



CON OJOS DE GIGANTES

LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA
EN EL SIGLO XXI



LUIS FELIPE BARRIENTOS/SEBASTIÁN LÓPEZ

EDICIONES B
GRUPO ZETA 

LUIS FELIPE BARRIENTOS PARRA

Licenciado en física y magíster en astronomía de la Universidad de Chile, obtuvo su grado de máster en la Universidad de Toronto, Canadá, y su doctorado en la misma institución. Desde entonces es profesor del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Realiza su investigación en el área de evolución y morfología de galaxias, cúmulos de galaxias y cosmología observacional. Ha sido distinguido como científico del programa de Ciencia de Frontera de la Academia Chilena de Ciencias.

SEBASTIÁN LÓPEZ MORALES

Investigador y académico del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile, se licenció en física en esa universidad y luego obtuvo un máster en física y un doctorado en astronomía en la Universidad de Hamburgo, Alemania. Su trabajo como investigador es experimental. Actualmente trabaja en responder preguntas sobre el origen de los elementos químicos en el Universo, y en probar teorías acerca de la posible variabilidad de las constantes físicas fundamentales. Ha sido distinguido como científico del programa de Ciencia de Frontera de la Academia Chilena de Ciencias.

DE CHILE



79/

1

oteca Nacional



1587140

917621

9A(714.79
80)

La publicación de este libro, que forma parte de una serie de cuatro títulos, se ha beneficiado del apoyo directo del Centro de Excelencia en Astrofísica del Programa Fondo de Investigación Avanzada en Áreas Prioritarias, FONDAF.

1ª edición: marzo 2008

© Luis Felipe Barrientos, Sebastián López. 2008

© Ediciones B Chile S.A., 2008
Monseñor Sótero Sanz 55, of. 600
Santiago, Chile
www.edicionesb.cl

ISBN: 978-956-304-040-1

Registro Propiedad Intelectual
Inscripción N° 168033

Impreso en Chile por Quebecor World

Edición
Gaspar Galaz

Diseño de Serie de Astronomía
Francisca Toral

Todos los derechos reservados. Bajo las sanciones establecidas en las leyes, queda rigurosamente prohibida, sin autorización escrita de los titulares del *copyright*, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamos públicos.

CON OJOS DE GIGANTES



LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA EN EL SIGLO XXI

Luis Felipe Barrientos y Sebastián López



A nuestras familias.

TABLA DE CONTENIDOS



INTRODUCCIÓN.....	11
 I. LA LUZ, NUESTRA VENTANA AL UNIVERSO.....	15
La velocidad de la luz.....	18
La naturaleza física de la luz.....	22
<i>La luz como una onda</i>	23
<i>La luz como una partícula</i>	24
<i>El espectro electromagnético</i>	25
<i>La temperatura y la radiación</i>	26
El código de barras de cada elemento.....	29
Un objeto, un espectro.....	32
La velocidad cambia nuestra percepción.....	34
El telescopio como máquina del tiempo.....	36
 II. LAS HERRAMIENTAS DEL ASTRÓNOMO	41
La Tierra, nave espacial en continuo movimiento.....	43
Sobre coordenadas celestes, ángulos y tiempos	45
Medir la cantidad de luz: sistema de magnitudes	49
El largo camino de la luz	51
Efectos de perspectiva: el paralaje.....	53

III. OJOS DE GIGANTES: LOS TELESCOPIOS	57
Telescopios refractores.....	59
Telescopios reflectores	62
Una máquina de precisión	64
Monturas y sistemas de coordenadas	68
Oculares y espejos secundarios	70
El ojo humano reemplazado por un chip	71
 IV. LÍMITES A LA OBSERVACIÓN	 75
A la atmósfera no le gusta la astronomía.....	77
Somos miopes, necesitamos los telescopios más grandes.....	80
Límite de difracción y resolución espacial.....	80
¡Imposible obtener la señal perfecta!.....	81
 V. UN INSTRUMENTO PARA CADA PROBLEMA	 85
Imágenes ópticas.....	88
Imágenes infrarrojas.....	89
Espectroscopía	91
El Universo en ondas de radio.....	95
 VI. PREGUNTAS PARA EL SIGLO XXI	 99
Materia y energía oscuras	102
Cometas y asteroides: una amenaza y una oportunidad	103
Nacimiento y vida de las galaxias	104
Vida extraterrestre.....	105
 VII. TECNOLOGÍA PARA EL SIGLO XXI.....	 107
Óptica activa y óptica adaptativa.....	109

