

# SEMANA DE ASTRONOMÍA 2011

**Tonatiuh Matos Chassin / Carlos Román Zúñiga**  
**Mónica Rodríguez Guillén / Guillermo Arreaga García**  
**Silvio Oreste Topa / Luis José Corral Escobedo**



**Editores:**  
**Luis José Corral Escobedo**  
**Silvana G. Navarro Jiménez**



## *Semana de Astronomía 2011*

### **Editores:**

*Dr. Luis José Corral Escobedo*

*Dra. Silvana G. Navarro Jiménez*

*Primera edición*

Copyright © 2013

ISBN:            Pasta suave    978-607-8193-55-4  
                     Ebook            978-607-8193-56-1

Esta obra no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, por ningún medio conocido o por conocer, sin la autorización previa y por escrito del titular del derecho de autor.

*Impreso y hecho en México / Printed and made in Mexico*

## Contenido General

Presentación	5
<i>Dr. Luis José Corral Escobedo</i>	
<i>Dra. Silvana G. Navarro Jiménez</i>	
La Versión Científica del Génesis	7
<i>Tonatiuh Matos Chassin</i>	
Gestación e Infancia de las Estrellas	41
<i>Carlos Román Zúñiga</i>	
Polvo interestelar: los orígenes del universo sólido	75
<i>Mónica Rodríguez Guillén</i>	
Simulaciones Numéricas de la formación de proto-estrellas	109
<i>Guillermo Arreaga García</i>	
<i>Silvio Oreste Topa</i>	
Nuestro vecindario galáctico	145
<i>Luis José Corral Escobedo</i>	



## **Presentación**

**E**n septiembre de 2011 se realizó en la ciudad de Guadalajara el XXIV Congreso Nacional de Astronomía (CNA), organizado por el Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara.

Las actividades del Congreso se llevaron a cabo durante cuatro días, en los cuales, cerca de 250 participantes, presentaron ponencias y carteles sobre sus actividades de investigación. Paralelamente al CNA se realizaron, durante esa semana, conferencias de divulgación, en diferentes foros, dirigidas a estudiantes universitarios y al público en general. En ellas, investigadores de las instituciones participantes, hablaron de temas en los que son expertos y presentaron diversos temas astronómicos. Hubo así conferencias sobre el origen del universo, la evolución de las galaxias, la formación estelar, la búsqueda de vida inteligente en la galaxia, entre otras. Algunas de estas conferencias son la base de los textos que presentamos en este libro.

Se ha tratado de que los autores conserven el orden de los temas que trataron en sus charlas, así como las imágenes ilustrativas y el lenguaje sencillo, sin descuidar la precisión y corrección de los textos. Se buscó, por tanto, que los conceptos, aunque se expliquen de manera coloquial, se apeguen siempre a una correcta interpretación científica para que cualquier persona pueda lograr un entendimiento del tema en cuestión.

Este libro forma parte de las actividades previstas en el Proyecto de Difusión “Semana de Astronomía 2011”, financiado por el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco.

*Semana de Astronomía 2011*

co (COECYTJAL) y la Universidad de Guadalajara, a quienes agradecemos todo su apoyo.

Guadalajara, Jalisco. Mayo de 2013

*Dr. Luis José Corral Escobedo*

*Dra. Silvana G. Navarro Jiménez*

Editores

## *Tonatiuh Matos Chassin*

---

CINVESTAV



**E**s egresado de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional. Obtuvo el Doctorado en Física Teórica en la Universidad Friedrich-Schiller de Jena, Alemania en 1987 y recibió su Habilitación en Astrofísica en la misma universidad en 1988.

Realizó estancias posdoctorales en la Universidad de Wien y la Universidad Técnica de Wien. Ha sido profesor visitante de diversas instituciones entre ellas, el Instituto Albert Einstein de la Sociedad Max Planck y la Universidad de British Columbia, en Canadá.

Fue el Vicepresidente fundador de la División de Gravitación y Física Matemáticas de la Sociedad Mexicana de Física (1992) y su Presidente en 1995. Es el Secretario General fundador del Instituto Avanzado de Cosmología desde el 2007.

Ha publicado más de 100 trabajos en revistas de investigación internacionales y 40 en memorias de congresos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores en su nivel III.

Ha supervisado 12 tesis doctorales. Una de ellas recibió el premio Arturo Rosembueth a la mejor tesis del CINVESTAV y otra recibió el premio Weizmann otorgada por la Academia Mexicana de Ciencias y la Asociación Mexicana de Amigos del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel.

Sus intereses académicos incluyen el estudio de la Materia y Energías Oscuras, la Astrofísica Teórica y la Cosmología.



## *La Versión Científica del Génesis*

Tonatiuh Matos

Todas las civilizaciones del mundo generan una cosmogonía, es decir, una manera de explicar su origen. Uno de los enigmas que los seres humanos consideramos de primordial importancia es justo este, dar una respuesta a las preguntas:

¿De donde venimos?

¿Quiénes somos?

¿Qué hacemos aquí?

¿Para que estamos aquí?

¿A dónde vamos?

Lamentablemente muchas de estas cosmogonías se han perdido por diferentes razones. Por ejemplo, la cosmogonía desarrollada por los antiguos europeos fue quemada por hordas de cristianos en la biblioteca de Alejandría a fines del siglo IV. Esta biblioteca concentraba el mayor acervo de papiros conteniendo todo el conocimiento de la historia antigua, ahí estaban los papiros de todos los sabios griegos, romanos, egipcios, etc. Ese lugar era la máxima casa de estudios de Europa en su tiempo. Algo semejante sucedió en Centroamérica a mediados del siglo XVI, el 12 de julio de 1562 el cura católico fray Diego de Landa, en un acto llamado auto de fe de Maní, quemó todos los códices Mayas. Al igual que los cristianos en Alejandría, de Landa destruyó en una noche más de dos mil años de pensamiento, de observaciones astronómicas, de conocimiento herbolario y medicina, de filosofía y matemáticas, de la cosmogonía Maya. A partir del siglo XVI Europa conquistó casi todo el mundo, generalmente destruyendo las civilizaciones que dominaba, imponiendo su ideología cristiana.

El cristianismo basa su cosmogonía en su libro sagrado, la Biblia, en donde se afirma que el mundo fue hecho en siete

días. También se afirma que Dios, el creador del universo, hizo al hombre a su imagen y semejanza. Este enorme privilegio estaba de acuerdo con un modelo cosmológico ideado por el sabio griego *Klaudios Ptolemaios*, figura 1., también llamado Ptolomeo a inicios de la historia antigua, antes de iniciarse la era cristiana. Siendo director de la biblioteca de Alejandría, propuso que los movimientos de los astros se pueden explicar si la Tierra es el centro del universo y alrededor giran todos los astros que vemos en diferentes bóvedas concéntricas. En la primera bóveda gira la luna, en la segunda el Sol, en las siguientes cada planeta, en una más fija la estrella del norte y en la última, todas las estrellas inmutables del Universo, (figura 2). Ese modelo explicaba muy bien el Universo observado y además, estaba muy de acuerdo con la ideología cristiana. Si el hombre está hecho a imagen y semejanza de Dios, debe ser el centro del Universo. Esta imagen del Universo se mantuvo durante 1400 años, no se sabe de alguien que la pusiera en duda.

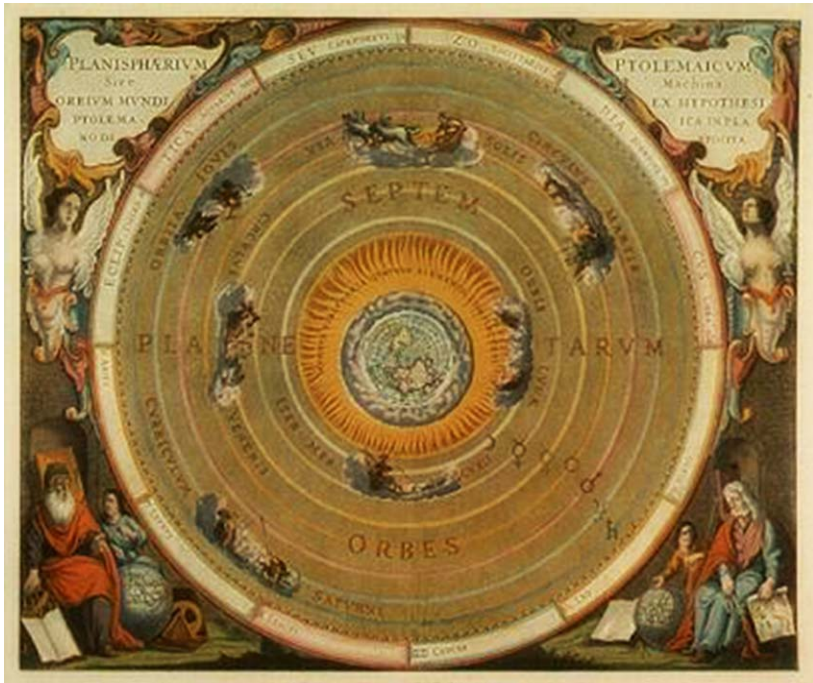


*Figura 1. Ptolomeo, 100 – 170. Wikipedia.*

Pero a mediados del siglo XVI, el canónigo de la Catedral de Frauenburg, de Polonia, Mikolaj-Kopernik (figura 3), también llamado Nicolás Copérnico, propuso que de igual manera, el movimiento de los planetas podía explicarse si el Sol está en el centro del Universo y no la Tierra. Este modelo tenía la ventaja de poder explicar mejor el movimiento de retroceso que tenían los planetas. Se sabía que los planetas avanzan a lo largo de la bóveda celeste durante un tiempo, pero después retroceden formando una trayectoria que asemeja flor de Liz. Copérnico murió en 1543, unos meses después de publicar su libro *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (de las revoluciones de las esferas celestes), por lo que ya no fue capaz de discutir sus resultados con los pensadores del momento, ni con la iglesia dominante.

Poco tiempo después, los reinos de Sajonia y sus alrededores se vieron convulsionadas por la revolución Luterana. Martin Luther era profesor de teología en la universidad de Wittenberg, en Alemania y puso en entredicho algunos de los preceptos y costumbres de la iglesia católica de su tiempo. Luther se casó con Catalina de Bora en 1525, iniciando un nuevo precepto para los matrimonios de sacerdotes cristianos. Poco tiempo después, el profesor de la universidad de Graz, Johannes Kepler (figura 6), se dio cuenta que el modelo de Ptolomeo no ajustaba adecuadamente a sus observaciones del movimiento de los planetas. En esa época de cambios, proponer algo nuevo no era anormal y Kepler decidió estudiar el modelo de Copérnico para ajustar mejor sus observaciones sobre el movimiento de los planetas. En este modelo el Sol se encuentra en el centro del universo y los planetas giran a su alrededor en órbitas circulares, ya que los círculos son las curvas más perfectas de las matemáticas y si Dios es perfecto, estas tenían que ser las órbitas que el escogió para este movimiento. Kepler necesitó más y mejores observaciones, por lo que en 1600 visitó a Tycho Brahe, un astrónomo aficionado, matemático real de Rodol-

fo II, quien tenía una serie de datos muy exactos y de mucha duración de los movimientos de los planetas. Después de varios años de trabajo, Kepler se dio cuenta que las órbitas circulares no podían explicar bien los movimientos de los planetas, por lo que cambió los círculos por elipses. Esto le dio la clave para desarrollar un nuevo modelo, mucho más exacto que el de Ptolomeo y que explicaba mejor el movimiento de los planetas.



*Figura 2. Modelo geocéntrico de Ptolomeo. Wikipedia.*

Kepler enunció sus tres famosas leyes en 1609, con las que pudo predecir el movimiento de Venus con gran exactitud y confirmar su modelo con órbitas elípticas. Sus tres leyes son las siguientes:

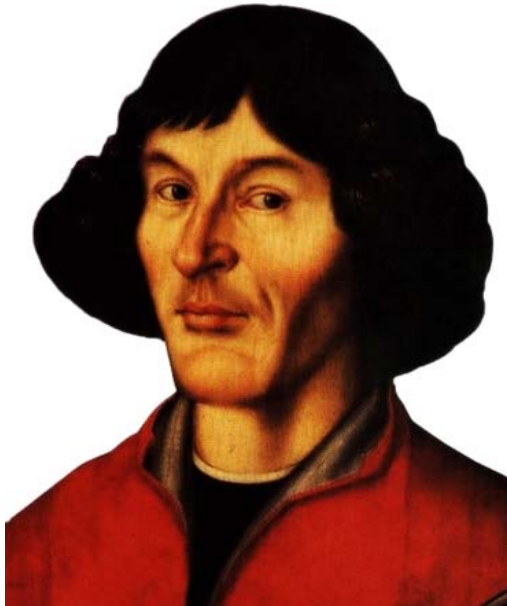
1. Los planetas giran en órbitas elípticas alrededor del Sol.

2. Las distancias de los planetas al Sol al cubo, es proporcional al cuadrado de sus masas.
3. Los planetas recorren áreas iguales en tiempos iguales (figura 7).

Esta fue la primera vez que tres enunciados simples podían explicar el movimiento de los objetos del cosmos con extraordinaria exactitud. Tres leyes sencillas que explican excelentemente el movimiento de todos los astros del cielo. Inmediatamente surgió la idea de si era posible formular leyes sencillas que nos expliquen todo los fenómenos del universo. Para muchos esto se podía formular así: ¿es posible entender el pensamiento de Dios?

Casi al mismo tiempo, pero en Italia, un joven estudioso en la universidad de Pisa llamado Galileo Galilei (figura 4), descubrió la ley de la inercia. Cuenta la leyenda que Galileo realizó un experimento muy ingenioso. Se subió a la torre inclinada de Pisa y desde ahí dejó caer dos cuerpos pesados. Para entender el experimento, vamos a recordar una experiencia que todos hemos tenido. Cuando vamos montados en un transporte, por ejemplo en un autobús o un auto, sentimos una fuerza que nos jala según sea el movimiento. Si el auto acelera, sentimos que la fuerza es hacia atrás, pero si enfrena, la fuerza es hacia delante. Es la razón por la que el cinturón de seguridad es tan importante, en caso de una frenada súbita y violenta, el cinturón impide que choquemos con el parabrisas. A esta fuerza se le llama inercia y es consecuencia exclusivamente del movimiento, es la oposición a que un cuerpo cambie su estado de movimiento. Si estamos parados esta fuerza se opone a que avancemos, si estamos en movimiento a que nos detengamos. Es muy diferente a otras fuerzas, por ejemplo, a la de gravedad. La fuerza de gravedad la sentimos todo el tiempo, porque estamos montados en el planeta Tierra, somos parte de él. Si nos lanzamos de un edificio de 20 pisos, la fuerza de gravedad hará que nos estrellamos contra el planeta Tierra, contra el suelo, a gran

velocidad. Es un choque entre nosotros y el planeta. Es una fuerza siempre atractiva y que actúa sobre todos los fuerza siempre atractiva y que actúa sobre todos los cuerpos, sobre todo lo que existe, no importa su estado de movimiento. La pregunta que se hizo Galileo es: cual es más fuerte, la fuerza de gravedad o la de inercia. La pregunta es sumamente interesante por lo siguiente, imaginen que quieren mover con las manos un auto. Si este es un auto pequeño, seguro con un empujón logran moverlo, si es uno grande les costará un poco de mas trabajo, pero si es un *trailer*, seguro necesitarán ayuda. Es decir, entre más grande sea la masa del cuerpo, tiene más inercia, nos cuesta más trabajo moverlo o detenerlo. Según esta lógica, si la fuerza de gravedad es constante y la misma para todos, a la Tierra le va a costar más trabajo mover un gordito que un flaquito.



*Fig. 3. Nicolás Copérnico 1473 – 1543. Wikipedia.*

Sin embargo, la fuerza de gravedad es mayor para las masas mayores, eso quiere decir que al gordito lo jala la Tierra con mayor fuerza que al flaquito. Pero quien gana, ¿la fuerza de gravedad o la de la inercia? La pregunta que Galileo se hizo es: ¿cuál de los dos cae más rápido, el gordito o el flaquito? Al dejar caer los dos cuerpos pesados, uno pequeño y uno grande, Galileo experimentó algo inesperado. Todos pensarían que el cuerpo más grande cae primero, pues es atraído por la fuerza de gravedad de la Tierra con mayor fuerza, aunque tiene mayor inercia. Pero no fue así, tampoco sucedió que el menor de los cuerpos llega primero, por tener menos inercia. El resultado fue que los dos llegan al mismo tiempo. Algo inesperado, incluso contrario a lo descrito por Aristóteles. Es decir, si yo aumento la masa de un cuerpo, este aumenta su inercia, me cuesta más trabajo moverlo, pero también aumenta su gravedad. Lo que dice el experimento es que la fuerza de gravedad aumenta en la misma proporción que la de la inercia. Entonces Galileo formuló el principio de equivalencia que dice que la masa inercial y la masa gravitacional son equivalentes. Esta formulación tendrá consecuencias muy importantes para formular la teoría general de la relatividad de Einstein.

Por otro lado, Galileo mejoró un nuevo instrumento de la época construido utilizando espejos modificados y unos tubos de metal. Con este invento llamado telescopio (figura 5), él pudo agrandar los objetos alejados. Cualquiera otro individuo hubiera utilizado este aparato en otra cosa. Los militares lo usaron para ver los movimientos de sus enemigos, otros lo usaron para espiar a sus vecinos, lo genial de Galileo es que él lo usó para ver las estrellas. Aristóteles había formulado que el cielo hecho por Dios tenía que ser perfecto más allá de la Luna, y Ptolomeo afirmó que todos los cuerpos giraban alrededor del centro del Universo, la Tierra.



*Fig. 4. Galileo Galilei 1564 – 1642. Wikipedia.*

Pero al enfocar Galileo su telescopio a Júpiter observó que alrededor de este planeta giraba varios otros astros, como alrededor de la Tierra. ¿Cómo es posible que haya objetos que no giren alrededor de la Tierra? Entonces la Tierra no es el centro de todo, Júpiter es el centro de otro Universo y luego observó Marte y así, llegó a la conclusión de que la Tierra no podía ser el centro de todo, el centro del Universo. La misma conclusión a la que había llegado Kepler en Alemania. Esta afirmación casi le costó a Galileo el morir quemado en la hoguera por la santa inquisición. Pero la condena fue reducida a prisión perpetua, afortunadamente.

