

ESTRELLAS JÓVENES EN VIEJAS GALAXIAS *

DR. RAFAEL BACHILLER

*Académico correspondiente de la Real Academia de Doctores de España.
Astrónomo y director del Observatorio Astronómico Nacional (IGN)*

RESUMEN

Resulta paradójico que las galaxias «viejas» que fueron formadas poco después del Big Bang (o «Gran Explosión») contengan estrellas «jóvenes», es decir, formadas mucho más recientemente en la evolución del universo. El material necesario para la formación de estrellas estaba disponible desde aquellos primeros momentos en que se formaron las galaxias, pero algún mecanismo ha ido retrasando el colapso gravitatorio, y regulando el nacimiento de las estrellas, un fenómeno que sigue teniendo lugar aún en nuestros días. Este artículo describe, en un contexto cosmológico, los mecanismos que han sido invocados, durante los últimos cincuenta años, como posibles soluciones a esta paradoja para centrarse en el estudio de los flujos bipolares eyectados por las estrellas en formación. Estos flujos no sólo parecen capaces de lograr que la formación estelar se autorregule, sino que también explican los valores de las masas de las estrellas más masivas y resuelven el denominado «problema del momento angular» que surge en las teorías de la formación estelar. Los flujos bipolares constituyen, por tanto, un ingrediente esencial y muy básico en la formación de cada estrella.

INTRODUCCIÓN. ¿UN UNIVERSO ÚNICO?

Una explosión, una gran explosión hace unos 14 mil millones de años es lo que formó nuestro universo tal y como lo concebimos hoy en el marco de la teoría «estándar». La expansión que comenzó entonces hace que el universo se haya ido diluyendo hasta nuestros días pero manteniendo su unidad y un elevado grado de estructura ordenada.

Esta concepción de universo como un «todo», como «la unidad del Mundo», es relativamente reciente, data del siglo XVII, momento en el que Newton realiza la síntesis de los numerosos trabajos de sus precursores (Copérnico, Giordano Bruno, Kepler, Tycho Brahe y Galileo, entre otros). Pero, sin embargo, Kant a finales del XVIII sugirió la existencia de muchos universos-isla, poniendo así en duda dicha

* Discurso pronunciado en la toma de posesión como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España celebrada el 4-6-2008.

«unidad del Mundo» y no es hasta bien entrado el XX, con el descubrimiento de las galaxias por Hubble en 1924, que el universo recupera su unicidad pasando a ser «inmenso». De hecho, aún hoy, no sabemos cuán grande es, ni siquiera si el espacio es finito o infinito.

Pero resaltemos aquí que en otros momentos de la Historia, el universo tenía un carácter mucho menos único. Aparte de los universos-isla de Kant, recordemos por ejemplo que en la antigüedad, el universo era considerado más jerárquico que unificado. En el modelo desarrollado en Grecia por Platón y Aristóteles —entre otros—, el universo era visto como un múltiple encaje de estructuras geométricas sucesivamente mayores. Quizá en el futuro, mediante la teoría de cuerdas, si es que llega a establecerse algún día de manera fiable, se pase a una concepción en la que nuestro universo cuatridimensional observable no pase a ser más que una parte o sección de un todo de más dimensiones en el que cabrían infinidad de otros universos como el nuestro.

1. Desde el Big Bang a las primeras estrellas

Si utilizamos la teoría de la Gran Explosión para remontarnos en el pasado, encontramos que el universo se hace más concentrado, más caliente y menos estructurado. La historia del universo se divide en dos periodos: al primordial (que tan sólo duró unos cientos de miles de años) le siguió la edad de la materia que dura hasta nuestros días. Ambos periodos están separados por la época de la recombinación.

El universo primordial era opaco a la radiación, no podremos observar jamás nada que proceda de esta época. Se piensa que muy pronto, tras unos 10^{-37} s después de la Gran Explosión, el tamaño del universo aumentó en un factor 10^{30} en una pequeñísima fracción de segundo (10^{-32} s). Las partículas elementales se formaron en el universo primordial, así como algunos de los núcleos de los átomos más simples (al cabo de los tres primeros minutos). No había ninguna estructura. La dispersión de la radiación por los electrones libres es la causa de la alta opacidad.

