



Las “estrellas azules”

Deborah Dultzin



El año pasado se cumplieron 50 años del descubrimiento de los cuásares, los objetos más brillantes del Universo. Cuando la luz del cuásar más cercano a nosotros fue emitida, la Tierra ni siquiera existía. También el año pasado se cumplieron 100 años del natalicio del gran astrónomo mexicano Guillermo Haro. Una ingeniosa e innovadora técnica desarrollada por él permitió identificar la contraparte visible de varias “radioestrellas”, lo que ayudó a descifrar su verdadera naturaleza y descubrir más de ellas. Esas “estrellas azules”, hoy conocidas como cuásares, emiten cantidades colosales de energía por la caída de gas y estrellas a un agujero negro con millones de veces la masa del Sol.

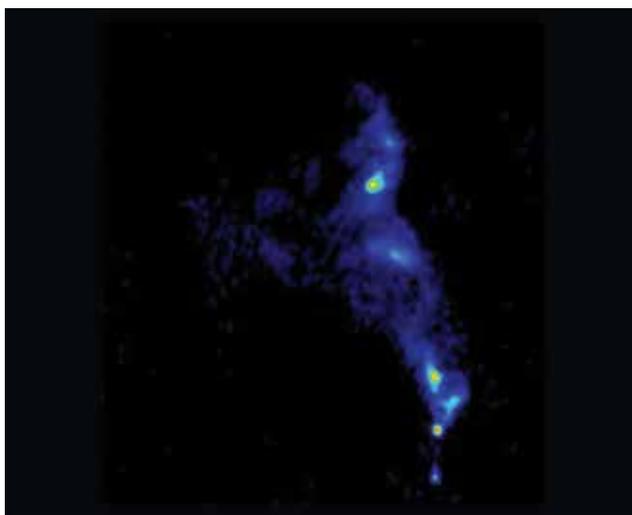
El 16 de marzo de 2013 se cumplió medio siglo del siguiente hallazgo: los cuásares son objetos que emiten cantidades monumentales de energía y se encuentran en los confines del Universo. Este descubrimiento fue consecuencia del desarrollo pionero de la radioastronomía y del estudio cuidadoso de los espectros ópticos de unas misteriosas “estrellas azules”. Hoy sabemos que el proceso que genera la asombrosa luminosidad de un cuásar es la caída de gas y estrellas a un agujero negro supermasivo. Pero estos objetos se descubrieron inicialmente por su emisión en radiofrecuencias a mediados del siglo pasado. Más o menos simultáneamente, el astrónomo mexicano Guillermo Haro desarrolló una ingeniosa y novedosa técnica para encontrar estrellas muy azules en el cielo. Gracias a ella, se pudieron identificar las primeras contrapartes ópticas (en luz visible) de estos misteriosos objetos.

La radioastronomía surge en la década de los años cincuenta del siglo pasado como una derrama del desarrollo del radar durante la Segunda Guerra Mundial. Mediante los radiotelescopios se descubrieron primero las “radiogalaxias” y después se empezaron a encontrar objetos muy pequeños, pero que también emitían gran



cantidad de luz en esas frecuencias (158 megahertz). En 1959 el grupo de radioastronomía de la Universidad de Cambridge confirmó la detección de cientos de estas misteriosas fuentes puntuales de radio dentro del famoso catálogo “3C” (Tercer Catálogo de Cambridge) que compilaba las posiciones en el cielo de 471 de estos objetos, las más precisas hasta entonces. Pero el mayor problema era justamente saber con exactitud dónde se encontraban esos objetos, dada la escasa resolución angular que aún tenían los radiotelescopios. Un radiotelescopio de 64 metros de diámetro, como el de Parkes en Australia y usado para ubicar radiofuentes en el cielo, tenía una resolución espacial de apenas 2.2^º (casi cuatro y media lunas llenas). Incluso un radiointerferómetro como el Owens Valley Radio Observatory, en California (OVRO, por sus siglas en inglés), el mejor en su época, sólo podía resolver objetos mayores de 3 minutos de arco (1/10 parte de la Luna llena).

