



# Cien mil millones de soles

Estructura y evolución  
de las estrellas

Rudolf Kippenhahn

**Biblioteca  
Científica  
Salvat**

# Cien mil millones de soles

Estructura y evolución de las estrellas

Rudolf Kippenhahn

SALVAT

Versión española de la obra original alemana *Hunden Milliarden Sonnen*, publicada por R. Piper GmbH & Co. de Munich

Traducción: Miquel Muntaner

Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

*Escaneado: thedoctorwho1967.blogspot.com.ar*

*Edición digital: Sargont (2018)*

© 1993 Salvat Editores, S.A., Barcelona

© 1984, 1993 R. Piper GmbH & Co.

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)

ISBN: 84-345-8901-X (Volumen 21)

Depósito Legal: B-33638-1993

Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona

Impresa por Printer, i.g.s.a., Diciembre 1993

*Printed in Spain*

# ÍNDICE

## PRÓLOGO

## INTRODUCCIÓN

### I. LA LARGA VIDA DE LAS ESTRELLAS

¿DE DÓNDE PROCEDE LA ENERGÍA DEL SOL?

LA ENERGÍA ATÓMICA DEL SOL Y DE LAS ESTRELLAS

LAS ESTRELLAS ENVEJECEN

LA COMPAÑERA DE SIRIO

LA SUPERGIGANTE DEL COCHERO

### II. EL DIAGRAMA MÁS IMPORTANTE DEL ASTROFÍSICO

MEDICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRELLAS

EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG Y RUSSELL

LAS ESTRELLAS VECINAS DEL SOL

LOS CÚMULOS ESTELARES: «CLASES ESCOLARES» DE ESTRELLAS

LA EDAD DE LOS CÚMULOS ESTELARES

### III. LAS ESTRELLAS COMO CENTRALES NUCLEARES

LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DEL ÁTOMO

ARTHUR EDDINGTON Y EL ORIGEN DE LA ENERGÍA ESTELAR

GEORGE GAMOW Y SU «EFECTO TÚNEL»

EL EFECTO TÚNEL EN LAS ESTRELLAS

EL CICLO DEL CARBONO

LA CADENA PROTÓN-PROTÓN

CREACIÓN DE LOS ELEMENTOS PESADOS

### IV. ESTRELLAS Y MODELOS ESTELARES

GRAVEDAD Y PRESIÓN GASEOSA

GENERACIÓN Y TRANSPORTE DE ENERGÍA

MATERIA ESTELAR EN EBULLICIÓN

ESTRELLAS EN EL COMPUTADOR

UN MODELO DE SOL PRIMITIVO

DESCUBRIMOS LA SECUENCIA PRINCIPAL PRIMITIVA

EL INTERIOR DE LA ESTRELLA SPICA

LA ENANA ROJA DEL CISNE

PROPIEDADES DE LA SECUENCIA PRINCIPAL PRIMITIVA

## V. LA HISTORIA DEL SOL

DEL SOL PRIMITIVO AL SOL ACTUAL

¿DÓNDE ESTÁ EL DEUTERIO DEL SOL?

EL PROBLEMA DEL LITIO

AÑO 1955, LA IRRUPCIÓN EN EL REINO DE LAS GIGANTES ROJAS

EL FUTURO DEL SOL

LOS NEUTRINOS DEL SOL

EL EXPERIMENTO CON NEUTRINOS DE RAYMOND DAVIS

EL EXPERIMENTO DEL GALIO

## VI. LA HISTORIA DE LAS ESTRELLAS DE GRAN MASA

LOUIS HENYER Y EL MÉTODO HENYER

LA HISTORIA DE UNA ESTRELLA DE SIETE: MASAS SOLARES

TRAYECTORIAS EVOLUTIVAS Y DIAGRAMAS DE CÚMULOS ESTELARES

ESTRELLAS PULSANTES

EL MODELO DE LA OLLA APLICADO A UNA ESTRELLA CEFÉIDA

ZHEVAKIN ESTUDIA DE NUEVO UNA ANTIGUA IDEA

## VII. ESTRELLAS MUY EVOLUCIONADAS

LOS NEUTRINOS ENFRÍAN Y LAS CAPAS ACTIVAS PARPADAN.