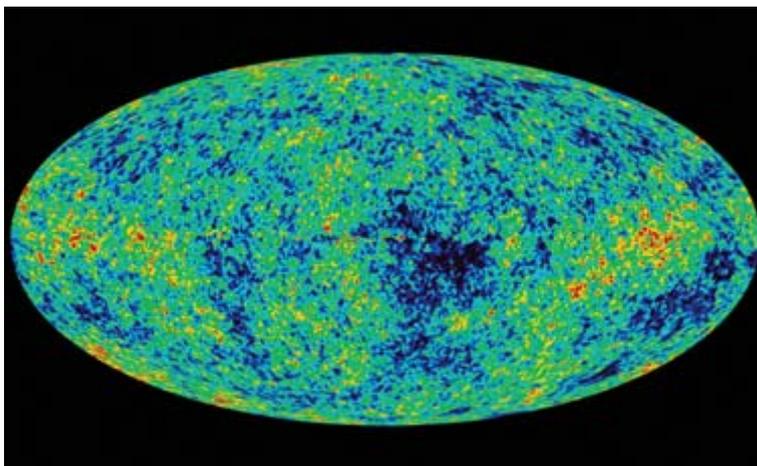
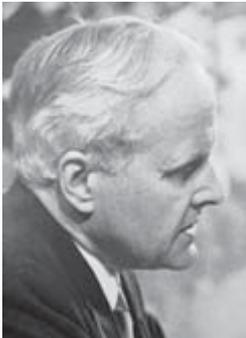


Figura 1. *Las observaciones del fondo cósmico de microondas realizadas por el telescopio espacial WMAP nos ofrecen una imagen del universo tal y como era al cabo de unos 300.000 años tras la Gran Explosión (cortesía NASA).*

En la época de la recombinación, cuando los electrones se combinan con los iones para formar átomos neutros, el universo se hace transparente, es cuando se emite la radiación que se detecta hoy como el fondo cósmico de microondas, uno de los pilares observacionales de la teoría de la Gran Explosión.

Tras la recombinación, el universo empieza a tomar su estructura actual. La radiación pierde importancia relativa respecto de la materia. Continúa la expansión y el enfriamiento, y la materia se organiza paulatinamente.

Pequeñas fluctuaciones en la densidad de la materia (observadas tal y como eran 300.000 años después del big bang por los satélites COBE y WMAP) forman estructuras que dan lugar a los cúmulos de galaxias y las galaxias. Tras 1 ó 2 mil millones de años, los supercúmulos están ya bien separados y hay una estructura fractal que abarca supercúmulos, cúmulos y galaxias. En cada galaxia se van concentrando masas de hidrógeno y helio en estado gaseoso («nubes»). En esa época el universo se ha enfriado hasta unos 40 K, y la gravedad entra en competición con la presión gaseosa. Las nubes también toman una estructura fractal y los glóbulos más densos, en los que la gravedad puede con la presión del gas, colapsan. Así la energía cinética del colapso se convierte en calor en la región central de la zona que colapsa, el calor hace que la presión aumente en el centro y así se contrarresta la gravedad. Las altísimas presiones de la región central posibilitan que se desencadenen reacciones nucleares. Así se formaron las primeras estrellas.



Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) fue uno de los primeros investigadores que se planteó la paradoja de si podía existir formación de estrellas en las galaxias actuales (viejas). En 1951 enunció una teoría del «rejuvenecimiento» con la hipótesis de que lo que parecían estrellas jóvenes eran, realmente, estrellas maduras «rejuvenecidas» por la acreción de materia interestelar de la vecindad.

2. La paradoja de von Weizsäcker

A primera vista, el nacimiento de las estrellas parece por lo tanto un proceso que tuvo lugar muy al principio en la evolución del universo. Estas ideas han perdurado hasta hace tan sólo unos cincuenta años. La formación estelar fue pronto reconocida como un proceso muy rápido y no parecía plausible, por ejemplo, el encontrar estrellas jóvenes en una galaxia vieja como la nuestra. Sin embargo, la observación mostraba que había estrellas jóvenes por doquier. C. F. von Weizsäcker en 1951 ofreció una explicación de que lo que parecían estrellas jóvenes eran, realmente, estrellas maduras «rejuvenecidas» por la acreción de materia interestelar de la vecindad.

El tiempo de caída libre de una nube de densidad ρ_o es $t_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho_o}}$ o

$4,5 \cdot 10^5 \frac{1}{\sqrt{n_4}}$ años, muy rápido en comparación con la edad del universo. Todas las

estrellas que puedan formarse deben haberse formado poco tiempo tras el Big Bang. El encontrar estrellas jóvenes en las galaxias «viejas» de nuestro entorno constituye una paradoja a la que denominaremos «paradoja de von Weizsäcker» por haber sido éste uno de los primeros que se preocuparon por este problema. El estudio de la formación estelar durante el último medio siglo, ha ido encaminado a resolver esta paradoja.