Megatelescopios terrestres.....	113
<i>El LSST</i>	114
<i>El GMT</i>	116
<i>El E-ELT</i>	117
<i>El ALMA</i>	118
Salir de la atmósfera: observatorios espaciales	120
Astronomía virtual... ¡cantidades astronómicas!	121
 VIII. PURO, CHILE, ES TU CIELO ASTRONÓMICO	 127
Palabras finales	131
 GLOSARIO	 133



INTRODUCCIÓN

La astronomía (palabra de origen griego que significa “conjunto de leyes sobre los astros”) nació como una actividad contemplativa del cielo, y pronto adquirió importancia práctica para la agricultura y la navegación de las primeras civilizaciones. Hoy en día la astronomía estudia el Universo con las herramientas de la ciencia. Lo que caracteriza a la ciencia es principalmente el método científico, según el cual las ideas o hipótesis deben ser contrastadas constantemente con la realidad de los experimentos. Cuando no pueden explicarlos, o predecir nuevos fenómenos, entonces son desechadas o modificadas. Tal escrutinio constante, inherente al proceso científico, asegura que la ciencia vaya avanzando siempre. La astronomía ha ido a la par de las otras ciencias, y durante el siglo XX se produjeron grandes avances, sobre todo gracias al estudio cuantitativo de la luz que proviene de los objetos celestes.

El otro elemento clave en el avance de la ciencia en su afán por comprender el mundo es el desarrollo tecnológico. La astronomía, como todas las ciencias hoy en día, no se contenta con contemplar en su caso el Universo: es necesario *medir* para entender. Para responder preguntas como qué tan lejos están las galaxias y estrellas, cómo genera energía una estrella o cómo se forman las galaxias, la astronomía y la astrofísica se valen de todas las herramientas que tienen a mano: por un lado, la comprensión de los fenómenos físicos a través de su lenguaje, la matemática, y por otro, el uso de la tecnología apropiada.

La astronomía, también como toda ciencia, no tiene fronteras: se desarrolla prácticamente en todas partes del mundo. Sin embargo, los laboratorios donde los astrónomos realizamos nuestros experimentos —esto es, los observatorios astronómicos— son muy costosos y requieren de condiciones externas muy precisas para que su construcción y funcionamiento tengan sentido. Hay dos lugares en el planeta que sobresalen para realizar observaciones astronómicas: la isla grande de Hawaii y las montañas en el desierto del norte de Chile. También es posible hoy en día observar el espacio desde satélites; es lo que ocurre con el Telescopio Espacial Hubble y otros observatorios en órbita.

En este libro pretendemos entregar una visión moderna de las herramientas y la labor de los astrónomos. Será un paseo por los fundamentos de la observación astronómica actual, cuyo constante avance ha permitido hallazgos que



están revolucionando nuestra visión del Universo y sentando las bases de los descubrimientos del siglo XXI. Pues es en los telescopios –terrestres y espaciales– donde, cada noche de observación, los astrónomos experimentamos y ponemos a prueba nuestras ideas y teorías sobre el Universo. Invitamos al lector a seguirnos en este paseo.

I.

La luz, nuestra ventana
al Universo



La Tierra, nave espacial en continuo movimiento

Los astros están en continuo movimiento. Por ejemplo, nuestro planeta gira en torno a su eje en 24 horas y en torno al Sol en unos 365 días. A su vez, nuestro Sol y su sistema solar giran en torno al centro de nuestra galaxia en unos 250 millones de años, y también nuestra galaxia gira en torno a un centro de gravedad común junto a sus compañeras del Grupo Local. Sin embargo, solo podemos percibir en forma directa los dos primeros movimientos. El movimiento diario de nuestro planeta en torno a su eje (la rotación) y el movimiento anual en torno al Sol (la traslación) hacen que todos los cuerpos celestes vistos desde la Tierra aparezcan continuamente en distintas posiciones del cielo, según la hora de la noche y la época del año. Dado que estos movimientos del observador terrestre influyen en la posición aparente de los astros, es menester definir un sistema de referencia que sea independiente del tiempo.



