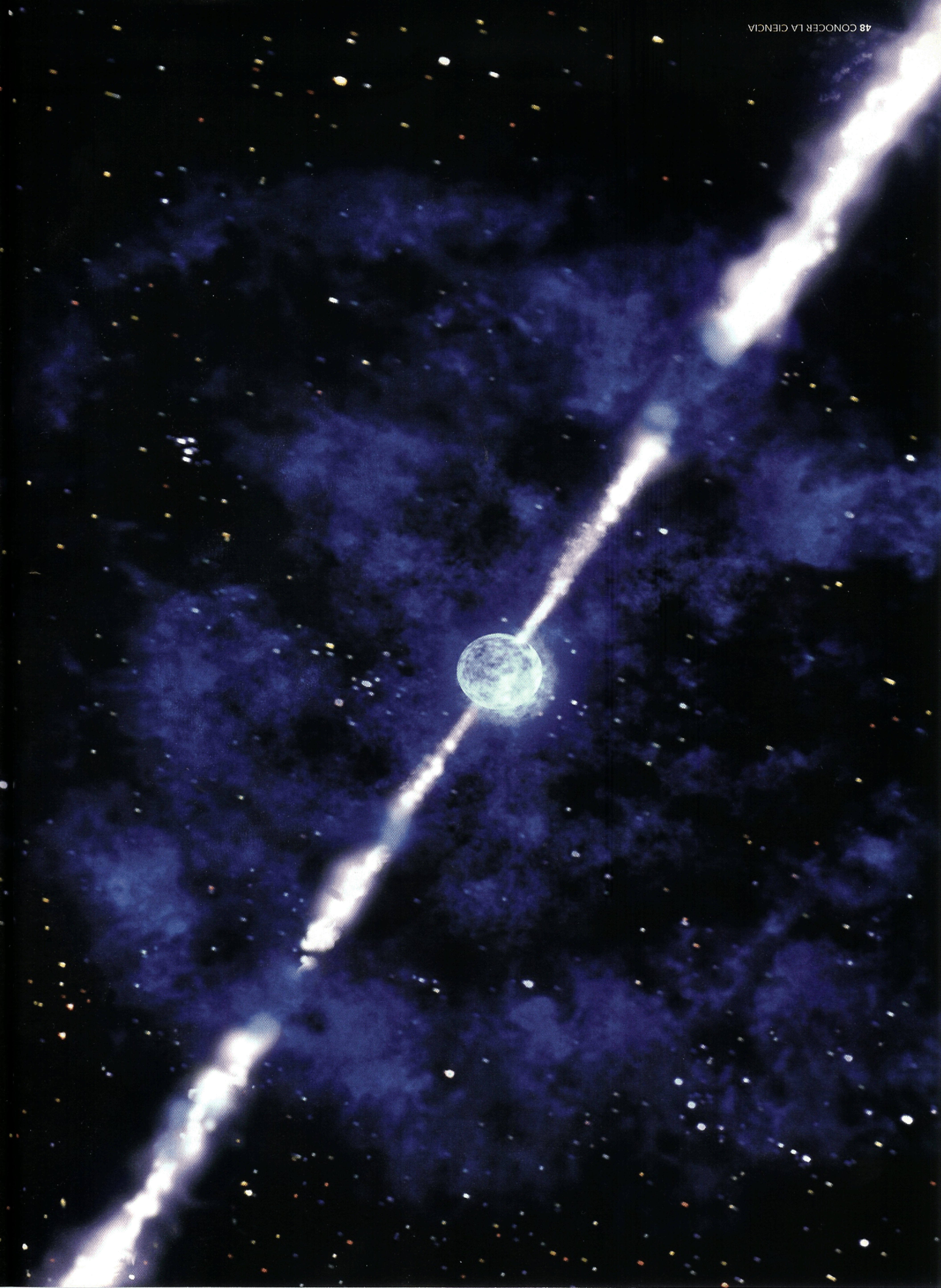




AGUJEROS NEGROS: LA FUERZA INVISIBLE

LOS AGUJEROS NEGROS HAN PASADO DE SER UNA MERA ESPECULACIÓN TEÓRICA A UNA REALIDAD. HOY CONSTITUYEN UNA DE LAS FRONTERAS DE LA FÍSICA, DONDE NUESTROS CONCEPTOS DE ESPACIO Y TIEMPO SE DESMORONAN

POR RAFAEL CLEMENTE INGENIERO

El nombre de “agujero negro” fue acuñado medio en broma por el profesor **John Wheeler** en 1967, durante una reunión de la *American Association for the Advancement of Science*.

Hasta entonces, la posibilidad de que esos **cuerpos fantasmales** existiesen no era más que una hipótesis teórica. Se los conocía como “estrellas negras”, una referencia a que no podían emitir luz. También había quien utilizaba el término “estrella congelada” o “colapsar”.

Wheeler, famoso por su carácter nada convencional, muy alejado del profesor serio y poco dado a bromas, inventó la expresión “**Black hole**” (agujero negro) para referirse al carácter de “sumidero de materia” que tienen estos cuerpos. Y el nombre cuajó en la terminología popular.

John Wheeler fue alumno de Einstein y Niels Bohr y, a su vez, profesor de otros

investigadores como Richard Feynmann, Frank Tipler y Kip Thorne. Entre todos, sentaron las bases de conceptos tan exóticos como “materia supercondensada”, “colapsos gravitatorios” y “gravedad cuántica”.

¿CÓMO SE FORMA UN AGUJERO NEGRO?