Pero el estudio de la formación estelar tiene una historia más larga. Desde el siglo XVIII en el que Kant (1755) y Laplace (1796) formularon la Hipótesis «nebulosa», la mayor parte de los estudios han ido encaminados a explicar la formación del sistema solar, esto es de una estrella simple. La hipótesis nebulosa consistía en una nube rotante que se enfría y se comprime bajo la acción de su propio peso. La rotación hace que se adelgace hasta formar un disco y la contracción hace que la rotación se acelere. Esta es la hipótesis que todavía prevalece hoy.

Hoy sabemos, en gran medida gracias a la radioastronomía y a la astronomía de infrarrojos, que los objetos que von Weizsäcker consideraba «rejuvenecidos» son realmente objetos verdaderamente «jóvenes» que tienen edades a veces de tan sólo unos diez mil años, mucho más cortas que la edad de la galaxia que los aloja.

Así pues, volviendo a la paradoja de von Weizsäcker. ¿Qué impide que todas las estrellas se hayan formado de una vez poco después del Big bang?

3. Rotación, campos magnéticos y turbulencia

En la búsqueda de un mecanismo que se contraponga a la gravedad, impidiendo que el medio interestelar forme estrellas con demasiada rapidez, se barajaron durante años varias posibilidades.

La rotación parecía un mecanismo sencillo y prometedor. La fuerza centrífuga actúa de manera decisiva sobre la estructura dinámica de una nube interestelar rotante y puede contraponerse eficazmente a la fuerza gravitatoria.

La rotación de nubes interestelares es muy fácil de medir en radioastronomía gracias al efecto Doppler sobre líneas espectrales. Sin embargo, estas medidas indican que, en términos generales, la rotación es insuficiente para contrarrestar la fuerza de la gravedad.

¿Y el efecto de los campos magnéticos interestelares? En efecto, las nubes interestelares densas están débilmente ionizadas y la presión magnética se añade eficientemente a la presión gaseosa frente a la gravedad.

Hay varias técnicas posibles para medir el campo magnético en nubes interestelares. Las tres principales son las siguientes: (i) medida de la polarización de la luz estelar emitida por estrellas que están situadas tras la nube; (ii) medida de la polarización de la radiación, continua o de líneas espectrales, emitida por la propia nube,

y (iii) medida del efecto Zeeman en la emisión/absorción de algunas líneas moleculares originadas en la propia nube. Pero, sin embargo, las medidas son muy complicadas pues cada una de las técnicas tiene sus problemas.

Yo me apasioné por este problema hace ahora veinticinco años, estudiando los objetos más jóvenes. En mi primer trabajo publicado en una revista internacional con sistema de arbitraje (Bachiller & Cernicharo, 1984; *Astron, Astrophys*, 140, 414) proponíamos que el glóbulo Barnard 1 sólo podía estar soportado por la presión magnética. Este artículo motivó a otros investigadores para medir el campo magnético en él. La medida más reciente indica un resultado de ~ 31 micro-Gauss (Matthews & Wilson 2002, *ApJ* 574, 822).

Tanto las medidas realizadas en Barnard 1, como las llevadas a cabo en otras regiones, indican claramente que aunque estos campos magnéticos son una componente dominante en los procesos de formación estelar, la intensidad de los campos magnéticos es insuficiente como para retrasar significativamente el colapso gravitatorio de las nubes densas.

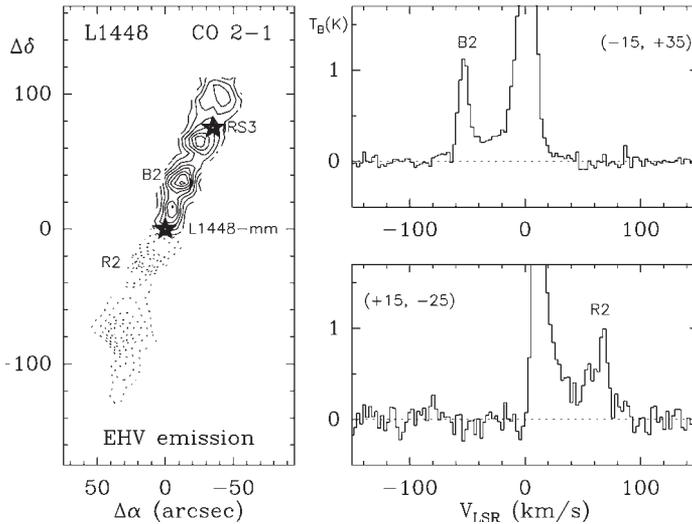


Figura 2. El flujo bipolar en torno a la protoestrella de Clase 0 L1448-mm posee unas características extraordinarias (Bachiller et al., 1990; *Astron, Astrophys*, 239, 276). Su morfología es muy similar a la de los chorros colimados («jets») observados en el óptico y en el infrarrojo.