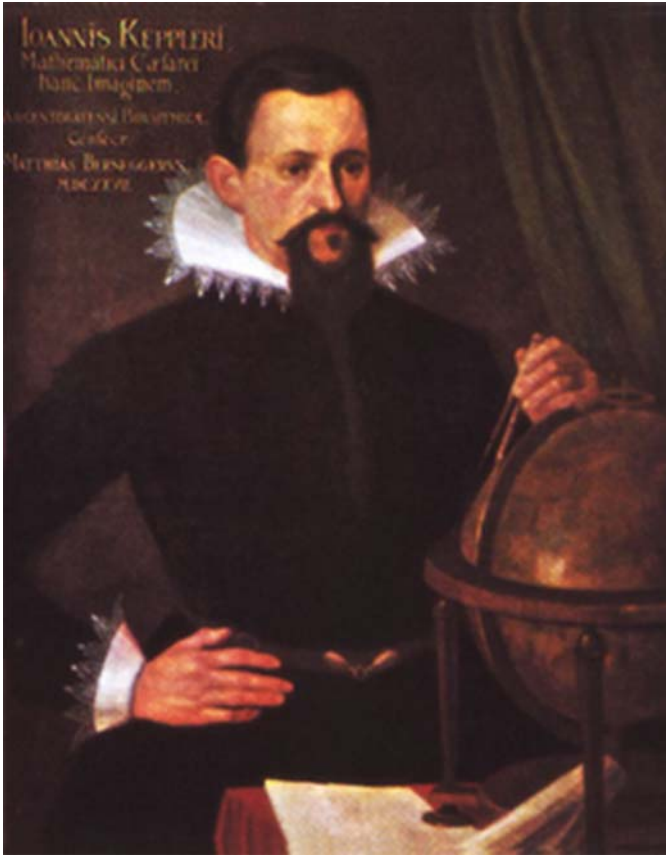




*Fig. 5. Telescopio usado por Galileo Galilei. Wikipedia.*

En el siglo XVII, un joven matemático inglés llamado Isaac Newton (figura 8), y un filósofo alemán llamado Gottfried Leibniz dieron otro paso fundamental en el estudio de las leyes de la naturaleza y en el entendimiento de estas leyes. Newton conocía bien las leyes de Kepler y se preguntó si era posible unir estas leyes en una sola. Ambos excelentes matemáticos diseñaron una nueva teoría matemática del movi-

miento llamada cálculo diferencial. Con esta teoría, Newton fue capaz de formular las leyes de Kepler matemáticamente de una forma simple. Más aún, cuenta la leyenda que un día Newton estaba sentado en el campo a la sombra de un árbol de manzanas. Estaba inmerso en sus pensamientos sobre el movimiento de los astros en el cosmos, sobre el movimiento de los planetas alrededor del sol, preguntándose sobre la fuerza que mantiene a los planetas atados al sol, cuando una manzana cayó del árbol que le daba sombra y lo golpeó en la cabeza. Este golpe le iluminó e inmediatamente se preguntó ¿por qué se cayó la manzana? ¿No será que la fuerza que mantiene a los astros atados al sol es la misma que la que hizo que la manzana me cayera en la cabeza? Esta simple conclusión condujo a Newton a un descubrimiento muy importante: las fuerzas entre los astros y las estrellas y las manzanas en la Tierra son la misma. Con esta deducción, Newton unió las fuerzas celestes con las fuerzas terrestres. Matemáticamente esto se formula como  $ma = F$ , y quiere decir, que el producto de la masa de un cuerpo por su aceleración, es igual a su fuerza. Esta fórmula tan simple es capaz de explicar el movimiento de las estrellas alrededor de la galaxia; de los planetas alrededor del sol; de las lunas alrededor de los planetas; de las manzanas que se caen de un árbol.



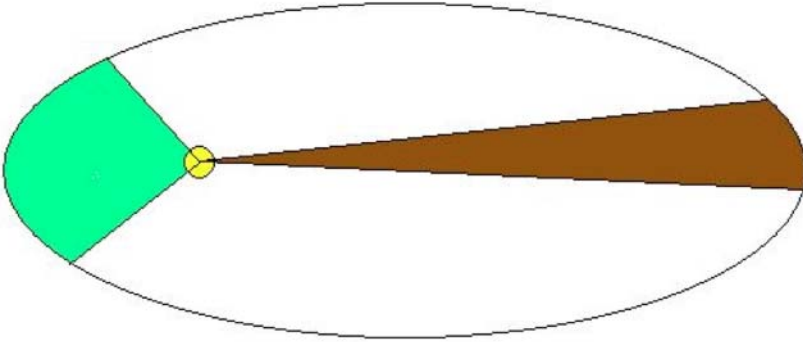
*Fig. 6. Johannes Kepler. Wikipedia.*

Una fórmula tan simple es capaz de explicar todo el movimiento del universo. Esta fórmula se puede derivar de las leyes de Kepler. Esta fórmula simple, conjuntamente con el conocimiento de termodinámica de la gente en esa época, son la base de la revolución industrial. Son la base de lo que conocemos como la modernidad.

Antes de la revolución industrial todos los objetos se fabricaban como se hacen en México, artesanalmente. Un artesano fabricaba unos metro de tela con su telar, dos días después fabricaba otros y así. Con la revolución industrial,

una máquina fabrica en una hora lo mismo que cientos de artesanos hacen en uno días. Con un ferrocarril, una máquina transporta en unas horas lo que antes miles de mulas transportaban en muchos días. O un barco de vapor podía ir sin problemas en contra del viento y arremeter contra cientos de barcos de vela sin problemas. Incluso los barcos se podían fabricar de metal, mucho más resistentes que los barcos de madera. Con esta tecnología surgida de la fórmula de Newton y un poco más, Europa se convirtió en la zona geográfica más rica del mundo y lo conquistó todo, con su poderío económico y militar. Esta es la consecuencia de leyes surgidas para entender el movimiento de los astros alrededor del sol.

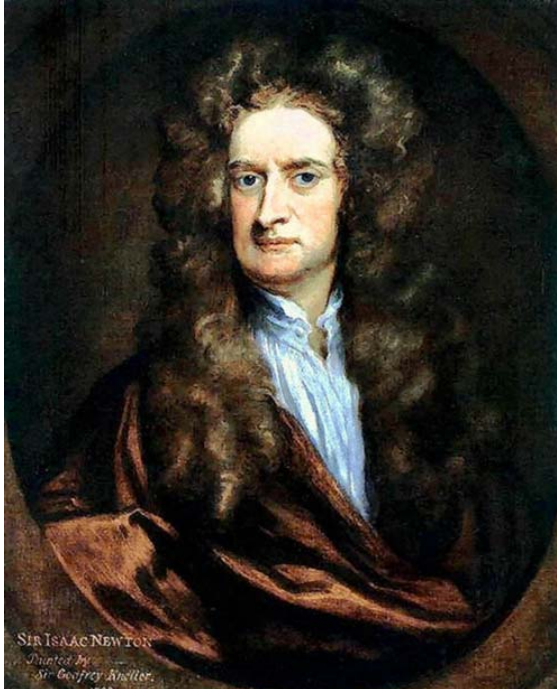
El universo emanado de la teoría de Newton es muy distinto al formulado por Ptolomeo. Para Newton los planetas y estrellas están gobernadas por la fuerza de gravedad combinada con la ley de la inercia, en un equilibrio magnífico. La Tierra gira alrededor del Sol, atraídos por su fuerza de gravedad, pero la inercia de su movimiento contrarresta la fuerza de gravedad creando un equilibrio aparentemente eterno. Pero las estrellas en el firmamento parecen estar quietas, sin movimiento. Entonces, ¿cómo es que la fuerza de gravedad no las colapsa? Newton llegó a la conclusión de que para que eso no pase, el Universo tenía que ser infinito en el espacio y en el tiempo. Veamos esto, imaginen que existen dos estrellas, para que estas no se colapsen, debe haber dos estrellas más al lado de cada una y en posición opuesta que contrarreste la fuerza de gravedad de las dos primeras. Pero ahora debe haber otra vez dos más que hagan lo mismo con las anteriores y así hasta el infinito. Si existe un número infinito de estrellas, estas podrían permanecer en equilibrio, pero debieron haber sido puestas ahí hace un tiempo infinito. Es decir, para Newton el Universo es un ente infinito en el espacio y en el tiempo.



**Fig. 7. Tercera ley de Kepler: : Los planetas recorren áreas iguales en tiempos iguales.**

La concepción Newtoniana del universo se mantuvo hasta el siglo XX, cuando se gestó una nueva revolución del pensamiento. En 1905, un joven alemán llamado Albert Einstein (figura 9), trabajaba en la oficina de patentes de Berna, en Suiza. Desde ahí formuló un nuevo concepto que a los científicos de su tiempo les costaría algún tiempo de entender y de apreciar su importancia. Einstein formuló que el espacio y el tiempo no eran entes separados, sino que forman un sistema conjunto llamado el espacio-tiempo, y a su vez explicó que cada objeto tiene su espacio tiempo propio, que puede ser compartido o no por otro cuerpo. Usando estas ideas, poco tiempo después en 1915, formuló que la fuerza de gravedad no existe, sino que esta es una manifestación de la curvatura, de la modificación del espacio-tiempo, por la que los cuerpos viajan por sus trayectorias mínimas, llamadas geodésicas. Un concepto matemático verdaderamente genial, que al ser comparado con los fenómenos del Cosmos correspondía muy bien con lo observado. La primera correspondencia la dió el astrónomo inglés Arthur Eddington en 1919. El Concluyó que si el espacio tiempo se curva, como afirmaba Eins-

tein, un rayo de luz que pasara en una trayectoria cercana al Sol debería desviarse antes de llegar a la Tierra. Eddington se propuso entonces observar estrellas cuya trayectoria de luz pasara muy cerca del Sol, luego esperar unos meses para ver las mismas estrellas desde otro ángulo y ver si en realidad la luz de estas estrellas se había desviado verdaderamente. Para poder ver estas estrellas es necesario ocultar la luz resplandeciente del Sol, de otra forma el enorme resplandor del sol no permitiría poder ver las estrellas que se encuentran en la dirección cercana a su corona. La idea es esperar a que ocurra un eclipse de Sol para que la Luna sea la que tape el resplandor del Sol y permita ver las estrellas justo detras de la corona. Para hacer esto, Eddington viajó al emisferio sur en donde sabían que uno de estos eclupses ocurriría. Subió su telescopio a una montaña, tomó varias fotografías en el momento del eclipse, justo en el momento en que las estrellas alrededor del Sol podían verse. Luego esperó unos meses, tomó de nuevo una foto de la misma región del cielo que antes, pero ahora sin la presencia del Sol y comparó. El resultado es que las estrellas se encontraban desplazadas con respecto a su posición con la presencia del Sol.



**Fig. 8.** *Isaac Newton 1642 – 1727. Wikipedia.*

La luz no tiene masa, por lo que la teoría de Newton no era capaz de explicar este desplazamiento, por eso el resultado fue que Einstein tenía razón. Esta confirmación de la teoría de Einstein, incluso por un inglés, le dio a la teoría de Einstein mucha credibilidad. Poco a poco surgieron nuevas observaciones confirmando las predicciones de la teoría general de la relatividad de Einstein. Esto implica que de verdad la gravedad es la manifestación de la curvatura del espacio-tiempo provocada por la presencia de un cuerpo, con o sin masa.

Pero ahora es importante ver cuales son las consecuencias de la teoría de Einstein en cuanto al origen del Universo. Curiosamente, Einstein era de la opinión de que el universo era infinito en el espacio y en el tiempo, como lo había pro-

puesto Newton. Además, todo parecía indicar en ese tiempo que las estrellas se mueven fijas en la bóveda celeste. Sin embargo, las ecuaciones emanadas de la teoría de Einstein implicaban siempre que el universo es dinámico, algo que Einstein no quería aceptar. Este hecho es debido a que la fuerza de gravedad es siempre atractiva, esto implica que si el universo no está en movimiento, la fuerza de gravedad va a atraer a toda la materia que existe y la va a llevar a un solo punto. Para contraponer el carácter atractivo de la fuerza de gravedad, Einstein le agregó un nuevo término a sus ecuaciones, una constante que el mismo llamó la constante cosmológica. Esta constante es como una fuerza geométrica que contrapone la fuerza de gravedad, de tal forma que equilibra a la fuerza gravitacional permitiendo un universo sin movimiento, como él quería. Pronto se demostró que este universo no podía existir por mucho tiempo, cualquier perturbación en este universo provocaría un desequilibrio que lo colapsaría hacia un punto. A principios de los años 1920's, un científico ruso llamado Alexander Friedmann (figura 10), demostró que las ecuaciones de Einstein implicaban que el universo estaba en expansión. Independientemente de Friedmann, el sacerdote católico belga Georges Lemaître llegó a la misma conclusión. Einstein mantuvo una larga discusión por carta con ambos investigadores, afirmando que estos resultados no eran físicos. Pero entonces hubo otra sorpresa. A finales de los años 1920's, el abogado y astrónomo norteamericano Edwining Hubble, usando el telescopio más grande del mundo de aquella época encontró, que las galaxias entre más lejanas, tenían un corrimiento al rojo cada vez mayor de su espectro.





*Fig. 9. Albert Einstein 1979 – 1955. Wikipedia.*

Esto implicaba que las galaxias más lejanas se alejan de nosotros cada vez más rápido. Un análisis sencillo de esta observación implica que el universo, todo, está en expansión. Einstein visitó a Hubble en Monte Wilson para ver este fenómeno, después de una semana Einstein quedó convencido de que el universo no es estático, sino se expande, es dinámico, justo como sus ecuaciones lo predecían. Este se considera uno de los descubrimientos más importante de la cosmología moderna. Einstein consideró en este momento

que la introducción de la constante cosmológica había sido la más grande metida de pata de su vida.

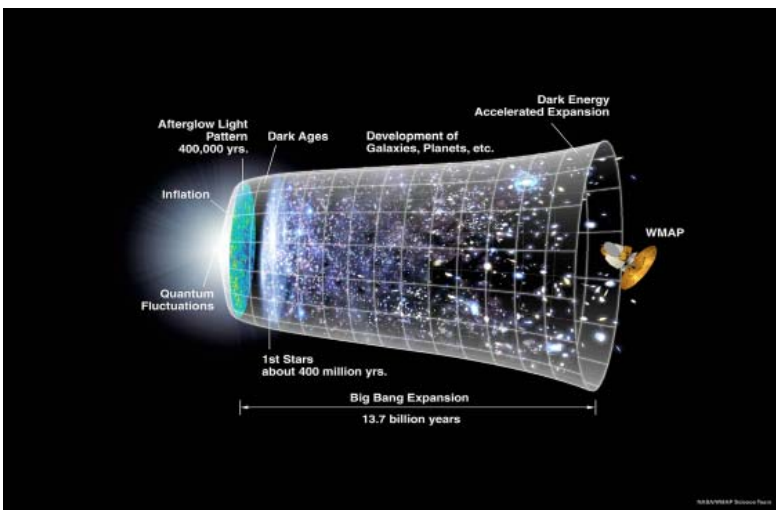


*A. Friedmann*

*Fig. 10. Alexander Friedmann 1888 – 1925. Wikipedia.*

En la actualidad tenemos un concepto del universo muy distinto al que formuló Newton, y aun más distinto al que formularon los Mayas, los griegos o los Fenicios. Nuestro concepto del universo está basado en observaciones astronómicas muy precisas, comprobadas por diferentes telescopios e instrumentos de mucha precisión. Es decir, las preguntas fundamentales de la filosofía están siendo atacadas por la cosmología moderna utilizando el método científico y los conceptos físicos más avanzados. Ahora pensamos que el universo que conocemos se originó de una región extremadamente caliente y densa hace unos 13 700 millones de años, llamado el Big

Bang (figura 11), la prueba de esta gran explosión se observó en los años 60. Dos ingenieros de la Bell Company trabajaban en una antena para detectar microondas, la antena se ve en la figura 12, parecidas a las que ahora conocemos de los hornos con que calentamos rápido nuestra comida. Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron una radiación de este tipo proveniente de todos lados, todos los días del año, durante todas las estaciones, día y noche, la cual era exactamente la misma siempre. Algo así solo puede tener un origen común, pero dicha radiación era exacto la misma de regiones provenientes de un lado que de otro, lo que implicaba que este origen común debe ser el origen del universo. Años atrás, el científico ruso-americano George Gamow, que había sido alumno de Freedman, había calculado que si el Big Bang había tenido lugar, se debería detectar una radiación en este rango de frecuencias. Por este descubrimiento, Penzias y Wilson recibieron el premio Nobel en 1978. La importancia de esta radiación ha quedado establecida desde esos años.

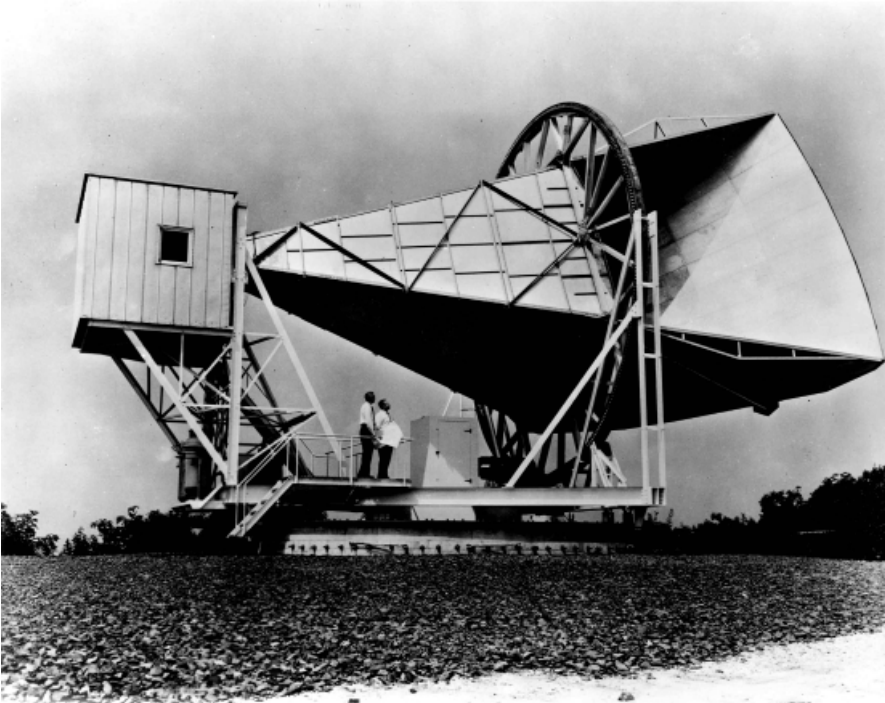


*Fig. 11. El modelo estándar de la cosmología. Foto de la NASA.*

Durante las siguientes décadas se ha medido y estudiado esta radiación, llamada la radiación de fondo del universo o CMB, por sus siglas en inglés y ahora se tienen mapas muy precisos de esta radiación. En 1991, el científico norteamericano Geoge Smoot dirigió una misión de la Nasa llamada COBE para medir con una precisión de hasta 7 grados de apertura de ángulo el CMB, la foto es la figura 13, más recientemente otro satélite de la Nasa la midió con una precisión de 3 grados (figura 14), y actualmente hay un satélite de la agencia espacial europea llamado Planck que mide esta radiación hasta con 1.5 grados de apertura. La precisión para medir el CMB es ya impresionante y nos ha dado un mundo gigante de información sobre el *Big Bang*.

Tal vez el resultado más importante al que nos han llevado las observaciones astronómicas de los últimos años es que el universo no solo está en expansión, sino que cada vez se expande más rápido. Este resultado puede implicar muchas cosas, una de las hipótesis que explican esta expansión y tal vez la más aceptada por la comunidad científica es que la constante cosmológica de Einstein si existe. Lo que implicaría que la más grande metida de pata de Einstein sería su más grande predicción. Si esto es cierto, implicaría que alrededor de 73% de la materia del universo estaría compuesta por esta constante cosmológica, casi tres cuartas partes de toda la materia del universo sería gravitacionalmente repulsiva. Otra consecuencia de las observaciones del CMB es que además hay como 23% de materia atractiva que no interactúa con la materia que conocemos, pero esta parte es gravitacionalmente atractiva, como los átomos. Como no interactúa con el resto de la materia, no sabemos que es ni como se ve, es decir, también es desconocida. Hay varias hipótesis que dicen que podría ser, pero todas están bajo estudio. Esto implica que 96% de la materia del universo es desconocida, algo nuevo, materia de la que no tenemos detección directa, vean la pizza de la materia en la figura 16. Aun cuando no sa-

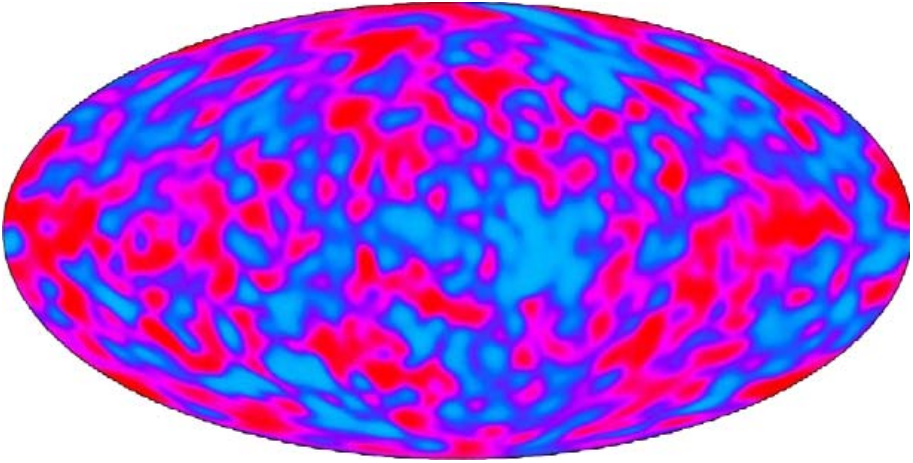
bemos que es, sabemos sus propiedades y por eso podemos decir mucho a cerca de como se comparta el universo a lo largo de su historia. Esta es como sigue.



