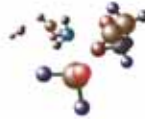


Josep M. Trigo Rodríguez

# LAS RAÍCES CÓSMICAS DE LA VIDA



El espejo y la lámpara



**Josep M. Trigo Rodríguez** (València, 1970) es astrofísico, formado en la Universitat de València, donde se doctoró *cum laude* en 2002 con un trabajo sobre la interacción de los meteoritos con la atmósfera terrestre y su origen dinámico. Entre 2003 y 2005 estudió meteoritos primitivos en la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA) bajo la dirección del profesor John Wasson, que desarrolló a mediados del siglo pasado la clasificación de los meteoritos más primitivos, llamados condritas. El Dr. Trigo fue el único investigador español participante en el equipo de examen preliminar de las muestras del cometa 81P/Wild 2 recuperadas por la misión Stardust (NASA). Actualmente promueve el desarrollo de misiones espaciales para el retorno de muestras de asteroides primitivos, como por ejemplo la misión Marco Polo-R, presentada a la Agencia Espacial Europea (ESA). También es científico titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), donde estudia cometas, asteroides y meteoritos para profundizar en los procesos fisicoquímicos acaecidos en el origen del sistema solar. Ha publicado una decena de libros de divulgación, entre ellos *El origen del sistema solar* (2000) y *Nosotros en el universo* (2000), publicados por Enciclopèdia Catalana y la editorial Complutense. Además, es autor de unos cincuenta artículos científicos arbitrados, y de varias decenas de artículos de divulgación por los que ha recibido varios premios, entre ellos el de la Fundación BBVA-RSEF en 2009.

El prólogo del libro corre a cargo del profesor François Raulin, famoso astrobiólogo que trabaja en la Universidad de París y en el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

Fotografía: Robert Ramos



Josep M. Trigo Rodríguez  
LAS RAÍCES CÓSMICAS DE LA VIDA

5

El espejo y la lámpara

Director de la colección: Gonzalo Pontón Gijón

Consejo asesor:  
José Manuel Blecuá  
Fàtima Bosch  
Victòria Camps  
Salvador Cardús  
Ramon Pascual  
Borja de Riquer  
Joan Subirats  
Jaume Terradas

© del prólogo: François Raulin, 2012  
© del texto: Josep M. Trigo, 2012  
© de esta edición: Edicions UAB, 2012

Edicions UAB  
Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona  
Edifici A  
08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès)  
Tel. 93 581 10 22 Fax 93 581 32 39

ISBN: 978-84-939695-2-3  
Depósito legal: B-10.918-2012  
Impreso por Novoprint  
Impreso en España - Printed in Spain

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

A mi entrañable mentor, el profesor  
y gran maestro Joan Oró

# Índice

PRÓLOGO . . . . .	13
INTRODUCCIÓN . . . . .	17
CAPÍTULO 1	
EL ORIGEN DEL UNIVERSO Y DE LA MATERIA . . . . .	21
Introducción . . . . .	21
Principios cosmológicos . . . . .	23
El papel fundamental de la gravitación . . . . .	25
Un repaso a la cosmología moderna . . . . .	28
La gran explosión y el contenido del universo . . . . .	32
CAPÍTULO 2	
LA HERENCIA ESTELAR DESVELADA DEL ESTUDIO DE COMETAS Y METEORITOS . . . . .	39
Introducción . . . . .	39
Diagramas de Hertzsprung-Russell: clases estelares . . . . .	42
Materiales primitivos y nucleosíntesis . . . . .	47
La nebulosa solar y los minerales primigenios . . . . .	51
Los componentes de las condritas . . . . .	53
Determinar la edad del sistema solar mediante sistemas isotópicos . . . . .	55
CAPÍTULO 3	
LOS BLOQUES CONSTITUTIVOS DE LOS PLANETAS . . . . .	59
Introducción . . . . .	59
Las fuentes de cuerpos primitivos en el sistema solar . . . . .	64