Los movimientos turbulentos en el medio interestelar se habían invocado desde los años cincuenta como una posibilidad para retrasar el colapso gravitatorio. Sin embargo, las ondas acústicas mediante las que se transmite la turbulencia en una nube se disipan con rapidez debido a las pérdidas térmicas. Para mantener la turbulencia se necesitaría una fuente continua. La explosión de supernovas y la creación de regiones HII son fuentes de turbulencia en regiones de formación estelar masivas. Pero dado que estos fenómenos no existen en regiones de formación estelar de baja masa, se necesitaría un mecanismo adicional que mantenga la turbulencia.

4. Flujos bipolares

Cuando, en los años 1980's, toda la comunidad de estudiosos de la formación estelar estábamos en estas reflexiones, sucedió un descubrimiento que daría un vuelco completo a todas nuestras hipótesis sobre la formación estelar.

En 1980, Snell, Loren y Plambeck (ApJ 239, L17), observando monóxido de carbono, CO, en Taurus habían localizado un fenómeno muy espectacular en L1551. Se trataba de eyecciones bipolares que provenían de la inmediata vecindad de la estrella en formación. En los primeros ochenta se llegó a la conclusión de que muchas estrellas jóvenes (en formación) perdían masa.

Pronto se sumaron muchas otras evidencias experimentales: objetos Herbig-Haro (HH), emisión H_2 , líneas ópticas prohibidas (desplazadas hacia el azul), máseres (H_2O), emisión en el continuo centimétrico, etc. Sin embargo, las observaciones del monóxido de carbono han prevalecido como las más importantes por varias razones. Sobre todo porque las líneas rotacionales de CO son un medio de diagnóstico potentísimo del medio. Pero además porque la emisión de CO traza el gas ambiente que ha sido puesto en movimiento por los vientos «primarios» estelares y, por ello, en este gas queda escrita la historia completa de las eyecciones provenientes del objeto joven. Por ejemplo: en el mismo flujo, L1551, que observaron Snell *et al.* en 1980, Bachiller y Cernicharo localizaron varios máximos de CO que permiten reconstruir los grandes episodios de pérdida de masa de la protoestrella.

Propiedades de los flujos bipolares. Hay dos propiedades que saltaron pronto a la vista tras su descubrimiento:

- Ubicuidad: los flujos bipolares se detectan prácticamente en todas las estrellas en formación.
- Bipolaridad: en la inmensa mayoría de los casos se observa que las eyecciones suceden en dos sentidos opuestos a lo largo de un eje.

Por lo tanto, la pérdida de masa ha de ser un ingrediente esencial en la formación estelar y la bipolaridad debe ser un atributo intrínseco del mecanismo que genera las eyecciones.

La espectroscopía del CO es una herramienta poderosísima para el estudio de estas eyecciones. Esto es debido a varias razones. En primer lugar, el CO es muy abundante (la molécula más abundante en las nubes moleculares después del H_2). Su estructura de niveles energéticos rotacionales es relativamente simple (se trata de un rotor simétrico) y su momento bipolar es bajo (0,1 Debye), lo que posibilita la termalización ($T_{ex} = T_k$) en las condiciones de muchas situaciones astrofísicas. A partir de dos líneas rotacionales (p. ej., $J = 2-1$ y $1-0$) es posible determinar la temperatura de excitación rotacional, y añadiendo una línea de ^{13}CO se puede determinar la opacidad. Así se determina la densidad proyectada de CO y, si su abundancia es conocida (normalmente el factor CO/H_2 es del orden de 10^{-4}), es inmediato determinar la densidad proyectada de H_2 . De esta manera se puede determinar la masa total del gas trazado por la emisión de CO. El campo de velocidades se obtiene directamente de los perfiles, y permite obtener el Momento, la Energía Cinética y la Potencia Mecánica de las eyecciones.

Parámetros obtenidos observacionalmente. De las observaciones de CO pueden derivarse valores estadísticos representativos para los parámetros de los flujos bipolares (Bachiller 1996, Ann. Review of Astron. Astrophys. 34, 111) . Por ejemplo, el tamaño de las eyecciones varía desde una pequeña fracción de parsec ($< 0,1$ pc) hasta varios pc. La velocidad terminal del gas eyectado (antes de corregir por efectos de proyección) puede encontrarse entre 1 y 100 km/s. La escala temporal asociada con las eyecciones oscila entre 10^3 y 10^5 yr. La masa del gas en movimiento puede encontrarse entre 10^{-2} y $10^2 M_{\odot}$ y su energía cinética entre 10^{43} y 10^{48} erg. La potencia mecánica de los flujos bipolares puede estar entre 10^{-3} y $10^4 L_{\odot}$.

