

EXTINCION DE LAS ESPECIES • LENTES GRAVITATORIAS

INVESTIGACION

ENERO 2002  
4,81 EURO 800 PTA.

*y*  
CIENCIA

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

# LUCHA GENETICA CONTRA LOS VIRUS

Sedimentos  
vítreos  
de la Pampa

Evolución del parto

El papel  
electrónico



## SECCIONES

3

**HACE...**

50, 100 y 150 años.

32

**PERFILES**

Richard S. Lindzen:  
el ominoso abuso del poder  
contra la libertad  
de expresión.



34

**CIENCIA Y SOCIEDAD**

El cólera y El Niño,  
Bangladesh como ejemplo...  
Geometría y nanotécnica...  
Tumores cerebrales,  
tasa de proliferación.



40

**DE CERCA**

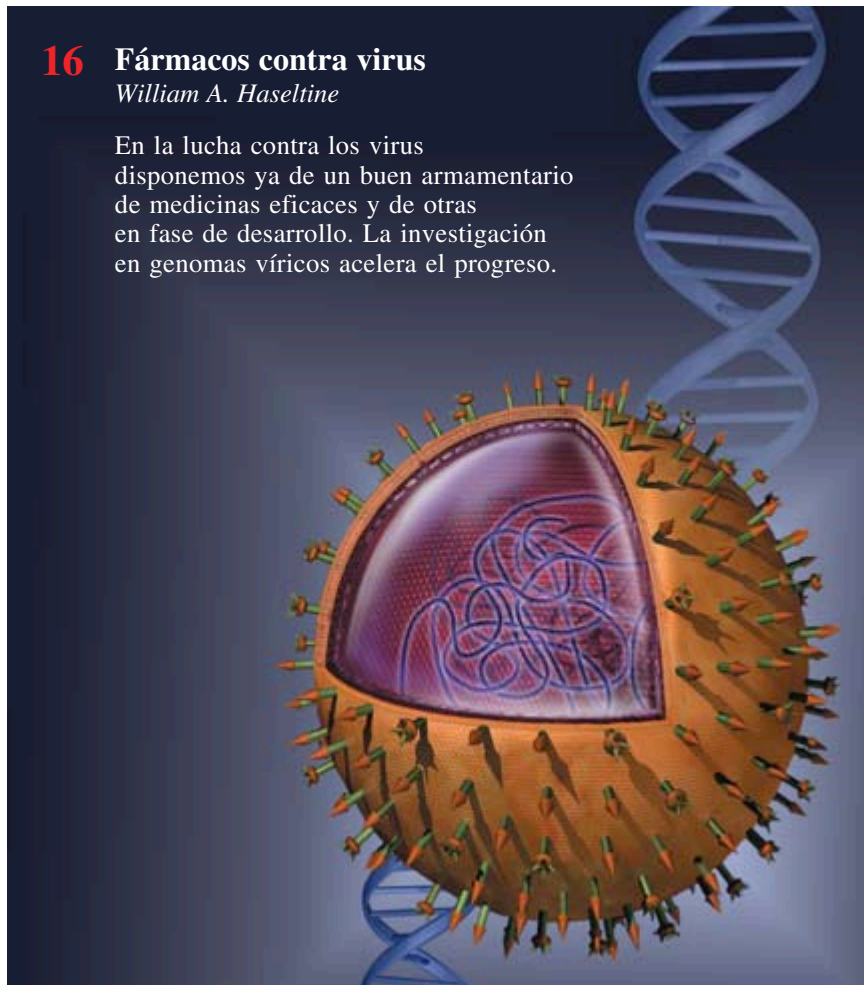
Icebergs.



## 16 FÁRMACOS CONTRA VIRUS

*William A. Haseltine*

En la lucha contra los virus disponemos ya de un buen armamentario de medicinas eficaces y de otras en fase de desarrollo. La investigación en genomas víricos acelera el progreso.



## Lentes gravitatorias y materia oscura

*Joachim Wambsganss*

Las estrellas, galaxias y agujeros negros pueden desviar la luz procedente de otros objetos celestes aún más alejados. Tal efecto de lente gravitatoria nos proporciona pistas acerca de la materia oscura, la estructura de los cúasares y la distribución de la materia a gran escala en el universo.



24

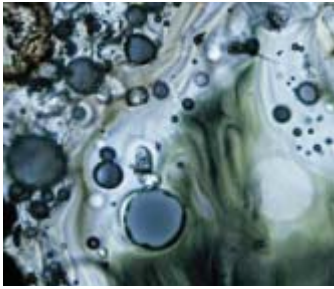


## La importancia del número de alumnos

*Ronald G. Ehrenberg, Dominic J. Brewer, Adam Gamoran y J. Douglas Willms*

La disminución del número de alumnos por profesor no es, en la enseñanza, la panacea.

42



### Las escorias y tierras cocidas de la Pampa

Marcelo A. Zárate y Peter H. Schultz

Los enigmáticos fragmentos vítreos asociados a otros parecidos a ladrillos que se encuentran en los sedimentos de la Pampa argentina cercanos a Mar del Plata se deben al impacto de un asteroide, ocurrido hace 3,3 millones de años.

53

### La extinción de las especies

W. Wayt Gibbs

Los ecólogos avisan de la extinción en masa que está teniendo lugar, pero es difícil saber sus dimensiones y la mejor manera de detenerla.



62



### La evolución del parto humano

Karen R. Rosenberg y Wenda R. Trevathan

La necesidad de ayuda a las mujeres durante el parto puede haber evolucionado junto a nuestro modo de locomoción bípeda.

68

### En busca del papel electrónico

Steve Ditlea

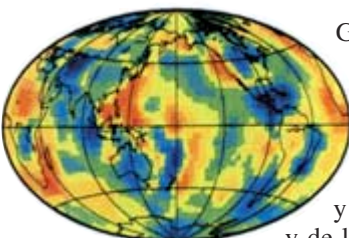
Las compañías compiten por la creación de un "papel" digital que reúna las mejores propiedades de los textos impresos y visualizados en pantallas de ordenador.