LA ENANA BLANCA DENTRO DE LA GIGANTE ROJA

EL FUTURO LEJANO DEL SOL

PETER APIANES, LUDWIG BIERMANN Y LOS COMETAS

LAS ESTRELLAS EVOLUCIONADAS PIERDEN MASA

LA ENANA BLANCA QUEDA LIBRE

LA ESTRELLA DE HARTWIG EN LA NEBULOSA DE ANDRÓMEDA

LA NEBULOSA CANGREJO Y LA SUPERNOVA CHINO-JAPONESA

EL DESTINO DE LA MATERIA EXPULSADA POR LAS ESTRELLAS

## VIII. LOS PULSARES NO PULSAN

PUSTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN NUEVO RADIOTELESCOPIO EN  
CAMBRIDGE

EL INFORME DE JOCELYN BELL

LOS PULSARES SON PEQUEÑOS

¿PUEDEN VERSE LOS PULSARES?

EL PULSAR DE LA NEBULOSA CANGREJO SE HACE VISIBLE

¿QUÉ SON LOS PULSARES?

THOMAS GOLD EXPLICA LOS PULSARES

CUESTIONES PENDIENTES

## IX. CUANDO LAS ESTRELLAS ROBAN MASA A OTRAS ESTRELLAS

ALGOL, LA CABEZA DEL DEMONIO

FUERZAS COMPLICADAS EN LAS ESTRELLAS DOBLES

[LAS PARADOJAS DE ALGOL Y DE SIRIO](#)  
[ESTRELLAS DOBLES EN EL COMPUTADOR](#)  
[LA HISTORIA DEL PRIMER PAR ESTELAR: SE CREA UN SISTEMA SEMISE-  
PARADO](#)  
[LA HISTORIA DEL SEGUNDO PAR ESTELAR:](#)  
[NACE UNA ENANA BLANCA](#)  
[LA NOVA DEL 29 DE AGOSTO DE 1975 EN EL CISNE](#)  
[LA NOVA DEL AÑO 1934](#)  
[EXPLOSIONES NUCLEARES EN UN SISTEMA ESTELAR DOBLE](#)

## [X. ESTRELLAS DE RAYOS X](#)

[LA HISTORIA DE UHURU](#)  
[LA ESTRELLA DE RAYOS X EN HÉRCULES](#)  
[LA FUENTE DE HÉRCULES SE HACE VISIBLE](#)  
[LAS ESTRELLAS DE RAYOS X SON PEQUEÑAS](#)  
[LA HISTORIA DE UNA FUENTE DE RAYOS X](#)  
[¿DE DÓNDE PROCEDEN LOS IMPULSOS?](#)  
[MEDICIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO DE UNA ESTRELLA DE NEUTRO-  
NES](#)  
[ERUPCIONES DE RAYOS X](#)

## [XI. EL FIN DE LAS ESTRELLAS](#)

[LA CATÁSTROFE GLACIAL DE LAS ESTRELLAS DE GRAN MASA](#)  
[UN EXPERIMENTO MENTAL CON UNA ENANA BLANCA](#)  
[UN EXPERIMENTO MENTAL CON UNA ESTRELLA DE NEUTRONES](#)  
[LOS AGUJEROS NEGROS](#)

## [XII. CÓMO NACEN LAS ESTRELLAS](#)

[TODAVÍA HOY NACEN ESTRELLAS](#)  
[EL NACIMIENTO DE UNA ESTRELLA EN EL COMPUTADOR](#)  
[EL NACIMIENTO DE UNA ESTRELLA EN LA NATURALEZA](#)  
[MOMENTO CINÉTICO Y NUBES EN COLAPSO](#)  
[SIGUIENDO LA PISTA A LA HISTORIA DE LA VÍA LÁCTEA](#)  
[¿QUÉ DESENCADENA LA FORMACIÓN DE ESTRELLAS?](#)  
[¿QUÉ SON LOS BRAZOS ESPIRALES?](#)  
[FORMACIÓN DE ESTRELLAS EN LA GALAXIA DE: LOS PERROS DE CAZA](#)

## [XIII. LOS PLANETAS Y SUS HABITANTES](#)

[EL PROBLEMA DE LA FORMACIÓN DE LOS PLANETAS EN EL COMPUTA-  
DOR](#)  
[NACIMIENTO DE UN SISTEMA SOLAR DOBLE](#)  
[¿ESTAMOS SOLOS?](#)  
[EL PROYECTO OZMA Y LA EMBAJADA DE ARECIBO](#)  
[LA LARGA TRAYECTORIA DE LA VIDA](#)  
[¿HAY EN NUESTRA GALAXIA UN MILLÓN DE PLANETAS CON VIDA?](#)

¿CUÁNTO TIEMPO VIVE UNA CIVILIZACIÓN?