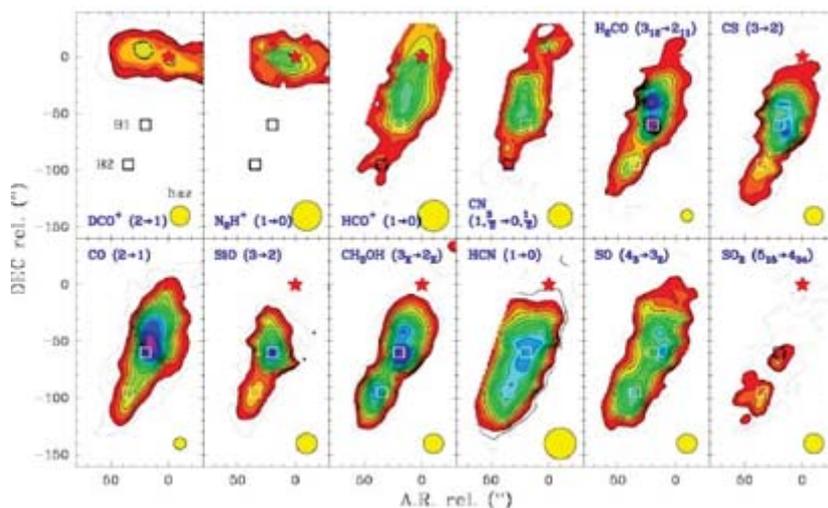


Figura 3. El flujo bipolar en torno a la protoestrella de Clase 0 L1157 (señalada aquí con el símbolo de una estrella roja de cinco puntas) es el prototipo de los llamados flujos «químicamente activos». Las ondas de choque generadas por el flujo modifican sustancialmente la composición química de la zona circundante (Bachiller et al., 2001, *Astron. Astrophys.* 372, 899), posee unas características extraordinarias (Bachiller et al., 1990, *Astron. Astrophys.* 239, 276). Su morfología es muy similar a la de los chorros colimados («jets») observados en el óptico y en el infrarrojo.

Flujos EHV. En un artículo que publicamos en 1990 (Bachiller et al. *Astron. Astrophys.*) se dio cuenta del descubrimiento de proyectiles discretos («molecular bullets») proviniendo de protoestrellas muy jóvenes. Se trataba de flujos bipolares verdaderamente extraordinarios sumamente colimados y formados por eventos explosivos que tenían lugar cada 1.000 años. Este descubrimiento fue clave para unificar los flujos bipolares observados en radioastronomía (CO) con los «jets» (chorros muy colimados) observados en el óptico y en el infrarrojo.

5. Las protoestrellas más jóvenes: objetos de Clase 0

La clasificación inicial de los Objetos Jóvenes Estelares incluía tres clases, Clase I, II y III, describiendo estadios evolutivos progresivamente más avanzados. Pero en los primeros años 1990 se descubrieron algunos objetos que no cuadraban en esta clasificación. Presentaban una distribución espectral de la energía con gran

emisión en ondas milimétricas y submilimétricas. Esto, junto con una temperatura bolométrica excepcionalmente baja, indicaba que se trataba de los objetos más jóvenes identificados hasta la fecha: se denominaron proto-estrellas de «Clase 0» (André, Ward-Thompson y Barsony, 1993, ApJ 406, 122).

Mis trabajos durante los años 1990 demostrarían que estos objetos de Clase 0 son los que poseen flujos extraordinarios (Bachiller *et al.*, 1990, 19901, 1995, etc.). Tales jets sirven por tanto para identificar a las protoestrellas más jóvenes. Resulta paradójico que sea la eyección y no el colapso lo que sirve para detectar la formación de una estrella nueva. Pero el caso es que, en contraste con la idea estándar de que una protoestrella es un objeto en el que el gas se desploma hacia el centro por el efecto de la atracción gravitatoria, las protoestrellas se revelan ahora como complejos sistemas de acreción/eyección en los que los flujos bipolares son un componente fundamental.

Además los flujos bipolares se revelan así como una herramienta valiosa para estudiar la primera evolución estelar (pues las protoestrellas no son «visibles») y algunos atributos de estos flujos pueden dar una indicación del estado evolutivo de la protoestrella.