La sonda <i>Stardust</i> : el legado del cometa 81P/Wild 2 . . . . .	67
Claves contenidas en el estudio de los cometas . . . . .	71
Procesos nebulares desvelados por la sonda <i>Stardust</i> . . . . .	74
CAPÍTULO 4	
EL CRECIMIENTO DE LOS PLANETAS TERRESTRES . . . . .	77
Introducción . . . . .	77
La temprana formación de los gigantes gaseosos . . . . .	80
Fases de acreción de los planetas terrestres . . . . .	82
La migración de los planetas gigantes . . . . .	85
CAPÍTULO 5	
LA EVOLUCIÓN DE LA TIERRA . . . . .	89
Introducción . . . . .	89
La composición química de la Tierra . . . . .	90
La diferenciación química y la desgasificación . . . . .	98
El papel de los isótopos: desintegración radioactiva . . . . .	99
El flujo de los impactos . . . . .	103
El gran bombardeo tardío: explicar anomalías . . . . .	108
CAPÍTULO 6	
EL ORIGEN DE LA ATMÓSFERA Y LA HIDROSFERA TERRESTRE . . . . .	113
Introducción . . . . .	113
La atmósfera primitiva y su estado de oxidación . . . . .	115
El entorno astrofísico en que se asentó la primera atmósfera . . . . .	118
El escape hidrodinámico y el problema del nitrógeno . . . . .	125
La evolución hasta la atmósfera actual . . . . .	129
¿Contó Marte con una atmósfera densa e hidrosfera? . . . . .	133
CAPÍTULO 7	
EL ORIGEN DE LA VIDA: DE CONJETURA A SU ENTORNO CÓSMICO. . . . .	137
Introducción . . . . .	137
Retar la generación espontánea . . . . .	138
¿Vida venida del cosmos o surgida en la Tierra? . . . . .	139
¿Asteroides carbonáceos y cometas en el origen de la vida? . . . . .	141
Alteración acuosa y procesado de materia orgánica . . . . .	146
Del medio interestelar a las condritas carbonáceas . . . . .	150

CAPÍTULO 8	
EL TRÁNSITO DE LA QUÍMICA A LA BIOQUÍMICA: UNA PERSPECTIVA TERRESTRE. . . . .	
	159
Introducción . . . . .	159
La química del carbono. . . . .	161
La importancia del agua . . . . .	171
El metabolismo primigenio . . . . .	173
La replicación: ¿existió un mundo primigenio del ARN? . . . . .	178
La raíz del árbol de la vida terrestre: ¿quién fue LUCA? . . . . .	181
Definir la vida desde una perspectiva termodinámica. . . . .	185
CAPÍTULO 9	
PLANETAS EXTRASOLARES Y VIDA EN OTROS MUNDOS . . . . .	
	187
Introducción . . . . .	187
La técnica de la velocidad radial. . . . .	194
La técnica de los tránsitos planetarios . . . . .	197
Microlentes gravitatorias . . . . .	201
Condiciones de habitabilidad de otros mundos. . . . .	203
Conclusiones generales . . . . .	205
BIBLIOGRAFÍA . . . . .	211
GLOSARIO . . . . .	231



## Prólogo

En 1973 se creó oficialmente la Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la Vida (ISSOL: International Society for the Study of the Origin of Life), que organizó su primer congreso trienal en Barcelona. En aquel momento, la exobiología era una rama de la ciencia muy joven y en este primer encuentro de ISSOL, organizado por el profesor Joan Oró, se debatió principalmente sobre la química prebiótica. Dos décadas más tarde, Barcelona fue de nuevo el lugar escogido para otro congreso internacional de ISSOL, en el que se evidenciaba que el campo se había incrementado exponencialmente y el encuentro cubría la mayoría de aspectos relativos a la exobiología. Desde entonces, esta rama de la ciencia, también conocida como astrobiología, se ha diversificado enormemente y evoluciona hacia un contexto claramente interdisciplinario. Ahora mismo es el estudio de la vida en el universo, más concretamente el estudio de los orígenes, distribución y evolución de la vida, pero también de las estructuras vivas, desde las moleculares hasta las que dan cuenta de los procesos fisicoquímicos asociados a la vida. Las principales cuestiones que cubren este dominio en expansión son todavía básicas: ¿cómo apareció la vida en la Tierra? ¿Existe vida en todas partes? Para responder a estas cuestiones, resulta esencial tener una imagen

completa de la compleja historia de «los orígenes», desde la formación del universo y los elementos químicos hasta la emergencia y la evolución de la vida.