Si uno imaginara a la Tierra fija, como lo hacían los antiguos, parecería que una gigantesca pantalla estrellada se va desplazando hora a hora del oriente al poniente, cuando en realidad es la Tierra la que gira en sentido contrario. Esta gran “pantalla”, la esfera celeste, que parece estar pasando sobre nuestras cabezas, también contiene a nuestra estrella más cercana, el Sol, cuya posición con respecto a nosotros produce el día y la noche. De esta forma, es la rotación terrestre la que provoca que todos los astros cambien su posición aparente (por ejemplo en relación con la vertical, o cenit).

El efecto de la traslación es un poco más sutil. Nuestro planeta completa una órbita en torno al Sol en un año. Por lo tanto, ese movimiento es perceptible a lo largo de los meses, cuando notamos, por ejemplo, leves desplazamientos en la posición de la salida y puesta del Sol en el horizonte. En realidad el efecto más visible lo tenemos en las estaciones del año: desde alrededor del 21 de junio, esto es, el solsticio de invierno en el hemisferio sur, notamos que el “paso” diario del Sol sobre nuestras cabezas va desplazándose hacia el sur. La situación se empieza a revertir a principios del verano en el hemisferio sur —alrededor del 21 de diciembre, solsticio de verano—, cuando la salida del Sol comienza a ser cada vez más al norte, y así sucesivamente. Las estaciones son una consecuencia de que los ejes de rotación y traslación no coincidan (en realidad difieren en unos 23 grados); si coincidieran, sería muy difícil detectar que la Tierra gira en torno al Sol.



Veamos ahora cómo definir un sistema de coordenadas que sea independiente del tiempo y que señale la posición de un astro en la esfera celeste.

Sobre coordenadas celestes, ángulos y tiempos

Hemos dicho que la astronomía necesita un sistema de referencia o de coordenadas para definir la posición de los astros en forma independiente de los movimientos del observador terrestre. Antes de definir tal sistema de coordenadas, detengámonos en el concepto de distancia angular.*

La distancia angular entre dos objetos celestes es el ángulo que forman las líneas rectas imaginarias que unen al observador y los objetos en su proyección en la esfera celeste. Se puede medir en grados ($^{\circ}$). Así, por ejemplo, la distancia angular entre un astro en el cenit y otro en el horizonte será de 90° (ángulo recto). Las fracciones de grado se llaman minutos de arco ($'$), y las fracciones de minuto de arco se llaman segundos de arco ($''$). Se tiene que $1^{\circ} = 60' = 60 \times 60''$. Así por ejemplo, la distancia angular entre dos extremos de la Luna es de medio grado (30 minutos de arco), y la distancia angular entre dos estrellas de un sistema binario es de unos pocos segundos de arco.

Se puede usar la mano para hacer una estimación de las distancias angulares. Si se estira el brazo completamente, se encontrará que el dedo índice cubre más o menos 1° (¡se



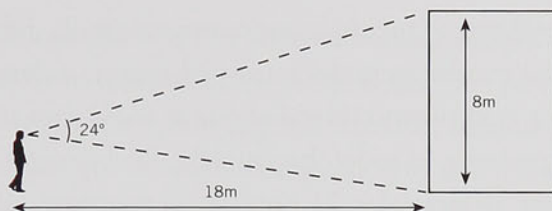
puede tapar la Luna con un dedo!), y si se usa una cuarta, ésta cubrirá aproximadamente 18° .



Ejemplos de distancias angulares usando la mano.