Una estrella es una inmensa burbuja de gas —o, mejor dicho, plasma— en equilibrio. Durante la mayor parte de su vida, se sostiene gracias a que la presión de la radiación que se genera en su interior es justo la necesaria para compensar el enorme peso de sus capas exteriores. Pero tarde o temprano, el equilibrio se romperá. Cuando el combustible nuclear se agota, **la estrella muere**. Algunas, la mayoría, se apagan como brasas. Pero otras, las más masivas, explotan violentamente en forma de supernova. Este fenómeno figura entre los mayores cataclismos conocidos en el universo.

Al estallar una supernova, buena parte del material que la compone sale proyectado hacia el espacio. El resto, sencillamente, se colapsa bajo su propio peso. Pero la estrella ya ha agotado todo su combustible. No puede quemar nada y, en consecuencia, no puede generar la presión necesaria para sostener las capas de gas más externas. La estrella se derrumba sobre sí misma.

En el proceso, **su densidad aumenta de forma catastrófica**. Primero, los espacios entre átomos se hacen cada vez menores; luego, las nubes de electrones se espesan, los electrones se embeben contra sus núcleos y la estrella se convierte en una esfera de materia degenerada que recibe el nombre de “estrella de neutrones”.

En estrellas relativamente ligeras, a medida que la materia se concentra, van apareciendo los efectos cuánticos —la presión de electrones y, más tarde, de neutrones degenerados— que aún pueden sostener el peso

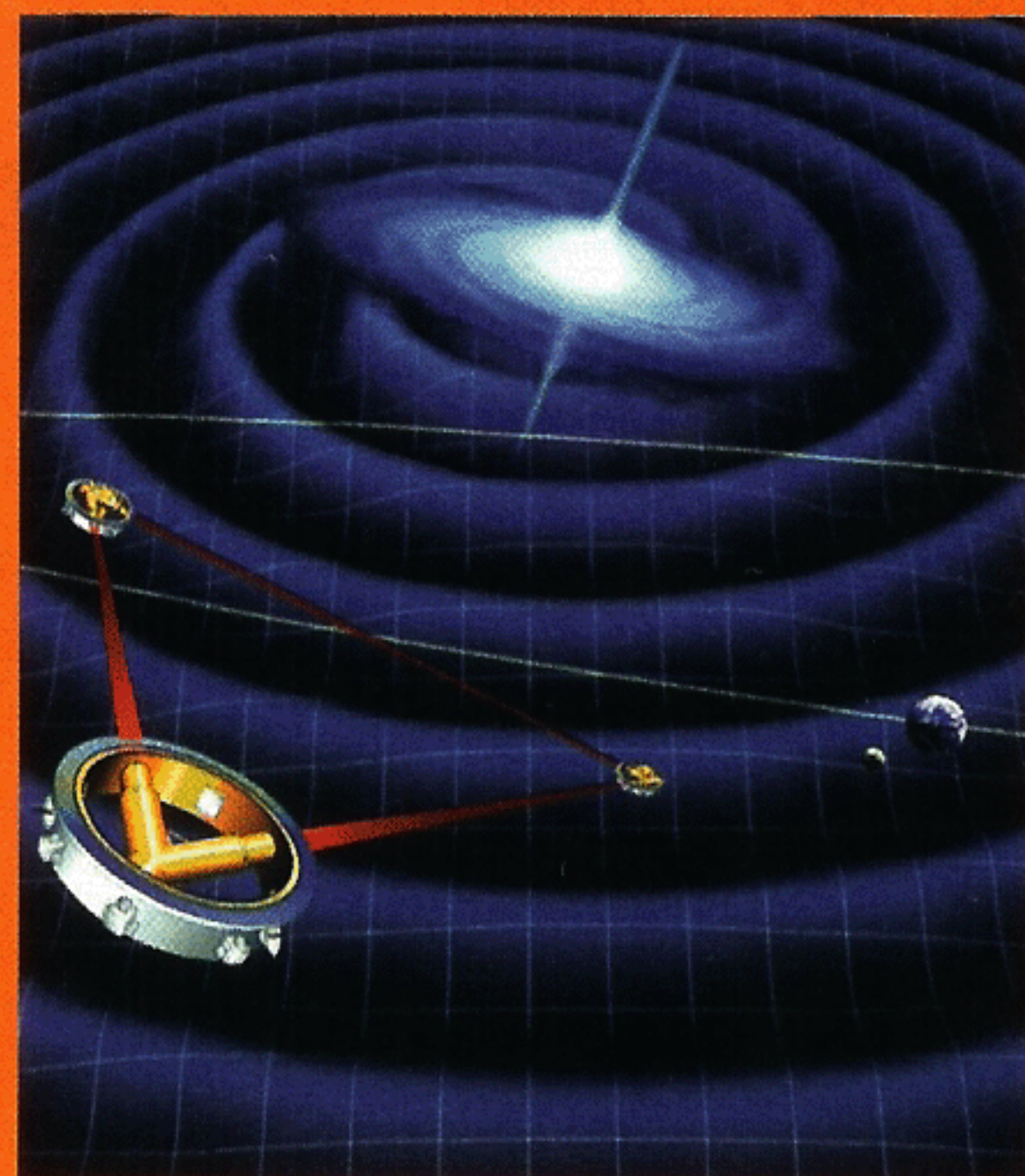
LISA: UN PROYECTO TRIANGULAR

TRES SATÉLITES OFRECERÁN VALIOSA INFORMACIÓN SOBRE EL COSMOS

LISA corresponde a las siglas de *Laser Interferometer Space Antenna* y es un ambicioso proyecto de las agencias espaciales europea (ESA) y americana (NASA) para detectar directamente ondas gravitacionales. La fecha de lanzamiento prevista es el año 2020. LISA constará de tres satélites que volarán en formación de triángulo

equilátero de cinco millones de kilómetros de lado, conectados sólo por finísimos haces de láser. La llegada de cualquier onda gravitacional producirá ligeros desplazamientos entre los tres satélites y, en consecuencia, figuras de interferencia en los rayos láser. Dos estrellas binarias próximas, girando una en torno a la otra, la coli-

sión de agujeros negros o el propio Big Bang son fuentes de ondas gravitacionales. LISA debería, pues, detectar el equivalente gravitatorio de la radiación de fondo de microondas. Si es así, abrirá una ventana que permitirá ver aún más lejos en el tiempo, más y más cerca del momento de la Creación.