En 1960 un grupo de astrónomos de California se dio cuenta de que muy cerca del objeto 3C48 había una “estrellita azul”. Entonces uno de ellos, Alan Sandage, empezó a monitorear fotométricamente esta “estrella” y encontró que su brillo era muy variable en escalas de tiempo de días a horas e incluso tenía pequeñas variaciones en minutos. Otros miembros del grupo tomaron espectros (entre ellos el astrónomo mexicano Guido Münch), y en un artículo que presentaron en la reunión de diciembre de 1960 en la American Astronomical Society, anunciaron que el objeto C48

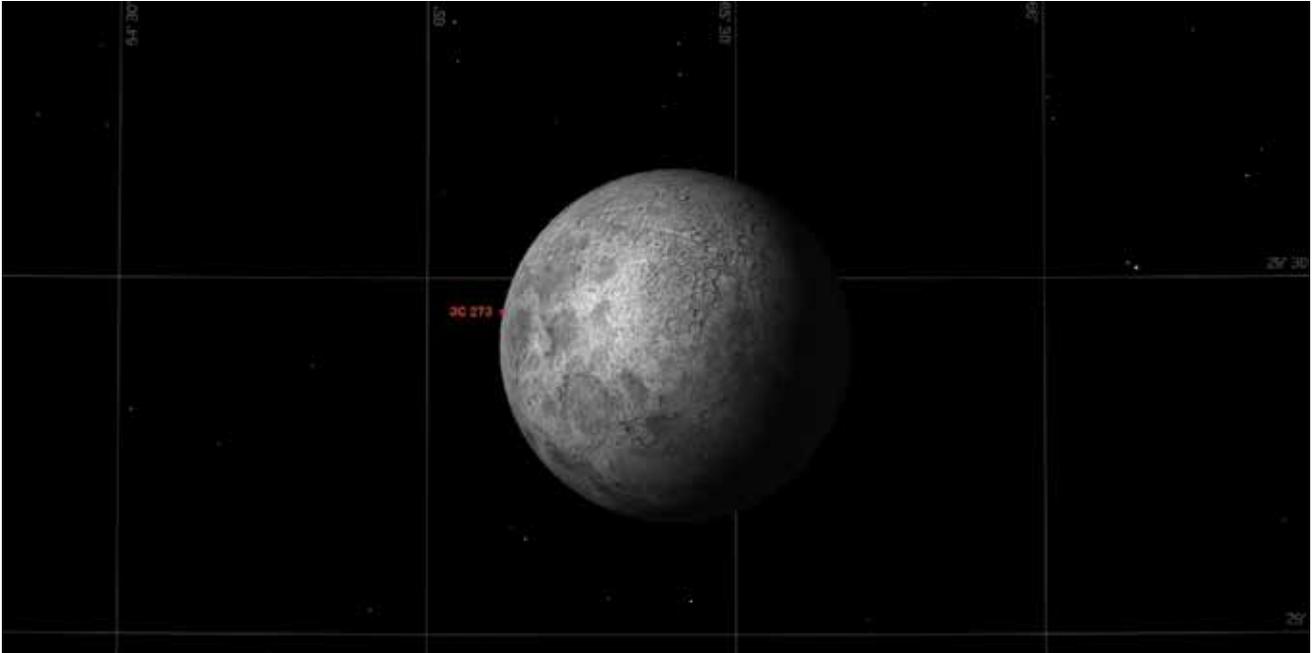


Objeto 3C48. Tomada de: <<http://www.jb.man.ac.uk>>.