El sistema estándar de coordenadas de la astronomía moderna es el ecuatorial, o sistema de coordenadas ecuatoriales.* Para establecerlo definimos el plano del ecuador como la prolongación del ecuador terrestre, y los polos Norte y Sur celestes, como la intersección de la prolongación del eje de rotación terrestre con la esfera celeste (ver el diagrama). Ahora estableceremos las dos coordenadas que especifican la posición de un astro en el cielo: su *declinación* y su *ascensión recta*.

Se define la declinación de un objeto celeste como la distancia angular entre éste y el plano del ecuador a lo largo de un círculo máximo. Así, la declinación es análoga a la latitud terrestre en las coordenadas geográficas. La declinación se expresa en grados, desde 0 hasta 90° hacia el norte y desde 0 hasta -90° hacia el sur del ecuador. Esta coordenada se designa con la letra griega delta minúscula: δ .

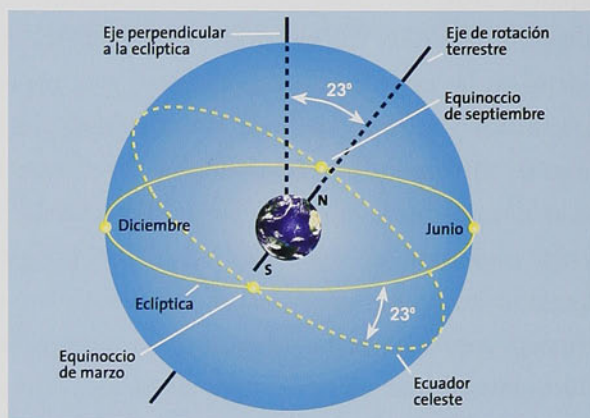


Ejemplo de distancia angular.

En cuanto a la ascensión recta de un objeto celeste, se define como la distancia angular medida a lo largo del ecuador entre éste y un punto fijo en el firmamento, llamado punto vernal.* La ascensión recta es el análogo de la longitud en las coordenadas geográficas, y se expresa en horas, minutos y segundos, desde 0 horas hasta 24 horas. Cero horas corresponde a 0 grados, y 24 horas a 360 grados, contando hacia el este desde la dirección al punto vernal. De esta manera, objetos celestes separados por 15° en ascensión recta pasarán por el meridiano separados en el tiempo por una hora. El punto –o mejor dicho la dirección– vernal que marca el cero de la ascensión recta es análogo al meridiano de Greenwich, que marca el cero de la longitud geográfica. Arbitrariamente, corresponde a la coordenada del Sol en el equinoccio de primavera del hemisferio norte. La ascensión recta se designa con la letra griega alfa minúscula: α .

La razón de expresar la ascensión recta en unidades de tiempo tiene una finalidad muy práctica: se puede medir – ¡con un simple reloj! – el tiempo transcurrido entre el instante actual y el paso del astro por el meridiano. Ese tiempo,

correspondiente al ángulo horario, es entonces la diferencia entre la ascensión recta del astro y el tiempo sidereal.* En la práctica es el tiempo sidereal el que se mide, con un reloj que está presente en todo observatorio. Si el tiempo sidereal marca, por ejemplo, las 23 horas y 30 minutos, sabemos que objetos de ascensión recta $\alpha=23^{\text{h}}30^{\text{m}}$ están pasando por el meridiano. Y así con todos. El sistema ecuatorial fue definido hace ya unos doscientos años, y uno de sus creadores fue el alemán Friedrich Bessel (1784-1846).



La esfera celeste. El punto vernal corresponde al equinoccio de marzo.

En resumen, la ascensión recta y la declinación definen la posición de un objeto astronómico independientemente del movimiento de la Tierra. La gran mayoría de los astros no cambia sus coordenadas a lo largo del tiempo; solo aquellos más cercanos como el Sol, la Luna, los planetas, asteroides y cometas tienen movimientos perceptibles.



Medir la cantidad de luz: sistema de magnitudes

En el cielo nocturno vemos estrellas que nos *parecen* más débiles que otras. ¿Son algunas estrellas intrínsecamente más débiles que otras, o es que las que nos parecen más débiles en realidad se encuentran más lejos? La respuesta es: ambas cosas.