LOS AGUJEROS NEGROS SE EVAPORAN

En 1974, Stephen Hawking demostró que dadas ciertas condiciones, un agujero negro puede emitir radiación en forma de partículas subatómicas. Esto significa que, a todos los efectos, el agujero negro se "evapora".

Aquí entra en acción la magia de los efectos cuánticos. Cuando se crea un par partícula-antipartícula en las proximidades de un agujero negro, puede suceder que una caiga en el abismo mientras que la otra consiga escapar hacia el espacio. Para ello ha de "robar" una

ínfima cantidad del agujero. Es muy poco, pero es algo. Con el tiempo, el agujero negro va perdiendo masa (o sea, energía) y su horizonte de sucesos, menguando. Al final –dicen algunas teorías– se vuelve inestable y explota en una catarata de radiación gamma y partículas subatómicas. ¿Cuánto tarda en evaporarse un agujero negro? Desde luego, es un proceso lentísimo. Quizá 10 seguido de cien ceros años. Es mucho, muchísimo más que la edad del universo. Pero no por ello es un fenómeno menos real.



CORBIS

de las capas exteriores. Una estrella de neutrones, por ejemplo, tiene sólo alrededor de 25 kilómetros de diámetro, pero una masa de por lo menos una vez y media la de nuestro Sol. Su densidad es similar a la de un inmenso núcleo atómico. Para escapar de ella haría falta un cohete capaz de viajar a 150.000 km/s, la mitad de la velocidad de la luz.

Pero si la estrella es verdaderamente masiva –cuatro o cinco veces más que el Sol–, su colapso gravitatorio no se detiene ni siquiera al alcanzar el estadio de una esfera sólida de neutrones. La materia continúa concentrándose y su atracción gravitatoria va en aumento. No existe en el universo ninguna fuerza tan intensa como para compensarla. En una fracción de segundo, **la estrella se derrumba**. Ahora es una trampa de la que nada puede escapar: ni los átomos, ni las partículas subatómicas, ni los quarks... Ni tan sólo la luz es suficientemente rápida pa-

ra vencer, por decirlo así, su propio peso. En el centro de lo que había sido una estrella, la fuerza de la gravedad se ha hecho infinita. Los astrofísicos la llaman **"singularidad"**. Nadie sabe con exactitud lo que sucede ahí. Las leyes de la física dejan de tener sentido. Tan sólo a unos pocos kilómetros sobre él, en el límite llamado "horizonte de sucesos", la relatividad general todavía puede imponer sus reglas. La propia trama del espacio se retuerce sobre sí misma y el tiempo se detiene. Ha nacido un agujero negro.

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

La primera hipótesis sobre la existencia de cuerpos tan masivos que ni siquiera la luz pudiera escapar de ellos se remonta nada menos que a 1796, cuando el astrónomo y matemático francés **Pierre Simón de Laplace** se aventuró a describirlos, teniendo

en cuenta sólo la teoría de la gravitación newtoniana clásica.

Ala luz de la Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein, hoy se ven los agujeros negros desde otro punto de vista: como ob-

jetos cuya enorme masa deforma la propia textura del espacio-tiempo. Así, para los rayos de luz, que siempre escogen el camino más corto para propa-

garse, en el extraño universo de un agujero negro se encuentran con que ese camino es un círculo cerrado sobre sí mismo o, peor aún, una trayectoria que se hunde en las profundidades del pozo gravitatorio: **la luz no puede escapar**, como si fuese agua atrapada en un remolino.

EL PUNTO DE NO RETORNO

Un agujero negro es, si se habla con rigor, una "singularidad", un punto matemático en el que todas las leyes de la física dejan de tener validez. A su alrededor, a más o menos distancia según la masa del agujero, se extiende una superficie invisible –esférica u oblonga– que marca el punto de no retorno. Por dentro de esa esfera, la velocidad de escape es superior a la de la luz: nada puede escapar. Más allá, la atracción del agujero negro se va debilitando y –al menos en teoría– sí es posible huir de ella. Esa esfera es el **"horizonte de sucesos"**, pero no corresponde a nada físico. Simplemente, es la frontera entre el universo y el mundo prohibido de la singularidad.

Por lo general, el radio del horizonte de sucesos suele considerarse el radio del agujero-