74

### Las ciencias de la Tierra en el último cuarto de siglo

Agustín Udías



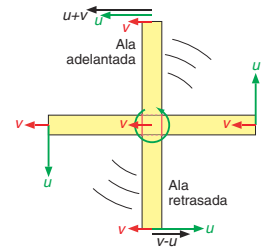
Gracias a nuevos instrumentos y métodos de observación, así como a la utilización de ordenadores de gran capacidad y rapidez de cálculo y memoria, los últimos 25 años han supuesto un gran adelanto para nuestro conocimiento de la Tierra y sus envolturas, océanos y atmósfera y de los procesos que se desarrollan en su seno.

## SECCIONES

82

### CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

El vuelo del bumerán, por Wolfgang Bürger



85

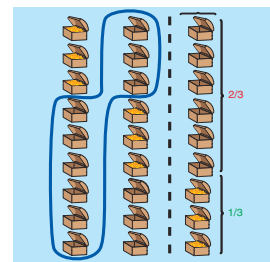
### AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Parada discrecional, por Dennis E. Shasha

86

### JUEGOS MATEMÁTICOS

Información y juegos de azar, por Juan M. R. Parrondo



88

### IDEAS APLICADAS

Interruptores de pérdida a tierra, por Mark Fischetti

90

### NEXOS

Temas muy intelectuales, por James Burke

92

### LIBROS

Evolución... Antropología... Biodiversidad.





**Portada:** Biozentrum/SPL/Photo Researchers, Inc., y Jana Brenning

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	NASA/ESA
6	Joachim Wambsgans ( <i>arriba</i> ); Atelier Kühn/SdW ( <i>abajo</i> )
7	Joachim Wambsgans
8	Lindsay King ( <i>anillo</i> ); Frederic Courbin ( <i>cuásar doble</i> )
9	Joachim Wambsgans; Sara Chen ( <i>gráfico</i> )
10	Joachim Wambsgans
11	NASA; W. N. Colley y E. Turner; J. A. Tyson, Bell Laboratories
12	Sara Chen ( <i>arriba</i> ); Frederic Courbin ( <i>doble cuásar</i> )
13	NASA/ESA; Spektrum der Wissenschaft ( <i>gráfica</i> )
17-19	Quade Paul
21	Cortesía de Laboratorios Abbott
24-27	Bruce Strachan
30	Jon Burbank
31	Bruce Strachan
42-51	Marcelo A. Zárate y Peter H. Schultz
55	Cheryl D. Knott
57	Lester V. Bergman, <i>Corbis</i> ( <i>trilobite</i> ); James L. Amos, <i>Corbis</i> ( <i>Placodermo</i> ); Richard Paselk, <i>Universidad Estatal Humboldt</i> ( <i>coral y fitosauero</i> ); Mike Everhart ( <i>mosasauero</i> )
58	Sara Chen
60-61	Frans Lanting, <i>Minden Pictures</i>
64-65	Nina Finkel
66	Nina Finkel ( <i>arriba</i> ); Danny Lehman, <i>Corbis</i> ( <i>fotografía</i> )
68-69	Sam Ogden
70	Eric Millette
71	Sam Ogden
72	Laurie Grace
73	Sam Ogden
75	Copyright 2000, American Geophysical Union
76	Agustín Udías
77	Copyright 2001, American Geophysical Union
78	Agustín Udías
79	Cortesía de E. Buform
82	Wolfgang Bürger/SdW
83	Thorsten Krome ( <i>arriba</i> ); Wolfgang Bürger ( <i>dibujo</i> )
84	Wolfgang Bürger
85	Ian Worpole
88-89	George Retseck

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

Emilio Elizalde: *Lentes gravitatorias y materia oscura*; Esteban Santiago: *Fármacos contra virus*; Luis Bou: *La importancia del número de alumnos y Aventuras problemáticas*; Joandomènec Ros: *La extinción de las especies*; Carlos Lorenzo: *La evolución del parto humano*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; José M.<sup>a</sup> Valderas Martínez: *Nexos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace... e Ideas aplicadas*

## INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.<sup>a</sup> Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> – 08021 Barcelona (España)

Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

## SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

MANAGING EDITOR Michelle Press

ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler

EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell,

Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson

PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN Rolf Grisebach

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup>  
08021 Barcelona (España)  
Teléfono 93 414 33 44  
Fax 93 414 54 13

### Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	52,89 euro 8.800 pta.	96,16 euro 16.000 pta.
Extranjero	69,12 euro 11.500 pta.	129,22 euro 21.500 pta.

### Ejemplares sueltos:

Ordinario: 4,81 euro 800 pta.  
Extraordinario: 6,01 euro 1.000 pta.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

## DISTRIBUCION

### para España:

**LOGISTA, S. A.**  
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)  
28108 Alcobendas (Madrid)  
Tel. 91 484 39 00

### para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> – 08021 Barcelona  
Teléfono 93 414 33 44

## PUBLICIDAD

GM Publicidad  
Francisca Martínez Soriano  
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.  
28009 Madrid  
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

### Cataluña y Baleares:

Miguel Munill  
Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup>  
08021 Barcelona  
Tel. 93 321 21 14  
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada 

Copyright © 2001 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2002 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona  
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

# HACE...

## ...cincuenta años

**UN LECTOR DISCONFORME.** «Señor director: El artículo de Louis N. Ridenour, de agosto de 1951, correctamente titulado 'Una revolución en la electrónica' es interesantísimo. Sin embargo, transmite la impresión completamente errónea de que el tubo amplificador de tres electrodos ha llegado al fin de su carrera. El doctor Ridenour omitió mencionar las limitaciones del transistor respecto a la frecuencia. Con tales limitaciones, no puede competir con el tubo de tres electrodos, o audión, como yo lo llamé en principio. La aplicación generalizada del transistor a la radio o televisión está muy lejos todavía.—Lee DeForest»