*Fig. 12. Arno Penzias y Robert Wilson en su antena en New Jersey. Wikipedia*

Hace 13 700 millones de años toda la materia del universo se encontraba concentrado en una región muy pequeña, extremadamente densa y caliente que se expandió muy rápido. Apenas unos cuantos millonésimos de segundo después del Big Bang el universo tenía la temperatura que se alcanza en los aceleradores de partículas como el LHC, que se haya muy cerca de Ginebra, en Suiza. A partir de este momento podemos reproducir la física de los diferentes momentos del universo, ya que los observamos constantemente en estos enormes laboratorios. Por eso sabemos que en los prime-

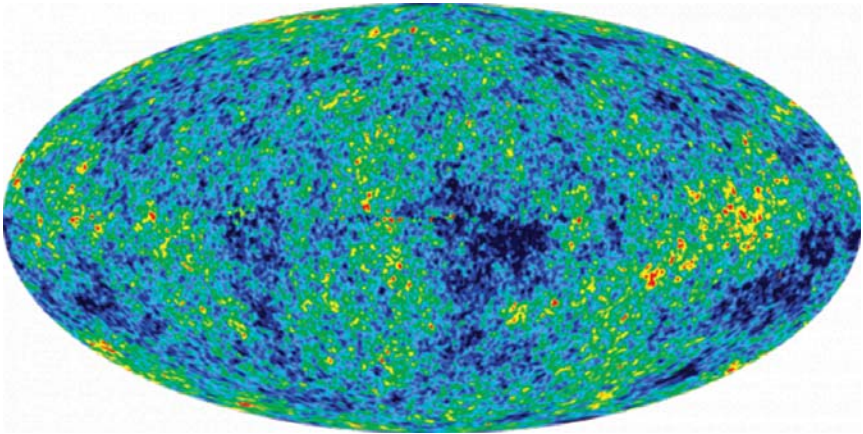
ros instantes del universo se formaron los electrones, los fotones, luego los neutrones, los protones y seguramente la materia oscura. La temperatura era suficiente para que se formaran núcleos de helio 4, de tal forma que después de algunos minutos del Big Bang existían núcleos de hidrógeno y de helio 4 dispersos, en una proporción que se ha medido y nos indica una cuarta parte de núcleos de helio y tres cuartas partes de núcleos de hidrógeno. Si el volumen aumenta, la temperatura disminuye, como el universo está en expansión, la temperatura del universo disminuye en la misma proporción a su expansión. Al bajar la temperatura, los núcleos libres pueden atrapar a los electrones formando así átomos de hidrógeno y helio. A partir de este momento el universo esta compuesto de átomos de helio e hidrógeno y de una muy pequeña fracción de otros elementos. Pero debido a la inmensa densidad de ese momento, la gravedad es aun muy intensa, y regiones un poco más densas que otras atraen a la materia con mayor intensidad que regiones menos densas. Así, estas regiones un poco más densas inician la atracción de materia oscura de regiones menos densas dejándolas sin materia oscura, haciéndose así más y más densas y por tanto atrayendo cada vez más y más materia. Estas regiones cada vez más densas son las semillas de las galaxias que ahora conocemos. Por otro lado, los fotones a una temperatura suficientemente alta chocar con los electrones, causando que estos se desvíen de sus trayectorias originales.



*Fig. 13. Radiación de Fondo del Universo según el satélite COBE. Foto de la NASA.*

A este fenómeno se le llama efecto Compton. Pero al bajar más y más la temperatura, los fotones ya no son capaces de chocar con los electrones e inician una trayectoria completamente libre. A este momento se le llama la recombinación, justo cuando los fotones inician un camino sin choques con los electrones. Lo increíble es que estos fotones se pueden fotografiar, son justo los fotones que observaron Penzias y Wilson, y después Smoot. A partir de ahí el universo ya es suficientemente frío, ya se han formado regiones más densas con materia oscura que sirven como imanes gravitacionales para atraer el gas de hidrógeno y el helio que hay disperso por todos lados. El gas entra violentamente a las regiones densas de materia oscura y choca entre si, calentándose y dispersándose por toda la galaxia en formación. Una foto tomada por el telescopio espacial Hubble, e la NASA, de cómo se ve el universo primigenio se puede ver en la figura 15, y en la figura 17 se ve una galaxia típica. De nuevo, la fuerza de gravedad, pero ahora del gas, inicia un colapso gravitacional formando regiones más densas, que se tragan la mayor

parte del gas de los alrededores. La fuerza de gravedad hace que el gas se comprima y aumente cada vez más la densidad y con esto, aumente su temperatura formando las planetas y estrellas. Cuando la temperatura del gas en el centro de la estrella es suficientemente alta, los electrones de los átomos de helio quedan libres, en el centro de la estrella la temperatura llega a ser tan alta que se inicia una reacción atómica llamada fusión nuclear. Esto es, los núcleos de hidrógeno, protones simples, se fusionan formando helio y desprendiendo energía, transformando una pequeña fracción de la suma de las masas en energía cinética. Esto provoca una presión hacia fuera, que se contrapone a la fuerza de gravedad. Entonces la energía interna desprendida por una fusión nuclear aumenta la temperatura del centro de la estrella provocando cada vez más reacciones de fusión, que a su vez provocan mayor calor y así sucesivamente.

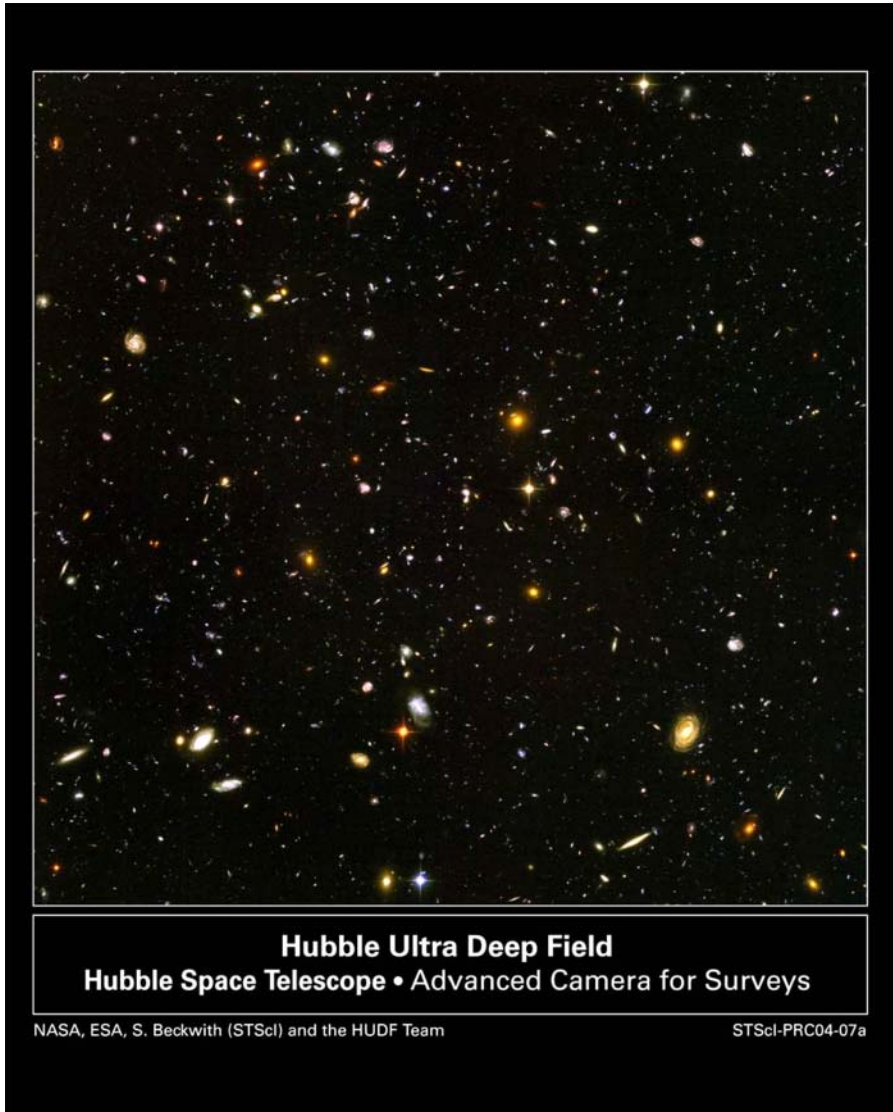


*Fig. 14. Radiación de Fondo del Universo según el satélite WMAP. Foto de la NASA.*

La presión es tan enorme que no solo detiene el colapso gravitacional, sino que expande la estrella provocando una disminución de la temperatura. Esto provoca que se

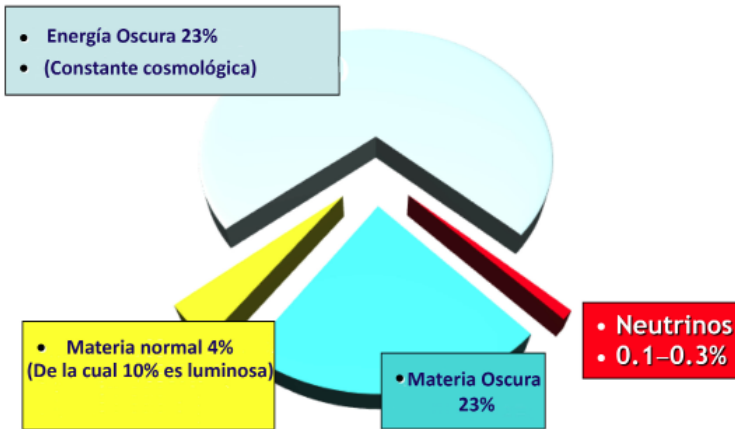


detengan las reacciones de fusión que causa que disminuya la presión. Entonces la gravedad vuelve a ganar y la estrella vuelve a disminuir su volumen aumentando al temperatura. Así sucesivamente, hasta que se llega a un equilibrio entre la gravedad y las reacciones de fusión. Este proceso dura unos cuantos millones de años. Estas bolas de gas, en donde la fuerza de gravedad disminuye su volumen y las reacciones de fusión lo aumentan se llaman estrellas. Nuestro Sol es un ejemplo, y en la figura 18 hay otro ejemplo. Este equilibrio dura mucho tiempo, nuestra estrella el Sol lleva 5 mil millones de años alumbrando y lo seguirá haciendo durante otros 5 mil millones de años más. Pero ahora pasó un fenómeno muy interesante, dentro de la estrella se formó helio producto de la fusión nuclear. Por supuesto, estas bolas de gas tienen mucho hidrógeno, pero este no es infinito. En una estrella como la nuestra el hidrógeno del centro de la estrella tarda cerca de 10 mil millones de años en terminarse. Pero algún día lo hace y entonces no hay nada que detenga la fuerza de gravedad. La estrella se colapsa, disminuye su volumen y esto aumenta la temperatura del centro de la estrella hasta una temperatura en donde el helio se fusiona, formando elementos más pesados. Al disminuir la cantidad de helio, estos elementos pesados se fusionan entre si y forman elementos cada vez más y más pesados. Estos son los elementos que conocemos en la tierra, de los que incluso nosotros estamos hechos. Es decir, todos los elementos de los que están hechas las cosas, los animales y las plantas, fueron cocinados en el centro de las estrellas. Pero seguro ahora surge la pregunta, ¿y como salen del centro de la estrella? La respuesta es sorprendente, al terminarse la fusión de los últimos elementos cuya fusión libera energía, esto corresponde al hierro, entonces no hay nada que detenga el colapso gravitacional de esta y la densidad dentro de la estrella aumenta tanto, que explota, formando una explosión de supernova.



*Fig 15. Foto del cosmos, cada punto luminoso es una galaxia que contiene algo como 100 mil millones de soles. Foto de la NASA.*

Esta explosión es tan poderosa, que llega a iluminar tanto como una galaxia entera, es decir, tanto como unas 60 mil millones de estrellas juntas. Esta luz puede durar unos días, en la actualidad se han fotografiado cientos de estas explosiones en el universo. La explosión de supernova lanza todos los elementos cocinados dentro de la estrella hacia el exterior, como en la figura 19, contaminando toda la galaxia con gas conteniendo elementos pesados, que a su vez son capturados por otros sistemas estelares, otros planetas, etc. Para que nosotros estemos aquí, tuvo que morir una estrella. No se ustedes, pero esto me hace sentir a mi muy importante.



*Fig. 16. La pizza de la materia del universo.*

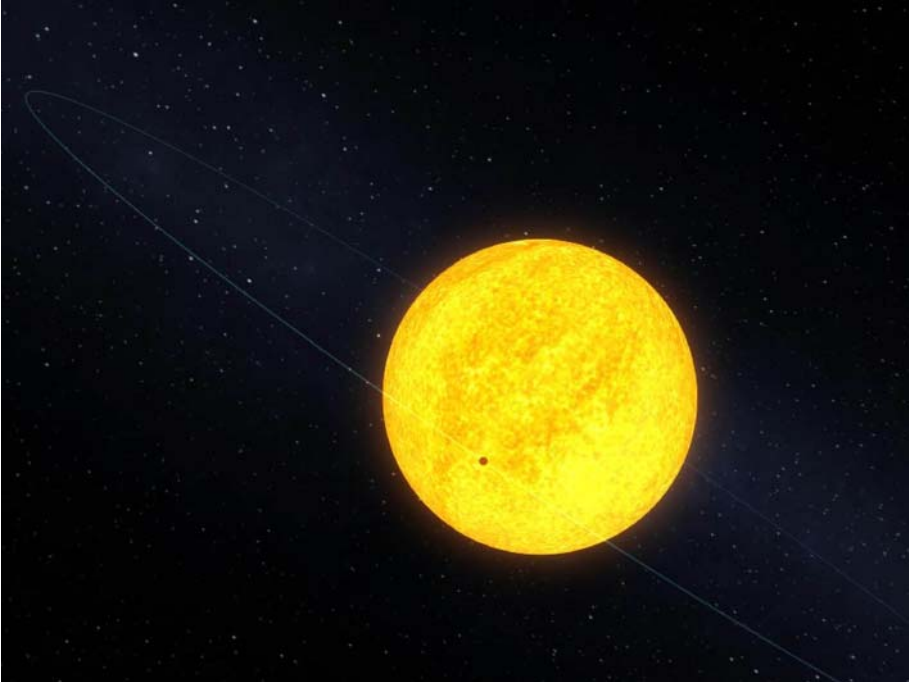
Este gas lanzado por la supernova contamina toda la galaxia y seguido forma planetas como el nuestro. La Tierra es un planeta hecho de todos estos elementos, capturados durante su viaje alrededor de la galaxia.



*Fig. 17. Galaxia NGC2683, contiene más de 10 mil millones de soles y su masa total es de más de 100 mil millones de soles. Foto de la NASA.*

De nuevo la fuerza de gravedad hace que este gas se colapse, formando piedras, como los asteroides, planetas como el nuestro, o como Júpiter o Marte o estrellas como nuestro Sol. A lo largo del tiempo algunos planetas se enfrían, pues no tienen algo propio que los caliente. Cuando estos elementos están muy calientes es muy difícil que se combinen. Pero estos elementos ya fríos, reaccionan químicamente formando compuestos, moléculas, etc. que llegan a ser muy complejas, formando moléculas orgánicas como proteínas, aminoácidos, etc. Este proceso dura varios miles de millones de años, en la tierra se cree que esta combinación duró algo como tres mil millones de años. Hasta que un día, una molécula compleja logra reproducirse a si misma. La molécula se reproduce absorbiendo las moléculas complejas que hay en el medio, esta moléculas se llaman RDN y ADN, se sabe que en la Tierra primitiva y después de 3 mil millones de años, los océanos eran ricos en moléculas orgánica y por eso fueron muy propicias para la reproducción del RDN y después del ADN. Las moléculas de ADN se combinaron entre si, hasta

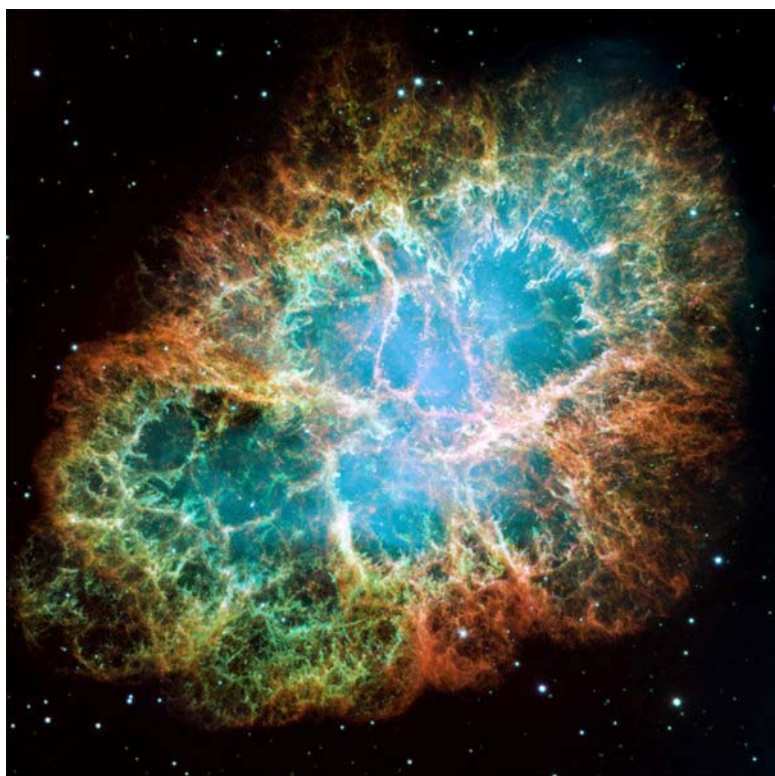
formar cadenas de estas muy complejas, cadenas que llamamos genes y estos genes combinados forman células. Las células se hicieron cada vez más complejas, las más eficientes consumían los elementos orgánicos del agua, mientras que las menos eficientes no sobrevivían.



*Fig. 18. Estrella con un planeta. Foto de la NASA.*

La lucha por el consumo de las moléculas orgánicas en el agua se intensificó, aniquilando a las células menos eficientes y reproduciendo a las más adaptadas. Esto obligó a las células a juntarse, para esto ya habían pasado otros 500 millones de años. Unos 100 millones de años más tarde, las células se habían especializado tanto que ya estaban formando organismos complejos como plantas y animales. Poco tiempo después, la necesidad de comida o de huir de

los depredadores más adaptados, obligo a estos a salir del agua y poco a poco, estos organismos conquistaron toda la Tierra. Se desarrollaron animales tan enormes como los dinosaurios, tan eficientes como los tiburones, tan veloces como las aves. La adaptación de los animales y vegetales al medio, para no perecer, ha dado como resultado una gama de millones de especies diferentes surgidas a lo largo de la historia de la Tierra.



*Fig. 19. Remanente de la explosión de la supernova del cangrejo. Foto de la NASA.*

Unos 500 millones de años después de que estos organismos complejos salieron del agua y se adaptaron a la Tierra,

surgieron una serie de primates débiles y lentos, con grandes problemas para su adaptación. En general eran fácil presa de animales mayores y rápidos y tenían serias dificultades para alimentarse. Varias de estas especies encontraron que vivir en manadas les ayudaba a defenderse de los depredadores y a proteger a las crías. Las hembras encontraron que pasar experiencias a su crías les servía para no cometer errores que ellos conocían, lo que les servía para mejorar la recolección, la caza y la sobrevivencia. Así se originó el lenguaje, se desarrollo poco a poco, pero este desarrollo necesito del desarrollo del cerebro. Este grupo de primates encontró que el desarrollo de su cerebro le permitía adaptarse mejor al medio. Solo una especie de estos primates sobrevivió, lo llamamos el homo sapiens o especie humana. El secreto de los humanos fue que desarrollaron el lenguaje por el cual han podido comunicar experiencias y aprendizajes de una manera sumamente eficiente de generación en generación, dándole a esta especie la supremacía absoluta sobre la Tierra.

