

La evolución química del universo

DESDE HACE DIEZ MIL MILLONES DE AÑOS

Por Enrique Pérez Montero
(IAA-CSIC)

LAS GALAXIAS DISTANTES TIENEN MENOR PROPORCIÓN DE ELEMENTOS PESADOS QUE LAS DEL UNIVERSO LOCAL, LO QUE CONFIRMA EL MODELO JERÁRQUICO DE FORMACIÓN DE GALAXIAS.

LA NOCIÓN DE UNIVERSO EN LAS DISTINTAS RAMAS DE LA CIENCIA y en el lenguaje cotidiano abarca las más variopintas concepciones. La definición más completa puede tomarse prestada de la filosofía, que afirma que universo es todo lo que compone el mundo real. La física puede ser algo más precisa en esta definición, ya que cualquier tratado riguroso especificará que ese "todo" incluye el espacio, el tiempo, la energía y la materia en todas sus formas, conocidas y desconocidas. Una cuestión que aún solo ha sido planteada desde un punto de vista teórico (y que es difícilmente comprobable experimentalmente) plantea más de un universo, ya sea citando realidades paralelas o universos anteriores al Big Bang (o Gran Explosión), o ulteriores si el proceso de expansión y quizá recesión es cíclico. La astrofísica, al ser una rama principalmente observacional de la ciencia, utiliza planteamientos algo más prácticos cuando se habla del universo y se constriñe en cierta manera a todo aquello que puede ser observado o deducido en la totalidad del espacio.

Teniendo en cuenta las vastas distancias que separan unos astros de otros, observar más lejos implica necesariamente observar más atrás en el tiempo, ya que la luz tiene una velocidad finita y, por tanto, cuando nos llega nos da información acerca de cómo era el objeto cuando los fotones salieron de él. Estas escalas de tiempo varían desde los ocho minutos que tarda la luz en llegar a la Tierra desde el Sol, los cuatro años desde la estrella Próxima Centauri (la más cercana después de nuestra propia estrella), unos veinticinco mil años desde el centro de nuestra Galaxia o dos millones y medio de años desde Andrómeda, la galaxia de un tamaño similar a la nuestra que se halla más cerca. Más allá de lo que se denomina el Grupo Local de galaxias, que son aquellas más próximas a la nuestra, observar el universo es obtener una visión certera de cuál ha sido su evolución en el tiempo. En realidad, hablar verazmente de estudiar la evolución del universo es algo que no ha podido hacerse hasta tiempos muy recientes, cuando la

