

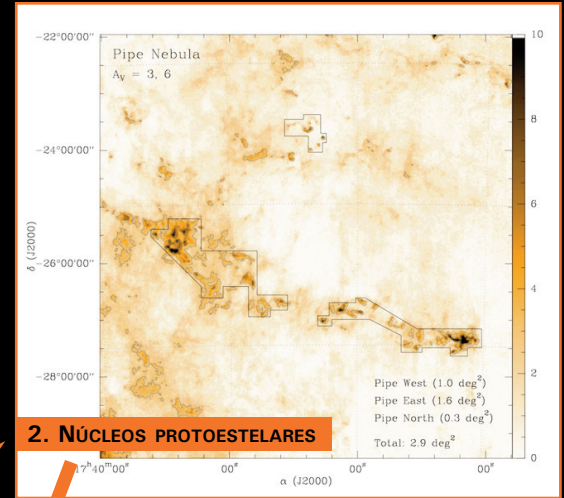
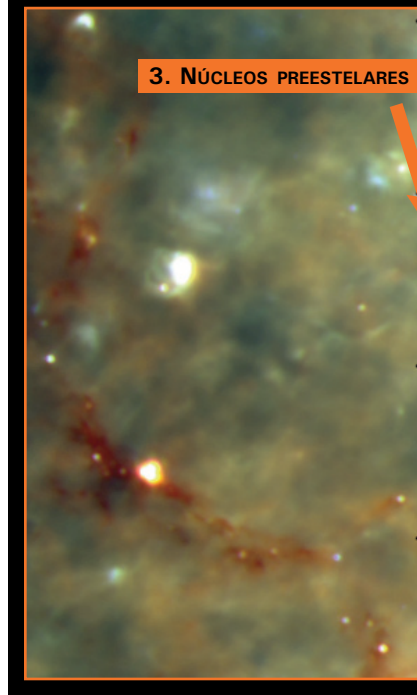
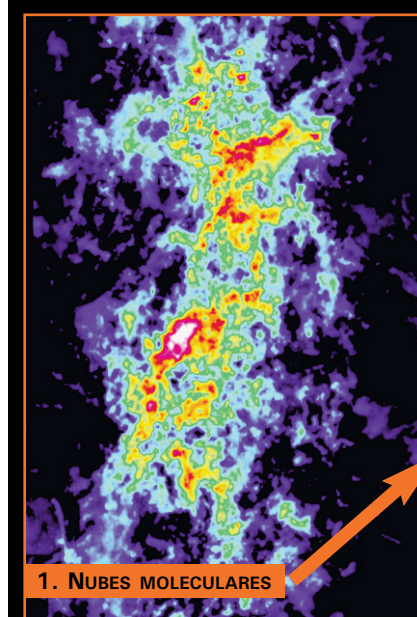
SEGREGACIÓN ESPACIAL EN NUBES MOLECULARES: ¿MASA O DENSIDAD?

Pilares científicos

Si dejamos a un lado la formación del universo como un todo, si ponemos aparte el objeto de estudio de la cosmología, el resto de la astronomía gira alrededor de la transformación de gas en estrellas, de la evolución y muerte de estas, retornando de nuevo el gas procesado al espacio interestelar, en un ciclo finalmente regido por las leyes de la termodinámica.

El conjunto de procesos físicos que llevan a una gran nube de gas a convertirse en un agrupamiento de estrellas es lo que denominamos formación estelar. En un esquema simple podemos diferenciar cinco fases desde la nube de gas molecular hasta la aparición de un cúmulo estelar visible en el rango óptico (ver imagen).

Las nubes moleculares gigantes, las que dan lugar a sistemas estelares, tienen masas entre diez mil y un millón de soles y temperaturas entre 10 y 30 grados kelvin (o entre -243 y -263 grados centígrados). La distribución interna de masa está lejos de ser uniforme, y presenta un alto grado de subestructura mostrando una geometría fractal. La física que domina esta fase es la magnetohidrodinámica. Perturbaciones internas o externas pueden romper el equilibrio de la nube y dar lugar a concentraciones de gas denso (núcleos protoestelares) distribuidos a lo largo de hilos que a su vez forman filamentos que, entretejidos, generan un complejo y transitorio tapiz natural. Cuando en un núcleo protoestelar la gravedad vence a la presión gaseosa y magnética se produce el colapso. La contracción gravitatoria calienta el gas y este empieza a emitir en infrarrojo, así notamos el primer llanto del recién nacido, el anuncio de la formación de un núcleo preestelar. Si la masa de este núcleo supera las trece masas de Júpiter tenemos una estrella. La física nuclear, el electromagnetismo y la termodinámica dominan esta fase a nivel individual y la primigenia nube de gas molecular (o lo que queda de ella) luce como un árbol de navidad en un salón oscuro tacho-



Imágenes de las distintas fases de la formación estelar.
Fuente (4): NASA/JPL-Caltech/E. Mercer (Boston University). (5a) NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), A. Nota (ESA/STScI), and the Westerlund 2 Science Team. (5b y c) ESA/Hubble y NASA.