En el centro de un agujero negro dejan de operar las leyes de la física

LA CURIOSIDAD

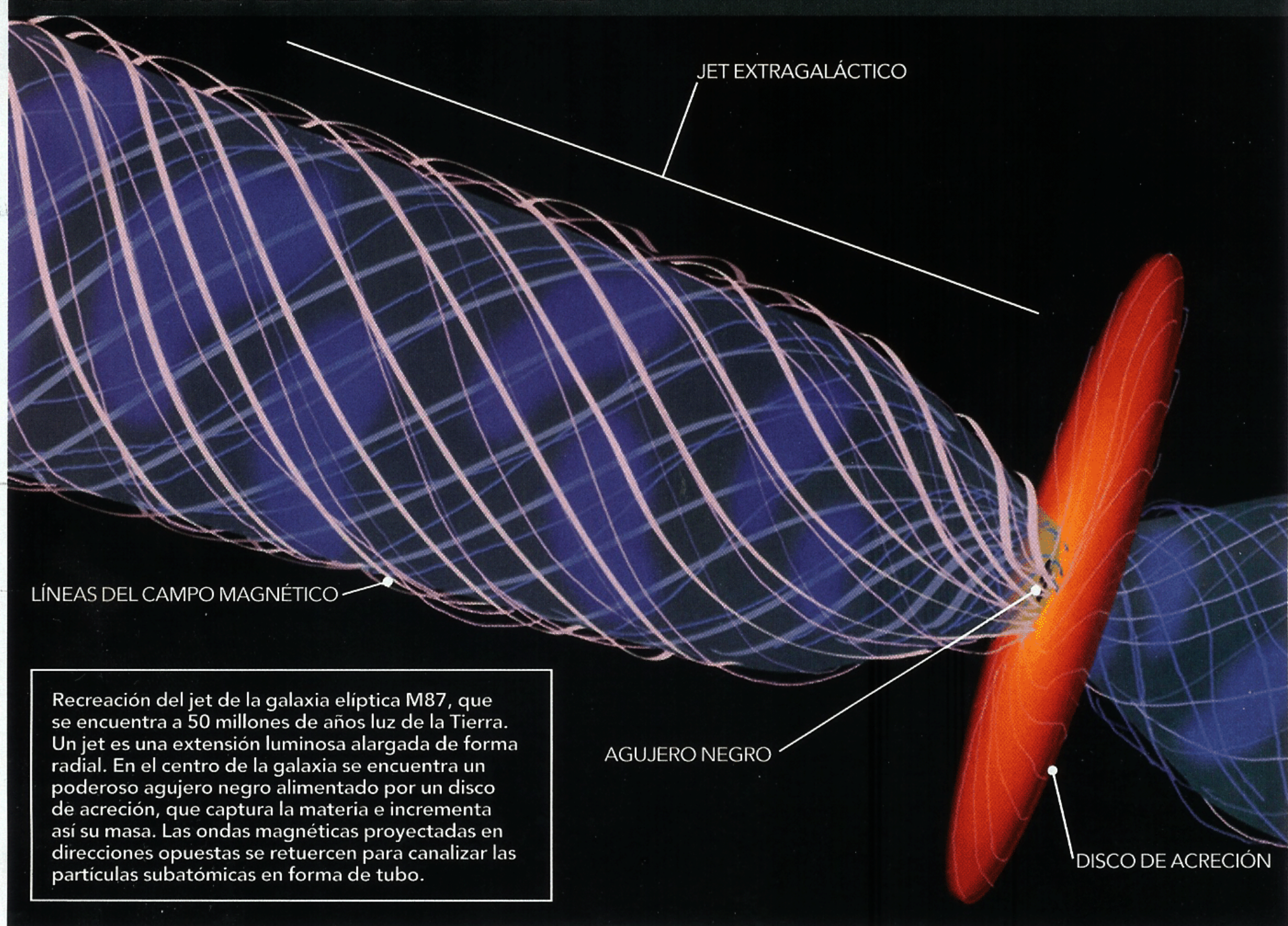
LA PRIMERA FOTO

¿DE QUÉ COLOR SON LOS AGUJEROS NEGROS?

En el año 1972, cuando empezaba a intuirse la naturaleza de Cygnus X-1 (una intensa fuente de radiaciones en la constelación del Cisne que probaría la existencia de un agujero negro), un grupo de investigadores del *Massachusetts Institute of Technology* editó una página, parodiando la portada del *New York Times*, en la que, entre otras

noticias relacionadas con los agujeros negros, se incluía una foto completamente negra acompañada del texto: "La primera fotografía en color de un agujero negro. Obsérvense los detalles del centro y la esquina superior izquierda, en buen acuerdo con las predicciones teóricas...". Se trató, evidentemente, de una broma.

JET ÓPTICO EXTRAGALÁCTICO



ro negro, aunque éste, en realidad, es sólo un punto de tamaño subatómico. El tamaño del horizonte de sucesos depende de lo masivo que sea el cuerpo. Para el Sol es de unos 3 kilómetros, para la Tierra no llega a un centímetro. Pero el agujero negro que se supone ocupa el centro de nuestra galaxia supera los 7 millones de kilómetros.

CLASES DE AGUJEROS NEGROS

En esencia, estas estrellas colapsares son todas iguales. Utilizando, de nuevo, una frase de John Wheeler: "Un agujero negro no tiene pelo". Lo único que los caracteriza es su masa, carga eléctrica y momento angular. También, la geometría de su horizonte de sucesos varía dependiendo de si el agujero gira o no.

El mecanismo más corriente para la formación de un agujero negro es el colapso de una estrella al menos tres veces más masiva que el Sol. Sin embargo, la teoría predice que en

el momento del **Big Bang**, las presiones y la densidad de la materia en el universo recién nacido eran tan altas que bien pudieron crearse multitud de agujeros negros. Se les llama "primordiales".

A diferencia de los que se forman al morir una estrella, los agujeros negros primordiales pueden tener cualquier masa. Incluso miles de veces menos que la Tierra. Muchos pueden haber sobrevivido incluso hasta hoy, pero su detección es terriblemente difícil.

En el otro extremo de la escala están los **agujeros negros supermasivos**. Éstos son monstruos cósmicos, con masas miles de millones de veces superiores al Sol. Suelen localizarse en el núcleo de muchas galaxias. La nuestra también posee uno.

¿ASPIRADORAS GALÁCTICAS?

Los agujeros negros no son aspiradoras cósmicas que amenazan con succionar todo el universo. Simplemente son cuerpos muy masivos, como cualquier estrella o

planeta, pero que concentran toda su masa en un espacio muy pequeño. A distancias razonables, es posible entrar en órbita a su alrededor, igual que si se tratase de la Tierra o el Sol.