Como hemos visto, una de las características principales de la especie humana es que se cuestiona su origen, algo que otras especies parecen no hacer. A esta propiedad los filósofos le llama conciencia, porque los seres humanos se hacen cocientes de su existencia. Lo más extraordinario es que en busca de una respuesta a las preguntas del origen de nosotros, de las cosas, de la materia, el hombre ha emprendido una aventura impresionante que lo conduce a conocer el mundo. Lean la historia que hemos contado y verán que apenas hace unos 500 años, un número muy pequeño comparado con el millón de años que tiene nuestra especie, nos dimos cuenta que vivimos en una nave espacial llamada la Tierra, que navega por el inmenso universo. Hace menos de 100 años nos dimos cuenta que nuestro universo de estrellas, que ahora llamamos galaxia, es apenas una de miles de millones en todo el cosmos. Hace apenas 15 años nos dimos cuenta que la materia de la que estamos hechos es menos

del 4% de toda la materia del universo. En esta aventura, la especie humana esta reconociendo que el cosmos es un lugar enorme, tanto en el tiempo como en el espacio, a mi me deja sin aliento que tanto espacio, compuesto por miles de millones de años luz, evolucionando en 13 700 millones de años, compuesto por cientos de miles de millones de estrellas, ha tenido como resultado un ser viviente que se da cuenta de su existencia y se pregunta, ¿de donde vengo? ¿por qué el mundo es así? Lo más impresionante de todo es que nosotros, esta especie viviente con conciencia, es solo un poco de polvo de estrellas que tuvo las condiciones para organizarse de una manera compleja. Somos una poco de materia de cosmos, somos una pequeña porción del universo organizado que se pregunta el porqué de su existencia. Somos el universo que se quiere conocer a si mismo. Es como si el universo, las galaxias, estrellas, polvo, caminara en el tiempo hasta autoorganizarse y adquiriera conciencia de si mismo. Parece ser que somos eso, los ojos, la boca, los oídos, el cerebro del universo tratándose de encontrar a si mismo, tratándose de explicar a si mismo. Es como si el universo evolucionó con toda esta materia, todo este tiempo en todo este espacio para crear la conciencia que le de sentido a él, que le de sentido a su existencia.



## *Carlos Román Zúñiga*

---

Instituto de Astronomía, UNAM (Ensenada)



**C**arlos Román Zúñiga es investigador en el Instituto de Astronomía de la UNAM, en la sede de Ensenada, Baja California. Estudió la carrera de física en la Facultad de Ciencias de la UNAM, y luego realizó estudios de posgrado en el Instituto de Astronomía, en Ciudad Universitaria, y en la Universidad de Florida, E.E.U.U., donde trabajó en una disertación sobre los cúmulos estelares de la Nube de la Rosetta. Realizó estancias post-doctorales en el Centro para la Astrofísica del

Instituto Smitsoniano, en Harvard, Massachusetts, y en el Centro Astronómico Hispano Alemán, en Granada, España. Su especialidad es el estudio de los cúmulos de estrellas jóvenes y la estructura de las nubes moleculares, usando principalmente imágenes infrarrojas. Como profesional de la astronomía, a dirigido y colaborado en investigaciones, ha publicado artículos arbitrados en revistas internacionales, y ha hecho labor docente a nivel licenciatura y posgrado.

También participa activamente en labores de divulgación científica, a través de actividades diversas, desde artículos de difusión y organización de eventos educativos hasta tiras cómicas. De 2011 a 2013, actuó como Coordinador de Comunicación de la Ciencia para el Instituto de Astronomía de la UNAM en Ensenada.

## Gestación e Infancia de las Estrellas

Carlos G. Román Zúñiga

### Introducción

**H**asta hace menos de un siglo, el formación de las estrellas era uno de los procesos menos entendidos en la naturaleza. En algún momento, incluso llegó a pensarse que dicho proceso contradecía lo establecido por algunas teorías, y que por tanto las estrellas no surgían de ningún lado sino que siempre habrían estado presentes. Parte de esta ignorancia se debía a la mínima o nula evidencia observacional del fenómeno, que lo envolvía en un oscuro velo de misterio. Lo del *velo oscuro* es algo literal, porque como sabemos hoy en día, el nacimiento de las estrellas ocurre, efectivamente, en regiones frías y oscuras, de hecho las más frías y oscuras del Universo. Antes de que se inventase un método para observar al interior de esas regiones, la *formación estelar* estuvo oculta a la vista del hombre.

Hablamos de la formación o *nacimiento* de las estrellas, como hablamos también de su *muerte*. Aclaremos: las estrellas tienen un ciclo de *vida* en el que transforman a la materia en su interior para producir luz y energía. En astronomía la palabra *vida* queda por tanto definida en términos de su existencia física, y no en los términos en que definimos vida en las ciencias biológicas, donde se explica el nacimiento y existencia de los organismos a partir de su reproducción y su consciencia del medio ambiente en el que se desarrollan. Las estrellas no son seres vivos, sino entidades físicas.

A la sub-rama de la astrofísica moderna que estudia los procesos físicos que involucran desde la transformación del

gas interestelar en estrellas (jugaremos aquí con la idea de una *gestación estelar*) hasta sus primeras etapas de evolución (pensaremos así en una suerte de infancia estelar) se le llama de manera general “Formación Estelar”, y es el tema que en esta ocasión nos atañe.

La formación de las estrellas es un proceso complejo, tanto que hoy en día lo comprendemos de manera amplia, pero no de forma completa, y por ello es aún uno de los problemas sin resolver en la astrofísica moderna. Sin embargo, gracias al avance de la tecnología que produce instrumentos de observación cada vez más poderosos, a los avances en computación que permiten hacer simulaciones detalladas de los procesos físicos y a los avances en los modelos teóricos (también llamados analíticos), la lista de investigaciones publicadas sobre el tema cada año es enorme, y continúa en crecimiento. La comunidad científica considera por tanto, que hoy nos encaminamos rápidamente hacia la formalización de una teoría de la formación estelar, que podría estar lista en esta o la próxima década. La teoría de la formación estelar, para ser aceptada, deberá de ser capaz de predecir, en base a una lista de leyes y ecuaciones básicas, cuántas estrellas se producen a partir de un volumen de gas interestelar, qué tan masivas son (comparadas con el Sol, por ejemplo) e incluso cuáles son algunas de sus características básicas –por ejemplo sus luminosidades, qué fracción de ellas son parte de un sistema múltiple, etcétera.

En este capítulo hablaremos de la formación de las estrellas desde dos puntos de vista, primero el histórico, que nos llevará a entender mejor cómo ha progresado nuestro conocimiento sobre el origen de las estrellas, y al acercarnos al pasado cercano y presente, podremos plantear las ideas actuales sobre el fenómeno.

## *El Origen de las Estrellas en la antigüedad*

Creo importante enfatizar que las estrellas son una fuente natural de curiosidad científica. La astronomía es una ciencia natural en sentido tanto literal, como figurativo. Literal porque hay algo de natural en todo ser humano el tumbarse de espaldas sobre el césped, después de un día de campo, en una tarde de verano y tras del atardecer, preguntarse de dónde vienen todas esas estrellas que poco a poco comienzan a brillar en el firmamento. ¿Qué son las estrellas? es una pregunta que muchos hemos hecho a nuestros padres, o que nos hemos hecho a nosotros mismos. Es una pregunta que puede en ese momento recibir una explicación científica escueta o muy completa dependiendo de quién nos la conteste, o bien puede recibir una explicación fantasiosa o abstracta si quien nos contesta prefiere usar elementos poéticos o metafóricos. Lo cierto es que podemos conformarnos con esa respuesta inmediata, o ahondar un poco más en ella regresando a casa. Algunas personas posiblemente lo olviden pronto. Pero hay un cierto número de personas que no cejarán en su empeño de recibir una explicación completamente satisfactoria. Hay quienes buscan la respuesta toda su vida y se llaman a sí mismos *astrónomos*.

De la curiosidad natural por saber qué son las estrellas nació la astronomía. Los astrónomos de la antigüedad no contaban ni con el conocimiento ni con la abrumadora cantidad de fuentes de información que hoy disfrutamos. De hecho, las primeras civilizaciones hicieron su astronomía mezclando sus observaciones con la imaginación y es de ahí que nacieran todo tipo de mitologías en torno a los astros. Prácticamente todas las civilizaciones antiguas consideraron a las estrellas como esenciales para su cultura, y esto es porque las estrellas –sepamos o no qué son y de dónde provienen– sirvieron a nuestros antepasados de brújula, de calendario y de reloj. El paso cíclico de las estaciones y con ellas la re-

petición de determinadas constelaciones en el cielo, fueron de gran utilidad a los humanos de la antigüedad y por eso siempre les rindieron culto y las incluyeron en sus mitos.

Es interesante pensar en las respuestas que distintas culturas dieron a la pregunta “¿cuál es el origen de las estrellas?”. (Figura 1.) Por ejemplo, de acuerdo a la tribu de los Yakut, en Siberia, las estrellas son ventanas de cristal por las cuales los dioses se asoman para observar y hacer recuento de los actos de los seres humanos. Este mito no se contrapone a la utilidad de las estrellas, pero da una respuesta contundente a la pregunta. Del mismo modo, pensemos en la civilización Turco-Tártara, que consideraba que el firmamento es un gigantesco manto de tela oscura que los dioses tendían sobre la bóveda celeste cada noche; el tejido de aquel manto tenía agujeros, donde las fibras no estaban bien apretadas y por ahí se colaba la luz del cielo brillante que aún seguía detrás del manto. Esos agujeritos eran pues, las estrellas. Esta mitología es sumamente interesante porque además de ser contundente como la de los Yakut, puede ir mucho más allá en su poder explicativo. Por ejemplo, explica porqué las estrellas se mueven en el cielo durante la noche: si aquellos dioses que tendieron el manto oscuro lo van deslizado poco a poco durante la noche, entonces los agujeritos del tejido se desplazarán, explicando el movimiento. También explica porqué algunas estrellas brillan más que otras, pues ciertamente los huecos en un tejido no siempre son del mismo tamaño y algunos dejan pasar más luz que otros.



*Figura 1. Disco de Nebra, 1600 AC. Atribuido a la cultura Unetice, de la región Sajonia-Anhalt, en Alemania y que se cree representa la bóveda celeste y sus fenómenos.*

Para la civilización Paliute, las estrellas son las hijas del Sol y de la Luna. El Sol, hambriento y brillante llega cada mañana y las devora, dominando entonces con su luz intensa el firmamento. Pero al atardecer llega la Luna, vence de nuevo al Sol y sale a bailar con sus hijas por el cielo. Una historia curiosamente similar a la que narra en su mitología la civilización Mexica, donde el Sol, llamado Huitzilopochtli, mata durante el día a las estrellas, hijas de la diosa Luna, llamada Coatlicue. La diferencia es que en este caso las estrellas ha-

bían decidido matar a su madre y por ello es que el Sol decide intervenir para salvarla.

Las mitologías en torno a los astros, que elaboraron las antiguas civilizaciones alrededor del mundo, ayudaron a construir en muchos casos complejas estructuras religiosas que a su vez se basaron en predicciones en base a horóscopos o profecías. Los religiosos utilizaron la astronomía para forjar sus estructuras, siendo entonces las estrellas y sus movimientos la base de un sistema de conocimiento que mantenían en secreto. Con ayuda de los mitos, ese conocimiento adquiriría categorías mágicas u ocultas, y por tanto se volvía inaccesible a las masas.

La civilización griega contaba con un sistema político complejo que permitió la separación relativa entre la religión y la ciencia. Por eso, tal vez los griegos no necesitaban de una mitología astronómica, y prefirieron dar a las estrellas y a los planetas la categoría de objetos abstractos, aunque de absoluta pureza. Los griegos veían más al firmamento como un mural artístico, en el que los dioses plasmaban las imágenes en homenaje a ellos mismos y a algunos de sus hijos, los semidioses. En ese sentido no necesitaron de explicar porqué o cómo habían surgido las estrellas en el cielo, puesto que estaban muy lejos y jamás podrían afectar o ser afectadas por los seres humanos.

El filósofo y astrónomo greco-egipcio Claudio Ptolomeo de Alejandría dedicó gran parte de su vida a catalogar a las estrellas del firmamento, así como sus movimientos. Su libro de astronomía, el *Almagesto*, contenía un listado de poco más de un millar de estrellas, que se consideró como único e inamovible por los siguientes 1400 años. En el *Almagesto*, poco se cuestiona sobre porqué están ahí las estrellas, a pesar de lo muy completo y elaborado de las técnicas matemáticas que ahí se plasmaron para explicar la maquinaria celeste. Algunos catálogos medievales y del renacimiento, como la *Uranometría Nova*, de Johannes Bayer se esforzaron más por elevar la precisión de las mediciones del *Almagesto*



que por cuestionar la idea del origen de las estrellas. Tycho Brahe, grandioso astrónomo del siglo XVI, fue posiblemente el primero en cuestionar la pureza del universo Ptolomeico de una manera significativa, pues fue testigo de una explosión de Supernova y fue capaz de deducir que los cometas no eran fenómenos atmosféricos. Brahe no formuló una teoría sobre el origen de los objetos celestes, pero si dio un paso importante hacia esos cuestionamientos.

Con la llegada del gran Galileo Galilei y el uso de telescopios para la astronomía, quedó claro que donde el ojo desnudo solo ve un grupo de unas pocas estrellas, con un poco de aumento se puede multiplicar ese número significativamente. Había muchas estrellas sin contar y si se deseaba llegar a una contabilización completa, debía de establecerse una ciencia básica que pasara de explicar el funcionamiento del universo a explicar su origen.



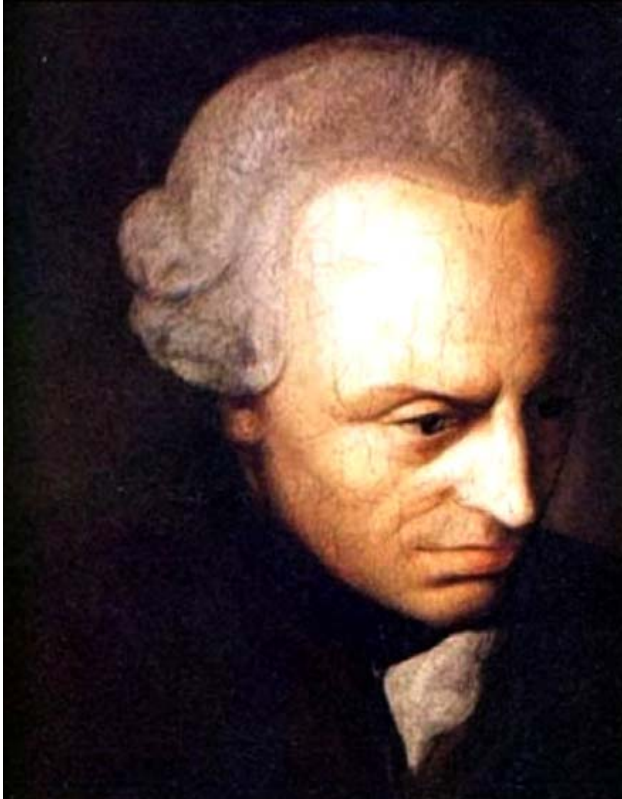
*Figura 2 René Descartes (1596-1650). Por Frans Hals, óleo sobre lienzo.*

## ***La idea moderna del origen de las estrellas***

En el año 1644, apenas unos dos años después de la muerte de Galilei, aparece en este escenario René Descartes (Figura 2), otro de los grandes pensadores de la época. Su libro *Principia Philosophiae*, contiene una compleja teoría que describe al universo como el contenedor de un fluido capaz de formar torbellinos, al centro de los cuales caería y se condensaría la materia para formar las estrellas y los planetas. Por casi un siglo, la comunidad científica francesa defendió esta teoría que sin embargo acabó siendo probada como incorrecta por Isaac Newton, unas pocas décadas después. Lo importante aquí es el enorme paso que da Descartes al intentar dar una explicación al origen y no solo al funcionamiento del universo.

El siglo XVII fue, a partir de Galileo, Descartes, Newton y los que se ‘posaron sobre sus hombros’ para ver el horizonte, una época de enorme avance en la llamada filosofía natural, que dió origen a la moderna Física. En ese siglo bulleron las ideas, algunas mucho muy elaboradas. Nos interesa aquí mencionar, en particular, la *Hipótesis Nebular* de Emanuel Swendeborg, de 1734, pues es la primera en sugerir que las estrellas nacen de una nube de gas. Hacia 1755 Immanuel Kant (figura 3) presenta un refinamiento de esta hipótesis que explica cómo la nube de gas debe de contraerse por la acción de la gravedad y formar un disco para conservar la energía de la rotación, disco del cual surgirían naturalmente los planetas. La teoría nebular de Laplace, en 1796 es esencialmente la misma que la de Kant salvo por el nivel de detalle con el que está expuesta. Es extraordinariamente notorio cómo sin un desarrollo de instrumentación astronómica significativo, sin computadoras electrónicas y con una teoría física aún en desarrollo, la hipótesis nebular haya sido tan atinada: *prácticamente la misma idea, salvo refinamientos asignados por los avances lógicos de las teorías, es la que se*

sostiene hoy en día como la explicación correcta para la formación de una estrella.



*Figura 3. Immanuel Kant (1724-1804). Oleo sobre lienzo, anónimo.*

Los avances lógicos a los que nos referimos se dieron hasta el siglo pasado, y fueron principalmente tres: el primero es la teoría debida a James Jeans, en 1929, que formula la masa y diámetro mínimos de gas interestelar que se requieren, para que actúe en ella la autogravedad y la nube se condense para formar una estrella. El segundo es el entendimiento de las reacciones nucleares, a partir de la teoría cuántica, que permiten explicar cómo es que las estrellas ge-

neran luz y calor a partir de la transformación de hidrógeno en helio. El tercero se debe principalmente al físico alemán Carl Weizsäcker, quien añade a la teoría de la nebulosa de gas un ingrediente esencial: la turbulencia. Curiosamente es el propio Weizsäcker quien pone en duda su teoría porque de acuerdo a ella, si todas las estrellas se hubiesen formado de nubes primordiales de gas, entonces deberían de tener casi la misma edad. Las teorías físicas sin embargo apuntaban fuertemente a que algunas estrellas son mucho más jóvenes que otras (algo que hoy consideramos correcto, como veremos más adelante) y eso llevó a Weizsäcker a formular en 1951 una teoría de rejuvenecimiento, que explicaría cómo al impactarse algunas estrellas con nubes viajeras de gas, adquirirían nuevo material que las renovarían y haría parecer más jóvenes. Durante las décadas de los 1940s y 1950s, la astrofísica moderna experimenta un desarrollo enorme, gracias a los desarrollos tecnológicos, computacionales y analíticos, y a la formalización de una ciencia cooperativa a nivel internacional, con un sistema estricto de publicaciones arbitradas y un gran número de grupos de investigación.

### *¿Qué es una estrella?*

Vamos a explicar algo de lo que sabemos hoy en día sobre el nacimiento de las estrellas, pero antes tenemos que entender, al menos de una manera básica, lo que es una estrella.

Una explicación sencilla podría ser la que encontramos en un portal de ciencia popular: por ejemplo, “una estrella es una gigantesca esfera brillante que produce enormes cantidades de luz y energía”. Esta no es una explicación incorrecta, pero si es muy poco satisfactoria.

Si ahondamos un poco en nuestra búsqueda ya sea en el internet o en algún libro, encontramos muy pronto mejores explicaciones. Un ejemplo, es el siguiente: “una estrella es

una masa de gas incandescente capaz de producir, por sí misma, luz y energía". Esta explicación es mucho más satisfactoria porque si uno la medita un poco, puede deducir que se requiere de una cantidad muy grande de gas como para que se condense al punto de producir luz y energía por sí misma. Ciertamente, el gas contenido en un tanque de hidrógeno de tipo industrial es insuficiente, de otra manera se formarían en ellos pequeñas estrellas todo el tiempo.