**RIDENOUR CONTESTA.** «Señor director: Me complace recibir los comentarios de quien posibilitó el estado presente de la electrónica, aunque deba estar un tanto en desacuerdo con alguno de ellos. Ciertamente, puede que falten algunos años para que los equipos comerciales de radio y televisión hagan uso del transistor. Pero ese retraso probablemente se deberá a la incapacidad de la producción de transistores para hacer frente a unas enormes y crecientes demandas militares. Las principales limitaciones de los aparatos electrónicos más complejos radican en las in-

suficiencias fundamentales del tubo de vacío, que casi medio siglo de desarrollo han aliviado pero no remediado.—Louis N. Ridenour»

**¿AVES DE CORRAL VENENOSAS?** «Los antibióticos aceleran el crecimiento de pollos y pavos. Los granjeros estadounidenses ya alimentan con ellos, en gran escala, sus corrales. Mortimer P. Starr y Donald M. Reynolds, bacteriólogos de la Universidad de California, examinaron los intestinos de pavos criados con una dieta complementada con estreptomina y descubrieron que a los tres días aparecía una bacteria resistente al fármaco. Si la alimentación con antibióticos produce variantes resistentes de parásitos tales como la *Salmonella*, este microorganismo no sólo podría envenenar a los consumidores humanos sino ser inmune a los tratamientos farmacológicos.»

## ...cien años

**EL CANAL DE PANAMÁ.** «El informe de la Comisión del Istmo del Canal ha despejado una masa de errores y distorsiones que hasta ahora se cernían sobre toda la cuestión del canal. A juzgar por la viabilidad de la construcción, seguridad, estabilidad política, comodidad y facilidad de explotación y economía de primera inversión y mantenimiento, el Canal de Panamá tal como

lo han diseñado nuestros ingenieros, con mucho, mejor proyecto que el Canal de Nicaragua. El Congreso está tan acostumbrado a considerar a Panamá como una empresa francesa que hasta ahora no ha empezado a darse cuenta de que si afianzamos nuestros propios términos de licitación en el proyecto Panamá, éste se convertirá en una empresa tan americana como la construcción de un canal *de novo* en Nicaragua.»

**ALIMENTAR PITONES.** «Hace algún tiempo la Sociedad Zoológica de Nueva York adquirió una pitón de casi ocho metros. El animal rehusó de plano comer nada, y si bien una serpiente puede ayunar durante un período considerable, incluso para el aguante del reptil hay límites. Las autoridades decidieron que había que tomar medidas extremas. La serpiente fue firmemente sujeta por doce hombres y con ayuda de un palo se le introdujo por la boca el alimento, compuesto éste por dos conejos y cuatro cobayas (véase ilustración). Luego fue devuelta a la jaula para que siguiera el proceso de digestión.»

## ...ciento cincuenta años

**MEDICINAS Y PANACEAS.** «Es muy corriente que los vendedores de remedios de curandero los anuncien como 'puramente vegetales'. Ello es abusar de la ignorancia de la gente. Hace ya tiempo se usaban exclusivamente medicinas vegetales, con la excepción del alumbre y el azufre. Cuando la ciencia desarrolló las virtudes de las medicinas químicas, los viejos prejuicios se organizaron contra las maldades de las 'nuevas drogas'. Los mismos prejuicios anidan aún en las mentes de muchos, y así oímos que los 'médicos naturistas' son más seguros. Creen esas personas que las medicinas químicas son más peligrosas, pero ello es pura tontería, pues los venenos más virulentos se extraen de hierbas. La morfina, la nuez vómica, la estricnina, la nicotina y otros espantosos venenos son extractos vegetales.»




Pitón: Alimentada a la fuerza en 1902

# Lentes gravitatorias y materia oscura

Las estrellas, galaxias y agujeros negros pueden desviar la luz procedente de otros objetos celestes aún más alejados. Tal efecto, que recibe el nombre de efecto de lente gravitatoria, nos proporciona pistas acerca de la materia oscura, la estructura de los cúasares y la distribución de la materia a gran escala en el universo

Joachim Wambsganss



**E**n una sala de espejos, el visitante disfruta con las imágenes múltiples de sí mismo; algunas, muy distorsionadas. A partir de los detalles de tales imágenes de su persona, deformes y como derretidas, podría, en principio, deducir la forma de la superficie de los espejos que las producen. E incluso si el observador desconociese el aspecto verdadero de sí mismo (que ha observado mil veces al mirarse en un espejo normal), aun en ese caso podría, a partir de las imágenes distorsionadas, reconstruir una imagen fiel de sí mismo.

También en nuestro universo podemos contemplar de vez en cuando dos, tres o incluso más imágenes —a menudo muy distorsionadas— de objetos celestes muy alejados. Esas imágenes múltiples aparecen cuando los rayos de luz son desviados por la acción de otros cuerpos celestes de enorme masa.

Ese efecto de lente gravitatoria, así se le denomina, proporciona a los astrofísicos la manera de obtener unos conocimientos de primera mano sobre el universo y sus objetos cósmicos, imposibles de adquirir por otra vía y, si acaso, con enormes dificultades. Son conocimientos sobre la escurridiza materia oscura, la distribución de la materia a gran escala o la estructura interna de los cuásares, regiones centrales extremadamente brillantes que se hallan en galaxias muy lejanas.

La astrofísica de las lentes gravitatorias constituye un campo de investigación joven. Pese a ello, los astrónomos han detectado muy diversas manifestaciones de este fenómeno de la ‘luz que se curva’. Así, se ha descubierto por ejemplo el efecto focalizador de estrellas solitarias, cuya masa no supera siquiera la solar. También se han identificado galaxias con hasta un billón de soles que operan como lentes gravitatorias extraordinariamente potentes; se han visto incluso cúmulos de galaxias, que contienen cientos de éstas, que cumplen la misma función. Por otra parte, los investigadores han identificado en los objetos más pequeños —ya fuesen estrellas o galaxias o cuásares— variaciones casi imperceptibles en su luminosidad o en su forma, lo que ha sido posible sólo merced al efecto aumentativo de la desviación de la luz.