Tras la llamada gran explosión, ocurrida hace unos 14.000 millones de años, de la que nuestro universo emergió, fruto de la síntesis de los elementos más ligeros, se formaron estrellas en las que tuvo lugar la nucleosíntesis estelar para ir sintetizando elementos químicos más pesados, entre los cuales se encontraban los biogénicos: C, O, N, S y P. Por aquel entonces, las moléculas empezaron a ser sintetizadas en el espacio interestelar y de estos procesos emergió materia de creciente complejidad. Muchos miles de millones de años más tarde, en una nube molecular localizada en un pequeño rincón de nuestra galaxia, se formó un disco de acreción y de allí emergió nuestro sistema solar hace unos 4.600 millones de años. En la parte interior de este sistema se encontraba la Tierra. En aquel entonces su atmósfera era muy diferente de la que existe ahora. No había oxígeno molecular (que surgió después a partir de la actividad biológica) y probablemente contenía un montón de dióxido de carbono con quizás algo de metano. Sin embargo, parece que muy pronto tras la formación de la Tierra surgieron océanos de agua sobre su superficie. En aquel entorno planetario, los procesos químicos dieron lugar a la formación de compuestos orgánicos de creciente complejidad, hasta dar origen a macromoléculas capaces de replicarse y proseguir su evolución darwiniana. Así, los primeros sistemas vivos se formaron a partir de una larga evolución química que partía de una compleja química prebiótica que involucraba la materia orgánica, el agua líquida y los flujos de energía. En el tiempo en que tuvo lugar el primer encuentro ISSOL en Barcelona, se creía que la atmósfera primitiva de la Tierra fue la principal fuente de materia orgánica. Sin embargo, en la actualidad tenemos un conocimiento mucho mayor de la composición química de los cometas y meteoritos, especialmente las condritas carbonáceas,

y de su flujo sobre la Tierra. Todo parece indicar que estos cuerpos menores pudieron haber importado una gran cantidad de materia orgánica y agua sobre la Tierra, y de este modo haber contribuido a la química prebiótica terrestre. Estos procesos prebióticos permitieron la evolución de la materia orgánica hacia sistemas más complejos y el surgimiento de los primeros organismos vivos. Esta vida primordial fue parte de un mundo pre-ARN que evolucionó posteriormente hacia un mundo del ARN hasta llegar al presente mundo del ADN.

De este modo, la vida sobre la Tierra se originó a partir de una larga evolución química en la que aparecían implicados el agua y la materia orgánica como principales ingredientes. Precisamente, una primera aproximación en la búsqueda de vida extraterrestre es mirar hacia cuerpos planetarios donde se encuentren estos ingredientes o, al menos, donde hayan estado presentes. En el sistema solar existen diversos objetivos de interés que cumplen estas condiciones. Marte ha experimentado grandes cantidades de agua líquida surcando su superficie en el pasado, justo en el momento en que la vida se originó sobre la Tierra, y también tuvo una probable presencia de materia orgánica importada en particular de cometas y de meteoritos. En el sistema solar externo existen varios satélites helados que poseen un océano interno de agua en donde, de nuevo, probablemente existe materia orgánica. Este es el caso de tres de los cuatro satélites galileanos de Júpiter: Ganímedes, Calisto y especialmente Europa, cuyo océano interno se encuentra relativamente próximo a la superficie helada, a la vez que se asienta sobre un fondo rocoso. También es el caso de por lo menos dos de los satélites de Saturno: Titán, el mayor de ellos, y el único del sistema solar con una atmósfera densa y con presencia de química orgánica compleja en marcha todavía hoy en día, y Encelado, con sus enormes géiseres de hielo de agua y materia orgánica que proceden de su reserva interna de agua líquida. Por si fuera poco, el reciente descubrimiento de pla-

netas extrasolares, con sus diferentes propiedades comparadas con los planetas del sistema solar, abre fantásticos caminos de investigación exo/astrobiológica. Debido a los sesgos observacionales de las actuales técnicas de detección, la mayoría de planetas que orbitando alrededor de otras estrellas detectadas hasta ahora son gigantes, pero comenzamos a descubrir exoplanetas rocosos más similares a la Tierra. Algunos de ellos se encuentran en la zona de habitabilidad de su estrella. Pronto seremos capaces de buscar biosignaturas en sus atmósferas para comprobar si se encuentran habitados.