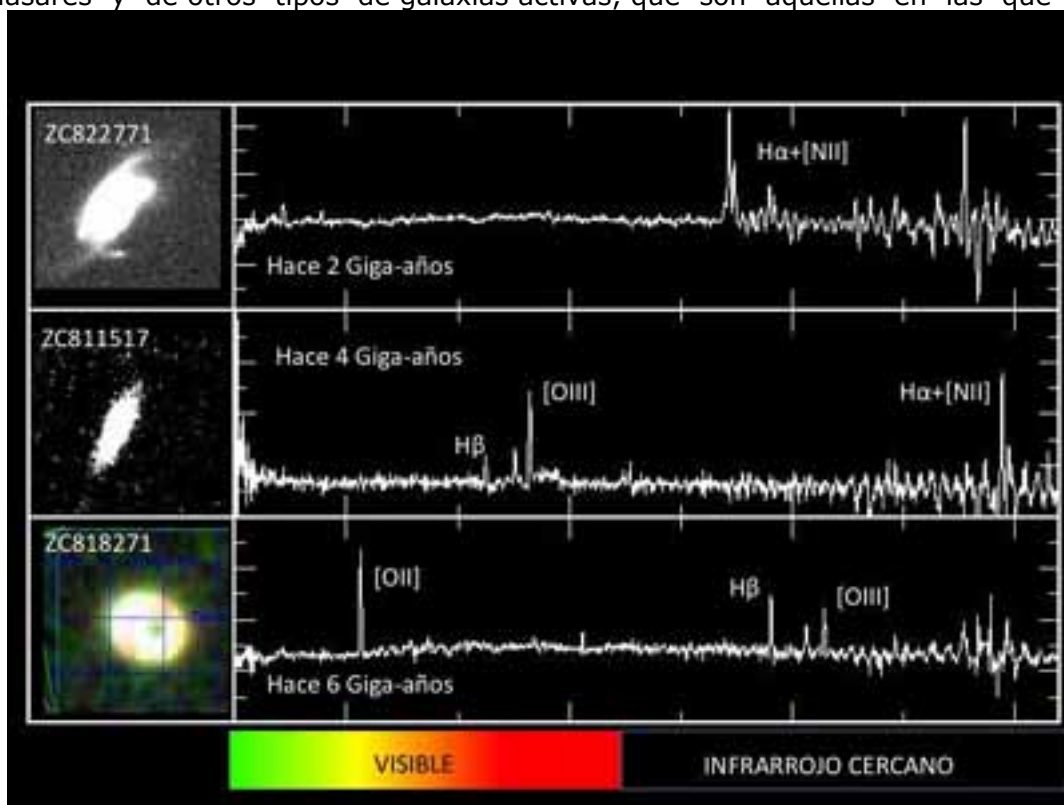


Galaxia MSC0647, la más lejana conocida hasta la fecha (a una distancia de 13.300 millones de años luz), vista por el telescopio espacial Hubble usando la técnica de lentes gravitacionales.

utilización de telescopios suficientemente grandes, detectores lo bastante sensibles y ordenadores lo bastante potentes permitió observar galaxias a una edad del universo en la que este tuviera propiedades totalmente diferentes a las que presenta hoy en día. Los primeros de estos objetos del universo "joven" en ser detectados fueron, en los años sesenta del siglo pasado, los cuásares (neologismo que procede de la abreviación de "objeto casi estelar"), que emiten una enorme cantidad de radiación en todas las frecuencias durante la formación de un agujero negro supermasivo. Hoy en día, no obstante, se puede obtener una estadística fiable de una gran cantidad de galaxias hasta edades más próximas a la Gran Explosión que al momento actual. El récord actual, por ejemplo, lo ostenta la galaxia MACS0647-JD, que se encuentra a 13.300 millones de años luz. Teniendo en cuenta que la edad del universo se estima en 13.700 millones de años luz, nos encontramos muy cerca del límite máximo observacional que se puede alcanzar.

Galaxias con formación estelar: trazadoras de la evolución del universo

Una de las características más notables de las galaxias que podemos estudiar en el universo más joven es que suelen ser mucho más brillantes que las demás. Este efecto de selección se conoce como "sesgo de Malmquist" según el que, a mayor distancia que miremos, menor será el número de galaxias menos brillantes que un muestreo es capaz de compilar. Entre las galaxias que es más fácil detectar y analizar se encuentran aquellas que están sometidas a diversos procesos que intensifican la cantidad de luz emitida. Este es el caso de los ya mencionados cuásares y de otros tipos de galaxias activas, que son aquellas en las que su



Imágenes del telescopio espacial Hubble y espectros en la zona visible e infrarroja del espectrógrafo VIMOS, en el VLT, de tres galaxias del catálogo zCOSMOS a distintos desplazamientos al rojo.

agujero negro central se encuentra en una fase de acrecimiento de materia. No obstante, los procesos físicos que se producen en los discos de acrecimiento aún no son lo bastante conocidos como para usar la distribución espectral de energía de estos objetos para un análisis detallado de las propiedades de las galaxias en que estos eventos se producen. Este no es el caso, no obstante, de aquellas galaxias cuya luz está dominada por la emisión pura de las estrellas, cuya naturaleza y propiedades son bien conocidas ya que se dispone de muchos datos de nuestra