En un sistema de lentes gravitatorias, entre el observador situado en la Tierra y la lejana fuente luminosa se sitúa algún objeto cósmico, que actúa como una lente de gran aumento. Puede tratarse de una estrella, de una galaxia, de un cúmulo de galaxias o de un agujero negro. Tales concentraciones de masa desvían la luz procedente de las fuentes lejanas de su trayectoria rectilínea. De ese modo, el observador terrestre puede ver el objeto duplicado o multiplicado varias veces, pese a que, en la realidad, se trata de un único objeto. Cuando se observa toda una constelación de este tipo, los especialistas hablan de un “efecto de lente gravitatoria fuerte o intenso”. Si la masa focalizadora no es lo suficientemente compacta, o si la fuente no se sitúa más o menos exactamente detrás de la lente, entonces el efecto desviador de la luz no tiene consecuencias tan drásticas y origina sólo ligeras deformaciones en la imagen de la galaxia lejana. Se habla en ese caso de un “efecto de lente gravitatoria ligero o débil”.

### **1. CUANDO UN CUMULO DE GALAXIAS**

—Abell 2218 en la fotografía, debida a Andrew Fruchter y tomada con el telescopio espacial Hubble— actúa como lente gravitatoria, engendra “gigantescos arcos de luz”. Las galaxias amarillentas grandes pertenecen al cúmulo; las galaxias más delgadas, en parte azules y curvadas formando un arco, se hallan situadas en realidad mucho más lejos, detrás del cúmulo; de acuerdo con la masa de éste sufren una mayor o menor deformación debido al efecto de lente gravitatoria.

Si sabemos que la luz se propaga en línea recta, ¿por qué puede desviarse de esa trayectoria en el cosmos? Por principio, la luz sigue la trayectoria más corta entre dos puntos, que en la mayoría de los casos se trata de una línea recta. Sin embargo, debido al hecho de que el universo contiene enormes concentraciones de materia y a los principios de la teoría general de la relatividad de Einstein, que predice que cada masa curva en mayor o menor medida (dependiendo de su valor mayor o menor) el espacio que tiene a su alrededor, resulta que los propios rayos de luz siguen también necesariamente caminos curvados. La intensidad de la desviación depende de la proximidad de la trayectoria del rayo de luz al objeto cósmico, así como de la masa de éste: el ángulo de desviación es directamente proporcional a la masa del objeto que la origina e inversamente proporcional a la distancia entre dicho objeto y el camino de la luz.

Esta curiosidad cósmica nos proporciona una solución, cuando menos aproximada, de algunos de los problemas más fascinantes de la astrofísica moderna: volumen, edad y geometría de nuestro universo, estructura interna de los cúasares, origen y evolución de las galaxias o búsqueda de la escurridiza materia

oscura. Los investigadores creen incluso que con la ayuda de este fenómeno llegarán a observar planetas parecidos a la Tierra que dan vueltas en torno a otras estrellas.

El efecto de lente gravitatoria se deja sentir en las propiedades de las fuentes de luz:

► **Posición:** Por medio de la desviación de la luz se modifica siempre la posición aparente de una estrella o de una galaxia en el cielo. Este efecto es inobservable la mayoría de las veces, dado que desconocemos por completo en qué lugar del cielo se vería el objeto si no se hubiese desviado la luz procedente del mismo. Sólo cuando una determinada configuración de lente gravitatoria se modifica substancialmente durante un corto intervalo temporal —entendiendo por tal, como mucho, el que corresponde a la vida activa de un astrónomo— y somos así capaces de ver, por decirlo de algún modo, el antes y el después del efecto, podemos me-



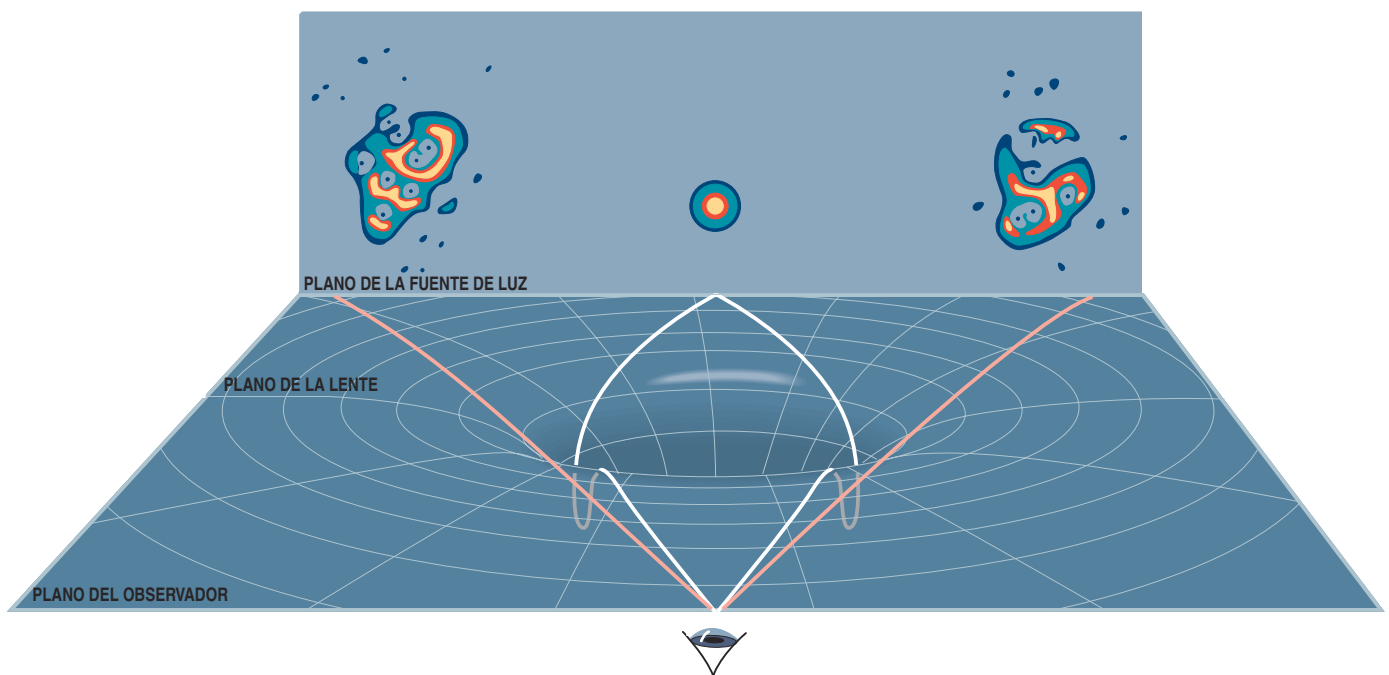
**3. EL CARTEL LUMINOSO ORIGINAL** (aquí el logotipo de "Investigación y Ciencia") se ha deformado y multiplicado varias veces por la acción de un conjunto de lentes gravitatorias simulado por ordenador. Las superficies de colores (*parte superior*) corresponden a diversas intensidades del efecto aumentativo de las lentes: cuando la fuente de luz se halla en una región de color azul, su intensidad se ve poco aumen-