“presentaba un patrón espectral con una serie de líneas de emisión” que ¡no era posible identificar con ningún elemento químico conocido! Cada elemento químico produce un patrón característico de líneas oscuras o luminosas –correspondientes a la absorción o emisión de luz en ciertas frecuencias– en el espectro. Este patrón se halla determinado por la estructura atómica de cada elemento. ¿Estaba esta extraña estrella constituida por elementos químicos desconocidos? Los astrónomos se hallaban azorados y realmente intrigados. La solución a este enigma, que se encontró varios años después, significó para la comunidad astronómica una verdadera conmoción. Pero no nos adelantemos a nuestra historia.

Ocultaciones de radiofuentes puntuales por la Luna

La solución al problema de identificar estos objetos con una contraparte óptica (visible) llegó un par de años después, cuando al astrónomo inglés Cyril Hazard se le ocurrió un método para determinar con precisión las posiciones de las radiofuentes mediante ocultaciones lunares. Cuando la Luna pasa delante de una radiofuente, se dejan de recibir las ondas que ésta emite. Hazard había desarrollado una técnica novedosa que permitía conseguir resoluciones casi 1 000 veces mejores que las que entonces proporcionaban los radiotelescopios. Para ello se necesitaba que la Luna, en su movimiento sobre la bóveda celeste, ocultase la radiofuente a estudiar. En 1962 Hazard (que entonces trabajaba en la Universidad de Sidney, Australia) convenció a sus colegas Mackey y Shimmins, y al director del recién inaugurado radiotelescopio de Parkes en Australia, de observar la ocultación lunar de una de estas misteriosas radiofuentes, 3C273. Gracias al gran tamaño del radiotelescopio de Parkes se podría determinar con alta precisión la posición de 3C273 en el cielo, pues era posible alcanzar una resolución de 1 segundo de arco. En 1962 la Luna pasó delante de esta radiofuente y Cyril Hazard y sus colegas australianos aprovecharon la ocultación para medir su posición. La estrella visible que emitía las ondas de radio resultó ser la más brillante de la región. El astrónomo Maarten Schmidt obtuvo su espectro y se encontró con el mismo tipo de objeto extraño que 3C48. ¡Indescifrable!



Determinación de la radiofuente 3C273 mediante ocultaciones de la Luna. Tomada de: <<http://www.parkes.atnf.csiro.au>>.

En sus memorias, Maarten Schmidt escribió:

En 1963 regresé a California con las posiciones de varias radiogalaxias que me había dado Matthews para observarlas con el telescopio de Monte Palomar, y también con la posición de la “radioestrella” 3C273 que se podía observar desde el hemisferio norte. Cuando tomé su espectro quedé azorado. Llamé a Bolton (el director del Observatorio Parkes en Australia) y me propuso que él y Hazard publicaran un artículo en la revista *Nature* con la identificación de 3C273 por ocultación, y que yo escribiera otro con mi resultado. El 5 de febrero de 1963 estaba rompiéndome la cabeza porque no quería publicar que no entendía nada. Entonces me puse a hacer unos cálculos de niveles atómicos y poco a poco me fui dando cuenta de que las líneas correspondían a las de la serie de Balmer que emite el hidrógeno, pero corridas en frecuencia hacia el rojo en un ¡16%!

Aunque ya Minkowsky había reportado galaxias muy débiles con corrimientos al rojo mayores (3C295 con 46%), ésta no era una galaxia, sino ¡una estrella! Dada la distancia que implicaba el corrimiento al rojo, la estrellita resultaba ser mucho más brillante que las galaxias más brillantes (nuestra galaxia, la Vía Láctea,

que no es gran cosa, tiene unos 100 000 millones de estrellas). Esto sucedía también con el objeto 3C48, pero además éste era variable y ninguna galaxia puede variar así su brillo, pues son demasiado grandes para ello. Continúa la cita de M. Schmidt:

Así, en marzo de 1963, se publicaron en *Nature* cuatro artículos sobre “radioestrellas”: uno de Hazard sobre las propiedades de radio de 3C273, uno de Oke sobre sus observaciones infrarrojas, el mío sobre el corrimiento al rojo de 3C273, y otro de Greenstein y Matthews sobre el corrimiento al rojo de 3C48. En mi artículo yo apunté que pensaba que el corrimiento se debía a la expansión del Universo y, por lo tanto, que el objeto era muy lejano.