APÉNDICE A

LA VELOCIDAD DE LAS ESTRELLA

APÉNDICE B

CÓMO MEDIR EL UNIVERSO

APÉNDICE C

CÓMO PESAR ESTRELLAS

EPÍLOGO A LA EDICIÓN DE 1993

NOTAS

## PRÓLOGO

Esta obra se basa en más de cien conferencias pronunciadas con la intención de presentar los descubrimientos de la moderna astrofísica en forma fácilmente comprensible a un público amplio.

Tomó su forma definitiva cuando a partir de ellas compuse, en el semestre de invierno 1978-79, un curso para alumnos de todas las facultades de la Universidad de Munich. En ocasiones el texto siguió de cerca los artículos que Alfred Weigert y yo habíamos publicado en la revista "Sterne und Weltraum" explicando los resultados de nuestras investigaciones personales. Introduje en muchos puntos del texto recuerdos personales, porque gran parte de los descubrimientos expuestos en la obra se han realizado en los últimos 25 años. Yo mismo he podido "vivirlos" como astrónomo. En algunos casos mis colaboradores y yo tuvimos la suerte de "estar metidos" en el proceso.

Me han ayudado muchos amigos y colaboradores eliminando del texto faltas y pasajes poco claros. Wolfgang Hillebrandt, John Kirk, Hans Ritter, Joachim Trümper y Wemer Tschamuter, han corregido algunos capítulos. Kurt von Sengbusch ha leído y mejorado casi toda la obra. Mi amigo, el matemático de Göttinger, Hans Ludwig de Vries, me ha proporcionado una gran ayuda al leer críticamente todo el manuscrito frase por frase; debo a él muchas sugerencias. La obra no se hubiese escrito sin el constante estímulo de mi esposa. Ursula Hennig y Gisela Wessling transcribieron grandes partes del manuscrito, propusieron numerosas correcciones y demostraron mucha paciencia cuando yo quería inmediatamente corregir sus correcciones. Doy las gracias a todos los que han colaborado.

RUDOLF KIPPENHAHN

## INTRODUCCIÓN

La acción se desarrolla en la Vía Láctea. Los protagonistas del drama son los cien mil millones de estrellas que la forman y unos cuantos centenares de astrónomos de la Tierra.

Según el guión impuesto por las leyes de la naturaleza, la materia del Universo tiene la tendencia a concentrarse en cuerpos esféricos, que nosotros llamamos estrellas. Los materiales de su interior están tan calientes que no pueden existir allí ni cuerpos sólidos ni fluidos de ningún tipo. Las estrellas son esferas de gas, que mantienen su forma gracias a su propia gravedad. Llamamos Sol a una de estas esferas. Un observador exterior que lo comparara con las demás estrellas de la Vía Láctea la consideraría una estrella de tamaño medio, no muy grande, no muy pequeña, de brillo también medio: una estrella sin nada que destacar entre cien mil millones más. El Sol es importante únicamente para nosotros, porque nuestra vida depende de él.

La mayoría de estrellas de la Vía Láctea están situadas en un disco plano, más o menos circular, el disco que forma nuestra *Galaxia*, un disco tan grande que la luz necesita casi cien mil años para atravesarlo diagonalmente de un borde al otro. Todas las estrellas se desplazan alrededor del centro del disco siguiendo trayectorias complicadas impuestas por el juego entre la fuerza centrífuga y la gravedad: la Vía Láctea está en rotación. Pero nosotros no estamos solos en el Cosmos con nuestro sistema estelar. La nebulosa de Andrómeda es otro disco en rotación formado por estrellas. En la figura 0-1 (al final del capítulo) contemplamos desde fuera este sistema estelar. El disco parece elíptico, porque lo miramos de lado. La nebulosa de Andrómeda es un retrato fiel de nuestro propio sistema estelar. Los tipos de estrellas presentes en nuestra Vía Láctea, todos los procesos que aquí se dan, se repiten también en la galaxia de Andrómeda, y no sólo en ella, puesto que hay miles y millones de galaxias, quizá incluso un número infinito de ellas.