dir la influencia de la lente gravitatoria sobre la posición.

► **Luminosidad:** La desviación y focalización de la luz influye sobre la luminosidad, medida con un

**2. CONSTELACION** de lentes gravitatorias típica. Los rayos de luz procedentes de un cúasar muy lejano (*la fuente circular situada arriba, en el medio*) son desviados en su camino hacia el observador terrestre por una galaxia que se encuentra en su camino (*líneas blancas*). El observador ve dos o más imágenes amplificadas (*arriba, a la iz-*

*quierda y a la derecha*), que aparecen ubicadas en distintas posiciones del cielo (*siguiendo las líneas rojas*). Las estrellas de la galaxia actúan como microlentes gravitatorias, lo cual conduce a una imagen deformada de la estructura de la fuente, que no se ve según tal es en realidad.







► **Número:** Fruto espectacular del efecto de lente gravitatoria, se generan imágenes dobles o múltiples de una galaxia lejana o de un cuásar. Las imágenes múltiples aparecen siempre por pares; en cada par, una es imagen especular de la otra.

Mediante simulación informática podemos recrear todos estos casos de desviación de luz por efectos gravitatorios.

Que las grandes masas de los cuerpos celestes desviaban de su trayectoria rectilínea a los rayos de luz lo anunció ya Albert Einstein en 1915, al formular su teoría general de la relatividad. Pero no fue el primero en predecirlo. En 1801 Johann Georg Soldner, astrónomo berlinés, había calculado que la posición de una estrella sufriría una desviación de ángulo muy pequeño debido a la influencia de la masa del Sol. El resultado de Einstein correspondiente al ángulo de desviación era, sin embargo, el doble del predicho por Soldner; tal efecto fue medido en 1919, durante un eclipse de sol, por los astrofísicos británicos Arthur Eddington y Frank Dyson. Este resultado constituyó un hito, pues corroboraba la teoría general de la relatividad.

En los años treinta Einstein volvió a la desviación de la luz provocada por la gravedad. Sus cálculos le llevaron a predecir la aparición de dos imágenes aumentadas de una estrella, cuando entre la estrella en cuestión y el observador mediara otra que actuaría de lente; en el caso de alineación exacta aparecería una imagen anular perfecta. Sin embargo, Einstein dudaba de que un efecto de estas características se observara nunca. Otros astrofísicos se ocuparon también por aquella época del efecto de lente gravitatoria. Fritz Zwicky sí estaba convencido de que terminaría por verse galaxias que actuarían como lentes gravitatorias. En los años sesenta se publicaron numerosos tra-

bajos teóricos que se ocupaban del tema. Sjur Refsdal demostró que la desviación de la luz permitía obtener el radio del universo.

### La primera imagen doble

Pero hasta 1979 no pudo hallarse en el firmamento la primera imagen doble. Le cupo el mérito a Dennis Walsh, de Manchester, y se trataba de un cuásar cuya luz era desviada por una galaxia situada en el camino de sus rayos. El astrónomo británico se encontró que la luz del cuásar era muy brillante; pudo distinguir dos imágenes del mismo. En los años subsiguientes fueron observados más y más fenómenos de lente gravitatoria. Los primeros “arcos luminosos gigantes”, originados por la acción focalizadora de un cúmulo de galaxias entero, y correspondientes a las imágenes extraordinariamente deformadas de varias galaxias lejanas, fueron descubiertos en 1986, por Roger Lynds, del Observatorio Astronómico Óptico Nacional de Tucson, y por Vahe Petrosian, de la Universidad de Stanford, así como también, independientemente, por un equipo liderado por Geneviève Soucail, del Observatorio Midi-Pyrénées de Toulouse. Hace unos meses, cuatro equipos observacionales distintos han demostrado que la propia estructura a gran escala del universo puede estudiarse mediante el efecto de lente gravitatoria.

Los efectos intensos de lente gravitatoria se observan en el cosmos con escasa frecuencia. Sin embargo, son fáciles de detectar, en lo que afecta a objetos individuales, bajo la forma de imágenes múltiples de un mismo objeto, de arcos de longitud considerable o de anillos que aparecen en ciertas galaxias.

Harto más común es el efecto de lente gravitatoria débil. Para su detección, los observadores del cosmos deben investigar una gran cantidad de objetos celestes y deducir del análisis estadístico de los mismos la desviación de lente gravitatoria. Según la masa del objeto que actúa de lente gravitatoria, o de acuerdo con el tipo particular de efecto observado como deformación de las fuentes luminosas

tada; más, si se encuentra en una región verde, y mucho más, en una roja. Si la fuente luminosa reside en una línea amarilla, el efecto aumentativo resulta particularmente intenso. Los dominios que se hallan dentro de las líneas amarillas se reproducen varias veces. Los pequeños cuadrados amarillos (a la derecha) señalan las posiciones de las lentes gravitatorias.

telescopio, de las estrellas y galaxias lejanas. Aunque la mayoría de los objetos cósmicos sufren una pérdida muy pequeña de luminosidad, algunos la aumentan. Sólo un número exiguo de fuentes aparecen mucho más brillantes debido al efecto de lente gravitatoria. Se han observado ya luminosidades que centuplican la intensidad original. Estas son las que revisten mayor interés.