nado por la emisión de las primeras estrellas recién formadas. Estamos viendo un cúmulo estelar embebido en el gas y solo observable en infrarrojo. A nivel individual cada estrella sigue un complicado modelo de formación, con acreción de material y generación de chorros y vientos estelares capaces de disipar el gas remanente y desvelar la nueva hornada a nuestros ojos. En ese instante, cada sistema estelar puede considerarse un conjunto de masas puntuales sometido a la mutua

interacción gravitatoria de sus componentes dentro de un potencial galáctico más suave y de mayor alcance espacial. El cúmulo estelar puede sobrevivir como un objeto bien definido, observable como una sobredensidad estelar en el campo, por períodos que van desde unos pocos millones hasta miles de millones de años, pero su destino está sellado, se disolverá finalmente en el disco galáctico formando un fondo uniforme mezclado con el resto de escombros de anterior-

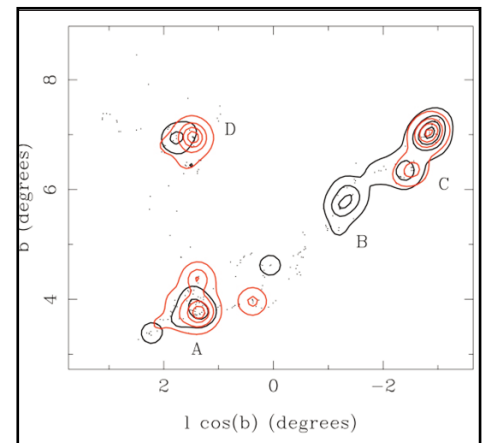
tos mecanismos físicos actuando a la vez en una interacción no lineal que resulta imposible establecer un cuerpo teórico coherente que nos permita siquiera atisbar una solución. ¿Estamos entonces en posición de descanso? Tampoco. Existe todo un programa científico completo para abordar la formación de cúmulos estelares que incluye desarrollos teóricos, simulaciones numéricas y observaciones a diferentes longitudes de onda que nos permitan establecer cotas empíricas a los diferentes aspectos fenomenológicos.

El grupo de Sistemas Estelares del IAA lleva trabajando varios años en la geometría de la formación estelar, en la búsqueda de patrones estructurales en el espacio fase de las diferentes etapas del proceso de formación de cúmulos que permitan establecer restricciones empíricas a los diferentes modelos teóricos propuestos para explicar la variada fenomenología observada.

A los físicos siempre nos han encantado los invariantes, esos observables de los sistemas naturales que en determinadas condiciones permanecen constantes a lo largo de toda su vida. Los principios de conservación del momento y la energía que estudiamos en la escuela secundaria son un ejemplo de lo que hablamos. En la formación de cúmulos estelares tenemos al menos dos invariantes empíricos. Las estrellas de un cúmulo recién nacido muestran una distribución de masa que parece seguir un modelo universal (la función inicial de masa); y la mayoría, por no decir todos los cúmulos jóvenes, con edades inferiores a diez millones de años, muestran una distribución espacial controlada por la masa de sus componentes, de tal forma que las estrellas masivas aparecen principalmente rodeadas de estrellas masivas. A este patrón espacial lo denominamos segregación de masa y se puede explicar por la dinámica estelar como un mecanismo de equipartición de la energía que necesariamente conlleva un tiempo de actuación. En algunos casos este tiempo dinámico es claramente superior a la edad de los cúmulos donde se ha observado este patrón. Así pues, esta teoría no puede explicar todos los casos, lo que conduce a la pregunta

de si la segregación de masa pudiera ser un fenómeno asociado, no a la dinámica de las estrellas sino a la magnetohidrodinámica del gas. En otras palabras, que tuviera un carácter primordial.

Para constatar esta hipótesis analizamos, en colaboración con Carlos Román Zuñiga de la UNAM (México), la distribución espacial de los núcleos gaseosos de la nebulosa de la Pipa. El 90% de ellos no emite en el infrarrojo,



Distribución de núcleos protoestelares de la Pipa en el plano galáctico. En negro los contornos de isodensidad de los cuarenta objetos más masivos, en rojo los de los cuarenta núcleos más densos. La densidad volumétrica muestra una mayor segregación espacial con tres grandes concentraciones en los extremos de los filamentos.

lo que parecería indicar que estamos observando las primeras fases del colapso de la nube. El análisis de la distribución espacial mostró una segregación por masa, corroborando así nuestra hipótesis, pero lo que resultó verdaderamente sorprendente fue encontrar que la principal variable que segregaba espacialmente los núcleos no era la masa, sino la densidad volumétrica de los nódulos (ver imagen superior).

Incertidumbres

El trabajo a seguir está bien definido: analizar si la segregación por densidad es el comportamiento habitual en las nubes moleculares de la vecindad solar, y estudiar qué mecanismo conlleva el paso de una segregación por densidad a una segregación por masa cuando las estrellas ya se han formado.

res sistemas estelares.

A la vista de este guión cualquiera podría pensar que está todo hecho. Bastaría con conocer las propiedades del gas molecular para, a partir de ahí y siguiendo las leyes de la física, deducir el momento de formación de las estrellas y las características fundamentales del sistema estelar recién nacido. Nada más lejos de la realidad. El proceso de formación estelar es un sistema complejo en el sentido científico y popular de la palabra. Hay tan-