vecindad solar y de galaxias cercanas. En aquellas galaxias en que se está produciendo un episodio masivo de formación estelar, las estrellas masivas emiten gran cantidad de radiación ultravioleta que ioniza y excita el remanente gaseoso que no ha colapsado para crear nuevas estrellas. El espectro de emisión del gas ionizado por estrellas masivas es muy brillante en la parte visible del espectro y se caracteriza por la presencia de intensas líneas a longitudes de onda muy definidas que corresponden a las diferencias de energía entre los niveles de los iones del gas. Aunque la mayor parte del gas es hidrógeno, las líneas de emisión provenientes de otras especies más pesadas, como el oxígeno, el nitrógeno o el azufre son bien visibles. El estudio de las intensidades de estas líneas de emisión sirve para cuantificar la cantidad relativa de estos iones en la fase gaseosa mediante un parámetro que se denomina "metalicidad". A diferencia de la química, en que se denomina metales a ciertos elementos que tienen unas propiedades muy definidas debido a la manera en que se combinan unos con otros, en astrofísica llamamos metales a todos los elementos químicos con la excepción de los dos más ligeros: el hidrógeno y el helio. Esto se debe al diferente origen de estos elementos más ligeros, que fueron creados mayoritariamente en la Gran Explosión. Por el contrario, los metales son creados por las propias estrellas durante las reacciones de fusión nuclear que se producen en su interior. Posteriormente, una porción considerable de estos metales es eyectada al medio interestelar durante la muerte de las estrellas, ya sea como explosión de supernova si la estrella es muy masiva, o como restos en forma de nebulosa planetaria si la estrella tiene una masa similar a la de nuestro Sol o menor. Así pues, poder medir la metalicidad de una galaxia supone una importante pista para saber cuántas generaciones de estrellas se han creado y han muerto para enriquecer el medio. Esos metales formarán parte de una nueva generación de estrellas que enriquecerá a su vez el medio interestelar. Por tanto, una galaxia de alta metalicidad equivale a una galaxia con historia de formación estelar muy intensa. Conocer la metalicidad de una región también es importante porque los metales son los elementos con los que se construyen las moléculas que dan lugar a la formación de cuerpos rocosos, como los planetas, y a los elementos primordiales que dan lugar a la vida.

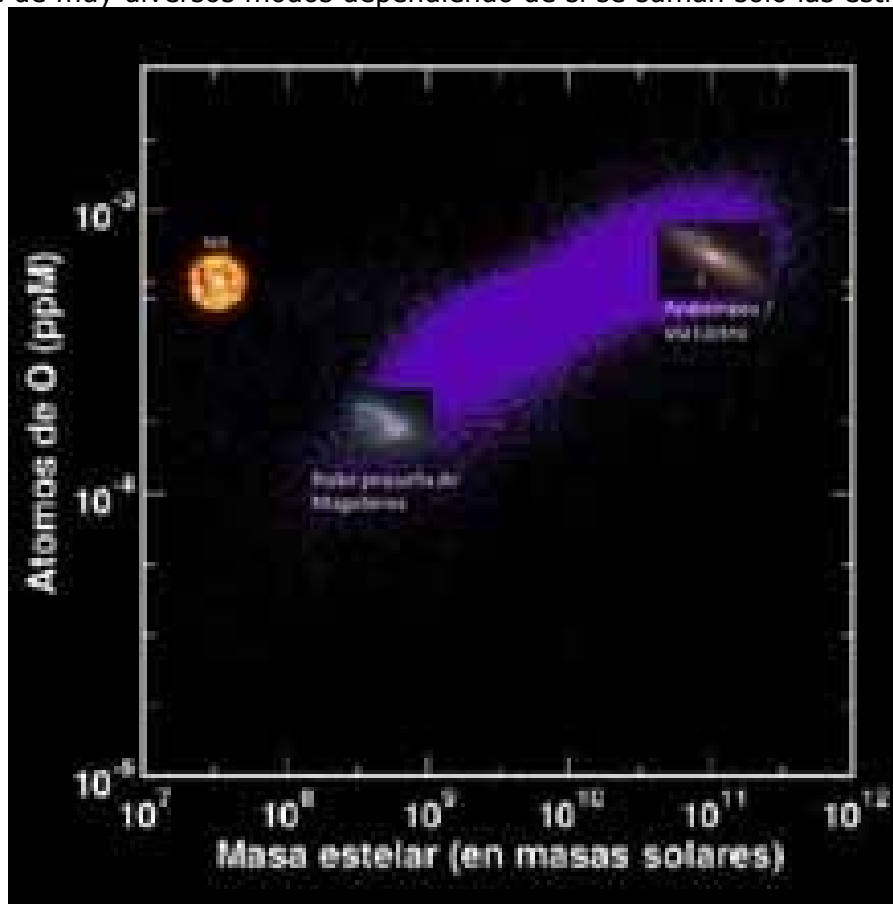
Otra de las ventajas que presenta el análisis de las líneas de emisión en el espectro de una galaxia con formación estelar reside en que permiten medir la velocidad de esa galaxia. Como la longitud de onda en reposo de estas líneas es conocida, medir una de estas líneas a una longitud de onda mayor equivale a poder medir a qué velocidad se aleja esta galaxia de nosotros. El principio físico que rige este fenómeno es el efecto Doppler, por el que la frecuencia de las ondas luminosas disminuye cuando el cuerpo que las emite se aleja del observador.

