

LA ESTRUCTURA ESPACIAL DE LA FORMACIÓN ESTELAR

Según el paradigma actual, la formación estelar tiende a ocurrir en los filamentos densos de grandes nubes moleculares y particularmente en sus intersecciones. El colapso de las nubes para formar estrellas y cúmulos es extremadamente complejo ya que sucede tanto a escalas espaciales grandes como pequeñas y está inseparablemente ligado a procesos turbulentos y de fragmentación.



(1,2) Marta González

marta.gonzalez-garcia@univ-grenoble-alpes.fr

Isabelle Joncour

Isabelle.Joncour@univ-grenoble-alpes.fr

Estelle Moraux

Estelle.Moraux@univ-grenoble-alpes.fr

(1) Institut de Planétologie
et d'Astrophysique de Grenoble

Ana Ulla

(2) Departamento de Física Aplicada,
Universidade de Vigo

ulla@uvigo.es

Además, la propia formación estelar es a la vez dependiente del medio e influye en el mismo a través de procesos de retroalimentación, particularmente cuando se forman estrellas masivas.

La naturaleza jerárquica de las nubes moleculares, que actualmente se describen mediante modelos multifractales, encuentra un paralelismo con las estructuras estelares, que desde sistemas binarios o múltiples hasta los super-complejos estelares, pasando por cúmulos y asociaciones, se encuentran anidados unos en otros. Estudiar los vínculos específicos entre las estructuras del gas y las estelares, requiere no solo una descripción robusta y objetiva, sino también evaluar la evolución dinámica de las estrellas. La población de objetos proto y pre estelares, dada su juventud, minimiza los efectos de esta evolución dinámica, y es la idónea para buscar posibles estructuras prístinas heredadas de la nube progenitora.

Recientemente los grandes cartografiados celestes proporcionan a la comunidad científica volúmenes de datos homogéneos en cantidad y calidad, permitiendo un estudio estadístico y sistemático de la distribución espacial de las estrellas. Esto requiere a su vez de técnicas robustas y homogéneas para describir y analizar los datos de la manera más objetiva posible, de modo que se explote todo su potencial.

A PEQUEÑA ESCALA: NESTS, LOS “NIDOS” DONDE SE FORMAN LAS ESTRELLAS

En este contexto hemos desarrollado S2D2 (*Significant, Small DBSCAN Detection* – González *et al.*, 2021), una herramienta para la búsqueda de subestructuras significativas a pequeña escala en una distribución estelar. Esto nos ha permitido construir un catálogo homogéneo y consistente de subestructuras significativas a pequeña escala de objetos estelares jóvenes en varias regiones de formación estelar en la vecindad.

Joncour *et al.* (2017, 2018) demostraron que estas pequeñas estructuras significativas (a las que llamaron NESTs, – *Nested Elementary Structure*) podían trazar las localizaciones preferentes de formación estelar en regiones prístinas. En efecto, los NESTs de Taurus contienen la mayoría de los objetos menos evolucionados (protoestrellas de clase 0) de toda la población de objetos estelares jóvenes en la región.

Además se superponen a los filamentos densos de gas molecular presentes, señalando efectivamente los “nidos” donde nacen las estrellas.

S2D2 constituye la implementación final, robusta y calibrada, del método de búsqueda de NESTs. Se trata de una herramienta de clustering que escoge los parámetros para el algoritmo DBSCAN (Ester *et al.*, 1996) utilizando estadística de vecinos cercanos para buscar subestructuras a pequeña escala, garantizando su nivel de significación. S2D2 está a disposición de la comunidad científica en varias implementaciones (<https://starformmapper.org>) y ha sido calibrado en cúmulos sintéticos con distribuciones espaciales subestructuradas, homogéneas y concentradas, produciendo resultados consistentes y robustos (González *et al.* 2021).

A GRAN ESCALA: MODOS DE FORMACIÓN ESTELAR

Durante la calibración de S2D2 se observó que los NESTs obtenidos en cúmulos de diferentes ca-

racterísticas presentaban ellos mismos diferentes distribuciones espaciales. Dicho de otro modo, los NESTs trazan la estructura significativa a gran escala presente en la muestra. Específicamente, se demostró que para distribuciones concentradas (que podrían representar por ejemplo un cúmulo abierto dinámicamente evolucionado) S2D2 típicamente recupera un NEST más grande y bien poblado, rodeado por un halo de ellos más pequeños.