Si el lector intenta hacer una escala del brillo aparente de los astros comprobará que, a ojo desnudo, se pueden agrupar en seis categorías de brillo, desde los más brillantes a los más débiles. Fue el griego Hiparco, en el siglo II a.C., quien concibió esta escala, y en 1850 el inglés Norman Pogson (1829-1891) la estudió desde un punto de vista más científico, descubriendo que esta escala, que él llamó escala de magnitudes,* es la forma natural en que el ojo humano puede diferenciar brillos. Pogson se dio cuenta de que las seis categorías de estrellas —o magnitudes— distinguibles por el ojo humano en el cielo nocturno corresponden a una diferencia de unas cien veces en cantidad de luz. Así, la luz que nos llega de las estrellas que más débilmente percibimos es unas cien veces menos intensa que la luz de las estrellas que nos parecen más brillantes en el firmamento, como Sirio en el hemisferio sur, por ejemplo.

La escala de magnitudes no es lineal (el doble en magnitud no corresponde al doble en “cantidad de luz”), sino logarítmica. Una escala logarítmica crece como una progresión geométrica; en el caso de la escala de magnitudes, esto significa que cada salto de diez veces en intensidad implica un cambio en 2,5 magnitudes. De paso,

el descubrimiento de Pogson demuestra que también es logarítmica la respuesta del ojo humano a los estímulos de luz (como lo es la respuesta del oído humano a los estímulos sonoros).

Acabamos de decir que el brillo *aparente* de una estrella es la cantidad de luz que nos llega de ella a nuestras pupilas o a algún detector artificial. Esta “cantidad de luz” se llama flujo* y se mide en cantidad de fotones por unidad de área y por unidad de tiempo. Como hemos dicho, los fotones son cuantos de luz, o partículas cuánticas que transportan energía y que componen la luz. A modo de ejemplo, de la estrella Sirio nuestra pupila recibe cerca de un millón de fotones cada segundo. En cambio, de la estrella más débil del firmamento recibimos solo unos 10.000 fotones por segundo. Los astrónomos decimos que las estrellas aparentemente más brillantes tienen una magnitud aparente de 0 y las más débiles una magnitud de 5. Se trata entonces de una escala inversa, por razones históricas, y logarítmica, por las características del ojo humano.

Si nuestra pupila fuera el doble de grande de los pocos milímetros de diámetro que tiene, seríamos capaces de detectar flujos cuatro veces menores, y de esta forma ampliaríamos nuestro límite humano a la observación de estrellas cuatro veces más débiles. En realidad, una tarea de los telescopios es “agrandar” nuestras pupilas y detectar así más fácilmente astros que aparecen centenas de millones y hasta miles de millones de veces más débiles que las estrellas de magnitud 5.

Como se verá más adelante, una forma alternativa de detectar más fotones de un mismo astro es con la *integración* de la observación, que es como llamamos a mantener el obturador de una cámara fotográfica abierto para detectar una imagen en condiciones de poca luz. Pero antes detengámonos a pensar por qué el brillo aparente de las estrellas es tan disímil.

El largo camino de la luz

Hemos sido cuidadosos al hablar de brillo *aparente* o cantidad de luz *recibida* por la pupila o por la apertura de un telescopio. La distinción es importante, pues el hecho de que una estrella aparezca más débil que otra se puede deber a dos razones muy distintas: se trata de una estrella que intrínsecamente radia menos luz, o bien de una estrella que está mucho más lejos, o ambas cosas. Cuando se trata de una estrella intrínsecamente más débil, decimos que su brillo absoluto o luminosidad* es menor. Dos estrellas de distinto brillo absoluto y a la misma distancia no se verán con el mismo brillo aparente.

Veamos ahora el efecto de la distancia en el brillo aparente de una estrella. Así como la luz de un faro nos parece más débil cuanto más nos alejamos de éste, una estrella muy lejana nos parecerá más débil que otra de igual brillo absoluto pero más cercana. En la práctica, se constata el siguiente efecto geométrico: estrellas dos veces más lejanas, nos parecen $2 \times 2 = 4$ veces más débiles; estrellas tres veces

más lejanas nos parecen $3 \times 3 = 9$ veces más débiles, y así sucesivamente. Tal efecto geométrico se debe simplemente a que la luz que sale de una estrella se reparte en todas direcciones.