Aunque el efecto Doppler es fácilmente reconocible con las ondas sonoras, su efecto sobre la luz es solo perceptible cuando las velocidades involucradas son una fracción elevada de la de la velocidad de la luz, que es de 300.000 kilómetros por segundo y, por tanto, solo afecta a objetos en un ámbito astronómico. En el caso de la expansión del universo, además, conocer la velocidad de alejamiento de un objeto equivale a conocer la distancia a la que se encuentra: hay medidas cada vez más precisas del ritmo de expansión del universo, que produce que los objetos se alejen de nosotros a mayor velocidad cuanto más lejos se encuentran. En la imagen de la página contigua vemos tres galaxias a diferentes distancias y cómo sus líneas de emisión se observan a longitudes de onda mayores cuanto más lejos se hallan (y, por tanto, cuanto más tiempo pasó desde que emitieron su luz).

La relación masa-metalicidad

La relación entre la masa y la metalicidad de una galaxia constituye una de las herramientas que usan los astrónomos para estudiar la evolución del universo

analizando el contenido en metales de las galaxias. La masa de una galaxia puede definirse de muy diversos modos dependiendo de si se suman solo las estrellas o si



Relación entre la metalicidad de una galaxia (proporción de átomos de oxígeno por cada millón de partículas) y la masa en estrellas de una galaxia mostrada como masas solares para las galaxias con formación estelar del muestreo SDSS. Se presenta como referencia la metalicidad del Sol y las masas de las galaxias de Andrómeda y la Nube Pequeña de Magallanes.

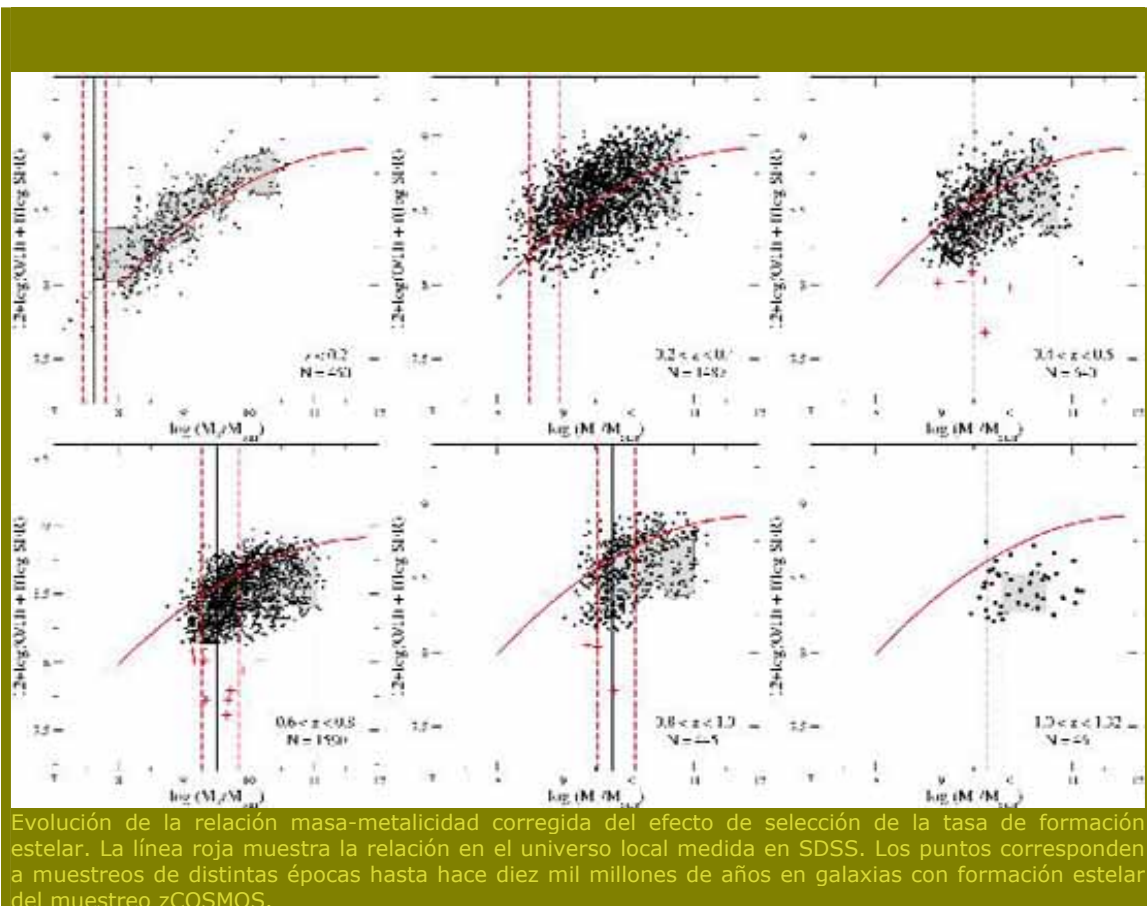
¿Ha sido esta relación siempre igual o las galaxias se han enriquecido y han creado estrellas a ritmos diferentes en función de la edad del universo?