6. Fenómenos asociados a los flujos

Propagación. Las eyecciones protoestelares se propagan en el medio ambiente comprimiendo y calentando el gas. Las velocidades de las eyecciones son altamente supersónicas ($M > 100-1000$) y se generan ondas de choque en forma de arco.

Química. En el gas comprimido y calentado por el paso de las ondas de choque pueden desencadenarse procesos físico-químicos que no tienen lugar normalmente en el medio interestelar frío. La química de choques no sólo es interesante en Astrofísica, sino que se trata de una de las grandes ambiciones de la química industrial (López-Mateos, 2008, comunicación privada). En el medio interestelar, las ondas de choque pueden romper los granos de polvo interestelar e incorporar material «fresco» desde la fase sólida a la fase gaseosa. Además el incremento de temperatura puede hacer que se desencadenen fenómenos endotérmicos que normalmente no tienen lugar en el medio interestelar. Esta química de choques se traduce en unos fenómenos observacionales muy distintivos y espectaculares. Por ejemplo, el monóxido de silicio aumenta su abundancia en varios órdenes de magnitud y algo parecido sucede con el metanol y el formaldehído. Los flujos parecen pasar por un estadio de gran actividad química en el que estos fenómenos son particularmente espectaculares. Los flujos que se encuentran en esta fase se denominan «químicamente activos» (Bachiller *et al.*, 2001, *Astron. Astrophys.*, 372, 899).

Origen. X-winds frente a D-winds. ¿Cuál es el origen de los flujos bipolares? Es decir, dada una protoestrella rodeada de un disco de acreción rotante, ¿cuál es el mecanismo físico que dispara la eyección de materia a lo largo de un eje? Está bien aceptado que los chorros se lanzan gracias a la fuerza centrífuga a lo largo de las líneas de campo magnético, pero los detalles de este mecanismo son objeto de un intenso debate. La fuerza centrífuga se origina en la rotación del disco de acreción, y en última instancia es la acreción la fuente de energía de los jets (los jets consumen

es el 10 por 100 de la energía de la acreción). Naturalmente los jets resuelven el problema del momento angular, permitiendo evacuar buena parte de éste fuera de la protoestrella.

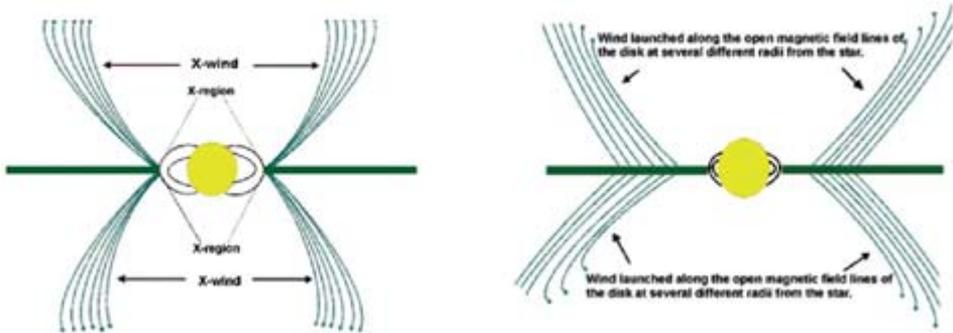


Figura 4. El origen último de los flujos bipolares es objeto de gran debate hoy día. Hay dos teorías principales: la del X-wind (izda.) y la del D-wind (viento del disco, dcha.). Ver texto para más detalles.

Aunque el proceso básico está bien comprendido, lo que causa mayor debate es el punto preciso desde el que se lanzan los chorros. Hay dos modelos principales: X-winds y D-winds. En un X-wind (Shu *et al.*) el material se acelera y se eyecta en la región en la que la magnetosfera estelar co-rrota con el disco (el punto X). Se trata de una región circular a unos cuantos radios estelares de la estrella. En un Disc-wind (Pudritz *et al.*) el viento se eyecta desde una región mucho más extensa, directamente desde la superficie del disco circunestelar.

En ambos modelos, el gas se mueve centrífugamente con una velocidad angular constante. Según se aleja de la estrella, su velocidad azimutal aumenta hasta que alcanza un valor tal que la tensión magnética contrarresta la fuerza centrífuga (por unidad de masa) y en ese momento las líneas magnéticas se distorsionan por la inercia del gas tomando una morfología toroidal. Este campo toroidal es lo que colimará el viento formando un auténtico «jet» a lo largo del eje del flujo bipolar.