Jesse Greenstein afirmó que cuando se les ocurrió por primera vez, ya al borde de la desesperación, que todas las líneas de emisión podrían estar desplazadas en longitud de onda por el efecto Doppler debido a la velocidad de recesión (alejamiento), descartaron la idea por disparatada, pero no encontraron ninguna otra explicación. Más adelante, Greenstein comentaría: “Fue un caso típico de autoinhibición de la creatividad por exceso de conocimientos formales.”

Cuáasar 3C273

El corrimiento al rojo se denota con la letra z , y vale la pena dar aquí su definición rigurosa. El corrimiento en longitudes de onda de las líneas se puede conocer directamente del espectro, midiendo la longitud de onda de una cierta línea espectral observada (por ejemplo, la línea de Balmer, $H\alpha$, del hidrógeno), y comparándola con la longitud de onda de esta línea para un gas en emisión en el laboratorio (en reposo). Llamemos a la longitud de onda de la línea emitida en reposo λ_e , y a la longitud de onda de la línea observada del cuáasar λ_o . El corrimiento al rojo será la diferencia $\lambda_e - \lambda_o$ y se define z como

$$z = \frac{\lambda_e - \lambda_o}{\lambda_o}$$

Según esta definición, 3C273 tiene un corrimiento al rojo de $z = 0.160$ y es el cuáasar de menor corrimiento al rojo. La manera natural de interpretar esto es suponer que los cuásares, al igual que las galaxias, se alejan de nosotros debido a la expansión del Universo y, por lo tanto, obedecen la ley de Hubble. Edwin Hubble descubrió en 1929 que el Universo se expande, tal y como lo predijo la teoría de la relatividad general. También encontró que los objetos que están más distantes tienen mayores corrimientos al rojo, y se mueven con mayor velocidad alejándose de nosotros, de manera que el corrimiento al rojo es un indicador de distancia. Si aplicamos la ley de Hubble a los cuásares, resulta que son los objetos más distantes de nosotros conocidos en el Universo; 3C273, el cuáasar más cercano, se encuentra a 3 000 millones de años luz. La luz de 3C273 que vemos en este momento salió del cuáasar cuando aún no existía la vida en la Tierra.



Crédito: ESA/Hubble/NASA. Tomada de: <www.spacetelescope.org/images/potw1346a/>.

Cuando M. Schmidt aplicó esta idea al espectro de 3C273 se dio cuenta de que sus líneas de emisión correspondían al patrón de las líneas espectrales del hidrógeno, bajo la suposición de que el cuáasar se alejara de nosotros a una velocidad de 47 000 kilómetros por segundo; es decir, más de un décimo de la velocidad de la luz. Ninguna estrella de nuestra galaxia podría moverse a esa velocidad, pues habría escapado de la galaxia hace mucho tiempo. En el caso de 3C48, el desplazamiento de las líneas de hidrógeno en longitud de onda debido al efecto Doppler implicaba una velocidad de recesión de 37% de la velocidad de la luz. Conforme fueron identificándose más radioestrellas, el misterio se fue profundizando. El término “radioestrella” se cambió por el de “radiofuente cuasiestelar”, que expresaba la idea de que se trataba de objetos distintos a las demás estrellas. Este nombre se abrevió para dar el término en inglés *quasar* (en español “cuáasar”). El término es un acrónimo de *quasi stellar radio source* o fuente de radio cuasi estelar, y fue acuñado por el astrofísico chinoestadounidense Hong-Yee Chiu, también en 1964, cuando usó esta palabra por primera vez en un artículo para *Physics Today*.