► **Forma:** Debido al efecto de lente gravitatoria, las galaxias aparecen separadas en direcciones tangenciales y adquieren forma de pequeño arco. En casos extremos pueden ofrecer una forma anular.

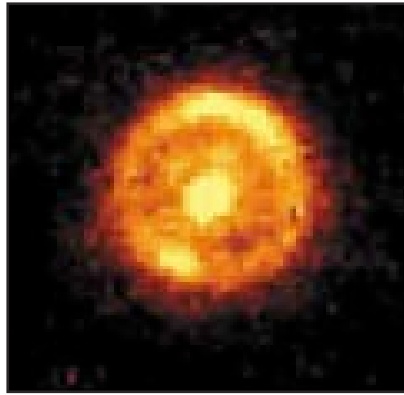
### El autor

JOACHIM WAMBSGANSS enseña física de astropartículas en la Universidad de Potsdam. Su principal tema de investigación es el efecto de lente gravitatoria así como sus diversas aplicaciones. Trabaja, además, en cúmulos de galaxias y en la búsqueda de planetas extrasolares.

del fondo, se deduce la naturaleza del fenómeno en cuestión.

**Imágenes múltiples de cuásares:** Hasta hoy, los astrónomos han podido observar más de cincuenta ejemplos de cuásares dobles, triples y cuádruples. En muchos casos, las separaciones entre imágenes corresponden a escasos segundos de arco; por eso, se precisa disponer de los mejores telescopios existentes para investigar tales fenómenos. De entrada hay que recoger indicios claros de que se trata de una imagen múltiple de un mismo cuásar y no de un grupo real de tales objetos celestes. La distancia a cada objeto —desviación hacia el rojo del espectro— debe ser exactamente la misma. Luego, los propios espectros de los cuásares —sus huellas dactilares— han de coincidir con cabal precisión. La hipótesis de que se trata de una lente gravitatoria empieza a ser plausible cuando podemos hallar, entre las imágenes del cuásar, una galaxia capaz de ejercer funciones de lente gravitatoria; para ello, debe distar del observador menos que el cuásar. La prueba definitiva se obtiene cuando los cambios de luminosidad que sufre el cuásar con el tiempo se observan de idéntica forma y paralelamente en todas las imágenes del mismo, aunque a veces con un retardo temporal. Tales cuásares múltiples son muy raros y, por ello, muy difíciles de encontrar. La lente es, en la mayoría de los casos, una galaxia.

**Arcos luminosos gigantes, arcos y arcos:** Cuando un cúmulo de galaxias entero, por acción de la masa combinada de las mismas, se convierte en objeto focalizador, el ángulo de desviación puede decu-



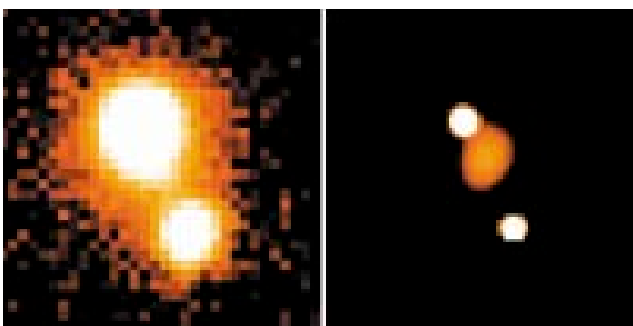
**4. ESTA IMAGEN ANULAR de la galaxia del fondo B1938+666 se produce porque la galaxia que actúa de lente (en el centro) y la galaxia fuente (deformada hasta constituir el anillo) se hallan perfectamente alineadas una detrás de la otra. Lindsay King y su equipo tomaron la fotografía con el telescopio Hubble, en luz infrarroja.**

plicar el correspondiente a una lente galáctica; a menudo el efecto se produce sobre varias galaxias lejanas al mismo tiempo. En razón de ello, aparecen arcos muy deformados, que se denominan así, arcos, y muchos otros arcos ligeramente deformes, los arcos. Se ha registrado casi un centenar de cúmulos de galaxias en funciones de lentes gravitatorias. Con la ayuda de las galaxias lejanas deformadas según una misma dirección tangencial, puede determinarse la masa del cúmulo y reconstruirse la distribución de la misma. De este modo podemos establecer, fuera de toda duda, que en el cúmulo hay una forma todavía desconocida de materia que no brilla, a la que se denomina genéricamente materia oscura.

**Anillos de Einstein:** Cuando una galaxia que posee una distribución de masas con simetría esférica casi perfecta, se sitúa por delante de otra galaxia más lejana, aparece la imagen de la galaxia del fondo: un anillo de Einstein. Si se conocen las distancias a cada una de ambas galaxias, podemos, a partir del diámetro del anillo, determinar con suma precisión la masa de la galaxia que actúa de lente. En situaciones normales, sin embargo, sólo podemos deducir la masa total de una galaxia aproximadamente y tras complicados cálculos: a partir de la luz emitida por sus estrellas y por el gas que la circunda. En cambio, el efecto de lente gravitatoria nos proporciona un método mucho más elegante e importante para la determinación de dicha masa.

**Efectos de microlente en cuásares:** La actuación de una lente gravitatoria no es siempre tan evidente como en los ejemplos considerados hasta ahora. Cuando una estrella engendra una imagen doble, ambas imágenes se hallan tan juntas que ni siquiera con los mejores telescopios del mundo pueden apreciarse separadas. Sí podemos lograrlo cuando se trata de la imagen doble de un cuásar; para ello hemos de servirnos del efecto de variabilidad temporal de la luminosidad del cuásar. Así vemos que su luminosidad varía con el tiempo. El grado de la variación de intensidad luminosa depende de la magnitud (desconocida) del propio cuásar: si se trata de un cuásar bastante grande, su intensidad no aumenta mucho y su luminosidad varía muy despacio, pero si es un cuásar menor sus variaciones de luminosidad resultan más detectables.