7. El efecto de los flujos sobre la turbulencia

Las observaciones de regiones de formación estelar muestran que las estrellas nacen en grupos, a veces grandes grupos distribuidos por toda la extensión de una nube interestelar. Esto muestra que la fragmentación de la nube es un fenómeno dominante previo al colapso gravitatorio. Una vez que se forman los grupos de proto-estrellas comienzan a las eyecciones bipolares en cada una de ellas. Estos flujos bipolares se propagan en la nube ambiente mediante frentes de choque en forma de arco.

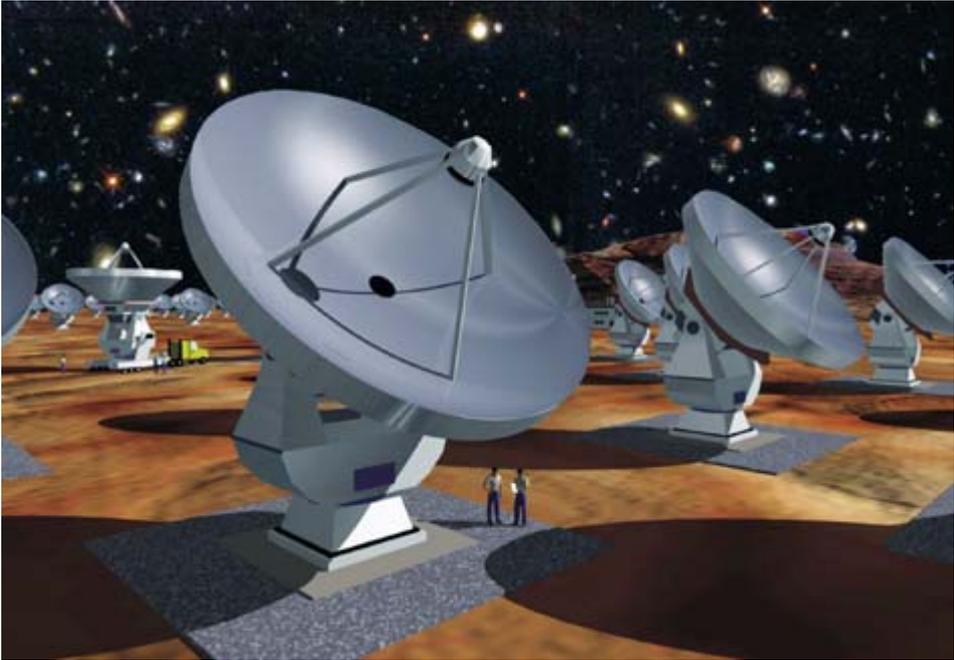


Figura 5. *Muchos fenómenos de la formación estelar pueden estudiarse adecuadamente gracias a las técnicas de la Radioastronomía. El proyecto del Gran Interferómetro de Atacama (proyecto ALMA) consiste en la construcción de un interferómetro de más de 70 antenas de altísima precisión en el desierto de Atacama (Chile), a unos 5.000 metros de altitud, en el observatorio astronómico más seco y de cielos más claros de todo el planeta. Este proyecto, el más ambicioso de la Astronomía a nivel mundial de los que se encuentran en construcción, cuenta con la participación de Norteamérica, Japón y varios países de Europa (entre ellos España).*

Estadísticas simples de nubes bien estudiadas muestran que cada elemento de volumen está sometido al efecto de los choques cada millón de años. Dado que la vida media de una nube molecular supera las decenas de millones de años, resulta que esencialmente cada parcela de gas sufre alguna vez el efecto de la propagación de los flujos, y es sometido a la inyección de turbulencia. Mientras esta generación de estrellas jóvenes se mantenga activa, las propias estrellas con sus vientos son la fuente de turbulencia que puede retrasar el colapso gravitatorio y las que causarán que la formación estelar se suspenda temporalmente.

La actividad en la formación estelar sólo podrá reiniciarse cuando esta generación de estrellas cese en su actividad de eyección de flujos. Cuando esto suceda, la gravedad podrá continuar nuevamente su cometido inexorable y ello llevará a una segunda generación de estrellas nuevas.

De esta forma la formación estelar se va autorregulando en las galaxias. Aunque una galaxia sea vieja como la nuestra, la formación estelar autorregulada hace que no todas las nubes colapsen en un corto periodo, sino que la formación estelar va manteniéndose en niveles discretos sobre periodos largos de tiempo, sobre esencialmente toda la edad del universo.