Los fenómenos extraños y peligrosos ocurren sólo a distancias relativamente cortas del agujero. Primero, en sus cercanías se producen intensas fuerzas de marea que destruirían cualquier objeto que se aproximara imprudentemente.

Si descendiéramos hacia un agujero negro, hasta llegar a una altura de tres veces el radio de su horizonte de sucesos, sería posible mantenerse en órbita, eso sí, a velocidades escalofriantes. Por supuesto, si aún bajáramos más, por debajo del horizonte de sucesos, cualquier comunicación con nuestro universo resultaría imposible.

A LA CAZA DE ESTRELLAS

Por definición, un agujero negro no se ve, así que la tarea de descubrirlos es (P. 54)▶

TELESCOPIO INTEGRAL: EL CARTÓGRAFO GALÁCTICO

EL SATÉLITE DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA ESTUDIA LOS AGUJEROS NEGROS



ESTRUCTURA DEL INTEGRAL

EL SATÉLITE ESTÁ DOTADO DE MODERNOS INSTRUMENTOS CIENTÍFICOS PARA EL ESTUDIO DE LA RADIACIÓN GAMMA

El satélite *Integral* es un proyecto de la Agencia Espacial Europea (con la colaboración de otros países). Su objetivo se centra en el estudio de la radiación gamma de alta energía procedente del espacio profundo. El origen de esta radiación se centra en fenómenos cósmicos muy violentos, asociados con los núcleos de galaxias activas, las estrellas de neutrones y los agujeros negros. Este satélite puesto en órbita en octubre del año 2002, transporta a bordo cuatro instrumen-

tos principales destinados a la investigación científica:

SPI. Un espectrómetro capaz de detectar rayos gamma en un amplio campo de energías. Esta radiación no puede controlarse mediante lentes o espejos. En su lugar, el telescopio utiliza una "máscara" o un ajedrezado compuesto por materiales opacos y transparentes a los rayos gamma. Si se analiza la forma en que su sombra se mueve al girar el satélite, puede determinarse con

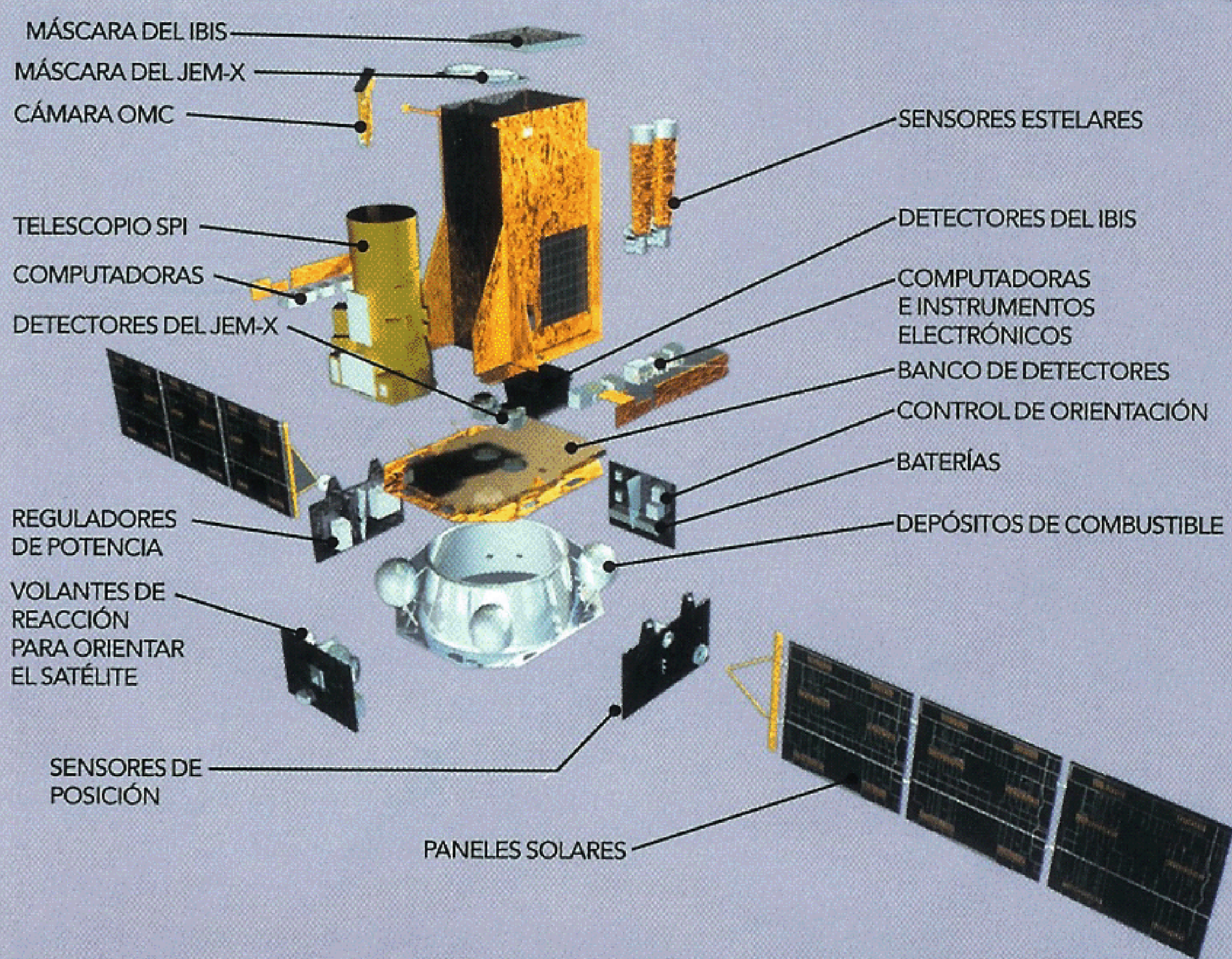
mucho precisión la dirección en que se encuentra la fuente de la radiación.