En la figura 0-4 (al final del capítulo) contemplamos verticalmente desde arriba otro sistema estelar. Desde 1924 se ha podido demostrar con seguridad que nuestro sistema galáctico y las

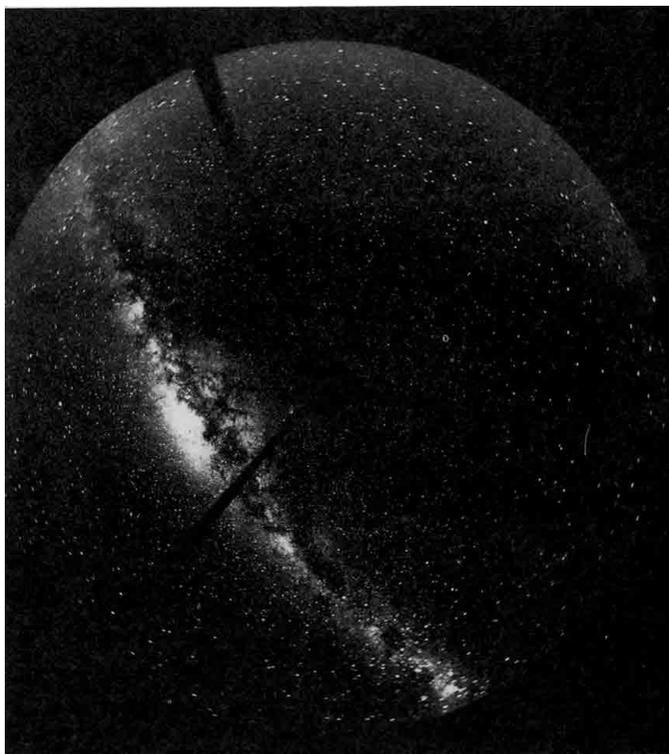
estructuras nebulosas y a menudo espirales presentes en el cielo son del mismo tipo. Se conocían con mucha anterioridad los pequeños discos nebulosos de débil luminosidad y a menudo elípticos llamados *nebulosas espirales*. En 1755, Immanuel Kant, entonces de 31 años, en su "Historia general de la naturaleza y teoría del cielo" comparó estos discos con nuestro propio sistema estelar: «Si el ojo del observador contempla este Universo de estrellas fijas (Kant se refería a nuestro sistema galáctico) a una distancia tan inmensurable que el observador quede fuera de él, el mundo de estrellas aparecerá con un ángulo tan pequeño como el de una pequeña habitación iluminada con una débil luz, y su figura será circular si su superficie se ofrece normalmente al ojo, y elíptica si se observa desde un lado.» Kant deduce de ello que las nebulosas elípticas que se observan en el cielo son sistemas galácticos situados a gran distancia, y escribe a continuación: «Todo nos hace creer que estas figuras elípticas han de considerarse universos idénticos, es decir, Vías Lácteas de constitución igual a la que acabamos de describir.» Sin embargo, tuvieron que pasar casi 200 años para que se demostrase este hecho.

El Sol, y nosotros con él, está situado aproximadamente en el plano central de nuestro sistema galáctico. Si miramos hacia el espacio en dirección perpendicular al disco, veremos un número relativamente reducido de estrellas, pero si miramos de lado, nuestra mirada tropezará con muchas estrellas, como indica la figura 0-2. El disco plano de nuestro sistema estelar aparece pues como una faja luminosa que atraviesa el cielo nocturno: es el cinturón de la Vía Láctea que nos muestra la figura 0-3.