Como mencionamos antes, la luz y la energía de las estrellas provienen de la transformación de átomos de hidrógeno a átomos de Helio por el principio de fusión nuclear. Para que esto ocurra, hoy en día sabemos que se necesita que la estrella contenga una cantidad de gas equivalente a por lo menos 90 veces la masa del planeta Júpiter, que es de aproximadamente  $2 \times 10^{27}$  kg. Eso es un 2 seguido de 27 ceros, o algo así como 2 mil cuatrillones de toneladas.

Eso es apenas el comienzo de la escala. Nuestra estrella, el Sol, es 11 veces más masiva que Júpiter, y los modelos recientes suponen estrellas hasta 150 veces más masivas que el Sol.<sup>1</sup> Esto nos lleva a establecer una clasificación de las estrellas por tamaños, aunque no es el tamaño lo que realmente nos importa. En astrofísica nos importa más la cantidad y tipo de luz que la estrella emite, porque eso es lo que realmente podemos medir de ella.

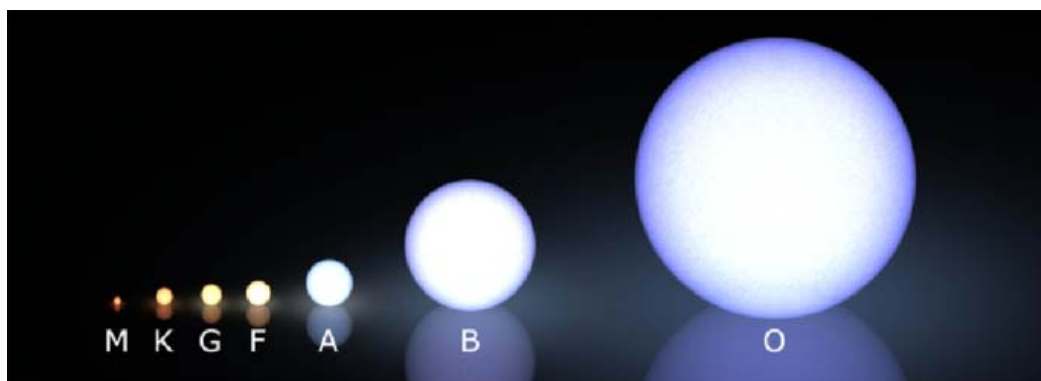
Pero pensemos un poco, podríamos tener una estrella muy masiva que emitiese mucha luz pero estuviera muy lejos, y que entonces fuera aparentemente menos brillante que una estrella poco masiva pero que se encontrara relativamente más cercana a nosotros.

Por ello preferimos usar un método más complicado, pero

---

1 Sin embargo hay varias estrellas conocidas con masas cercanas o superiores a las 200 masas solares. La estrella más masiva que se conoce, R136a1, en la Nube Mayor de Magallanes posiblemente sea entre 265 y 330 veces más masiva que el Sol.

de algún modo infalible. Al pasar la luz por un prisma podemos descomponer esa luz en un espectro, que nos indique cuánta luz emite la estrella en diferentes longitudes de onda. Los espectros de las estrellas más luminosas y más masivas son muy distintos de los espectros de las estrellas más pequeñas, y esto permite hacer una clasificación, llamada, lógicamente, clasificación espectral. Hoy en día se prefiere la clasificación de Morgan-Keenan, que divide a las estrellas en tipos, O, B, A, F, G, K, M, L y T (Figura 4).



*Figura 4. Ilustración de la clasificación estelar de Morgan y Keenan (MK). Ésta se basa en la temperatura superficial y la luminosidad de las estrellas. Entre más calientes son las estrellas su máximo de emisión se recorre a las partes azul y ultravioleta del espectro.*

Las estrellas de tipo O y B son las más calientes con temperaturas de decenas de miles de grados en su superficie, y también son las más escasas porque viven muy poco tiempo. Luego están las estrellas A, de tipo intermedio, menos masivas y calientes que las O y B (con temperaturas de entre 7 y 10 mil grados en su superficie) pero no tan estables como las de tipo F y G (entre estas últimas, el Sol) que con temperaturas de entre 5 y 7 mil grados tienen vidas útiles de miles de millones de años. Hacia el final de la clasificación están las estrellas de tipo K, M, L y T, las más longevas (se cree que

la mayoría de ellas no han concluido aún sus vidas útiles), que van descendiendo en la clasificación hasta tener cerca de la mitad de la temperatura del Sol y que son al mismo tiempo extraordinariamente abundantes en número.

Existe también una clasificación adicional por clase de luminosidad en las estrellas. En esta clasificación, las estrellas como el Sol son consideradas estrellas enanas, aunque también hay estrellas subenanas, gigantes, supergigantes e hipergigantes. Aquí las cosas se complican un poco: por ejemplo, algunas estrellas supergigantes de tipo B son menos calientes que sus contrapartes enanas. Una estrella gigante de tipo G, a pesar de tener la misma clasificación espectral que el Sol, es 130 veces más luminosa, y una supergigante tipo G, es casi 10,000 veces más luminosa.

Para auxiliarse en su trabajo, los astrónomos grafican las luminosidades y temperaturas de las estrellas que observan en un plano llamado Diagrama HR, en honor a sus creadores, dos astrónomos de apellido Hertzsprung y Russell (Figura 5). En este diagrama, las estrellas como el Sol, que aún están transformando activamente hidrógeno en helio dentro de sus núcleos, se alinean apretadamente a lo largo de una curva llamada Secuencia Principal. Por arriba de esta secuencia, aparecen en líneas horizontales de mayor luminosidad, las estrellas sub-gigantes, gigantes y super-gigantes. Por debajo de la secuencia principal se acomodan las estrellas sub-enanas y un tipo especial de estrellas, aún muy calientes pero poco luminosas llamadas enanas blancas, que son residuos de estrellas gigantes.

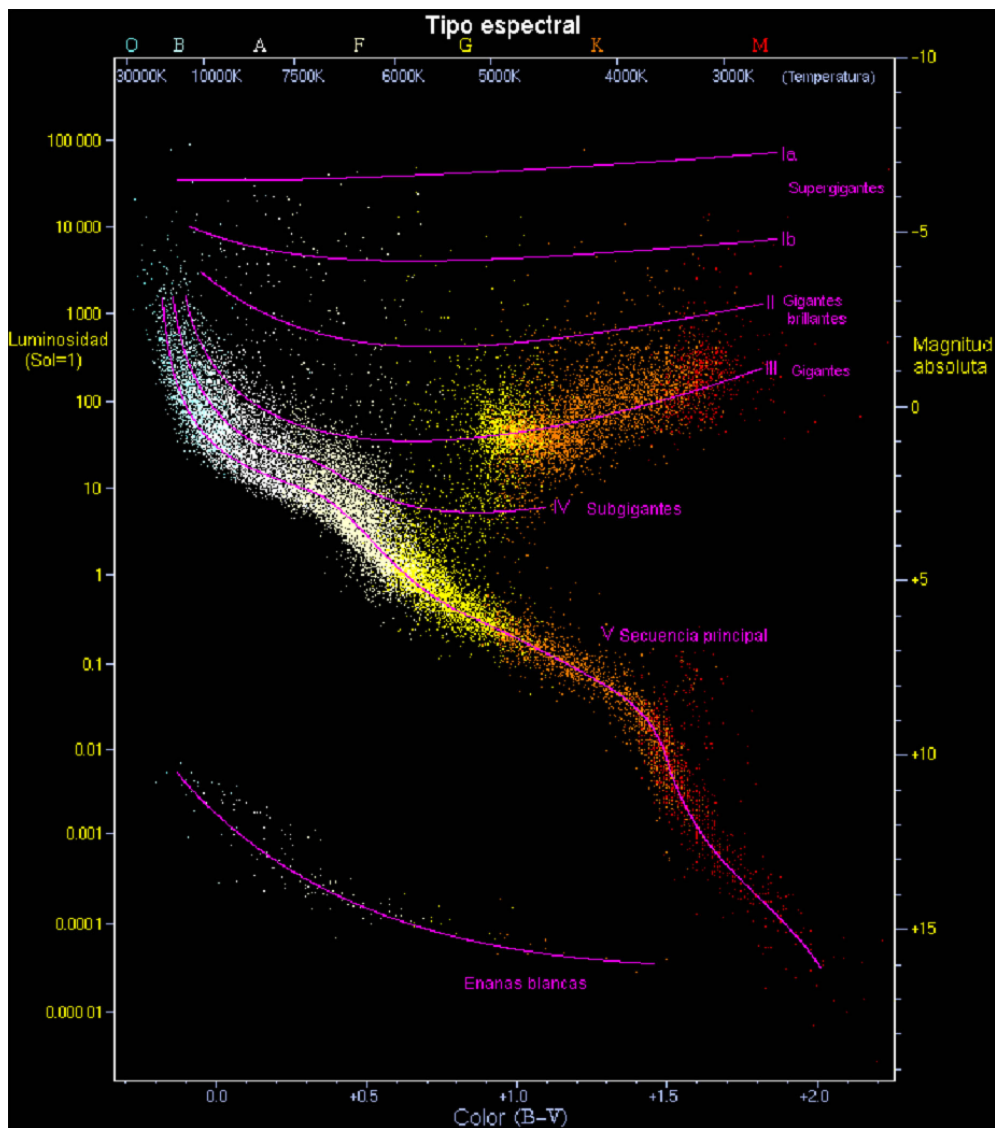


Figura 5. Diagrama Hertzsprung-Russell.



## *La vida de las estrellas*

Ahora vamos a hacer una descripción somera del proceso de vida de las estrellas, para poder entender mejor las fases iniciales en un contexto completo.

Las estrellas nacen, como veremos un poco más adelante, de la condensación de grumos de hidrógeno molecular. Estos grumos son, pues, las nubes de las que hablaban Kant y Laplace. Al formarse una estrella, ésta inicia en cierto momento los procesos de fusión nuclear en el centro, transformando hidrógeno en helio (un proceso mal llamado en astronomía 'quemado de hidrógeno') y comienza su fase en la Secuencia Principal. Mientras haya material suficiente en el núcleo, la estrella se mantendrá en esta fase. Una estrella como el Sol, por ejemplo, pasa unos 10 mil millones de años en la secuencia principal.

Cuando el hidrógeno se agota, la estrella ya no puede sostenerse con el mismo tamaño. Así que se expande y se enfría. Si una estrella tiene una masa de al menos 40% la del Sol, acabará como una gigante roja, perdiendo un 30% de su masa y ensanchándose unas 250 veces. (Figura 6)

En estrellas más masivas que el Sol, el hidrógeno se sigue 'quemando' en una capa alrededor del núcleo, mientras que en el núcleo se pueden seguir 'quemando' elementos más pesados, comenzando con el helio. Al final, se formará una gigante roja pero de mucho mayor tamaño.

Si tras expulsar las capas externas, el núcleo remanente tiene menos de una masa crítica (1.4 masas solares), la estrella terminará formando una nebulosa planetaria y en el centro una estrella enana blanca, que se enfriará durante un largo tiempo hasta formar una enana negra.

Si el núcleo tiene más de una cierta masa crítica, el núcleo se colapsará hasta el punto de poder fundir los protones con los electrones para formar neutrones. Pero en este caso el colapso es demasiado violento y la estrella, usualmente,

explota como una supernova. Lo que no es expulsado en la explosión puede mantenerse como una estrella de neutrones o bien un agujero negro.

Cada una de las fases arriba descritas representa un estadio de la evolución estelar, y cada una de ellas es tema de una sub-rama de la astrofísica moderna y sería imposible siquiera resumir lo que se sabe de cada una en unas pocas páginas. Por ello solo tomaremos la primera fase, la de la formación, que es la que nos concierne, y resumiremos muy brevemente lo que sabemos.



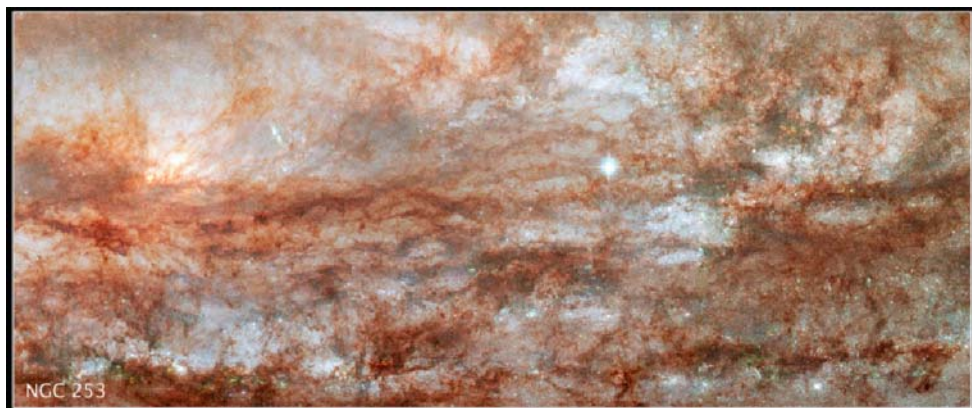
Figura 6. Interpretación artística de los últimos días de la Tierra, cuando el Sol se expanda y se convierta en una Gigante Roja.

## *Gestación y nacimiento de las estrellas*

Todas las estrellas, hasta donde entendemos, tienen un origen similar, en nubes de hidrógeno *molecular*. El hidrógeno es el elemento más simple y también es el más abundante: más de un 75% de la materia capaz de emitir luz en el cosmos es hidrógeno. La mayoría del hidrógeno es estable en un estado neutro, con un protón y un electrón para cada átomo. En este estado el hidrógeno formó, desde una época muy temprana del Universo, gigantescas estructuras de nubes de las cuales se formaron las galaxias. Dentro de las galaxias a escalas mucho más compactas, el hidrógeno neutro adquiere mayor densidad. En altas densidades y en la presencia de polvo interestelar, que es emitido en forma de 'hollín cósmico' por estrellas gigantes antiguas, dos átomos de hidrógeno (H) se pueden fusionar para formar una *molécula* de hidrógeno (H<sub>2</sub>), este estado molecular del elemento tiene la capacidad de enfriarse y condensarse

Además el polvo, además de permitir la formación del hidrógeno molecular, le sirve de escudo para no ser disociado por la radiación ultravioleta de otras estrellas.

Lamentablemente se tiene aquí el *problema del huevo y la gallina*, puesto que las observaciones parecen indicar que se requiere el polvo cósmico para formar el hidrógeno molecular y por tanto estrellas, pero entonces ¿cómo se formaron las primeras estrellas que dieron origen al polvo? Actualmente hay varios grupos de científicos atacando este problema, y pronto entenderemos cómo se formaron las nubes moleculares primordiales. Por lo pronto podemos enfocarnos a lo que sabemos, y describir la formación de las estrellas tomando en cuenta que las nubes moleculares existen, pues han sido observadas y los datos ya han dado testimonio de cómo se forman las estrellas en su interior.

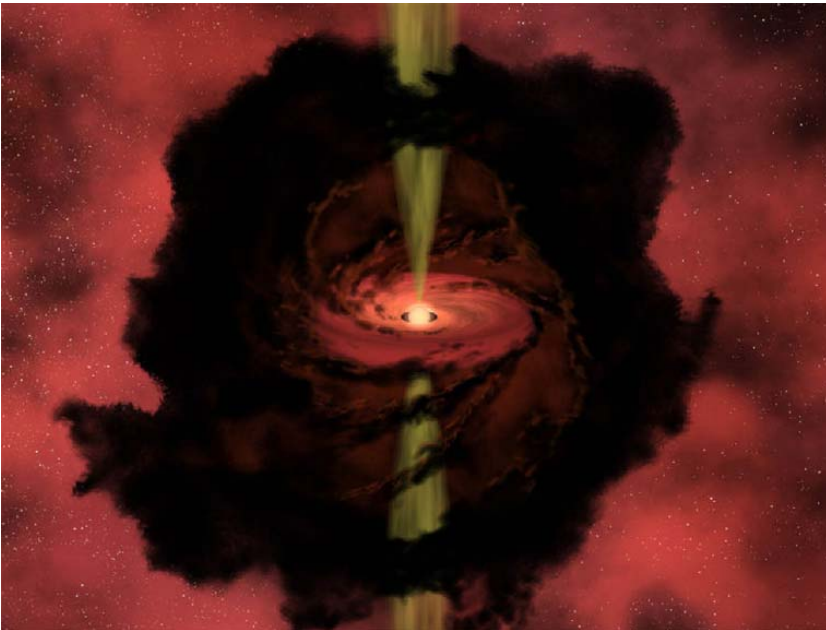


***Figura 7. Nubes moleculares gigantes en el disco de la galaxia NGC 253. Las regiones blancas son en realidad un océano de estrellas individuales, cada una un minúsculo punto blanco visto desde esta escala. Archivo público del Telescopio Espacial Hubble.***

Lo que es importante, es que la gestación de una estrella es un proceso que podemos dividir en varias etapas:

La primera etapa abarca un proceso de fragmentación del gas en el interior de la nube y la condensación de grumos densos a partir de dicha fragmentación. Esta etapa, llamada a veces la etapa de condiciones iniciales o primordiales, es sumamente importante de entender. La fracción del material disponible en la nube que termina por formar estrellas es muy pequeña, apenas de un 1 a un 5 por ciento del material podrá condensarse en grumos que tengan la densidad necesaria para colapsarse y formar estrellas. Los astrónomos estudian nubes muy jóvenes, que aún no han formado estrellas o que han formado muy pocas para entender cómo se da el proceso de fragmentación y colapso. También aquí son cruciales las modernas simulaciones numéricas por computadora, que permiten estudiar el proceso a una mayor velocidad: es imposible que observemos la fase inicial de la formación estelar porque dura en promedio de 1 a 3 millones de años en nubes moleculares como las que hay en nuestra

galaxia. Tras de la etapa de condensación se da una fase de colapso, en la que la gravedad acaba por vencer a la presión interna del gas. Se entiende hoy que en los grumos densos de las nubes moleculares, la turbulencia del gas es menor y adquiere una coherencia en sus movimientos, que la lleva a un estado de equilibrio. Distintos procesos en la nube pueden ayudar a mantener este equilibrio para que el colapso no se de de una manera violenta y el grumo denso pueda seguir acretando material de sus alrededores mientras en su centro el material sigue condensándose hasta adquirir una densidad crítica. A partir de allí el colapso es irreversible y el núcleo empezará a calentarse rápidamente. Tras de unas decenas de miles de años (un suspiro, en la escala cósmica) el núcleo denso se transforma en una *protoestrella*.



*Figura 9. Interpretación artística de la formación de la proto-estrella en el interior de un núcleo de gas denso. Se ilustra, a una escala corecta, el disco de acreción y los chorros bipolares. NASA/JLP/R. Hurt SSC.*

La etapa protoestelar continúa mientras el material del núcleo denso original sigue acretándose hacia el centro. La física nos dice que la energía debe conservarse, así que de manera natural la protoestrella va transformando la energía de gravedad a energía de rotación, para así mantener un equilibrio mientras se condensa. En un momento dado, la estructura esférica de material circundante a la protoestrella gira demasiado rápido y, tal como lo haría una bailarina de ballet o un atleta de patinaje que abre los brazos para disminuir la velocidad de giro, el material comienza a condensarse hacia el ecuador del sistema, formando un disco. Este disco de acreción, que es una estructura común a muchos procesos en la astrofísica, es el que en un momento dado dará origen a un sistema planetario. Como puede deducir quien lee, si todas las estrellas forman comúnmente discos de acreción al formarse, entonces todas o una gran mayoría de ellas están en capacidad de formar sistemas planetarios. Una estrella como el Sol, es capaz de formar un disco protoplanetario en aproximadamente unos 100 mil años.

