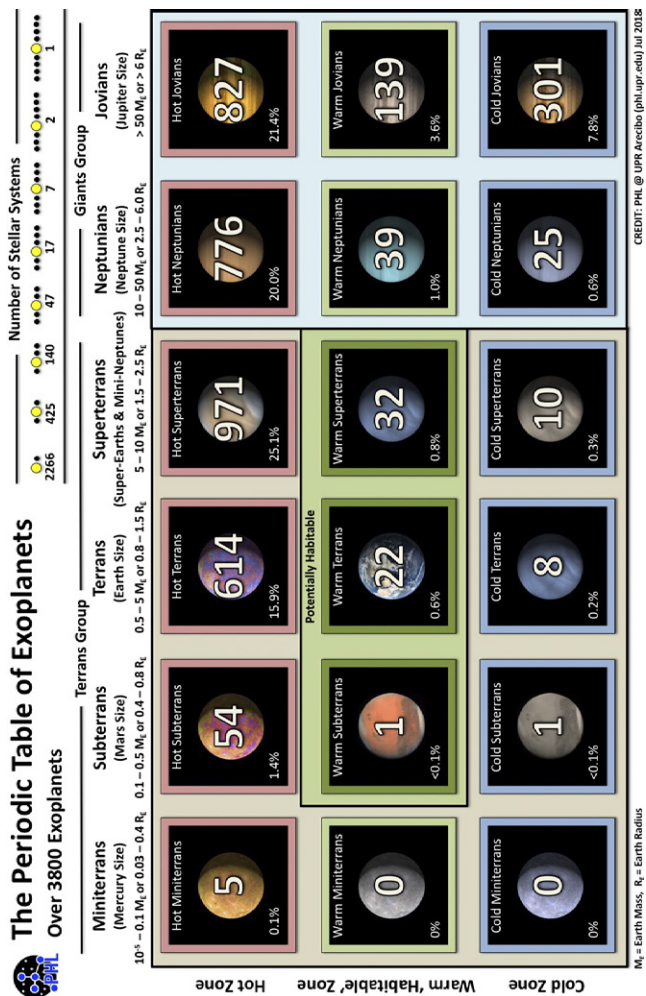


Fig. 42. Exoplanetas confirmados en 2018 agrupados por categorías, aseguno tamaño e colocación na ZH (quente, morna ou fría).  
 $R_E$  = Radio terrestre,  $M_E$  = Masa terrestre. Cortesía de PHL @ UPR Arcibo.



E, entre tanto exoplaneta xa detectado, o noso obxectivo final, digamos, logo cal sería? Por exemplo, atopar signos inequívocos de vida en Próxima b, o noso veciño potencialmente habitábel máis preto, se os hai. Pois non é tarefa sinxela, nin con todos os telescopios, satélites e instrumentación especializada de que a ciencia hoxe dispón. As esperanzas están postas no futuro telescopio espacial James Webb, equipado cun espello primario de 6,5 metros de diámetro, o maior endexamais lanzado ao espazo, cuxa posta en órbita se espera para o segundo semestre de 2021. Tamén, en terra, está en construción en Chile dende 2017 o chamado ELT, Extremely Large Telescope, de 39 metros de diámetro de espello primario, que será no seu momento o maior telescopio óptico terrestre operativo. A detección contundente de evidencias biolóxicas nas finísimas e distantes atmosferas de calquera dos 60 exoplanetas de tipo sub- a super-terra ata hoxe catalogados, ben vai necesitar dos éxitos destes proxectos: o James Webb, conxuntamente realizado por parte da NASA, ESA e Axencia Espacial Canadiana, e o ELT por parte do Observatorio Europeo do Sur (ESO, das súas siglas en inglés).