Pero el disco de nuestro sistema no está lleno únicamente de estrellas. Unas nubes luminosas demuestran que el espacio entre las estrellas no está vacío. Una centésima parte de la masa de nuestra galaxia no se concentra en forma de estrellas sino que llena los espacios existentes entre ellas. Su composición química se parece a la del Sol; sin embargo, su densidad es sólo una billonésima de una billonésima de la densidad solar. Dentro de este gas *interestelar* están incrustados diminutos granitos de polvo. Las nubes de polvo interestelar, actuando como gruesas cortinas, debilitan y enrojecen la luz de las estrellas situadas detrás suyo, del mismo modo que el Sol en la puesta se vuelve rojo por el polvo que contiene la atmósfera terrestre. Los granos de polvo interestelar son pequeños: su diámetro mide solamente una diezmilésima de milímetro.

**Fig. 0-2.** El ejemplo de la galaxia de Andrómeda nos permite entender el origen de la banda luminosa de la Vía Láctea. Si un observador, desde su planeta nativo situado en el disco galáctico, mira hacia fuera del plano del disco verá más o menos la imagen de la izquierda: en su campo de visión aparece un número relativamente reducido de estrellas. Si mira en una dirección que coincida con el plano del disco, verá la multitud de estrellas del disco formando una banda luminosa que cruza el cielo, como muestra la imagen de la parte superior derecha.

Pero el disco de nuestro sistema no está lleno únicamente de estrellas. Unas nubes luminosas demuestran que el espacio entre las estrellas no está vacío. Una centésima parte de la masa de nuestra galaxia no se concentra en forma de estrellas sino que llena los espacios existentes entre ellas. Su composición química se parece a la del Sol; sin embargo, su densidad es sólo una billonésima de una billonésima de la densidad solar. Dentro de este gas *interestelar* están incrustados diminutos granitos de polvo. Las nubes de polvo interestelar, actuando como gruesas cortinas, debilitan y enrojecen la luz de las estrellas situadas detrás suyo, del mismo modo que el Sol en la puesta se vuelve rojo por el polvo que contiene la atmósfera terrestre. Los granos de polvo interestelar son pequeños: su diámetro mide solamente una diezmilésima de milímetro.



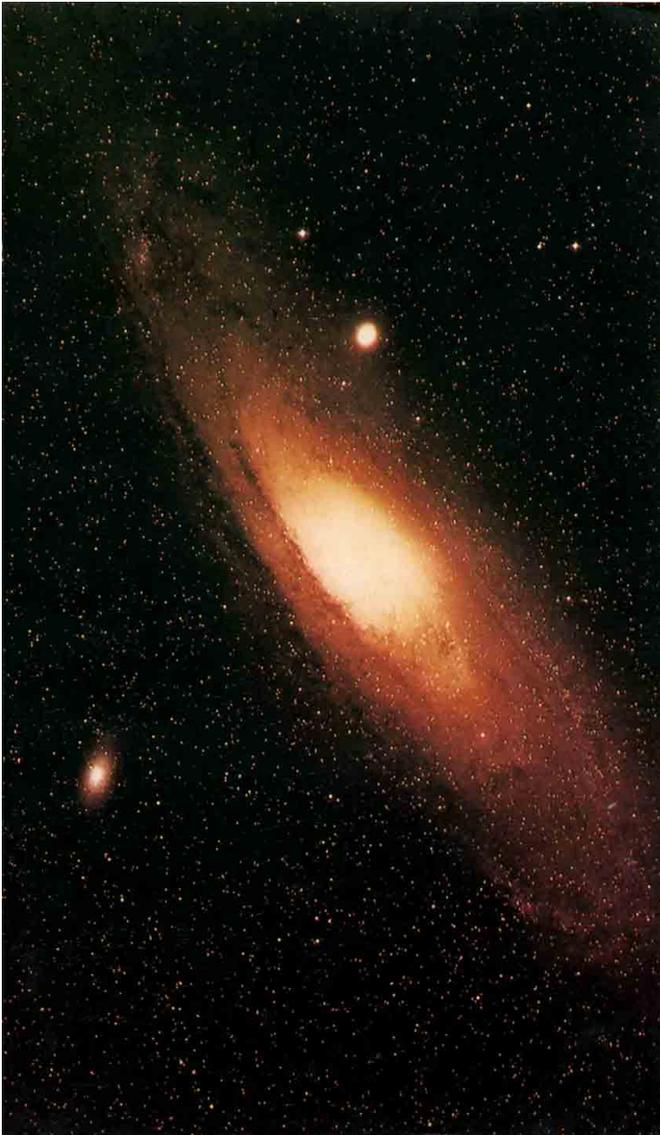
**Fig. 0-3.** La Vía Láctea fotografiada con una cámara gran angular. Las líneas negras que cruzan la imagen se deben a la misma cámara. (Fotografía: W. Schlosser, Astron. Institut der Ruhr-Universität, Bochum.)