Para estudiar la distribución espacial de los NESTs utilizamos el árbol de mínima expansión (MST) de los NESTs, utilizando como distancia la mínima entre los objetos de cada NEST. Al podar las ramas del MST mayores que un umbral asociado al tamaño de la región (específicamente un 25% del radio equivalente de la envolvente convexa), el MST se separa en árboles menores constituidos por agrupamientos de NESTs. Estos grupos definen las estructuras a gran escala presentes en la región, a las que nos referiremos como modos de formación estelar. En la Figura 1

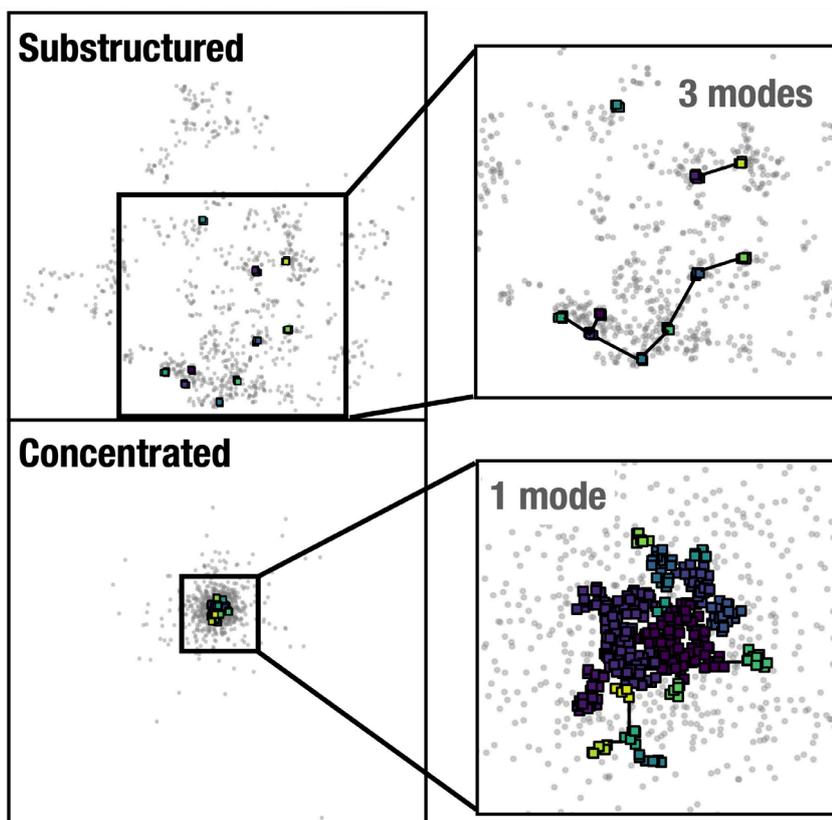


Figura 1. Ejemplo de los NESTs y modos recuperados en una región sintética subestructurada (parte superior) y en una concentrada (parte inferior). Los puntos grises representan las estrellas en las regiones, los cuadrados coloreados las estrellas que pertenecen a NESTs, y las líneas en los recuadros (aumentados) a la derecha, muestran las ramas del árbol de NESTs menores que el umbral.

se pueden ver los diferentes NESTs y modos obtenidos en una región sintética subestructurada, multimodal, y en una concentrada, unimodal.

CATALOGANDO LOS NESTS EN REGIONES VECINAS

Estamos ya en condiciones de comparar de forma justa la estructura espacial de regiones de formación estelar, construyendo un catálogo de los NESTs y modos de sus objetos estelares jóvenes. Para ello necesitamos contar con una muestra homogénea y consistente, como la proporcionada por los catálogos de los proyectos MYStIX (Feigelson *et al.*, 2013) y SFINCs (Getman *et al.*, 2017). Estos programas fueron diseñados específicamente para obtener la población de objetos estelares jóvenes de regiones formación estelar a distancias menores de 4 kpc de nosotros. Los miembros de las regiones se obtienen a partir de una combinación de fuentes con exceso IR, candidatos de rayos X, y una muestra de estrellas OB conocidas.