Como el lector supondrá, para determinar distancias en astronomía debemos conocer el brillo absoluto de las estrellas, pues la relación entre éste y el brillo aparente nos da la distancia (al cuadrado). ¡Pero el brillo absoluto es una cantidad muy difícil de medir! En realidad, toda nuestra visión del Universo reposa sobre nuestra capacidad de medir distancias a los astros, un tema que inevitablemente lleva al estudio de la cosmología,* tratada en otro volumen de esta serie.

Un aspecto importante es qué unidades de distancia usar en astronomía. Incluso en la Tierra utilizamos diferentes medidas dependiendo de cuán grandes sean las distancias: para medir el largo de una mesa podemos usar centímetros, pero para medir la distancia entre dos ciudades será mejor usar kilómetros. En el cielo las distancias son tan grandes que los astrónomos hemos definido nuevas unidades. Una de las más prácticas consiste en medir el tiempo que tardaría la luz en recorrer una distancia. Por ejemplo, la luz que proviene del Sol tarda unos ocho minutos en alcanzar la Tierra, como ya vimos; la luz que proviene de la estrella más cercana al Sol, Alfa Centauri, tarda unos cuatro años, y la luz proveniente del centro de nuestra galaxia, unos 26.000 años. Decimos entonces que el Sol se encuentra a 8 minutos luz, Alfa Centauri a 4 años luz, y el centro

de la galaxia a 26.000 años luz. Las distancias a objetos más lejanos crecen en forma impresionante. Por ejemplo, nuestra galaxia vecina, la Nube Grande de Magallanes, se encuentra a unos 160.000 años luz de nosotros. Con telescopios actuales podemos detectar galaxias que se encuentran a ¡miles de millones de años luz!

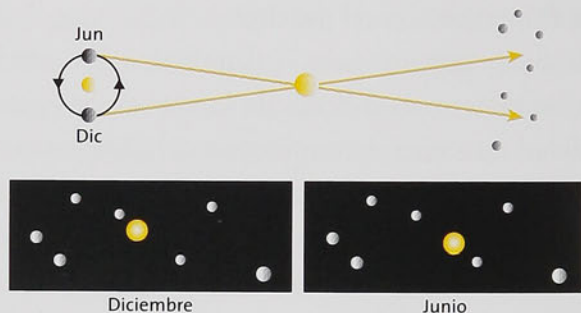
Efectos de perspectiva: el paralaje

Hemos dicho que conocer la distancia a las estrellas es una de las tareas más difíciles de la astronomía moderna. En realidad, gracias a determinaciones indirectas de brillo absoluto la astronomía ha ido incrementando su capacidad de medición, y hoy en día estamos en condiciones de determinar distancias tan grandes como el tamaño del Universo.

Sin embargo, toda medición de distancias está basada en un solo sistema, que es de corto alcance pero a la vez el más directo de todos: el paralaje.* La forma más elemental de medir distancias es usar el efecto de perspectiva que resulta de observar la posición aparente de una estrella desde dos posiciones distintas de la Tierra a cada lado del Sol. Esto significa que debemos hacer observaciones separadas por medio año de una misma estrella cercana, la que aparecerá en posiciones levemente distintas con respecto a estrellas del fondo (lejanas), para las que el efecto de perspectiva es casi nulo. Mientras más cerca esté la estrella en cuestión, más evidente será el cambio en su posición aparente, y



mientras más lejos, más imperceptible. Esta diferencia de perspectiva en dos mediciones de una estrella cercana separadas por medio año se llama paralaje, y nos permite medir distancias en forma directa. El paralaje, de hecho, no nos es desconocido en la vida diaria, porque nuestro cerebro, con la información independiente de los dos ojos, se vale de este efecto para calcular las distancias de objetos cercanos.



El efecto de perspectiva llamado paralaje.