Las estrellas, el gas y el polvo de la Vía Láctea se mueven lentamente y en promedio dan una vuelta al punto central cada 100 millones de años. Pero el mundo de las estrellas no es tan indolente. Muchas de ellas forman sistemas dobles y cada componente se mueve alrededor de la otra en períodos de años, de días o incluso de horas. Otras se hinchan y se encogen de nuevo con un ritmo regular, como si respiraran. De vez en cuando una explosión revienta una estrella, y ésta brilla brevemente casi con tanta intensidad como los cientos de miles de millones de estrellas de todo el sistema juntas. Algunas estrellas no emiten su luz de modo continuo sino en forma de destellos, que se suceden a intervalos de centésimas de segundo.

Un puñado de astrónomos empeñados en comprender el Universo contempla este impresionante escenario de la naturaleza desde sus observatorios de la Tierra, un diminuto planeta que gira alrededor de una estrella insignificante, el Sol. Los astrónomos,

con aparatos contruidos con los materiales de su planeta, siguen las evoluciones del Cosmos y envían telescopios y cohetes por encima de la molesta atmósfera de la Tierra. Muchos de sus conciudadanos los confunden con los astrólogos, aunque no tengan nada que ver con ellos. Otros los admiran porque sus pensamientos se mueven en dimensiones que nuestra imaginación, formada en contacto con los fenómenos de la vida diaria, es incapaz de comprender. Su trabajo les acerca un paso más a la creación, por lo menos a la creación del mundo inanimado. Pero esta proximidad es la proximidad propia de los científicos sobrios que no pueden extraer ninguna norma moral de lo que saben. Su trato con lo grande y con lo infinito no les convierte en hombres mejores. Tampoco les empuja únicamente el ansia de saber. Las ganas de hacer carrera y la competencia influyen en sus vidas del mismo modo que influyen en los demás sectores sociales, y algunos grandes descubrimientos se deben a estos motivos. Pero también entre los astrónomos existe el deseo apasionado de saber, la ayuda mutua y la colaboración amistosa. Muchos pasajes de este libro van a demostrarlo. El resultado de la investigación es una obra humana y, por lo tanto, imperfecta en muchos aspectos, a veces incluso errónea. Sin embargo, el camino que sigue la ciencia astronómica, desde sus primeros inicios en los babilonios hasta la moderna astrofísica, es un camino de progreso, a pesar de repetidos retrocesos.

Hemos identificado el escenario del drama, hemos presentado a los protagonistas, la acción puede ya empezar.



◀ **Fig. 0-1.** La galaxia de Andr6meda est1 situada a unos dos millones de a1os luz de nuestra galaxia V1a L1ctea, a la que pertenecen todas las estrellas solas que pueden reconocerse en la fotograf1a. La nebulosa de Andr6meda aparece como una mancha nebulosa y el1ptica. S6lo los mayores telescopios pueden resolver esta "nebulosa" en innumerables estrellas. Muchas galaxias presentan la estructura espiral visible en esta imagen. Si observ1ramos la V1a L1ctea desde el sistema de Andr6meda ofrecer1a aproximadamente el mismo aspecto. (Copyright Calif. Inst. of Technology and Carnegie Institution of Washington; reproducida con autorizaci6n de Hale Observatories.)



◀ **Fig. 0-4.** Nebulosa espiral M51 en la constelación de los Perros de Caza. Vemos aquí un sistema galáctico en dirección perpendicular a su plano. Las espirales luminosas son los lugares donde estrellas brillantes y azules excitan y hacen brillar el gas interestelar. La luz que recibimos de esta galaxia ha tardado en llegar unos 12 millones de años. (Fotografía: US Naval Observatory, Washington, EE.UU.)