Objetos ópticos cuasi estelares

Hoy sabemos que sólo alrededor de un 10% de los cuásares son potentes radiofuentes. Pero en los años sesenta del siglo pasado la pregunta era: ¿cómo encontrar más cuásares ópticos? Bueno, pensaron los astrónomos, pues si se ven como estrellitas azules, pues busquemos en catálogos de objetos azules. Y aquí entra la enorme contribución del astrónomo mexicano Guillermo Haro.

En 1956 Haro ideó un método fantástico para detectar objetos muy azules usando la cámara Schmidt del Observatorio de Tonantzintla. En 1936 Schmidt diseñó y construyó el primero de este tipo de telescopios, los cuales tienen un espejo esférico al cual se acopla una placa correctora de vidrio delgado. Con este tipo de telescopio se puede abarcar un gran campo en el cielo, de 5 grados cuadrados, en imagen directa y con prisma objetivo (que produce espectros de baja resolución) en una misma placa. Además, gracias a la superficie tallada, se logra que las imágenes, que de otra manera serían pobres, se corrijan a un área puntual simétri-

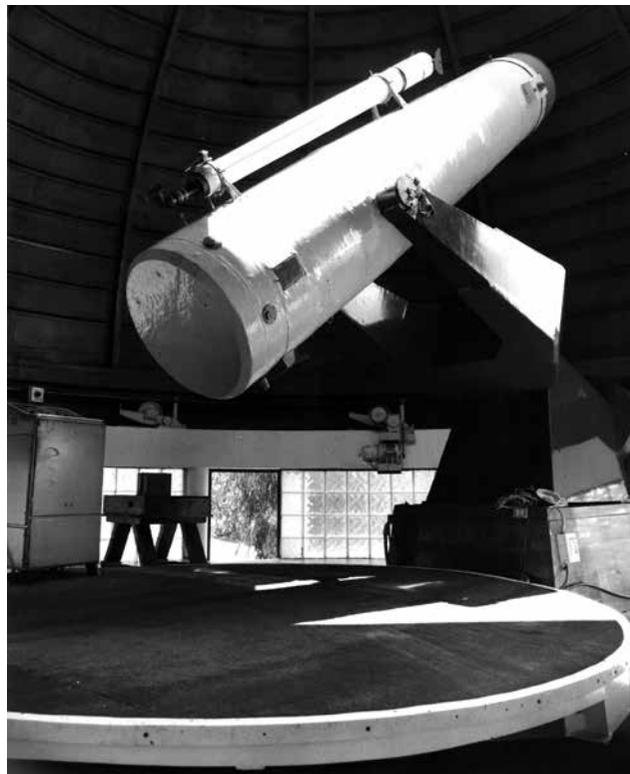
ca pequeña, dando así la posibilidad de alcanzar objetos muy débiles. El Observatorio de Tonantzintla fue una de las pocas instituciones que poseyó una cámara Schmidt, de las más grandes que existían en esa época, a finales de la década de 1940.

El ingenioso método de Haro consistía en registrar en una sola placa tres imágenes usando los filtros U (del inglés *ultraviolet*, ultravioleta), B (del inglés *blue*, azul) y V (del inglés *visual*, amarillo). Como el Sol, la enorme mayoría de las estrellas son amarillas, por lo que la evolución ha hecho que nuestra retina tenga su máximo de sensibilidad en el color amarillo, pero Haro buscaba estrellas muy jóvenes, que son azules. Después de cada exposición, Haro cambiaba de filtro y luego deslizaba ligeramente la placa y volvía a hacer una exposición para que las imágenes fueran adyacentes. Así descubrió una gran cantidad de objetos muy azules que sobresalían en el filtro U.