Josep M. Trigo Rodríguez, un destacado discípulo del profesor Joan Oró y miembro también de ISSOL, describe en su libro esta evolución cósmica desde la síntesis de los elementos químicos hasta el origen de la vida en la Tierra y en otros mundos. Al ser un experto en cuerpos menores, nos demuestra que nuestro conocimiento de las condiciones de formación y evolución de asteroides y cometas proporciona importantes evidencias sobre los orígenes y la evolución de los planetas terrestres, en particular de la atmósfera y la hidrosfera de la Tierra. Como un astrofísico con un conocimiento profundo de la cosmoquímica, él es capaz de enfatizar en este libro el papel crucial que ciertos meteoritos y cometas tuvieron en el origen de la vida. Así pues, cuarenta años después del primer congreso de ISSOL en Barcelona, este libro, también nacido en esta bella ciudad, muestra que las raíces de la vida en la Tierra tienen un origen cósmico.

FRANÇOIS RAULIN  
LISA-CNRS

Universidad de París XII (París Este Créteil-Val de Marne) /  
Universidad de París VII (Denis Diderot)

## Introducción

Vivimos una época, que yo me atrevería a llamar la edad de oro de la astrofísica, en que el número y la magnitud de los descubrimientos sobre el cosmos resulta abrumador. Desgraciadamente, la velocidad vertiginosa con la que profundizamos en el estudio y la comprensión del universo aleja inexorablemente su comprensión de la sociedad. Este siglo XXI viene asimismo acompañado por una creciente exploración de los más recónditos rincones del sistema solar que nos hará cambiar progresivamente la visión de nuestro entorno. En la actualidad no sólo tenemos sondas sobre Marte sino también a la misión Dawn de la NASA cartografiando el fascinante asteroide Vesta, y a la sonda Rosetta de ESA a punto de posarse sobre el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. En 2006, con la sonda *Stardust* de la NASA conseguimos las primeras muestras sólidas de un objeto del sistema solar diferente a la Luna, en concreto del primitivo cometa 81P/Wild 2. Precisamente esperamos que el estudio de los componentes de estos objetos, inalterados desde su formación, produzca un progreso científico sin parangón en el campo de la astrobiología. Por esta razón he propuesto, junto a otros científicos europeos, la misión Marco Polo-R para el retorno de muestras de un asteroide carbonáceo próximo a la Tierra que está siendo actualmente

evaluada por la Agencia Espacial Europea (ESA). Este libro pretende explicar nuestro interés por estos objetos a fin de paliar ese distanciamiento antinatural entre la ciencia y la sociedad. La respuesta a muchas de nuestras preguntas se encuentra esperando una rigurosa interpretación científica de la evidencia cósmica. Les ofrezco un texto divulgativo pero no por ello superfluo ni exento de rigor. La ciencia proporciona lo necesario para un viaje diferente por este planeta, más racional y exploratorio. Si el lector se acerca a este libro por mera curiosidad, espero que encuentre en sus páginas un compendio de respuestas a sus preguntas. También desearía que esta obra les permita obtener una interpretación coherente sobre los orígenes de la materia, las estrellas, los planetas y los seres vivos.

Mi interés por la divulgación científica viene de lejos y quizás sea incomprendida. Hay personas que piensan que los científicos disertamos sobre ciencia para alcanzar un mayor estatus social o para difundir nuestras ideas más arriesgadas. Pienso que, en mi caso, irían muy desencaminados, dado que mis motivaciones son bien diferentes. La ciencia me ha permitido interpretar mi entorno sin necesidad de recurrir a creencias y, por tanto, ha sido mi balón de oxígeno. Desde joven me acostumbé a divulgar conforme leía y me sorprendía de nuestra propia ignorancia sobre ciertos temas. Me chocaba enormemente que explicaciones racionales y lógicas de los fenómenos naturales no fuesen ampliamente conocidas por el gran público. De ese modo, mi interés por la ciencia surgió de la lectura de los grandes maestros de la divulgación: Isaac Asimov, Josep Comas Solà, Paul Davies, Camille Flammarion, Rudolf Kippenhahn, Carl Sagan y James S. Trefil, entre otros. A todos ellos les debo esa inquietud por divulgar: ¡ojalá mis textos les resulten tan entretenidos como me parecieron sus lecturas!