IBIS. Una cámara capaz de registrar imágenes en rayos gamma y X de alta energía. También funciona con una máscara, como el SPI, pero abarca un campo de energías algo mayor.

JEM-X. Dos detectores idénticos, calibrados para medir energías más bajas, que corresponden a la banda de los rayos X. Tienen una resolu-

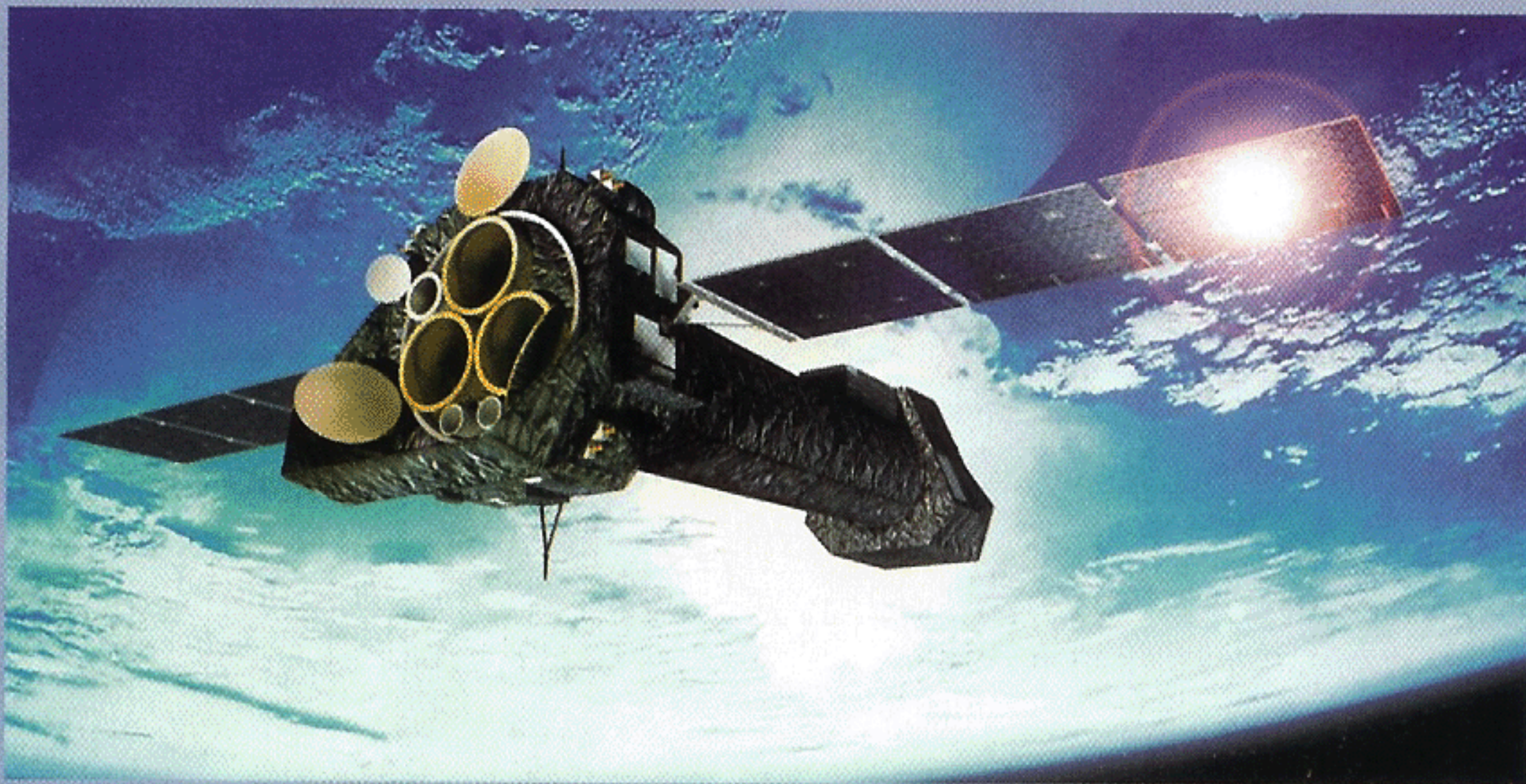
ción del orden de sólo 1 minuto de arco.

OMC. Una cámara que funciona en la banda visible, para ayudar a localizar las fuentes gamma que se estudian mediante los otros tres equipos. Utiliza un sensor CCD de 1 megapíxel. La mayoría de cámaras digitales de aficionado tienen bastantes más megapíxeles, pero no más sensibilidad. Esta cámara puede detectar estrellas cien mil veces menos brillantes que las más débiles visibles a "ojo desnudo".