Encontramos 255 NESTs organizados en 68 modos en 37 de las 39 regiones que comprenden nuestra muestra inicial. En las dos regiones restantes no obtuvimos estructura con significación suficiente como para descartar que fuesen fluctuaciones aleatorias de una distribución homogénea de estrellas. Más de la mitad de las regiones con estructura significativa, 20, son unimodales, mientras las restantes 17 muestran subestructura compleja a gran escala con al menos dos modos de formación estelar significativa.

MODOS DE FORMACIÓN ESTELAR, GAS MOLECULAR Y ESTRELLAS MASIVAS

Ahora mostramos el potencial de los NESTs como herramienta de análisis, comparando la estructura significativa de nuestro catálogo con la distribución espacial de gas molecular y estrellas masivas.

En primer lugar, consideraremos que un modo de formación estelar está embebido en la nube natal si su envolvente convexa se superpone con el contorno del 99.5% de más intensidad de emisión de *Herschel* a 500 μ m (Pilbratt, 2010). Por ello, este análisis se limita a las 33 regiones presentes en el archivo de *Herschel*.

La influencia potencial de estrellas masivas es evaluada para cada modo comprobando si los programas MYStIX y SFINCs habían catalogado estrellas

OB en el área. Clasificamos los modos de formación estelar en cuatro tipos según estos criterios, como se muestra en la Tabla 1.

Tipo	Embebido	Estrellas masivas	Número de modos
T1	Sí	No	21
T2	Sí	Sí	11
T3	No	No	10
T4	No	Sí	15
Total			57

Tabla 1. Tipos de modos de formación estelar, clasificados como se describe en el texto.

Los modos de tipo T1 (embebido, sin estrellas OB) parecen trazar áreas de formación estelar activa de estrellas de baja masa y son el tipo mayoritario en regiones unimodales. En modos T4 (no embebidos, con estrellas OB) esperamos que las estrellas masivas hayan contribuido a la expulsión del gas, potencialmente obstaculizando la formación estelar a nivel local. A pesar de la presencia de estrellas masivas en los modos T2 (embebidos, con estrellas OB) hay todavía gas muy denso en el entorno, y en una fracción significativa de modos T3 (no embebidos, sin estrellas OB) hay una superposición visual con un filamento o estructura de gas, a pesar de que no se hayan alcanzado los límites de intensidad requeridos. La interacción específica entre protoestrellas, gas y estrellas masivas en modos T2 y T3 no está de todo clara y necesita ser individualmente evaluada.

La Figura 2 muestra ejemplos específicos de cada uno de los modos en la Tabla 1 en cuatro regiones. Las dos regiones de la izquierda, DR21 y Orión, son unimodales, y embebidas, mientras que en las regiones de la derecha, NGC2264 y M16 hay subestructura rica y compleja, con varios modos de tipos diferentes dentro de la misma región.

El modo más poblado de NGC2264, en el sur, se corresponde con las áreas de gas denso en la zona, mientras que en el norte las subestructuras son pequeñas, contienen estrellas masivas, y no se solapan con gas molecular. El retrato que obtenemos de M16 es diferente, el de una región más evolucionada en la que gran parte de la formación estelar ya se ha producido. Su modo más poblado está asociado a