Para tentar visualizar o dificultoso da tarefa de detectarmos vida exoplanetaria, propoñamos o exercicio ao revés, isto é: suposto que en Próxima b houbo alguén interesado ou interesada en nos detectar a nós, con medios tecnolóxicos similares aos nosos, como verían a Terra? Detectarían o lixo e chatarra espacial, xunto cos máis de 2.600 satélites artificiais, que nos rodean? (iso, sen entrar valorar os proxectos de megaconstelacións de pequenos satélites en marcha, e en disputa...) Os avión ou globos sonda que comparten atmosfera coas nubes ou ciclóns? As auroras polares e, deducirían delas as características da nosa magnetosfera? A perniciosa contaminación luminosa nocturna? Os nosos gases de efecto invernadoiro, mesturados co oxíxeno, nitróxeno ou argon do ar que os seres vivos terrícolas respiran? Detectarían os océanos, a clorofila, os nosos programas emitidos pola radio? Deducirían se o noso nivel de metano atmosférico é de orixe xeolóxica ou bacteriolóxica?

Obviamente, antes ca todo iso, primeiro detectaron que a Terra é só un entre oito planetas, no centro da ZH (morna) do seu sistema, nun periplo anual de 365,25 días terrestres arredor da súa estrela (Sol), e que é de tipo rochoso e potencialmente habitábel, porque esas deteccións están tecnoloxicamente superadas cos medios que teñen en Próxima b. O ciclo de 11 anos de actividade magnética solar, que

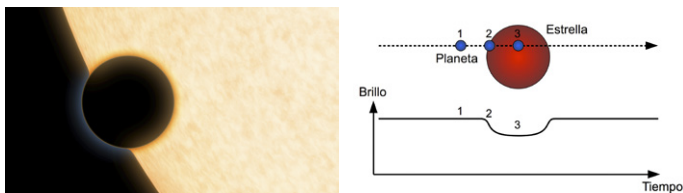
produce manchas escuras na súa superficie ás veces máis grandes ca planetas, tampouco supuxo problema para a detección da Terra. Incluso, dende Próxima b detectaron a existencia de cometas e outros corpos menores no Sistema Solar. Como detectamos os científicos e científicas terrícolas cara a outras estrelas... aproximadamente.

O 14 de febreiro de 1990 a sonda Voyager 1, cando estaba xa a 40 veces a distancia Terra-Sol camiño do espazo interestelar, sacou unha imaxe da Terra a solicitude de Carl Sagan quen, inspirándose nela, logo titulou un dous seus libros *Un punto azul pálido*. En outubro de 1989 lanzou a NASA a sonda Galileo con destino a Xúpiter. En decembro de 1990, en manobras de asistencia gravitacional arredor da Terra, obtivo datos dela que en 1993 serían publicados en Nature por Carl Sagan e colaboradores. Estes investigadores atoparon indicios claros da presenza de abundante oxíxeno, metano e pigmentos compatibles coa clorofila que, conxuntamente, se toman como elementos indicativos de vida –os chamados biomarcadores– no planeta. Este tipo de información terían que detectar dende Próxima b, ou calquera outra parte, se a Terra fose un exoplaneta para eles no que intentar caracterizar a presenza de actividade biolóxica.

Logo, se somos quen de detectar similares biomarcadores nos espectros das atmosferas dos exoplanetas, parece que estaría o asunto da detección da vida extraterrestre resolto. Tecnicamente, debería ser tan doado como separar a luz estelar filtrada pola atmosfera (fig. 43a) do exoplaneta cando transita (fig. 43b), e estudar as liñas ou bandas no seu espectro, non si? Así que, a día de hoxe, a pregunta é: somos ou non, dende a Terra, quen de observar inequivocamente biomarcadores nas atmosferas exoplanetarias? Aínda que a teoría parece fácil a resposta non é simple porque separar un sinal tan feble, procedente dunha atmosfera tan fina e dende tan lonxe, é en realidade un reto tecnolóxico fabuloso. Para a interpretación de resultados, precísase tamén a comparación con modelos atmosféricos sofisticados, que dean conta da presenza (ou ausencia) de nubes ou aerosois e outros parámetros de difícil caracterización.