LOS ESPÍAS DEL COSMOS

LOS TELESCOPIOS ESPACIALES ANALIZAN TODO TIPO DE ASTROS



ESA

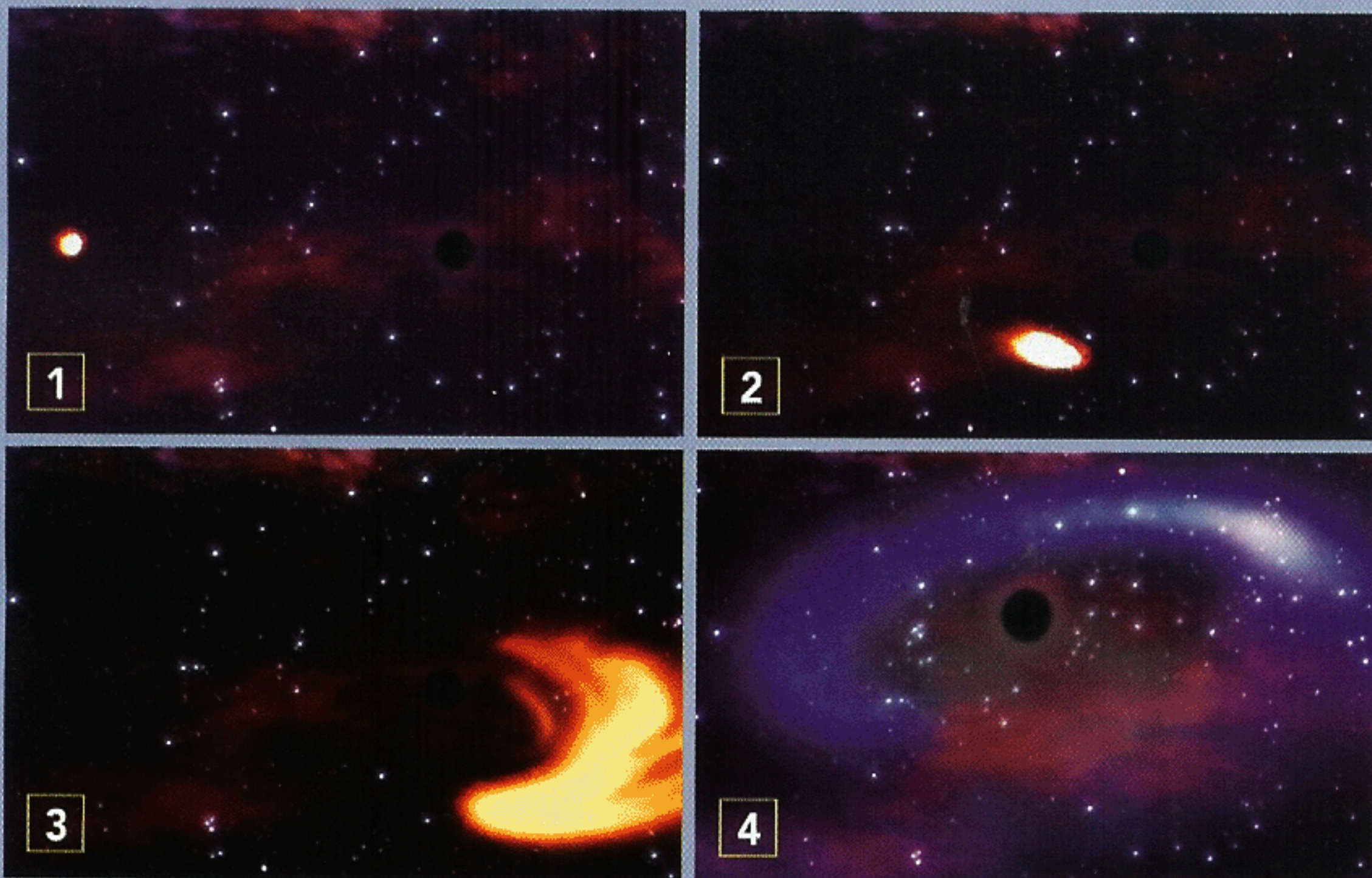
EL XMM-NEWTON

Los últimos descubrimientos del satélite de la ESA

El XMM-Newton es un satélite observatorio de rayos X construido por la Agencia Espacial Europea. Fue lanzado, como el satélite *Chandra* americano, en el año 1999 y recientemente se ha aprobado el presupuesto para mantenerlo en operación por lo menos hasta marzo de 2010.

El XMM-Newton ha observado todo tipo de cuerpos celestes, desde cometas próximos (se utilizó durante el impacto de la sonda *Deep Impact* en el cometa Tempel 1) hasta quásares y agujeros negros supermasivos.

Tanto el *Chandra* como el XMM-Newton funcionan en cooperación con otros observatorios orbitales, como el satélite *Compton*—ya desorbitado— y el *Integral* europeo, aún en activo. Ambos están especializados en analizar la radiación, aún más energética, en la banda de los rayos gamma.



ESA

LA FUERZA DE LA GRAVEDAD DE UN AGUJERO NEGRO

Secuencia de la absorción de un cuerpo celeste

Las imágenes muestran la tremenda fuerza de gravedad de un gran agujero negro durante el paso de una estrella. En primer lugar, ésta es atraída hacia el agujero hasta ser desgarrada. La mayor parte del gas del astro se pierde, pero una parte se mantiene, formando un disco alrededor del agujero negro. Antes de desaparecer, el disco emite rayos X y alcanza una temperatura de millones de grados.

«(P. 51) francamente ardua. Pero existen al menos un par de métodos:

El primero tiene lugar cuando el agujero negro **engulle materia** (por ejemplo, gas arrancado a una estrella próxima). Entonces se forma una especie de remolino, como el agua que cae por un sumidero. En el torbellino, los átomos de gas colisionan violentamente unos contra otros, produciendo destellos de radiación, principalmente en la banda de los rayos X. Esto ocurre muy cerca del agujero, pero todavía lo suficientemente lejos como para estar a salvo de su atracción. Se pueden instalar detectores de rayos X a bordo de satélites artificiales con el objetivo de descubrirlos. Así se localizaron, en los años 70, los primeros candidatos a ser agujeros negros: uno giraba alrededor de una estrella azul gigante en **Cygnus** (Cyg X-1) y el otro, en la galaxia **Centaurus** (Cen X-3).

La segunda posibilidad de “cazar” un agujero negro es observar los efectos de su campo gravitatorio sobre las estrellas y nubes de gas próximas. En 1995, un equipo de astrónomos americanos y japoneses midieron la velocidad del gas cerca del núcleo de varias galaxias.