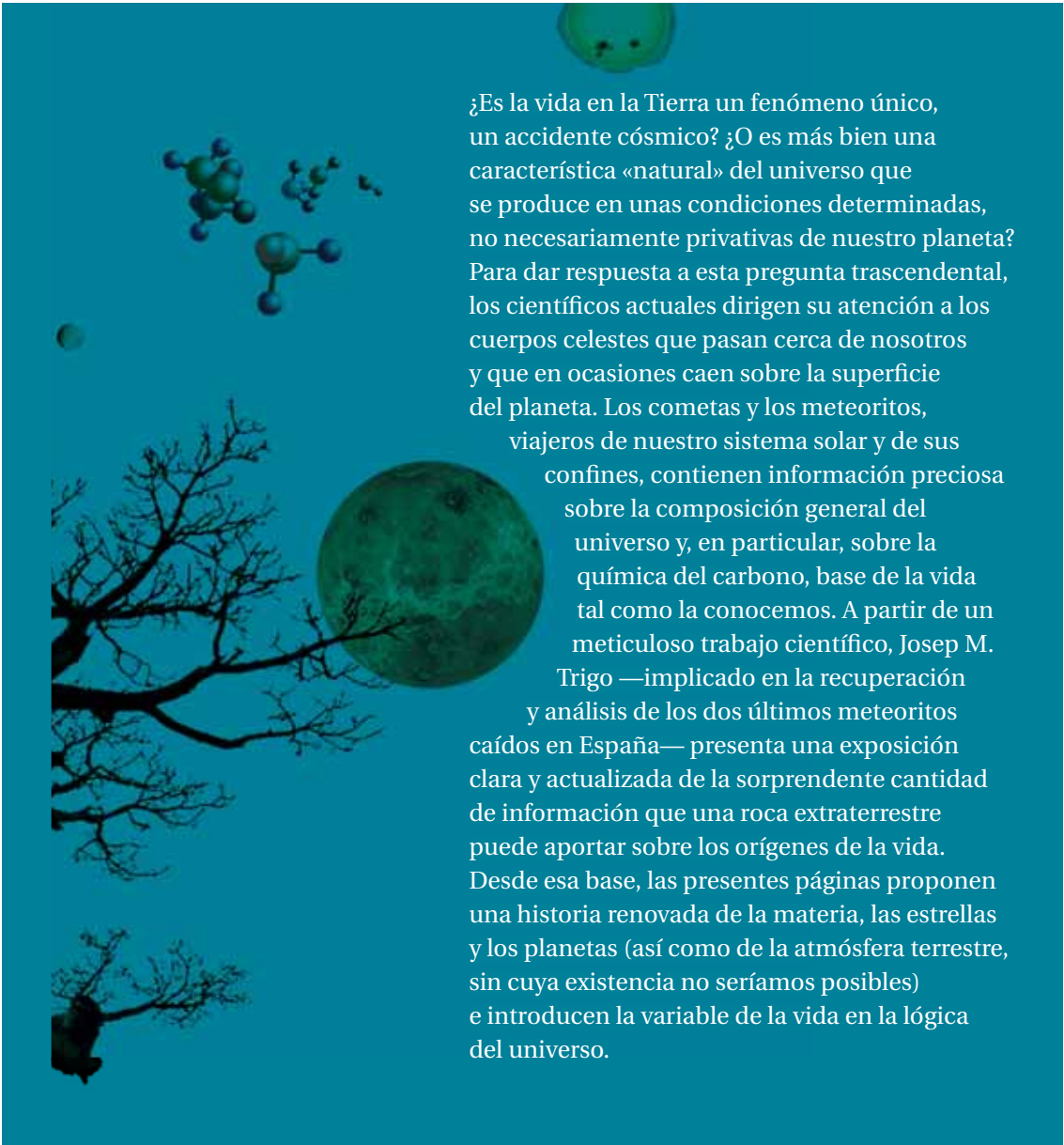
También debo mi inquietud por las ciencias tanto a mis padres, Julio y Gloria, como a mi hermano Xúlio, que recuer-