En 1956 apareció una lista preliminar de 44 objetos de color “anormal” en el *Boletín de los Observatorios de Tacubaya y Tonantzintla*, seguida de otras dos publicaciones en colaboración con Enrique Chavira y Braulio Iriarte. Cuando se empezaron a identificar las “radioestrellas” con “estrellas” visibles muy azules y muy extrañas, inmediatamente los astrónomos interesados, entre ellos los de Tonantzintla, se abocaron a buscar catálogos de estrellas muy azules. Sólo 15 “estrellas azules” de este catálogo resultaron ser cuásares, pero llevan el nombre Tonantzintla (TON). Algunas veces un mismo objeto aparece en dos o más catálogos; por ejemplo, TON 469 es también la radiofuente 3C232.

Una anécdota curiosa en esta historia es que ya en 1957 se había recurrido al catálogo de Tonantzintla para estudiar espectroscópicamente las “estrellas azules”. Haro pensaba que eran estrellas muy jóvenes y otros astrónomos pensaban que eran estrellas muy evolucionadas (enanas blancas). Resultó que Haro tenía razón. Pero en el contexto de este debate, se analizó el espectro de TON 202, y en 1960 (tres años antes de que se hiciera para 3C48 y 3C273) se publicó que se trataba de una “estrella nova peculiar o una enana blanca”. Fue sólo hasta 1966 que Greenstein y Oke se dieron cuenta de que se trataba de un cuásar.

Otros 80 cuásares están listados en el catálogo de “estrellas azules” elaborado por Haro y Luyten en 1961.



Cámara Schmidt del Observatorio de Tonantzintla, 1964.

En 1956 Haro ideó un método fantástico para detectar objetos muy azules usando la cámara Schmidt del Observatorio de Tonantzintla que consistía en registrar en una sola placa tres imágenes usando los filtros U (del inglés *ultraviolet*, ultravioleta), B (del inglés *blue*, azul) y V (del inglés *visual*, amarillo). Después de cada exposición, Haro cambiaba de filtro y luego deslizaba ligeramente la placa y volvía a hacer una exposición para que las imágenes fueran adyacentes. Así descubrió una gran cantidad de objetos muy azules que sobresalían en el filtro U.

Nótese que en 1961 no se sabía qué eran. W. J. Luyten invitó a Haro a aplicar su técnica con la cámara Schmidt de Monte Palomar (de 48 pulgadas), que en su tiempo era la más grande del mundo. En el artículo titulado “Faint Blue Stars in the South Galactic Pole” de G. Haro y W. J. Luyten, se publicaron los primeros resultados. Otros 80 cuásares están listados en el catálogo elaborado por Haro y Luyten con el telescopio y llevan la denominación PHL (Palomar-Haro-Luyten).

Diez años después ya se conocían 200 cuásares, y en la actualidad se conocen más de 200 000 y su número se incrementa cada año. Todos se encuentran a enormes distancias de nosotros, con desplazamientos al rojo que implican de 4 000 a 12 000 millones de años luz de distancia. También se encontró que muchos variaban su brillo. Algunos lo hacían en horas, otros tardaban meses. Para que un objeto pueda variar su brillo, debe transmitirse alguna señal a lo largo de ese objeto y que, como un todo, aumente o disminuya su luminosidad coherentemente. La velocidad de dicha señal no puede



exceder en ningún caso la velocidad de la luz. Para una señal luminosa, la velocidad será $c = d/t$, donde d es el tamaño del objeto y t el tiempo en el cual se produce el cambio de luminosidad. De manera que si un cuásar es variable con tiempos característicos de unos días, sus dimensiones físicas serán de unos días luz. Y entonces regresamos al problema de lo que hace brillar un cuásar: ¿qué objeto cuyas dimensiones sean las del Sistema Solar puede emitir la energía de más de mil millones de soles?