En 2002, con datos do Telescopio Espacial Hubble (HST), David Charbonneau e colaboradores publicaron por primeira vez a detección de sodio nunha exoatmosfera: a do planeta xigante HD 209458 b. Dende entón, aconteceron outros resultados sobre a presenza de potasio, auga, metano ou dióxido de carbono tamén en atmosferas de

exoplanetas xigantes, pero estas técnicas espectroscópicas distan aínda moito de poder confirmar con total seguridade a presenza de compoñentes químicos de procedencia non-abiótica nos exoplanetas en xeral, ou nos exoplanetas potencialmente habitábeis de tipo terrestre, en particular.



*Fig. 43 (a, b). Esquerda: (a) Concepción artística do exoplaneta HAT-P-11b, con atmosfera, cruzando por diante da súa estrela. A observación espectroscópica intentaría detectar a composición química da dita atmosfera, cando filtra a luz da estrela. De NASA/JPL-Caltech. Dominio público. Dereita: (b) Esquema do método dos tránsitos para a detección de exoplanetas, pola diminución do brillo da súa estrela, ao cruzar por diante dela. De Hans Deeg, baixo licenza Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International, vía Wikimedia Commons.*

Ou sexa: mentres o descubrimento de novos planetas é relativamente accesíbel, a caracterización de biomarcadores nas súas atmosferas é substancialmente máis difícil, ata o punto de seguir, hoxe por hoxe, sen evidencias definitivas de vida fora da Terra por esta vía de investigación.

## SETI@HOME

Antes de rematar, o capítulo e o libro, mencionaremos o proxecto SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*), como idea pioneira na busca de vida intelixente fora da Terra. A finais dos anos 1950, ao tempo que se desenvolvía a carreira espacial da man da Academia Nacional de Ciencias de EE. UU., tomou forma a proposta de investigación encamiñada á detección de sinais extraterrestres mediante medicións radioastronómicas. En tal contexto, SETI viu a luz oficialmente en novembro de 1960, pero non foi ata a década de 1970 que o proxecto realmente se afianzou e medraron en paralelo diversos proxectos SETI.

Entre eles, pode que lembredes o proxecto SETI@HOME polo cal, a partires de 1999, se solicitou a colaboración de millóns de persoas en todo o mundo para procesar nos seus ordenadores persoais paquetes de datos obtidos polo radiotelescopio de Arecibo. En parte pola complexidade de manter esa rede mundial de computación distribuída, en parte polo desmantelamento da antena, e en parte porque nestes vinte anos non se detectou nin un só sinal definitivamente asimilábel a intelixencia extraterrestre, SETI@HOME foi suspendido o 31 de marzo de 2020 de maneira indefinida.

No momento de rematar de escribir este libro levamos un ano de pandemia mundial por un coronavirus chamado SARS-CoV-2 causante do síndrome respiratorio agudo severo (COVID-19). Os avances en investigación básica probaron, neste período seguramente máis ca en calquera época pasada da historia, a súa importancia, valía e contribución á mellora da vida das persoas. Seguimos sen biomarcadores exoplanetarios ou sinais de intelixencia extraterrestre, pero a exploración espacial avanza a bo ritmo (fig. 44) e varias vacinas contra a COVID-19, desenvolvidas en tempo récord, parecen estar a demostrar a súa esperada eficacia. Así, cos seus ollos postos na vida, a humanidade terrícola mira interrogativamente á ciencia porque todo vai ser, basicamente, cuestión de espazo, tempo e enerxía.



Fig. 44. Boa reflexión sobre a amortizaxe da sonda Perseverance o 18/02/2021. Cortesía de Luis Davila.

## Bibliografía recomendada

Hai realmente moitos libros e moi bos en temas de astrofísica, astronomía, cosmoloxía, astrobioloxía... así que en modo algún pretendo recomendar unha escolma completa, destacada ou destacábel por ningunha razón. Só comparto sete obras que a min parécenme significativas e útiles, e que son:

*Cosmos*. Carl Sagan (2004). Editorial: Planeta. ISBN: 9788408053040.