Así pues, naturalmente es posible tener estrellas jóvenes en galaxias viejas. Los flujos bipolares eyectados por las protoestrellas permiten dosificar y regular la formación estelar y no es necesario idear teorías para «rejuvenecer» estrellas viejas. Los objetos estudiados por von Weizsäcker en 1951 son estrellas realmente jóvenes. Los flujos bipolares pueden mantener la turbulencia interestelar resolviéndose así la paradoja de von Weizsäcker.

CONCLUSIÓN

Los flujos bipolares no sólo resuelven la paradoja de von Weizsäcker, también explican los valores de las masas estelares, resuelven el problema del momento angular y, en una palabra, son un ingrediente esencial sin el cual no podría llegar a cocinarse completamente una estrella.

El origen de las estrellas queda ahora mucho mejor comprendido que hace tan sólo veinte o treinta años, pero aún quedan muchos aspectos y refinamientos por estudiar. Para dichos estudios, los astrónomos dispondremos de unos medios sobresalientes: a nivel nacional destacaremos, entre los proyectos en los que está involucrado mi centro, el radiotelescopio de 40-m de Yebes, el telescopio espacial HERSCHEL y el gran interferómetro ALMA (el proyecto más ambicioso de la astronomía actual).

Con estas instalaciones sobresalientes es de esperar que tanto la teoría de la formación estelar como la teoría de la formación del universo sigan obteniendo este tipo de éxitos, éxitos que pueden calificarse como «gloriosos» tanto por la cantidad de observaciones como por la precisión de los detalles que pueden llegar a explicarse.

Y en este punto me gustaría volver a referirme al tema del origen del universo que mencioné al principio, pues es prácticamente imposible estudiar el origen de las estrellas sin plantearse el problema más básico del origen del universo. Al principio mencioné cómo el origen del universo, el origen de «todo», se asocia con «la Gran Explosión». Sin embargo, tal y como han señalado algunos cosmólogos, esta asociación no está completa y absolutamente justificada. La reconstitución hacia el pasado de la historia del universo no puede ser llevada hasta el hipotético punto cero en el que tanto las densidades, como las temperaturas y las energías se escapan completamente del marco de nuestra Física. El entramado de los efectos cuánticos y relativistas constituye una barrera infranqueable para nuestro conocimiento actual (la «barrera de Planck») tras de la cual ni el espacio ni el tiempo están bien definidos. Y sin espacio ni tiempo es imposible dar una descripción física. La reconstrucción del pasado no implica necesariamente ningún origen real, ninguna creación. En efecto, cuando el físico se enfrenta a la creación del tiempo ha de hacerlo necesariamente fuera del tiempo, lo cual es contradictorio y absurdo.

A pesar de estas limitaciones de la ciencia actual, es seguro que se descubrirán detalles mucho más minuciosos de la formación estelar. Incluso es posible que, gracias a modelos cosmológicos cada vez más sofisticados, se concluya sobre la unicidad (o no) del universo que nos planteábamos al principio de esta exposición. En resumen, la Astronomía seguirá obteniendo éxitos científicos sobresalientes.

Y ¿qué más se puede pedir además de todos esos éxitos gloriosos? Según el escritor y hombre político Jacques Duclos, «*la modestia* es el único esplendor que se

puede añadir a la gloria». Como científicos y como hombres que hemos constatado nuestra pequeñez frente al Cosmos, estamos obligados a ser humildes. Debemos estar satisfechos porque la astrofísica, la cosmología, la ciencia, puedan desvelarnos muchos detalles del universo, pero también hemos de ser conscientes de que ni la astrofísica, ni la cosmología, ni la ciencia, nos desvelarán jamás el secreto de la existencia del mundo, ni el misterio de su sentido, ni del lugar que nosotros, hombres, ocupamos en él.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo está basado en la conferencia que impartí el día 4 de junio de 2008 con motivo de mi ingreso como Académico Correspondiente en la Real Academia de Doctores de España. Deseo expresar mi gratitud a la Academia por acogerme, muy especialmente, al Doctor don Federico López Mateos por la presentación tan generosa que realizó de mi carrera y por haber avalado sin reservas mi candidatura. Mis más sinceras gracias también al resto de los Académicos, en particular a los de la Sección de Ciencias Experimentales, que refrendaron mi incorporación a esta institución que aglutina tantos saberes y tanta experiencia.

El texto completo de la conferencia —que tan sólo difiere ligeramente respecto del presente artículo— ha sido reunido junto con el texto de la presentación por el Doctor don Federico López Mateos y con las palabras de agradecimiento que pronuncié como introducción a mi conferencia en una separata que se encuentra disponible en la Biblioteca de la Academia, o mediante mera solicitud a mi dirección electrónica (r.bachiller@oan.es).