● Hoyos negros

Ya mencionamos que la explicación sobre la naturaleza de los cuásares como objetos extremadamente lejanos no sólo no resolvió todas las dudas, también planteó nuevas y fascinantes preguntas. Si conocemos a qué distancia se encuentra un cuásar, podemos calcular su luminosidad intrínseca; por ejemplo, resulta que 3C273 tiene una luminosidad equivalente a cinco billones de soles. Algo similar ocurre con 3C48. Si colocáramos una galaxia gigante, con sus miles de millones de estrellas, a la distancia a la que se encuentran los cuásares más lejanos, no la veríamos. Para ser visible, un cuásar debe tener la luminosidad de 100 galaxias juntas, y aún así se ve como una estrella diminuta. Además de otras rarezas, ya en 1963 Mathews y Sandage habían publicado un artículo en el *Astrophysical Journal* en el que reportaban que la “radioestrella” 3C48 tenía variaciones de brillo en escalas de semanas y meses, e incluso pequeñas variaciones de brillo en escala ¡de 15 minutos! Las galaxias son demasiado grandes para cambiar así su brillo. La escala de tiempo del cambio en el brillo está relacionada con el tamaño del objeto; es decir, que la luz de 3C48 se emite desde una región de un tamaño menor que el del Sistema Solar.

¿Qué hace brillar tanto a los cuásares para que los podamos ver desde los confines del Universo? La respuesta es la caída de material (gas y estrellas) a un agujero negro supermasivo, de millones de veces la masa del Sol. Esta hipótesis fue propuesta por los astrofísicos soviéticos Yacov Zeldovich e Igor Novikov en su libro *Relativiskaya Astrofizika* (Astrofísica relativista), publicado por la editorial rusa Nauka en 1967. En 1969



Ilustración de un disco de materia arremolinándose alrededor de un agujero negro supermasivo, de un millón de veces la masa del Sol. Se muestra también el jet de partículas emanando a altas velocidades. Tomada de: <www.apod.nasa.gov/apod/ap130312.html>. Fuente: Robert Hurt, NASA/JPL-Caltech.

apareció la traducción al inglés del libro y casi simultáneamente la idea fue formulada por el astrofísico británico Lynden-Bell en la revista *Nature*. Lynden Bell propuso, además, la idea de que este tipo de hoyos negros podían encontrarse en núcleos de galaxias “ac-

tivas” relativamente cercanas. Todo lo cual, a pesar de que inicialmente fue recibido por los astrónomos como la más descabellada de las hipótesis, se ha ido comprobando a lo largo de los últimos 50 años.

Debora Dultzin es pionera en el estudio de los cuásares y su fuente de energía, los hoyos negros supermasivos. Estudió física en la UNAM, el posgrado en la Universidad Lomonósov de Moscú (bajo la supervisión de Zeldovich) y obtuvo el doctorado en la Sorbona (Paris 7). Es investigadora del Instituto de Astronomía y profesora de la Facultad de Ciencias, ambos de la UNAM. Pertenece a la Academia Mexicana de Ciencias y al Sistema Nacional de Investigadores. Ha publicado más de 200 artículos en libros y revistas de circulación y con arbitraje internacionales que le han valido más de 4 000 citas. En 2007 se llevó a cabo un simposio en su honor al que asistieron más de 100 expertos en cuásares de todo el mundo. En 2010 recibió el premio Ciudad Capital Heberto Castillo por su trayectoria. deborah@astro.unam.mx

Lecturas recomendadas

- D'Onofrio, M., P. Marziani y J. W. Sulentic (comps.) (2013), *Fifty Years of Quasars*, Berlin-Heidelberg, Springer.
- Dultzin, D. (1988), *Cuásares*. En *los confines del Universo*, México, FCE/SEP/Conacyt (La Ciencia para todos).
- ____ (2009), “Cuásares y núcleos activos de galaxias”, *Revista Ciencias*, 95, 54-61.
- Ferris, T. (1977), *The Red Limit*, New York, William Morrow & Co.
- Hacyan, S. (1988), *Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo*, México, FCE/SEP/Conacyt (La Ciencia para todos).
- Weedman, D. (1986), *Quasar Astronomy*, Cambridge, Cambridge University Press.