**Efectos de microlente en estrellas:** Gracias a muchas mediciones astronómicas de distinto tipo sabemos que la Vía Láctea y otras galaxias contienen en sus regiones exteriores abundante cantidad de materia que no brilla. La naturaleza de esta materia os-



**5. EL CUASAR DOBLE HE1104-1805, descubierto por Lutz Wisotzki y fotografiado con el "Telescopio de Nueva Tecnología" del Observatorio Europeo Austral de Chile (izquierda). Con la ayuda de técnicas de retoque de imágenes, desarrolladas por Frédéric Courbin y su grupo, podemos detectar la imagen de una galaxia muy débil que se halla entre las dos imágenes del cuásar y que es la que actúa como lente gravitatoria (derecha).**

cura constituye una de las mayores incógnitas de la astrofísica actual. Nos dice la teoría que esta misteriosa sustancia debe tener propiedades completamente distintas de las que adornan a la materia ordinaria constituida por partículas elementales.

En 1986, Bohdan Paczyński, de la Universidad de Princeton, propuso que, con ayuda del efecto de microlente, debería poder demostrarse si la materia oscura de las regiones externas de nuestra Vía Láctea se halla en forma de objetos compactos, los Machos (Objetos Masivos Compactos del Halo). Cuando un macho se sitúa entre el observador y una estrella cercana —de la Gran Nube de Magallanes— entonces esa estrella nos aparecerá con brillo intensificado de una manera característica, que desaparecerá cuando ya no quede alineada con el macho en cuestión.

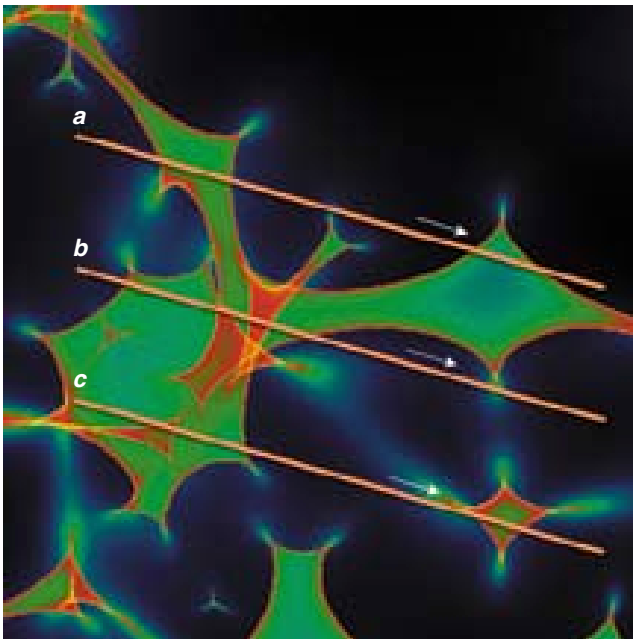
A principios de los noventa, varios equipos internacionales de investigación —entre los que se encuentra un grupo americano-australiano (“Macho”), otro francés (“Eros”) y un tercero polaco-norteamericano (“Ogle”)— se pusieron a trabajar con este método en busca de machos. En un intervalo de siete años se descubrió una veintena de fenómenos de microlente de este tipo, producidos por machos, en estrellas de la Gran Nube de Magallanes. Las curvas de luminosidad podían haber sido causadas por objetos de una masa de aproximadamente la mitad de la del Sol. El número total es, sin embargo, tan pequeño, que sólo pueden explicar una fracción restringida de la materia oscura existente en nuestra galaxia.

Los mismos equipos de observadores están buscando ahora en el centro de nuestra Vía Láctea fenómenos de microlente del tipo indicado. De momento se han contado ya más de 500 curvas de

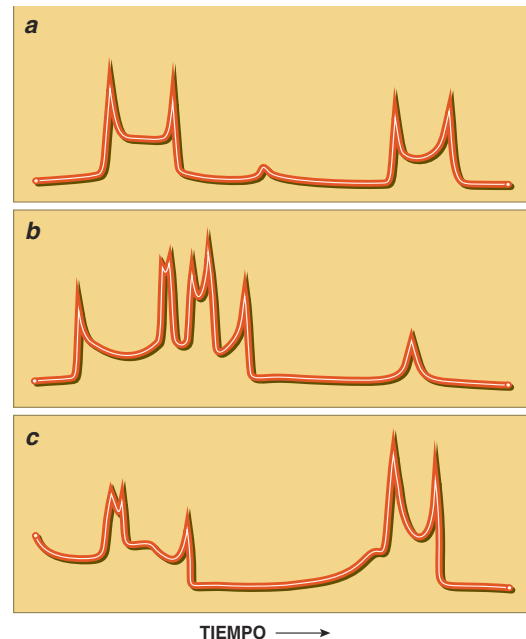
luminosidad apropiadas. En este caso no hay machos detrás de la lente gravitatoria, sino otras estrellas ordinarias, aunque de poca masa, situadas en el plano de la Vía Láctea. El hecho de que aparezcan en número tan inesperado, por lo elevado, muestra hasta qué punto era incompleto nuestro conocimiento de la Vía Láctea y refleja la ayuda que el efecto lente puede ofrecernos para ahondar en la comprensión de la estructura de nuestra galaxia.