*Intelligent Life in the Universe: Principles and Requirements Behind Its Emergence* Peter Ulmschneider (2006, segunda edición). Editorial: Springer. ISBN: 9783540328360

*100 conceptos de astronomía* ([https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/100\\_conceptos\\_astr.pdf](https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/100_conceptos_astr.pdf)). Julia Alfonso Garzón, David Galadí Enríquez e Carmen Morales Durán (coordinadores, 2009). Edita INTA/Ministerio de Defensa. NIP0: 078-09-002-6 Depósito Legal: M-51.749-2009.

*50 cosas que hay que saber sobre el universo*. Joanne Baker (2011). Editorial: Ariel. ISBN: 9788434469808.

*Astronomía para Dummies*. Stephen P. Maran (2013). Editorial: PARADUMMIES. ISBN: 9788432901492.

*La puerta de los tres cerrojos* (trilogía). Sonia Fernández-Vidal (2018). Editorial: Destino Infantil & Juvenil. ISBN: 9788408218227.

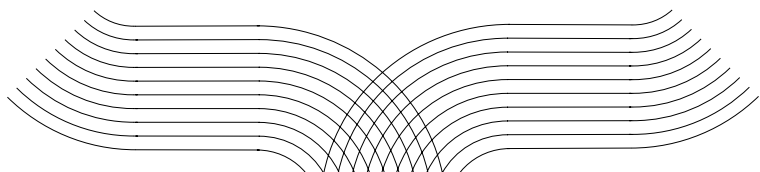
*¿Estamos solos?* Carlos Briones (2020). Editorial: Editorial Crítica. ISBN: 9788491992219



## Agradecementos

As seguintes persoas e institucións colaboraron a que este libro sexa realidade aportando comentarios, revisións de textos, suxestións, ánimos, gráficos e/ou imaxes e quero que conste para elas o meu agradecemento expreso:

Enrique Alonso, Jorge Luis Bueno, Mada Cabaleiro, Luis Davila, Carmen del Puerto, Álvaro Díaz Huici, Javier Escribano, Antonio Ferriz, Francisco J. Gil, Mati Gómez, Benigno González, Mateo M. González, Tomás González, Nieves Loperena, Marcos López Alonso, Minia Mantega, Abel Méndez, Benjamín Montesinos, Antón Pena, Lola Sabau, Ediciones Nigra Trea S. L., Fundación Ceo, Ciencia e Cultura (FC3), Grupo Ascensores Enor S. A., Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), Planetary Habitability Laboratory/University of Puerto Rico at Arecibo (PHL @ UPR Arecibo) e Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo.





# Esenciais

Breviarios de divulgación do saber

## Últimas publicacións na colección

*A ciencia política (2020)*

Argimiro Rojo Sagrado

*As enerxías renovables (2021)*

Maite de Castro e Xurxo Costoya

*Feminismo (2021)*

Beatriz Suárez Briones e M.<sup>a</sup> Jesús Fariña Busto

*O cambio climático (2021)*

Diego Fernández Nóvoa, Marisela Des Villanueva  
e Moncho Gómez Gesteira

## Vindeiras publicacións na colección

*A linguaxe (2021)*

Fernando Ramallo



9 7 8 - 8 4 - 8 1 5 8 - 8 9 4 - 1

# A astrofísica

Astrofísica é unha palabra de orixe grega, de στήρ (aster = estrela) e φύσις (physis = natureza). Corresponde así ao estudo da natureza das estrelas, e de todo o que integra o universo coñecido. As persoas tamén somos parte do universo e, se queremos entender, convén ver as estrelas no ceo de noite e facérmolos preguntas sobre elas.

Como non sería realista propoñer todas as preguntas posibles deste vasto campo de coñecemento, este libro inclúe unha sucesión limitada delas: sobre a morte das estrelas, a evolución do universo, a busca de vida extraterrestre... na esperanza de contribuír, seica, a abrir algúns canles de reflexión na materia.

Servizo de Publicacións

Universidade de Vigo