En el caso de una espiral llamada NGC 4258, los valores eran tan altos que sólo podrían explicarse por la presencia de un cuerpo enormemente masivo en su centro: un agujero negro gigante, equivalente a 40 millones de soles.

NGC 4258 no es un caso único. Hoy se sospecha que el núcleo de muchas galaxias espirales contiene agujeros negros supermasivos. Por ejemplo, Centaurus A y la conocida M104 “Sombrero”, albergan un agujero negro de masa estimada en mil millones de soles. En un plano más modesto, hay pruebas muy concluyentes de que el centro de nuestra propia Vía Láctea esconde uno de masa equivalente a entre dos y tres millones de soles.

LA VÍA LÁCTEA

Vista desde la Tierra, el centro de nuestra galaxia—la Vía Láctea—se encuentra en la dirección de la **constelación Sagittarius**. Pese a que el núcleo central está eternamente oculto por nubes de polvo cósmico, es una zona muy rica en enjambres de estrellas.

Los radiotelescopios y telescopios que funcionan en el campo del infrarrojo—más inmunes a las nubes de polvo—muestran una imagen muy complicada en las cercanías

del centro de la galaxia. Hay restos de una supernova y una pequeña espiral de gas y estrellas. Justo ahí se localiza una intensa fuente de emisiones de radio. Probablemente, son el resultado de ingentes cantidades de material absorbidas por un invisible agujero negro. En el torbellino, los átomos chocan entre sí, emitiendo tremendas oleadas de radiación.

Durante los últimos doce años, un equipo del **Instituto Max Planck**, ha conseguido fotografiar el movimiento de una diminuta estrella, denominada S2, en el mismo centro de la Vía Láctea. En las imágenes, se la ve describiendo una órbita elíptica alrededor de un cuerpo invisible cuyas dimensiones y masa (entre 2 y 3 millones de soles, concentrados en un radio diminuto: apenas tres veces mayor que el sistema solar) coinciden con las calculadas para el hipotético agujero negro situado en el corazón de nuestra galaxia.

LA GALAXIA CENTAURUS A

Hace muchos millones de años, dos galaxias chocaron no muy lejos de la Tierra. Más o menos, a unos diez millones de años luz.

INVISIBLES

Los agujeros negros son cuerpos celestes invisibles. Sólo detectamos sus efectos

Un **choque de galaxias** no es como un choque de trenes, sino más bien como dos manos que entrecruzan los dedos, vistas a cámara muy lenta. El espacio es tan grande y

está tan vacío que es raro que dos estrellas lleguen a impactar una con otra. Lo que sí sucede es que las colosales fuerzas gravitatorias que se ponen en juego deforman las galaxias, alteran las órbitas e incluso pueden lanzar las estrellas hacia el espacio como una gigantesca onda.

El resultado de uno de esos cataclismos es lo que hoy se conoce como Centaurus A, una galaxia muy activa en cuyo centro se esconde un agujero negro supermasivo que va devorando cuanto gas, polvo y restos de la colisión original encuentra a su alrededor. En el proceso, se producen intensísimas emisiones electromagnéticas que abarcan todo el espectro, desde las ondas de radio hasta los rayos X y gamma.

CAER EN EL ABISMO

Precipitarse por un agujero negro no ha de ser agradable. Un astronauta que tuviese la desgracia de ser engullido por uno de estos monstruos cósmicos resultaría, a la vez, frito por intensas dosis de radiación y brutalmente estirado ("spagettizado", dicen los físicos) por las tremendas fuerzas de marea que se dan allí.

Las **fuerzas de marea** ocurren porque, si el astronauta cae "de pie", sus piernas estarán más cerca del agujero negro que su cabeza. Por lo tanto, experimentarán un mayor tirón gravitatorio. En la Tierra, esa diferencia es inapreciable pero, en el entorno de una singularidad, puede alcanzar valores de

muchas toneladas, suficiente para hacer pedazos no sólo un cuerpo humano, sino hasta la más robusta nave espacial.

Para el pobre astronauta, la fase final de su viaje ocurre en apenas una fracción de segundo. Pero visto desde lejos, el efecto es muy distinto: a medida que cae hacia el agujero, el tiempo parece transcurrir más y más despacio. Sus movimientos se hacen a cámara cada vez más lenta. Por fin, al alcanzar el horizonte de sucesos, donde **el tiempo se detiene**, su imagen queda congelada. Claro que para un observador externo, eso no sucedería hasta que hubiera transcurrido un tiempo infinito. ■

GLOSARIO

ESTRELLA BINARIA

Pareja de astros unidos por gravitación y que giran alrededor de su centro de masas. Estas estrellas pueden estar muy juntas o, al contrario, muy separadas. En las primeras se puede producir transferencia de masa de una a la otra debido a la gran proximidad. En ocasiones, observándolas desde la Tierra, parece que una de las estrellas oculta a la otra, lo que se denomina "estrella binaria eclipsante".

QUARK

Partícula subatómica básica de la que se componen otras partículas como los neutrones y protones.

SINGULARIDAD

Zona en la que se concentra una gran cantidad de materia, normalmente el centro de un agujero negro. En este punto las leyes de la física no funcionan, debido a la gran curvatura espacio-tiempo.

PARA SABER +

ENSAYO

TAYLOR F., Edwin; WHEELER, John Archibald. *Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley, 2000. (En inglés.)

HAWKING, Stephen. *Brevísima historia del tiempo*. Barcelona: Crítica, 2005.

INTERNET

Página oficial de la ESA con información sobre el telescopio espacial XMM-Newton. (En inglés.) <http://sci.esa.int>