do que siempre satisfacían mi curiosidad adolescente con una buena lectura. Soy eterno deudor a Helena, mi esposa, de la motivación recibida a lo largo de los años y del tiempo necesario para escribir esta obra. Mi hijo Isaac también ha sido partícipe de mi batalla con la escritura, entre pañal y pañal. Sin duda le agradezco la tregua nocturna que me ofrecía para la consecución de esta obra. También debo agradecer a muchos colegas sus enseñanzas y motivación a lo largo de estos años. En particular, deseo agradecer a Emili Elizalde su guía histórica para elaborar el primer capítulo y a Jordi Llorca su confianza y apoyo a lo largo de los años. También deseo agradecer a Sachiko Amari, Peter Brown, Don Brownlee, Hans Deeg, Ed Guinan, Purificación López-García, Bernard Marty, Harry Y. McSween, Ignasi Ribas, John T. Wasson, Donald K. Yeomans y demás equipos científicos, a quienes debemos maravillosas imágenes y diagramas que he podido incluir con su permiso para facilitar la comprensión de muchos conceptos. Por otro lado, cabe reconocer que dos grandes maestros son los culpables de que me haya dejado cautivar por la astrobiología: Joan Oró, que desgraciadamente nos dejó en 2004, y François Raulin, con quien me enorgullece contar para prologar esta obra.

Finalmente, espero que el esfuerzo personal realizado a lo largo de este último año para conseguir este texto divulgativo resulte útil a otros para abrirse un camino hacia una explicación racional, sea al nivel que sea, de las grandes preguntas que nos solemos plantear acerca de nuestros orígenes en el cosmos. Me conformo con que en este texto encuentren una explicación suficientemente razonada y científica que ayude a desterrar algunas creencias todavía profundamente enraizadas en nuestra sociedad. El origen de la vida, al permanecer aparentemente inexplicado, está mitificado, pero nuestro conocimiento de la evolución de la materia sugiere que los seres vivos surgen de manera natural en aquellos lugares en los que la vida puede enraizar. Es, por tanto, sumamente improbable que sea

un patrimonio único de la Tierra. Ojalá mi prosa sea rigurosa y entretenida para que usted, apreciado lector, llegue a esas conclusiones de la lectura de estos capítulos. Entiendo que cada uno sacará sus propias conclusiones, pero permítanme que les brinde los ingredientes para que profundicen en la maravillosa cocina cósmica. No son unos fogones cualesquiera, dado que han sido capaces de crear estrellas, planetas y seres vivos sobre la base de los mismos principios e ingredientes. Agradezco, pues, su interés por adoptar este libro y espero que me acompañen en esta historia a través de los orígenes de la materia, las estrellas, los planetas y los seres vivos.





¿Es la vida en la Tierra un fenómeno único, un accidente cósmico? ¿O es más bien una característica «natural» del universo que se produce en unas condiciones determinadas, no necesariamente privativas de nuestro planeta? Para dar respuesta a esta pregunta trascendental, los científicos actuales dirigen su atención a los cuerpos celestes que pasan cerca de nosotros y que en ocasiones caen sobre la superficie del planeta. Los cometas y los meteoritos, viajeros de nuestro sistema solar y de sus confines, contienen información preciosa sobre la composición general del universo y, en particular, sobre la química del carbono, base de la vida tal como la conocemos. A partir de un meticuloso trabajo científico, Josep M. Trigo —implicado en la recuperación y análisis de los dos últimos meteoritos caídos en España— presenta una exposición clara y actualizada de la sorprendente cantidad de información que una roca extraterrestre puede aportar sobre los orígenes de la vida. Desde esa base, las presentes páginas proponen una historia renovada de la materia, las estrellas y los planetas (así como de la atmósfera terrestre, sin cuya existencia no seríamos posibles) e introducen la variable de la vida en la lógica del universo.

Edicions UAB

CÓDIGOS IBIC: PS · PDZ

ISBN 978-84-939695-2-3



9 788493 969523