se tiene en cuenta todo aquello que no luce, como gas, polvo y, sobre todo, materia oscura, que representa más de un 90% del total. En objetos lejanos, no obstante, y con los medios disponibles, solo es posible estimar la masa en estrellas de una galaxia a partir de su distribución espectral de energía. El método más eficaz consiste en calcular la luz que emitiría una población de estrellas dada y, conociendo la distancia a la que se encuentra dicha galaxia, suponer de cuántas estrellas dispone y, por tanto, cuál es su masa. El estudio de la relación entre la masa de una galaxia y su metalicidad en las galaxias del universo local es bien conocida. En la gráfica superior se muestra dicha relación para unas trescientas mil galaxias a distancias entre 0,3 y 1,3 gigaaños luz del Muestreo Digital Sloan (SDSS, de sus siglas en inglés). Se trata del muestreo más completo del universo local realizado hasta la fecha que, mediante un telescopio robótico, ha tomado imágenes y espectros de todas las fuentes del cielo más brillantes (aunque no permite estudiar el cielo profundo y, por tanto, fuentes más lejanas). Como se aprecia en la figura, hay una tendencia clara a que las galaxias que tienen más estrellas tengan una proporción de metales más alta, aunque es cierto que esta relación tiene una gran dispersión.

Las causas para explicar esta relación son variadas, pasando desde que las galaxias enanas son menos eficientes a la hora de producir metales a que, como presentan menos masa, sus pozos de potencial gravitacional no son capaces de retener los elementos que son eyectados por las supernovas y se pierden en el medio intergaláctico. Una evidencia de esta explicación son los potentes vientos galácticos que se observan en las galaxias con formación estelar y que son capaces de lanzar gas a velocidades de varios miles de kilómetros por segundo. También se han observado evidencias de un cierto enriquecimiento en metales en regiones del espacio aparentemente disociadas de las galaxias, por lo que se piensa que han podido llegar hasta allí lanzados por las estrellas. Surge entonces una pregunta clara, ¿ha sido esta relación igual en todas las épocas o las galaxias se han enriquecido y han creado estrellas a ritmos diferentes en función de la edad del universo?

Muestreos profundos del cielo para estudiar la evolución

Uno de los muestreos más profundos y completos de que se dispone actualmente es COSMOS (Muestreo de evolución cosmológica), en cuyo marco se han observado más de un millón de fuentes en un campo de unos dos grados cuadrados cercanos



al ecuador celeste, en una región del cielo donde el disco de nuestra galaxia no obstaculiza la visión. Cada una de esas fuentes ha sido observada en bandas fotométricas que cubren ondas de radio, infrarrojo, visible, ultravioleta y rayos X. La colaboración zCOSMOS ha ampliado la información de unos veinte mil de los objetos de COSMOS realizando espectroscopía con el espectrógrafo multiobjeto VIMOS instalado en uno de los cuatro grandes telescopios VLT, en el observatorio de Cerro Paranal en Chile. La observación espectroscópica de estas galaxias permite muestrear la evolución de la relación entre la masa estelar y la metalicidad