En adición al disco de acreción se forman también un par de chorros que emanan por los polos de la estrella, de manera perpendicular. Estos chorros de gas viajan a velocidades de cientos de kilómetros por segundo, pueden llegar a tener longitudes del orden de cientos a miles de veces la distancia entre la Tierra y el Sol y son usualmente calientes, con temperaturas del orden de 10 mil °C. Algo importante de mencionar es que los discos de acreción y los chorros bipolares son estructuras comunes a varios procesos astrofísicos, solo que ocurren a escalas mucho mayores. Por ejemplo, es común ver discos de acreción en los centros de muchas galaxias, de donde emanan chorros de gas gigantesco, que pueden abarcar decenas de miles de años luz de distancia. Estos chorros fueron descubiertos por dos astrónomos, uno de ellos mexicano. Los llamaron *objetos Herbig-Haro*, en honor a su trabajo.

El final de la etapa protoestelar se da tras unos 10 millones de años para una estrella como el Sol. El núcleo de la estrella se enciende al fin, y comienza la etapa de Secuencia Principal. El disco de acreción para entonces se ha aplanado y vuelto mucho más tenue porque el material que lo forma, principalmente polvo, se ha ido condensando en partículas cada vez más grandes, que luego han formado rocas y éstas han chocado y se han pegado hasta formar objetos del tamaño de los planetas. El resultado final es una estrella con un sistema planetario, como el que habitamos.

### *Barriendo al polvo cósmico*

Vamos a dar un poco más de detalle acerca de las nubes moleculares, aquellas donde se da la gestación estelar. Las nubes de gas molecular son usualmente gigantescas, con masas equivalentes a decenas de miles y centenas de miles de veces la del Sol. Son usualmente amorfas al principio, y sus diámetros típicos van del orden de decenas a un par de centenas de años luz. Simplificando muchísimo un proceso mucho más complejo, podemos decir que cuando las nubes se preparan para formar estrellas, usualmente forman primero capas relativamente planas, como si fuesen olas o sábanas de material, y estas capas después tienden a dividirse en estructuras de forma filamentaria. A lo largo de estos filamentos, como si fuesen las cuentas de un collar, se forman los grumos, aproximadamente esferoidales que darán lugar a estrellas o grupos de estrellas.

Las nubes moleculares se mezclan con un pequeño porcentaje (tal vez un uno o un dos por ciento) de polvo por unidad de masa. Este polvo está hecho principalmente de carbón, producido en antiguas estrellas gigantes que lo han expulsado en forma de un 'humo' extremadamente tenue, y de algunos silicatos, muchas veces producidos en el interior de estrellas masivas que luego lo han arrojado al espacio cuando explotan como supernovas. Hay además otros elementos en muy pequeñas proporciones, como oxígeno, azufre y nitrógeno.

Sin embargo, aún estas cantidades ínfimas de elementos pesados son suficientes para formar moléculas en adición al hidrógeno molecular. Algunas moléculas son sencillas, como el sulfuro de carbono (hecha de un átomo de carbón y uno de azufre) y otras extremadamente complejas, como los alcoholes e incluso formas simples de aminoácidos. La más abundante de las moléculas cósmicas después del  $H_2$ , es el monóxido de carbono (CO), que abunda en apenas cinco a diez partes por millón, pero que puede tomar varias formas isotópicas, y que hace posible detectar las nubes moleculares con un radiotelescopio. Esto último es porque el hidrógeno molecular no puede emitir ondas de radio, pero la molécula de CO sí. Cuando observamos una galaxia cualquiera, o bien cuando vemos hacia el centro de nuestra propia galaxia, vemos las nubes moleculares como manchas oscuras frente a un mar de estrellas (Figura 10).



**Figura 10.** Fotografía de una fracción de la nube molecular gigante de la Rosetta, ilustrando las estructuras de hidrógeno molecular y polvo, donde se forman nuevas estrellas. Derechos reservados, [cs.astronomy.com](http://cs.astronomy.com)

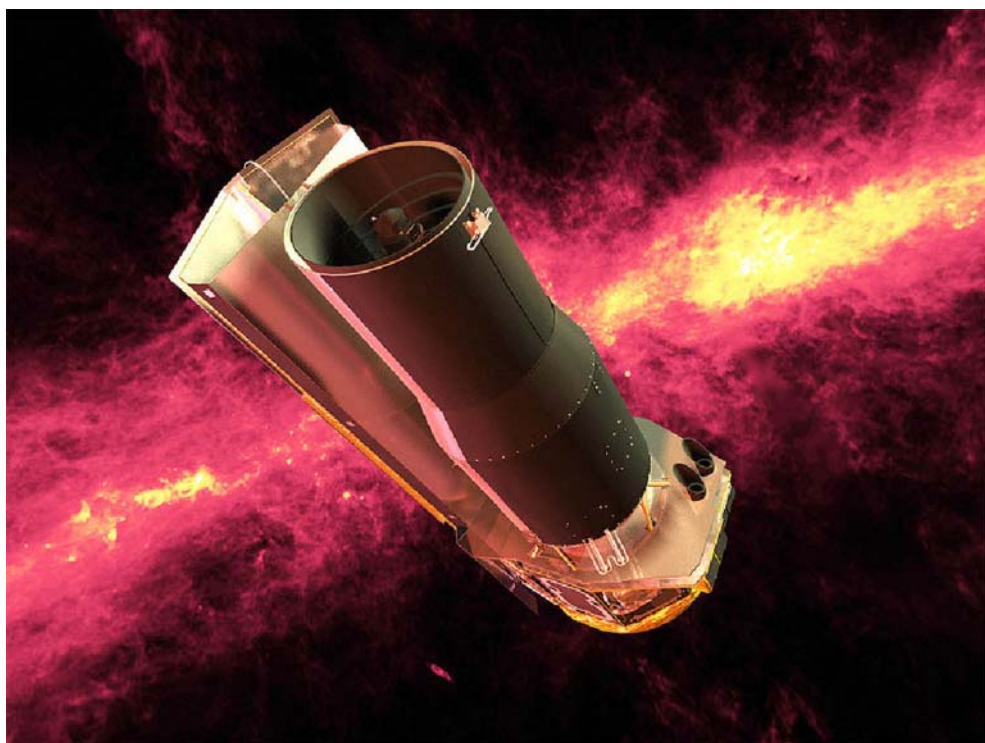


El polvo, a pesar de no ser la materia dominante en las nubes, es suficiente en cantidad y lo suficientemente opaco como para formar una película de grueso variable que absorbe la luz de las estrellas de fondo. En luz visible (como la que detectamos con nuestros ojos, con longitudes de onda entre 300 y 800 nanómetros) las nubes moleculares son totalmente opacas. Por eso es que decimos que la formación estelar estuvo oculta a los ojos del hombre por tanto tiempo: no contábamos con un método para observar el interior de las nubes moleculares que forman estrellas porque el polvo nos lo impedía.

La solución está en utilizar otro tipo de luz, cuya longitud de onda sea más larga que el tamaño promedio de un grano de polvo y que por tanto pueda salir de la nube sin ser absorbida. La luz a la que nos referimos es aquella con longitudes de onda en el *infrarrojo*. Nuestros ojos no son capaces de detectar luz infrarroja, pero sí de sentirla, porque esta luz es la que contiene mucha de la energía de calor que emiten los objetos. Poco más de la mitad de la luz que recibimos del Sol, por ejemplo, es luz infrarroja, que calienta nuestra atmósfera, nuestros océanos y a los seres vivos. Las estrellas emiten, una gran cantidad de luz infrarroja y por tanto con un detector adecuado para ese tipo de luz, es posible ver a las estrellas detrás del polvo cósmico.

Hasta la década de los 1940s, la observación en ondas infrarrojas era solamente terreno de la física teórica y de algunas tecnologías relativamente burdas, como los termopares. Luego llegaron mejores ideas sobre cómo detectar luz infrarroja con capas de sulfuro de plomo (PbS). El avance tecnológico permitió avanzar hacia el uso de otros compuestos semiconductores. Para finales de los años 1970s, el estándar se estableció con detectores de antimonio de indio (InSb) y mercurio-cadmio-telurio (HgCdTe) y se avanzó durante las siguientes dos décadas en la implementación de estos compuestos en dispositivos de carga acoplada (CCDs, como los

de las cámaras digitales de hoy en día) que hoy nos permiten tener detectores infrarrojos en casi todos los observatorios astronómicos profesionales del mundo. La astronomía infrarroja ha incluso viajado al espacio con satélites de observación especializados como el observatorio IRAF (década de los 80s), el telescopio Spitzer (segunda mitad de la década de 2000, Figura 11) y el telescopio Herschel (2009-10).



*Figura 11. El telescopio espacial infrarrojo Spitzer. Interpretación artística. Archivo público de la NASA.*

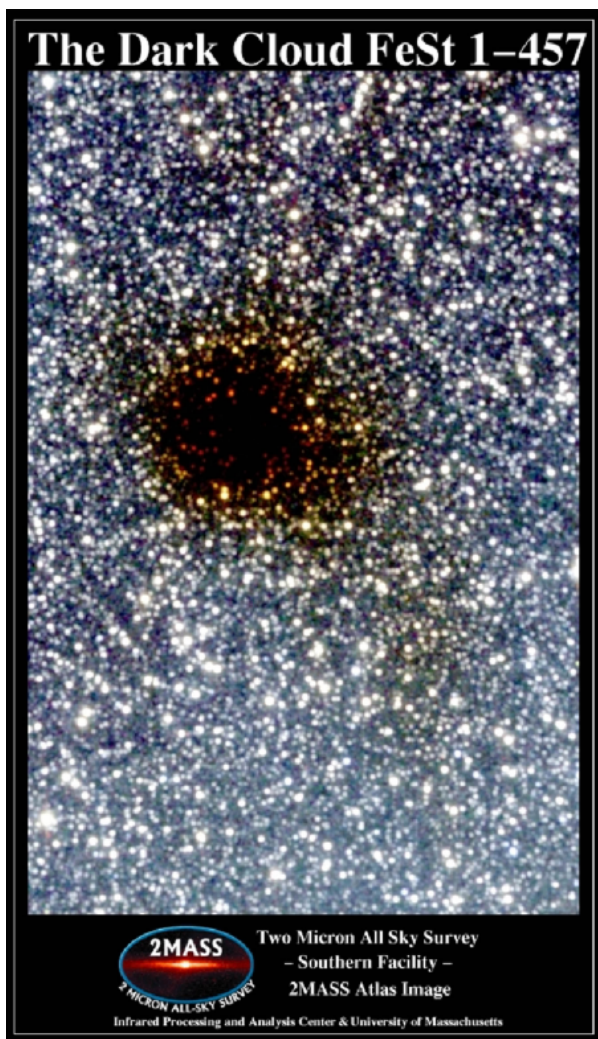
Junto a la astronomía infrarroja, también se desarrollaron radiotelescopios, cada vez más grandes y capaces de medir objetos sumamente tenues, pequeños y lejanos, especializados en estudiar objetos gaseosos o que emiten en la presen-

cia de polvo. Los ejemplos más espectaculares son la antena de IRAM, en la Sierra Nevada española, el VLA (Gran Arreglo de Antenas) en Nuevo México, el impresionante arreglo ALMA, ya instalado a gran altura en una cordillera chilena, el arreglo sub-milimétrico (SMA) en Hawaii, y el Gran Telescopio Milimétrico, en la Sierra de la Negra en Puebla, México. (Figura 12).



**Figura 12.** Algunos radiotelescopios utilizados para observar la radiación de moléculas del Medio interestelar. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: la antena de 30 m en el Observatorio de Pico Veleta, España, manejada por el IRAM, el arreglo ALMA, en el desierto de Atacama, en Chile manejado por el Observatorio Austral Europeo, el Gran arreglo de Antenas (VLA), manejado por el NRAO en New México, USA y el Pequeño Arreglo de Antenas (SMA), ubicado en Hawaii, manejado por la U. de Hawaii. Créditos: IRAM; ESO; NRAO; U. de Hawaii.

Con toda esta tecnología a favor de la ciencia, pronto la oscuridad del polvo cósmico se tornó en un brillante universo de longitudes de onda largas, que nos mostró muchos de los secretos de la formación estelar



*Figura 13. El núcleo denso de gas molecular FeSt 1-457, en la Nebulosa de la Pipa. Atlas Image mosaic, cortesía de 2MASS/UMass/IPAC-Caltech/NASA/NSF*

## *Observando el nacimiento e infancia de las estrellas*

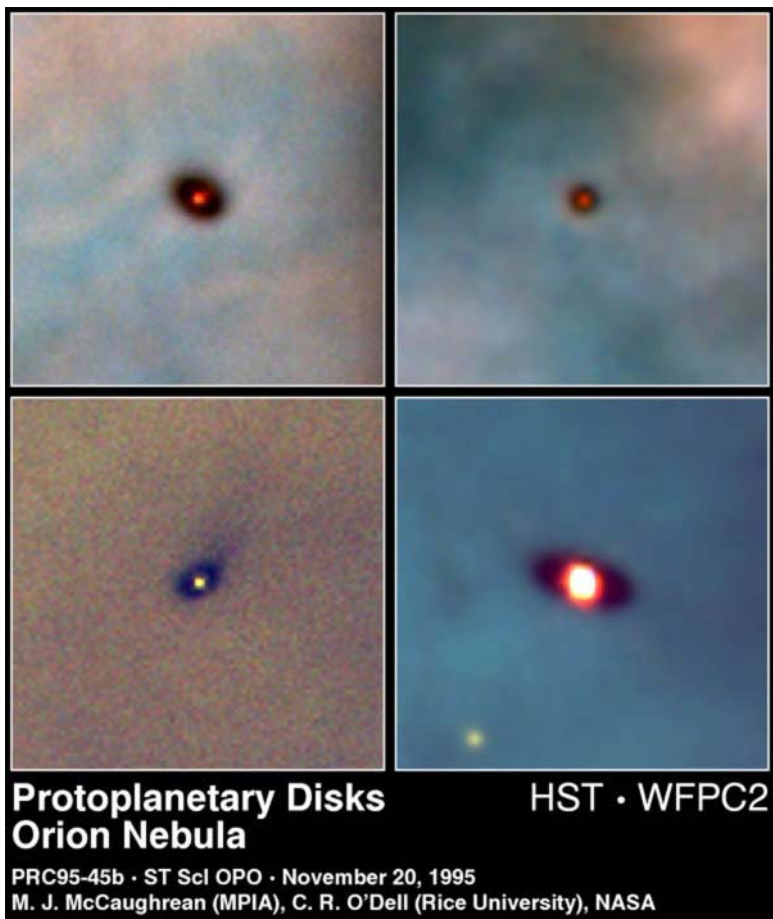
Lo que en longitudes de onda visibles parece una nube oscura, con poca morfología discernible es, en ondas infrarrojas y de radio, una compleja estructura de capas y filamentos que muestran claramente las regiones de alta densidad donde se formarán o ya se forman nuevas estrellas.

Donde ya se han formado, el infrarrojo atraviesa el velo de polvo y revela bellos cúmulos en los que conviven protoestrellas y estrellas muy jóvenes: estos son los llamados cúmulos embebidos, una suerte de “cuneros cósmicos” donde podemos estudiar la evolución más temprana de todo tipo de estrellas.

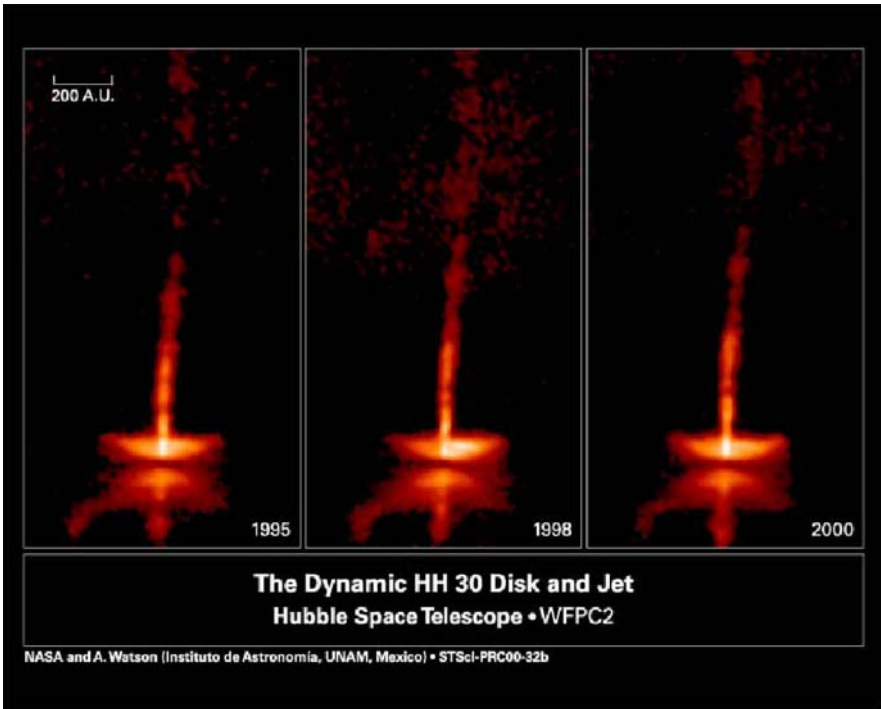
Hoy en día cada fase de la formación estelar ha sido observada con mucho detalle. Por ejemplo, en la figura 13 vemos a un núcleo de gas molecular muy denso, de forma casi esférica, proyectado contra un océano de estrellas gigantes del bulbo central de nuestra galaxia. La imagen está hecha con un detector infrarrojo y por eso hacia el centro del núcleo vemos algunas cuantas estrellas enrojecidas, aunque muchas menos que en los alrededores. Es un núcleo de polvo tan denso que aún las ondas infrarrojas no lo atraviesan por completo.

En la siguiente figura (Figura 14) vemos un grupo de imágenes de discos protoplanetarios proyectados contra el fondo de la nebulosa de Orion. Los discos son oscuros y uno de ellos parece estar siendo despeinado por el gas ionizado de alta velocidad que soplan las estrellas jóvenes y masivas, abundantes en aquel complejo cósmico.

Otra figura (Figura 15) nos muestra al objeto Herbig-Haro identificado como HH-30. Claramente podemos ver en la fotografía, tomada con el telescopio espacial Hubble por el astrónomo norteamericano residente en México, Alan Watson, al disco protoplanetario y al prominente chorro de gas bipolar que surge por sus polos.



*Figura 14. Discos protoplanetarios de la Nebulosa de Orión. Archivo público del telescopio espacial Hubble*

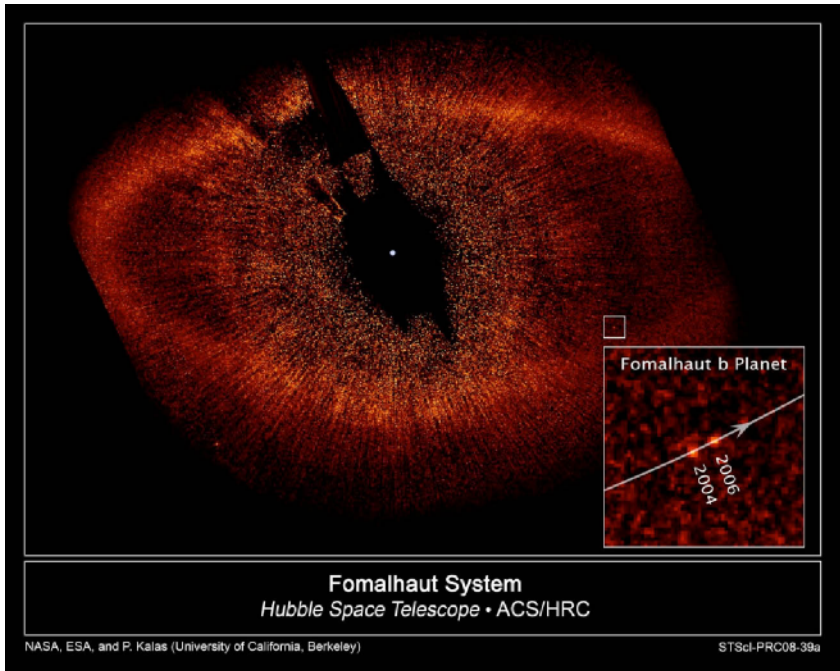


*Figura 15. El objeto HH-30, mostrando su disco protoplanetario y un chorro prominente de material. Archivo público del Telescopio Espacial Hubble.*

En la siguiente figura (Figura16) vemos una imagen de Fomalhaut, en la que se ha enmascarado el brillo de la estrella para mostrar al disco de polvo que aún la rodea. En una orilla de ese disco, un tenue puntito fue observado con dos años de diferencia. Es un proto-planeta, tal vez similar en tamaño a Saturno, y que se empieza a abrir paso en su órbita.