Actualmente podemos medir el efecto de paralaje de estrellas lejanas, situadas a cientos de años luz. El satélite europeo Hipparcos (nombre que homenajea al griego Hiparco, pero que también es el acrónimo de High Precision Parallax Collecting Satellite), dedicado precisamente a esta tarea, pudo medir distancias de hasta casi 1.000 años luz usando el método de paralaje. ¡El efecto es tan sutil como tratar de medir el ancho de un pelo humano a un kilómetro de distancia!

La pregunta en este punto es obvia: si solo podemos



medir con este método la distancia a estrellas a menos de 1.000 años luz, ¿cómo se ha podido determinar la distancia a algunas galaxias a *miles de millones* de años luz? La respuesta es: midiendo su magnitud aparente e infiriendo su distancia a través de su magnitud absoluta. Pero, como el lector imaginará, esto es algo realmente difícil de realizar, y constituye uno de los temas relevantes en cosmología, como se puede ver en el volumen *Supernovas* de esta serie.

AGRADECIMIENTOS



Los autores agradecen a sus instituciones, la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Universidad de Chile, así como al Centro de Astrofísica FONDAP, por el apoyo brindado para llevar a cabo este libro. Nuestros sinceros agradecimientos también van a nuestros alumnos, que enriquecieron las clases en las que se basa gran parte del material que exponemos.

Agradecemos también a todas aquellas personas que amablemente leyeron nuestro texto e hicieron importantes sugerencias.

Los autores también agradecen a los observatorios de Cerro Tololo, Gemini, SOAR, La Silla, Las Campanas, Paranal, al Telescopio Espacial Hubble, al Telescopio Espacial Spitzer, al radioobservatorio ALMA, y a sus instituciones asociadas, por permitir el uso de sus hermosas imágenes, que son parte importante de este libro.

**CRÉDITOS DE LAS FIGURAS**

- Pág. 15: NASA/ESA/Hubble Heritage Team (AURA/STScI).
- Pág. 21: J. Spencer, Lowell Observatory/NASA/ESA.
- Pág. 39: NASA/ESA/S. Beckwith (STScI)/HUDF Team.
- Pág. 41: NASA/JPL/Space Science Institute.
- Pág. 57: Gemini Observatory.
- Pág. 63: Yerkes Observatory.
- Pág. 67: SAGEM/ESO.
- Pág. 69: Izquierda: ESO. Derecha: Gemini Observatory.
- Pág. 73: Gustavo Arriagada/Gemini Observatory.
- Pág. 75: T.A. Rector/I.P. Dell'Antonio/NOAO/AURA/NSF.
- Pág. 82: NASA/Hubble Heritage Team (AURA/STScI).
- Pág. 85: ESO.
- Pág. 91: ESO.
- Pág. 95: ESO.
- Pág. 97: NRAO/AUI.
- Pág. 99: T.A. Rector/University of Alaska, Anchorage, H. Schweiker/WIYN/NOAO/AURA/NSF.
- Pág. 107: Gemini Observatory /AURA.
- Pág. 110: AUI/NRAO.
- Pág. 113: Gerard Hudepohl /ESO.
- Pág. 115: LSST Corporation.
- Pág. 116: GMT Consortium.
- Pág. 117: ESO.
- Pág. 118: ESO.
- Pág. 119: ESO.
- Pág. 121: NASA/CXC/SAO.
- Pág. 122: NASA/ESA.
- Pág. 127: ESO.
- Págs. 20, 27, 29, 32, 35, 46, 47, 48, 54, 60, 64, 69, 79, 95: Elena Manríquez.

SECC. CHILENA

BIBLIOTECA NACIONAL
C. SELECCION ADQUISICION Y CONTROL

23 ENE 2008

DEPOSITO LEGAL

OTROS TITULOS DE LA SERIE

HIJOS DE LAS ESTRELLAS

La astronomía y nuestro lugar
en el Universo

MARÍA TERESA RUIZ

MUNDOS LEJANOS

Sistemas planetarios y vida en el Universo

DANTE MINNITI

SUPERNOVAS

El explosivo final de una estrella

MARIO HAMUY Y JOSÉ MAZA