hasta una distancia de unos diez mil millones de años luz. De ese análisis se desprende que la relación masa-metalicidad a esa edad es sensiblemente más plana que la obtenida en el universo local a partir del muestreo SDSS, lo que quiere decir que la metalicidad de las galaxias más masivas es más similar a la de las galaxias enanas en esa época. Este resultado ya era conocido por la comunidad astronómica desde hace tiempo, a través de otros muestreos de cielo profundo, aunque a partir de un número de fuentes mucho menor. No obstante, la evolución real de la relación masa-metalicidad había sido puesta en duda a partir de otros resultados que involucraban otro de los parámetros fundamentales en las galaxias de formación estelar. Este es la tasa de formación estelar, es decir, el número de estrellas que son creadas por unidad de tiempo. Esta tasa puede ser medida, por ejemplo, a partir de la intensidad de las líneas de emisión de hidrógeno (como H α –hidrógeno alfa–), que no depende de la metalicidad o de otras características de la geometría del gas, sino del número de fotones ionizantes emitidos por un cúmulo recién formado. Se sabe que la metalicidad media de una galaxia tiende a ser menor en objetos que presentan una tasa de formación estelar mayor. Este hecho observacional podría deberse a que, además de las galaxias, en el universo hay nubes de gas primordial que no ha colapsado para formar estrellas. Cuando estas nubes interactúan con una galaxia se producen dos efectos: por un lado la metalicidad media de la galaxia disminuye, ya que se mezclan el gas enriquecido con el gas sin procesar de la nube. Por otro lado, el acopio de gas induce la formación de nuevas estrellas. Por ello, debido al sesgo de Malmquist citado más arriba, a mayor distancia, más brillantes son las galaxias que se observan y mayor tasa de formación estelar presentan en promedio. Por ello, se creía que la observación del aplanamiento de la relación masa-metalicidad podía ser debida a este efecto de selección. Con el nuevo muestreo zCOSMOS ha sido posible cuantificar también la tasa de formación estelar en un número de galaxias lo bastante numeroso para minimizar el sesgo de Malmquist y cuantificar la evolución de esta relación. En la imagen contigua se observa esta relación para distintos desplazamientos al rojo en comparación a la relación del universo local y se confirma que el aplanamiento de la relación es real y que las galaxias del universo joven son, en promedio, menos metálicas a pesar de tener un mismo número de estrellas.

Otro de los parámetros que se ha usado por vez primera para estudiar la evolución de esta relación es la cantidad relativa de átomos de nitrógeno y oxígeno. Este cociente también depende de la metalicidad, ya que el nitrógeno es producido en las estrellas de baja masa durante la fusión de hidrógeno, proceso en que el oxígeno se emplea como catalizador de dichas reacciones y produce nitrógeno como deshecho. Eso implica que la producción de nitrógeno aumente en estrellas más metálicas. Además, este cociente tiene la ventaja de que no es sensible a la tasa de formación estelar ya que la caída de gas poco procesado en una galaxia evolucionada no altera la proporción entre estos dos elementos. El estudio zCOSMOS ha permitido verificar que la relación entre el número de átomos de oxígeno y nitrógeno en relación a la masa estelar también es más plana en el universo más joven, lo que confirma la evolución de la relación masa-metalicidad.

El aplanamiento de la relación masa-metalicidad podría ser interpretado de manera equivocada como que las galaxias eyectaban menos metales en el universo más joven, a pesar de producir un mismo número de estrellas. En su lugar, este resultado apoya el modelo jerárquico de formación de galaxias. En este escenario, se piensa que las galaxias más masivas se produjeron sobre todo como consecuencia de los procesos de fusión e interacción entre galaxias más pequeñas. En un proceso de fusión de dos galaxias enanas la masa estelar se duplica, pero la metalicidad permanece constante, que es justo lo que se percibe. Al evolucionar la galaxia masiva creando más estrellas, también aumenta su metalicidad de manera progresiva hasta alcanzar el nivel esperado para su número de estrellas. Así pues,

el estudio de la metalicidad nos permite imaginar un universo con un volumen menor y con un mayor número de galaxias en colisión, lo que provocaba una alta tasa de formación estelar en contraste con el universo actual, más vacío y con un mayor número de galaxias masivas, metálicas y evolucionadas.

Enrique PÉREZ MONTERO (IAA_CSIC)

Este artículo aparece en el número 39, febrero 2013,
de la revista *Información y Actualidad Astronómica*,
del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA_CSIC)