A pesar del nivel de detalle con el que conocemos el proceso de la formación estelar hoy en día, quedan demasiadas dudas que no permiten elaborar aún una teoría formal del fenómeno. Por ejemplo, sabemos que en los cuneros estelares que mencionamos arriba, las estrellas nacientes producen vientos de gas ionizado en épocas muy tempranas de su desarrollo, que barren con el gas y polvo remanentes, en

un simil de un polluelo que rompe el cascarón. El gas, sin embargo, hasta ese momento había servido de “pegamento” gravitacional y había mantenido a las estrellas en un equilibrio, orbitando todas alrededor de un centro común. Sin el gas, a menos que el número de estrellas sea suficientemente grande, el cúmulo estelar se desintegra en menos de 10 millones de años. A este fenómeno, se le conoce como “mortalidad infantil” en los cúmulos estelares y no queda claro si es un fenómeno que depende mas bien del tipo de nube en el cual se forman los cúmulos.



**Figura 16.** El sistema Fomalhaut, mostrando el disco de polvo que se ha formado tras de la evolución de la protoestrella central. El recuadro de la derecha muestra dos posiciones en la órbita de un protoplaneta, Fomalhaut b. Archivo público, Telescopio Espacial Hubble



Otro problema es la existencia de cúmulos estelares con muy pocas estrellas: por ejemplo, recientemente se han descubierto estrellas masivas aisladas, o grupos de menos de 20 estrellas, ninguna de ellas más masiva que diez soles. No entendemos muy bien cómo funciona la formación estelar en ese tipo de grupos. De hecho, tampoco entendemos muy bien cómo formar una sola estrella masiva, puesto que la mayoría de los modelos funcionan muy bien para estrellas que tengan no más de unas cuantas veces la masa del Sol. De acuerdo a nuestros cálculos, no es nada obvio cómo se forma un grumo denso de gas lo suficientemente grande como para formar una estrella de 100 masas solares sin que decida fragmentarse en 100 fragmentos de una masa solar cada uno, por ejemplo. Otros procesos complejos son también poco entendidos, como por ejemplo la formación inducida o 'por gatillo', en la que un grupo de estrellas provoca que el gas y el polvo sea barrido hacia la orilla de la nube y en ese amontonamiento se forme un nuevo grupo de estrellas. Quedan pues muchos misterios por resolver en el campo de la formación estelar.

Afortunadamente, hay hoy en día muchos astrónomos interesados en el campo de la pediatría estelar, y cuentan con la más avanzada tecnología para desarrollar sus ideas.



*Figura 16.- Imagen de un “cunero estelar”. El cúmulo embebido DR7, en el complejo Cygnus X es uno entre docenas de cúmulos estelares jóvenes (con edades de uno a tres millones de años, posiblemente), que muestran un modo común del nacimiento de estrellas: la formación multitudinaria. Imagen obtenida con el telescopio de 3.5m del Observatorio de Calar Alto, en Almería, España. Derechos Reservados, Carlos Román Zúñiga.*

## *Mónica Ródriguez Guillén*

---

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica



**E**s Investigadora Titular del INAOE, en Tonantzintla, Puebla. Realizó sus estudios de Licenciatura y Doctorado en la Universidad de La Laguna, en Tenerife, España, con una estancia en el Imperial College de Londres a través del Programa Erasmus de la Comunidad Europea.

Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores en su nivel II, así como de la Sociedad Española de Astronomía y de la International Astronomical Union (IAU).

Ha publicado más de 30 artículos de investigación en revistas indexadas y con arbitraje y un número similar en memorias de congresos. Ha dirigido dos tesis de maestría y dos de doctorado.

Sus temas de interés incluyen la física del medio Interestelar, en particular las regiones ionizadas (Regiones H II) y las Nebulosas Planetarias, así como la creación y evolución del polvo interestelar y su interacción con la radiación.

## *Polvo interestelar: los orígenes del Universo Sólido*

Mónica Rodríguez Guillén

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica



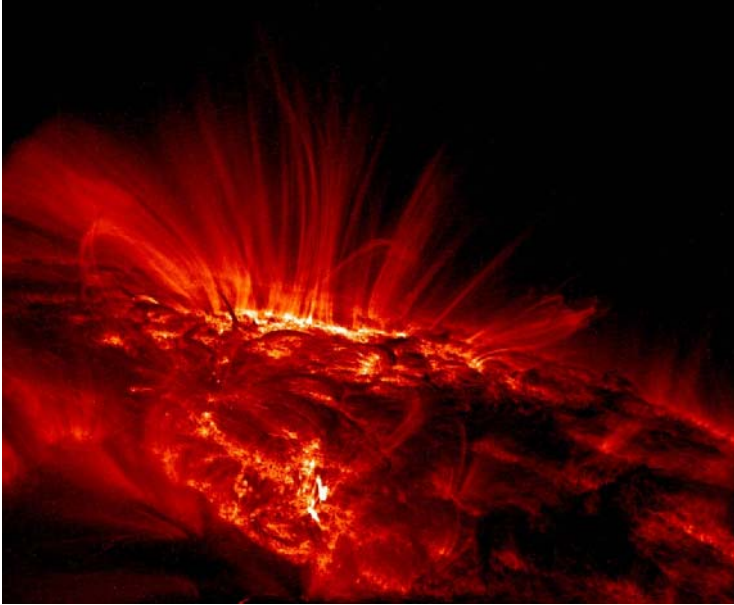
*Figura 1. Imagen de Alessandro Falesiedi*

En los inmensos espacios vacíos que existen entre las estrellas encontramos grandes nubes de gas, donde se acumulan y se mezclan los materiales expulsados por las estrellas a lo largo de sus vidas y donde se forman estrellas nuevas. Las nubes son también el punto de encuentro de unas diminutas partículas sólidas: los granos de polvo interestelar. Estos granos representan solo un 1% de la masa del gas, pero contienen la mayoría de los elementos pesados de la nube, los cuales son imprescindibles para formar planetas roco-

Los granos como la Tierra y seres vivos como nosotros. Los granos se forman alrededor de las estrellas y pasan después a las nubes interestelares, donde su existencia se vuelve muy accidentada: allí pueden crecer, ser irradiados, chocar entre ellos, unirse entre sí, fragmentarse, destruirse, o bien participar en la formación de planetas alrededor de estrellas nuevas. Los granos de polvo interestelar son por tanto el origen de toda estructura sólida en el universo, al menos de aquellos lugares donde un día podríamos plantar los pies sin morir en el intento.

### *El universo inhóspito*

Puede que en nuestro rincón del universo las condiciones hayan permitido la aparición de seres vivos, pero el universo está lleno de objetos, lugares y fenómenos hostiles, a los cuales no querríamos acercarnos más de lo necesario. El Sol es un ejemplo perfecto, porque aunque su radiación nos es imprescindible, no queremos tenerlo mucho más cerca de los 150 millones de kilómetros que nos separan de él. La imagen de la figura 2 muestra parte de la superficie del Sol en luz ultravioleta. Las zonas oscuras tienen temperaturas de miles de grados. La zona más brillante está asociada a una mancha solar, así llamada porque en luz visible (la que detectan nuestros ojos) se ve como una mancha oscura en la superficie solar. El gas que fluye a lo largo de las líneas del campo magnético alrededor de la mancha solar alcanza temperaturas superiores a un millón de grados. Nada que podamos construir por el momento podría sobrevivir en un ambiente como este.



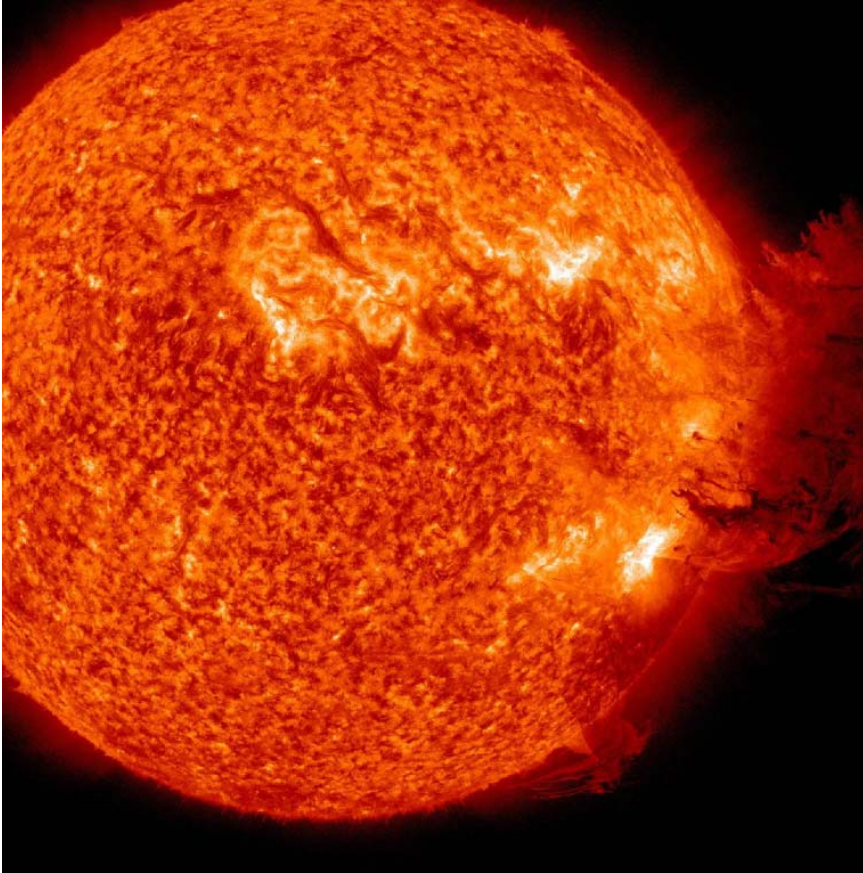
*Figura 2. La superficie del Sol en luz ultravioleta. Crédito: Proyecto Trace, NASA*

Los fenómenos energéticos que tienen lugar en el Sol a veces encuentran expresión más violenta: una zona de la superficie del Sol acumula energía magnética hasta que llega un momento en que explota, produciendo una erupción solar, como la que se muestra en la figura 3, también en luz ultravioleta. Erupciones como esta eyectan miles de millones de toneladas de material solar (una parte insignificante de la masa del Sol). Parte del material puede caer de nuevo sobre el Sol, mientras el resto es expulsado hacia el espacio. Si la Tierra se encuentra en su camino, las partículas solares cargadas son atrapadas por el campo magnético terrestre, el cual las dirige hacia los polos, por donde entran a nuestra atmósfera y chocan con sus moléculas, excitándolas y produciendo radiación. Este fenómeno es el que produce las auroras boreales (o auroras australes en el hemisferio sur).

La llegada de radiación y partículas energéticas puede tener también efectos menos deseados, afectando a nuestras comunicaciones e incluso produciendo apagones eléctricos (como el Gran Apagón de Quebec de 1989). El peligro directo lo sufren los astronautas; los que se encuentran en la Estación Espacial Internacional deben refugiarse dentro de ella cuando se producen estos eventos.

A pesar de todos estos fenómenos que tienen lugar en el Sol, nuestro astro es en realidad una estrella tranquila y estable. Sin embargo, las cosas cambiarán en el futuro. Las estrellas evolucionan tan despacio que no podemos seguir el ciclo de vida de ninguna de ellas. Lo que sí podemos hacer es estudiar muchas estrellas que se encuentran en puntos distintos de su evolución e inferir los procesos que llevan a explicar lo que observamos. De este modo sabemos que las estrellas que tienen masas similares a las del Sol viven unos diez mil millones de años, el tiempo en que pueden transformar hidrógeno en helio en las reacciones nucleares que tienen lugar en su interior (y que producen la energía que las hace brillar). Como el Sol tiene alrededor de 4600 millones de años, dentro de unos cinco mil millones de años, agotará el hidrógeno de su interior y empezará a hincharse hasta acabar engullendo sus planetas más próximos: Mercurio, Venus y, probablemente, la Tierra. Las capas exteriores del Sol acabarán por desprenderse de este, mientras lo que queda de nuestra estrella se contrae y se calienta. Cuanto más caliente es una estrella más energética es la radiación que emite, y llegará un momento en que la radiación solar podrá ionizar el material que expulsó (arrancarle sus electrones) formando una nebulosa planetaria, como la nebulosa Ojo de Gato en la imagen de la figura 4. El nombre de “nebulosa planetaria” viene de los primeros astrónomos que observaron objetos de este tipo; sus telescopios los mostraban como manchitas que parecían discos planetarios.





*Figura 3. Una erupción solar. Crédito: NASA/Goddard/Equipo SDO AIA*

La contracción de la estrella central de una nebulosa planetaria es lenta pero inexorable, solo se detiene cuando los electrones del gas estelar alcanzan su límite de confinamiento. En esos momentos la estrella se ha convertido en una enana blanca. Imaginen algo que tiene más de la mitad de la masa del Sol, comprimido hasta ocupar un volumen similar al de la Tierra. La imagen de la figura 5 muestra los planetas del Sistema Solar junto con el Sol escalados para mantener su relación de tamaños (aunque no de distancias). El mate-

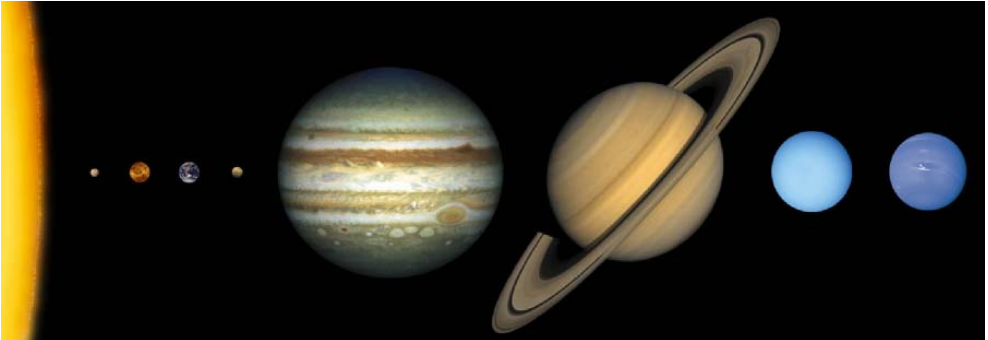
rial de una enana blanca se encuentra tan comprimido que una cucharada de este pesaría una tonelada en la Tierra.



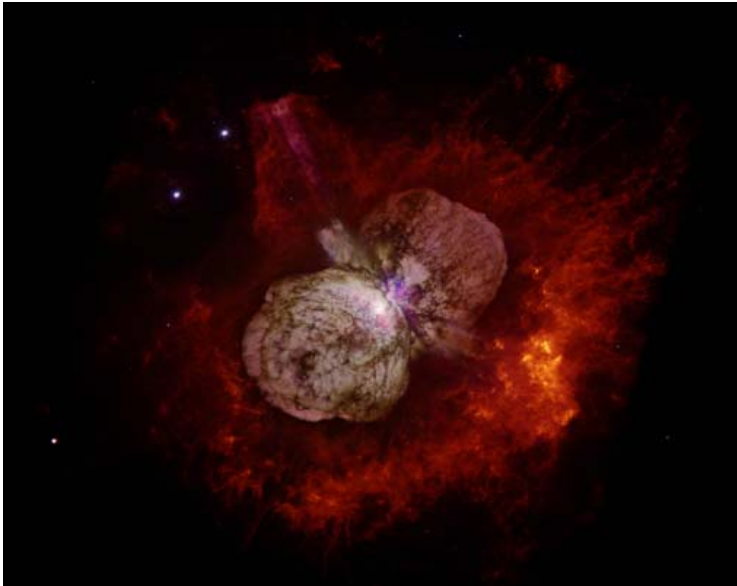
*Figura 4. Nebulosa Ojo de Gato. Crédito: NASA/ESA/HEIC/Hubble Heritage Team*

El Sol del presente no solo será superado por el Sol del futuro en lo que se refiere a violencia, sino que es superado por todas las estrellas que son más masivas que él. Consideremos a Eta Carina, en la imagen del telescopio espacial Hubble que se muestra en la figura 6. Eta Carina tiene entre 80 y 100 veces la masa del Sol y brilla tanto como cinco millones de soles. Las estrellas masivas son muy inestables porque les resulta difícil encontrar un equilibrio entre su inmensa gravedad, que tiende a contraerlas, y su no menos inmensa producción energética, debida a las reacciones nucleares en

su interior, y que empuja el material estelar hacia afuera. Alrededor de 1840, Eta Carina expulsó el material que vemos a su alrededor, que tiene más de diez veces la masa del Sol y alcanza ahora un año luz de diámetro.

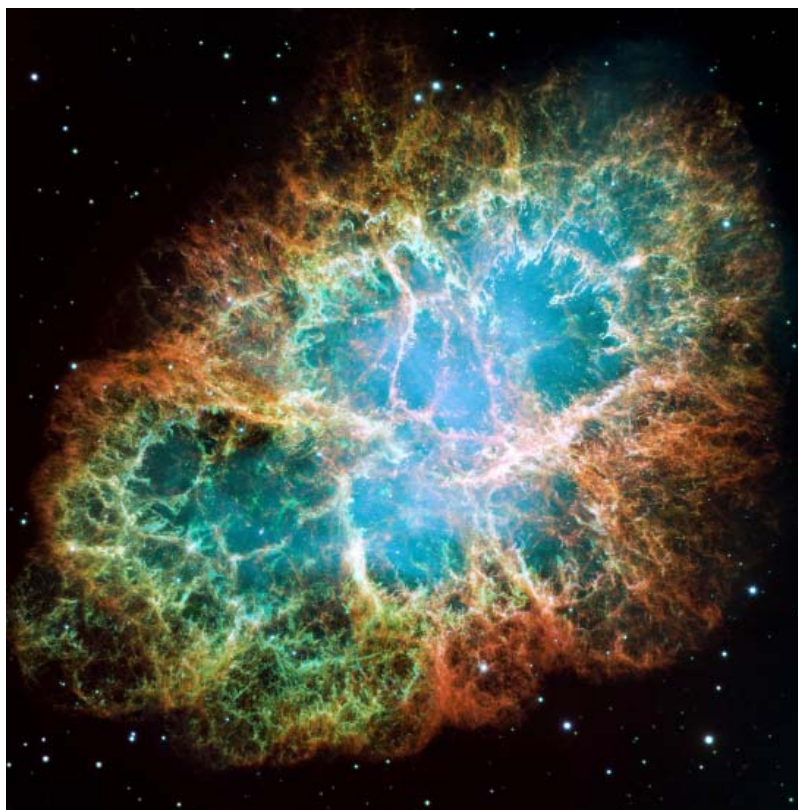


**Figura 5. Tamaños relativos en el Sistema Solar. Crédito: NASA**



**Figura 6. Eta Carina y la nebulosa del Homúnculo. Crédito: NASA, ESA, N. Smith**

Además, las estrellas más masivas que el Sol (con masas superiores a ocho veces la solar) también acaban sus vidas de forma mucho más espectacular, en una gran explosión de supernova durante la cual llegan a brillar tanto como miles de millones de estrellas juntas. Ese aumento de brillo puede volver temporalmente visible a una estrella que antes no lo era, y eso es lo que pasó en el año 1054, cuando astrónomos chinos reportaron la aparición de una estrella nueva en la zona del cielo donde ahora observamos la nebulosa del Cangrejo (figura 7).