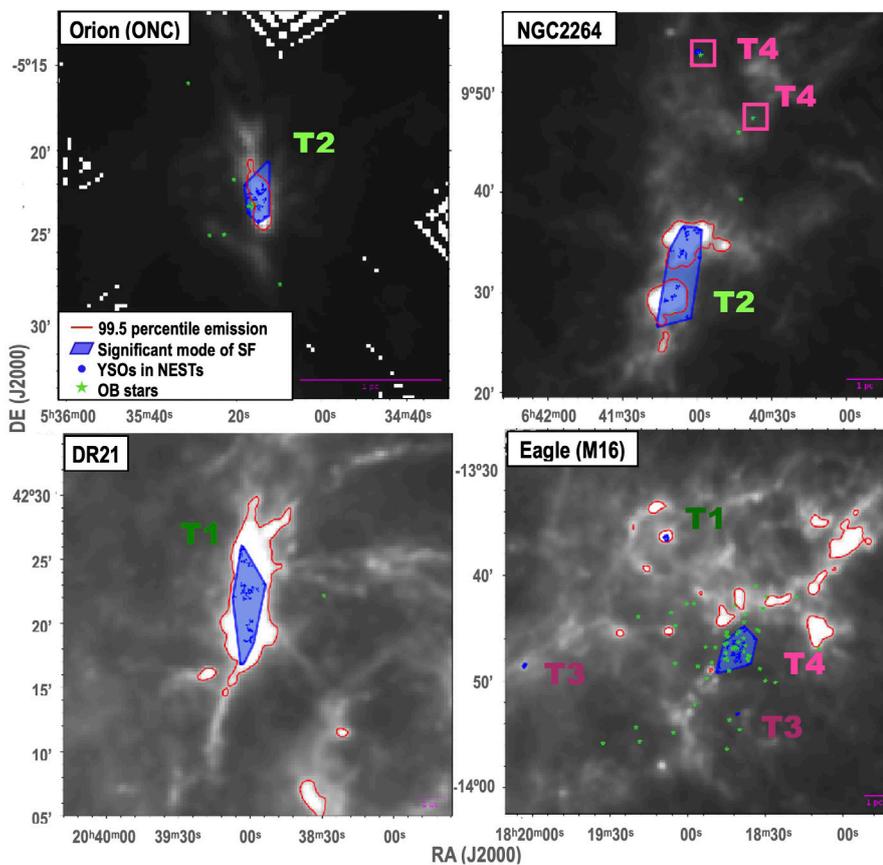


Figura 2. Modos significativos de formación estelar obtenidos en 4 regiones, superpuestos sobre la emisión de Herschel a 500 micras en escala de gris. La envoltura convexa de cada modo está representada como un polígono azul, y las estrellas en los NESTs de su interior como puntos azules. Las estrellas OB en la región están representadas en verde y en color rojo el contorno del percentil 99.5 en emisión. Cada modo está etiquetado según su tipo, como se explica en el texto.

numerosas estrellas masivas que probablemente han dispersado el gas de la zona. Los modos más pequeños de los alrededores se superponen con remanentes de gas molecular, que alcanzan mayores densidades hacia el norte.

La visión de estas regiones, obtenida a partir del análisis de la estructura significativa que hemos detectado, es consistente con el conocimiento obtenido por otros autores utilizando diferentes medios. Esto confirma el potencial de los NESTs como herramienta de análisis robusta y objetiva que nos permite estudiar la relación de los modos significativos de formación estelar con otras variables en su entorno. Hemos clasificado los modos de SF según su relación con el gas molecular y la distribución espacial de estrellas masivas, encontrando categorías que ayudan a entender la complejidad y variedad que la formación estelar puede mostrar incluso dentro de una única región. Una comprensión más profunda de las complejidades de la formación estelar requiere también estudiar

la relación de la estructura con otras variables, como el estado evolutivo de los objetos estelares jóvenes (González *et al.* en prep.) o su cinemática.

REFERENCIAS

- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. 1996, In Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD'96, pp. 226–231 (AAAI Press).
- Feigelson, E. D., Townsley, L. K., Broos, P. S., Busk, H. A., Getman, K. V., et al. 2013, *ApJS*, 209, 26.
- Getman, K. V., Broos, P. S., Kuhn, M. A., Feigelson, E. D., Richert, A. J. W., et al. 2017, *ApJS*, 229, 28.
- González, M., Joncour, I., Buckner, A. S. M., Khorrami, Z., Moraux, E., et al. 2021, *A&A*, 647, A14.
- Joncour, I., Duchêne, G., & Moraux, E. 2017, *A&A*, 599, A14.
- Joncour, I., Duchêne, G., Moraux, E., & Motte, F. 2018, *A&A*, 620, A27.
- Pilbratt, G. 2010, In JENAM 2010, Joint European and National Astronomy Meeting, p. 149.