Se está aplicando un esfuerzo notable en la investigación de efectos de lente colectivos causados por cúmulos lejanos, con el fin de conocer la distribución de materia a gran escala del universo. Puesto que la materia que ejerce de lente se halla muy distribuida, no se espera en este caso ninguna multiplicidad de imágenes espectacular. Si tenemos en cuenta la amplia variedad de formas que presentan las galaxias y la escasa deformación que sufren por la lente gravitatoria, entenderemos que el efecto no permita individualizar una galaxia determinada, a diferencia de lo que ocurriría con los arcos luminosos gigantes. Sólo cabe analizar la forma de un conjunto de muchos miles de galaxias muy lejanas y determinar deformaciones sistemáticas de la misma: todas las galaxias deberían experimentar una pequeña deformación parecida en una misma dirección.

Al ser tan nimio el efecto esperado, un proyecto de esta naturaleza precisa, para su ejecución, de telescopios de muy amplio campo, de innumerables noches con óptimas condiciones de observación y de enormes dosis de arte en el análisis de los datos. En cualquier caso, hace escasos meses cuatro equipos internacionales de investigadores —bajo la dirección de David J. Bacon, de la Universidad de Cambridge,



**6. SIMULACION** para mostrar efectos de microlente, producidos por el campo gravitatorio de una estrella sobre un cuásar lejano. Las líneas de contorno rojas corresponden a posiciones en que se intensifica el efecto amplificador.



A partir de los movimientos del cuásar, la lente y el observador, el cuásar se desplaza a lo largo de líneas rectas en el campo amplificador. A la derecha, amplificación observada para tres ejemplos de variabilidad distintos.

de Nick Kaiser, del Instituto de Astronomía de Hawai, de Ludewik van Waerbecke, del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica de Toronto, y de David M. Wittman, de Lucent Technologies— han logrado observar este efecto de lente gravitatoria muy débil. La técnica promete dilucidar en un próximo futuro cuál de los modelos cosmológicos es el que mejor describe nuestro universo.

Una de las cuestiones fundamentales de la cosmología atañe al radio y edad del universo. El universo se halla en expansión. Vale decir, cuanto más dista de nosotros una galaxia, mayor es la velocidad a la que se aleja. Esta conexión entre distancia y velocidad —cuyo factor de proporcionalidad, la “constante de Hubble”,

recibe el nombre del descubridor de la expansión del universo— se conoce sólo con cierta precisión.

El inverso de la constante de Hubble nos ofrece el valor de la edad del universo, que, multiplicada por la velocidad de la luz, nos da una longitud: la magnitud de su radio actual, aproximadamente. Mas, pese a poder determinar la velocidad de una galaxia o cuásar con notable precisión, a partir del corrimiento de su luz hacia el rojo, su distancia de nosotros resulta muy difícil de acotar.

Como ya había demostrado en 1964 Sjur Refsdal, mucho antes de que se descubriera la primera lente gravitatoria, el efecto lente nos proporciona una posibilidad muy elegante de determinar una escala de distancias cósmica dentro de nues-

tra colección de medidas de corrimientos hacia el rojo. Se toma para ello un sistema formado por dos imágenes de lente gravitatoria de un cuásar muy lejano y se establece la diferencia de tiempos que media entre las dos imágenes.

Expliquémoslo con mayor detenimiento. Cuando una galaxia genera una imagen doble de un cuásar que se halla detrás de ella, los dos haces luminosos aparecen a dos lados distintos, digamos izquierdo y derecho, de la lente gravitatoria. En general, ambos caminos luminosos difieren en su longitud, lo que provoca que las dos señales procedentes del cuásar alcancen la Tierra en tiempos distintos. A esta diferencia de tiempos hay que añadir aún la gravitatoria, correspondiente a la teoría general de la relatividad: puesto que un haz pasa más cerca del centro de la lente, y así queda expuesto a campos gravitatorios más intensos, la luz sufre un frenado mayor que en el caso del otro haz, que pasa más lejos del centro de la lente. Ambos efectos —el geométrico y el gravitatorio— son del mismo orden de magnitud.

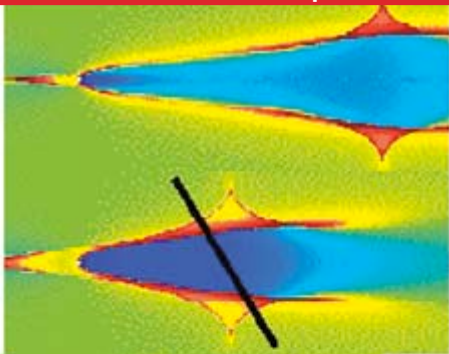
A partir de la determinación de la diferencia temporal de los dos haces, puede deducirse la distancia absoluta que hay al cuásar. ¿Cómo? En un dispositivo observacional estático, sólo tiene sentido considerar magnitudes adimensionales, aquí la distancia angular y las variaciones relativas de luminosidad entre las imágenes, así como la distribución de luminosidad relativa en la galaxia-lente. De ahí puede obtenerse una distribución de masas correspondiente al sistema lente, que reproduce todos los valores de las magnitudes observadas. Un modelo de lente gravitatoria de este tipo proporciona también la diferencia de tiempos entre los caminos luminosos relativa al tiempo total correspondiente a uno de los recorridos.

### Curvas de luminosidad desplazadas en el tiempo

El modelo considerado no es, sin embargo, unívoco. Si se multiplica por dos, la escala absoluta de distancias, magnitudes y masas

## Detección de un planeta

Cuando un planeta de la masa de Saturno gira en torno a su estrella a una distancia aproximadamente igual a la de la Tierra al Sol, se genera una distribución de amplificaciones de tipo micro-lente que tienen el aspecto presentado en la figura. Una estrella lejana que se mueva por detrás



del planeta es ampliada por el efecto gravitatorio de éste de manera distinta, al ir variando su posición: de la zona en azul (amplificación pequeña), pasando por la verde y la amarilla, hasta la roja (amplificación muy intensa). Las seis simulaciones corresponden a diferentes

distancias del planeta a su estrella central. El efecto de lente gravitatoria de un planeta dura muy poco y es relativamente débil; no obstante, puede medirse.

Los tres ejemplos representados a la derecha corresponden a distintas curvas de luminosidad y muestran el comportamiento de la luminosidad a lo largo de las tres líneas negras de los diagramas de la izquierda.