*Figura 7. Nebulosa del Cangrejo. Crédito: NASA, ESA*

La nebulosa del Cangrejo es un remanente de supernova, los restos de la explosión observada en 1054. En su interior se encuentra lo que queda de la estrella que explotó, su núcleo central, donde se ha agotado el combustible que producía reacciones nucleares, de modo que ya no puede detener el colapso gravitatorio, como sucede con las enanas blancas. Sin embargo, ahora la masa que se colapsa es mayor a una masa solar y la gravedad consigue vencer la resistencia de los electrones, aplastándolos junto a los protones y formando neutrones. Los neutrones se resisten a ser comprimidos todavía más, y el resultado final es una estrella de neutrones, un objeto con poco más de una masa solar colapsado hasta formar algo del tamaño de una ciudad: su densidad es tal que una cucharada de su material pesaría más que toda la humanidad. La gravedad en la superficie de una estrella de neutrones es enorme, unos doscientos mil millones de veces superior a la gravedad en la Tierra: si se dejara caer un objeto desde un metro de distancia a la superficie, este llegaría a la superficie con una velocidad de casi dos mil kilómetros por segundo. No es agradable imaginar qué le sucedería a un ser humano que intentara aterrizar en una estrella de neutrones.

Y ese no es el límite de aplastamiento. Las estrellas más masivas no consiguen formar estrellas de neutrones. De hecho, no consiguen frenar el colapso gravitatorio y su materia acaba concentrada en un punto, formando un agujero negro (u hoyo negro), un objeto tan denso que ni siquiera la luz puede escapar a su gravedad. Sin embargo, al contrario de lo que cree mucha gente, los agujeros negros no son aspiradores cósmicos, que van engullendo cualquier cosa que se coloque a su alcance. Si sustituyéramos al Sol por un agujero negro con su misma masa, el efecto de la gravedad sobre nosotros sería el mismo. El problema con los agujeros negros es que con su material comprimido en un punto, uno puede acercarse mucho a ellos y seguir sintiendo la atracción gravitatoria de toda su masa. Así, un agujero negro con la masa

del Sol atrapar  cualquier cosa que se acerque a menos de 3 km de distancia.

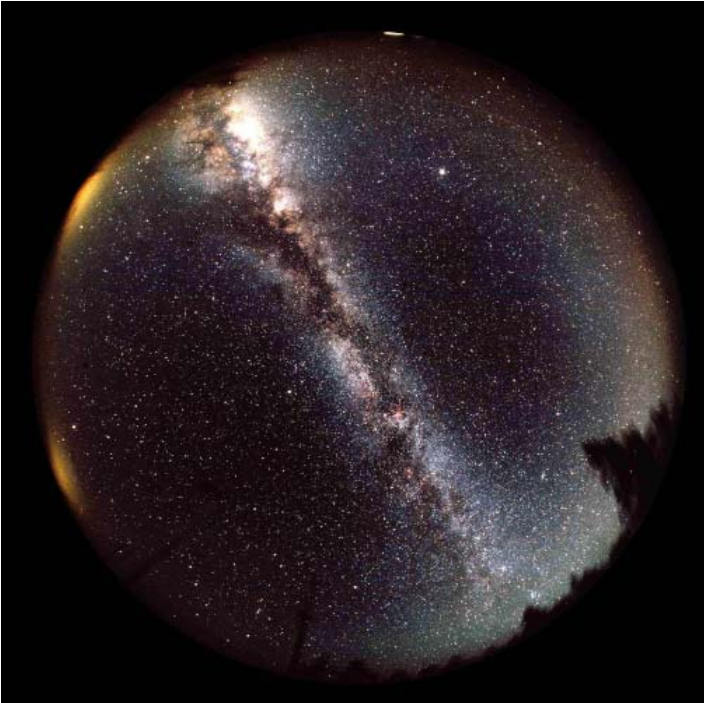
### *El medio interestelar y su conexi3n estelar*

En el espacio entre las estrellas podemos encontrar vacíos mejores que los vacíos más perfectos que podemos crear en un laboratorio, pero el espacio interestelar no est  realmente vacío. Un átomo aquí y otro all  se van acumulando sobre grandes distancias hasta formar nubes interestelares de tamaños y masas considerables. Según su densidad, su temperatura y su proximidad a estrellas, las nubes observadas en luz visible pueden ser transparentes, oscuras o luminosas, y podemos detectarlas con facilidad en galaxias cercanas como la de Andr3meda, en la imagen que se muestra en la figura 8.



*Figura 8. La galaxia de Andr3meda, a dos millones de años luz de distancia.  
Crédito: Robert Gendler*

Las galaxias son enormes agrupaciones de estrellas que se mantienen unidas por la gravedad. Pueden tener muchos miles de millones de estrellas y tamaños superiores a los cien mil años luz. Nuestra propia galaxia es parecida a la de Andrómeda, con la mayoría de las estrellas concentradas en un disco de poco grosor. Como nosotros estamos sumergidos dentro de ese disco de estrellas, vemos en el cielo una banda de luz, la Vía Láctea, donde la concentración de estrellas es mayor (figura 9). La banda de luz se ve interrumpida por zonas oscuras producidas por material interestelar. En las zonas más densas del medio interestelar, el gas se contrae por su gravedad y acaba formando estrellas nuevas.



**Figura 9.** Imagen del cielo tomada con un objetivo ojo de pez. Podemos ver la Vía Láctea y, sobre el horizonte, árboles y luces de ciudades lejanas. Crédito: Steward Observatory, University of Arizona

Las nubes interestelares están compuestas principalmente por hidrógeno (alrededor de un 90% de sus átomos) y helio (cerca del 10% restante), lo cual no es de extrañar, porque, con uno y dos protones en sus núcleos, estos átomos son los más sencillos y los que pudieron formarse con más facilidad tras el Big Bang, la gran explosión en la que se originó el universo. Solo uno de cada mil átomos interestelares corresponde a elementos que podemos considerar más interesantes, como carbono, oxígeno, hierro, oro o uranio. Estos elementos fueron creados a partir de átomos de hidrógeno y helio en reacciones nucleares en el interior de las estrellas, y fueron eyectados al medio interestelar en procesos de evolución estelar como los descritos antes, principalmente en explosiones de supernova y en las eyecciones de las nebulosas planetarias.



*Figura 10. Zona de formación estelar en la Gran Nube de Magallanes, una galaxia enana vecina de la nuestra. Crédito: Hubble Heritage Team/Y.-H. Chu/ESA, NASA*

Muchos de los átomos de estos elementos más pesados no se encuentran sueltos en el gas, sino que forman parte de unas diminutas partículas sólidas: los granos de polvo interestelar. Los granos constituyen el 1% de la masa de las nu-

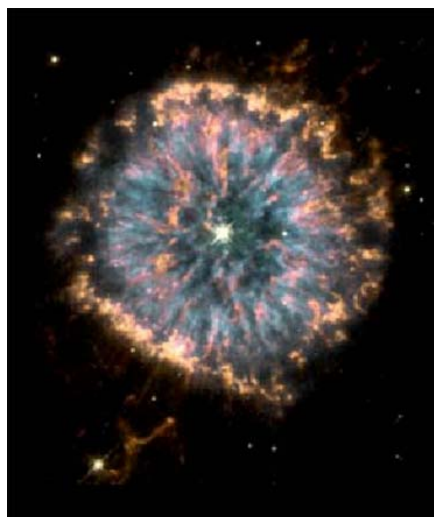


bes, tienen tamaños que van desde los de moléculas grandes hasta una millonésima de metro, y están compuestos de sustancias familiares a los geólogos, como grafito, silicatos, óxidos, compuestos metálicos de hierro y níquel, etc. De hecho, estas sustancias deberían sernos familiares a todos, si recordamos que el grafito forma la mina de un lápiz, los silicatos la corteza terrestre y muchos granos de arena, mientras que el núcleo de la Tierra consiste principalmente de hierro y níquel. Estos granos de polvo que podrían parecernos insignificantes, son en realidad diminutas semillas de lo sólido, pues se encuentran detrás del origen de todas las estructuras que nos rodean.

¿De dónde han salido todos esos granos y cómo se organizan para formar cosas más grandes? Para formar los granos de polvo no nos sirven los ambientes tenues que predominan en el medio interestelar. Necesitamos un medio lo suficientemente denso como para que los átomos puedan encontrarse con facilidad y unirse, creando moléculas primero y estructuras sólidas después. El medio en donde se produce la formación de granos debe tener también temperaturas lo suficientemente bajas, como para que no se volatilicen los compuestos de interés (por debajo de unos 1500 grados para los compuestos más resistentes). Por increíble que parezca, para encontrar las condiciones adecuadas debemos buscar en las estrellas.

Durante la mayor parte de sus vidas, las estrellas consumen el hidrógeno de su interior, convirtiéndolo en helio en las reacciones nucleares que son su fuente de energía. Después de agotar el hidrógeno, una estrella puede consumir distintos elementos convirtiéndolos en otros más pesados, pero cuando el hidrógeno se acaba en su núcleo, la estrella se vuelve inestable y sus capas exteriores se expanden y enfrían, como dijimos que le sucederá al Sol dentro de cinco mil millones de años. Las estrellas se convierten en gigantes, y sus capas exteriores proporcionan lugares adecuados para la formación de granos de polvo estelares. Algunas estrellas

producen tanto polvo que este las oscurece casi por completo en luz visible, aunque pueden ser observadas en la luz infrarroja que emiten los granos de polvo al ser calentados por la luz estelar. Esta misma luz estelar, al incidir sobre los granos de polvo los empuja hacia el exterior, y las estrellas gigantes van expulsando sus envolventes ricas en polvo.





*Figuras 11a, 11b, 11c. Tres nebulosas planetarias de nuestra galaxia observadas con el telescopio espacial Hubble. Crédito: NASA, ESA, Hubble Heritage Team*

En las estrellas con masas inferiores a ocho veces la masa del Sol, las capas de gas y polvo que se están expulsando pueden volverse temporalmente visibles formando las espectaculares nebulosas planetarias descritas más arriba (figuras 11a, 11b, 11c). Todo este material que vemos, acabará por incorporarse al medio interestelar, mezclándose con este.

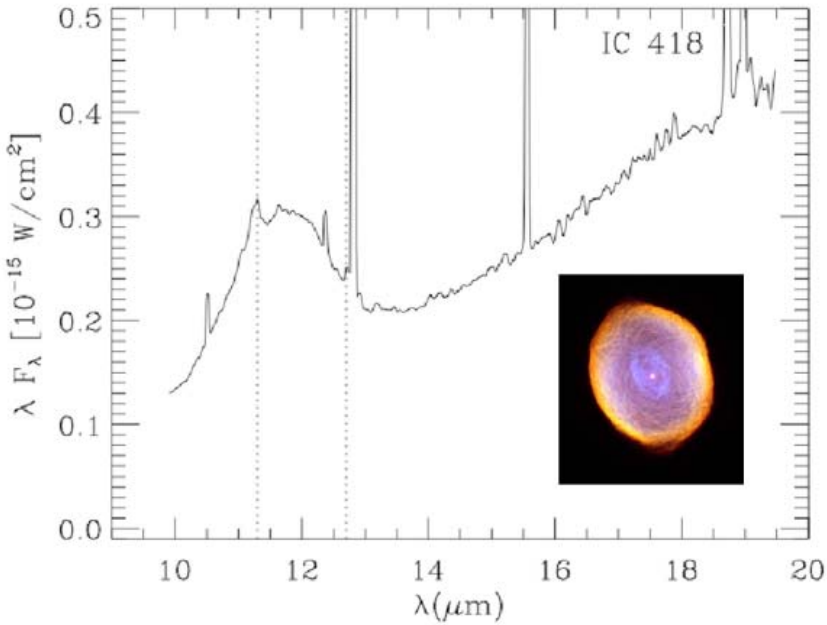
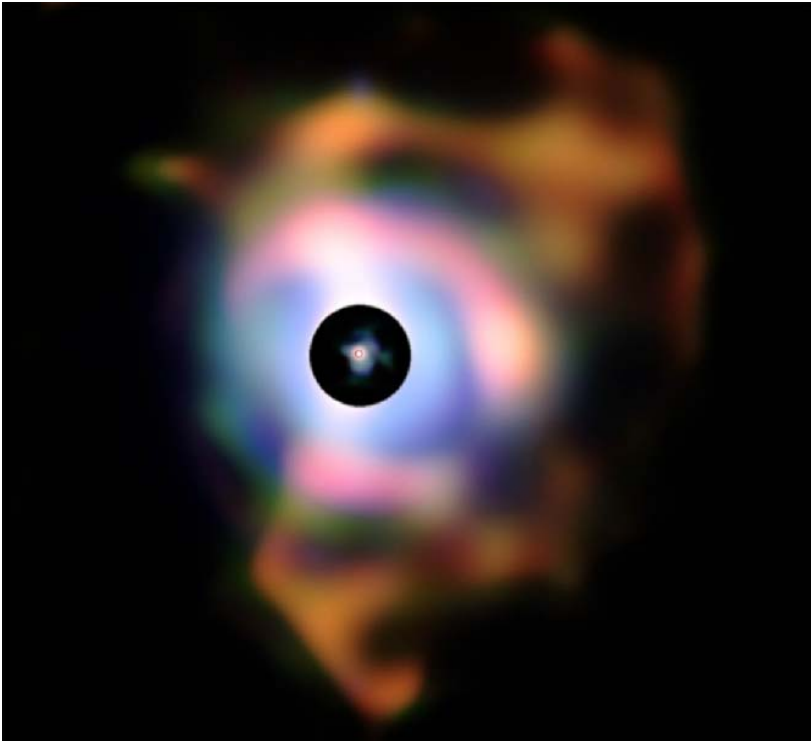


Figura 12

La estructura y composición de las distintas sustancias que se encuentran en los granos de polvo hace que absorban y emitan luz a ciertas energías (o colores o longitudes de onda) características. Esto implica que si obtenemos un espectro de un objeto con polvo, es decir observamos cuánta luz nos llega del objeto a cada energía, podemos identificar la composición de sus granos de polvo. Como ejemplo, en la figura 12 se muestra una zona del espectro de la nebulosa planetaria IC 418, con una imagen de la nebulosa del telescopio espacial Hubble en el recuadro (crédito: NASA/ESA/Hubble Heritage Team/R. Sahai). En el eje vertical tenemos una medida de la cantidad de luz detectada, en el eje horizontal se muestra la longitud de onda de dicha luz en micras (millonésimas de metro). Podemos ver picos estrechos de luz (algunos cortados por la escala elegida) que se deben a la emisión de ciertos átomos ionizados de neón y azufre. Las

líneas punteadas verticales indican la posición de luz emitida por moléculas de hidrocarburos policíclicos aromáticos; el pico ancho que se encuentra por debajo de estos rasgos se debe a la emisión de carburo de silicio (SiC), presente en los granos de polvo de esta nebulosa planetaria. El espectro fue obtenido con el telescopio espacial Spitzer (operado por JPL/Caltech con un contrato de la NASA).

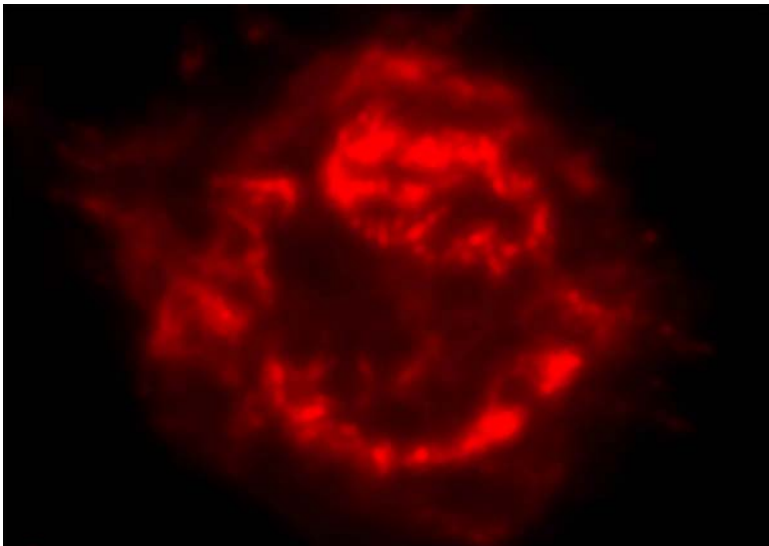


*Figura 13. Betelgeuse y su envoltura de gas y polvo. Crédito: ESO/VLT/P. Kervella y colaboradores.*

Las estrellas más masivas también pueden pasar por una etapa de gigante o supergigante en la que forman granos de polvo. Un ejemplo es la estrella Betelgeuse de la constelación de Orión, la cual es tan grande que si la colocáramos en lugar del Sol, su superficie llegaría casi hasta la órbita de Júpiter.

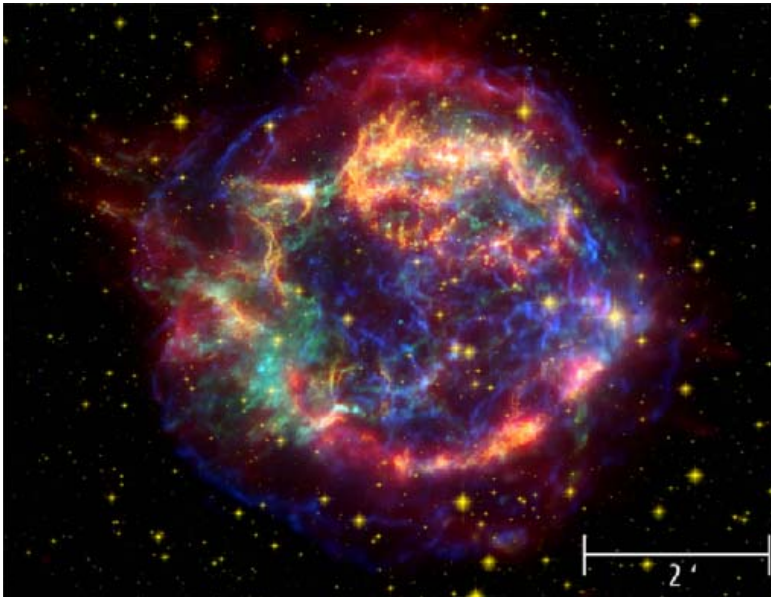
Betelgeuse tiene a su alrededor una envoltura de gas y polvo que eyectó y que alcanza distancias de sesenta mil millones de kilómetros. La imagen de la figura 13 fue tomada en luz infrarroja: un pequeño círculo rojo en el centro indica la posición y tamaño de Betelgeuse, a su alrededor vemos el material eyectado. La parte central es mucho más brillante que el resto y se muestra con otra escala de brillos. La luz emitida por la envoltura indica que sus granos de polvo tienen silicatos.

Otros ambientes donde pueden formarse granos de polvo son los remanentes de explosiones de supernova, donde el material está enriquecido con átomos pesados, producidos en reacciones nucleares dentro de la estrella que explotó. Consideremos, por ejemplo, a Casiopea A, remanente de una supernova cuya explosión se observó hace unos 330 años. Una imagen en luz infrarroja (figura 14a) muestra la distribución de sus granos de polvo. Casiopea A se encuentra a una distancia de diez mil años luz y tiene diez años luz de diámetro.



*Figura 14a. Casiopea A en luz infrarroja. Crédito: NASA, JPL, D. Hines, University of Arizona*

Los remanentes de supernova tienen también gas muy caliente, a una temperatura de diez millones de grados. Este gas tan caliente no puede observarse en el infrarrojo ni en luz visible, pero sí emite en rayos X, como muestra la imagen de Casiopea A tomada en rayos X desde el espacio con el telescopio Chandra (figura 14b). Los distintos colores de la imagen reflejan rayos X con energías diferentes: rojo para las menores energías, azul para las mayores. El punto azul en el centro podría ser una estrella de neutrones creada tras la explosión. El gas calienta al polvo a temperaturas de unos 10 grados. Cuanto menor es la temperatura, menor es la energía característica de la emisión de luz, y por eso el gas de diez millones de grados emite principalmente en rayos X mientras que el polvo a 10 grados emite, como los seres humanos a sus 37 grados, en el infrarrojo.

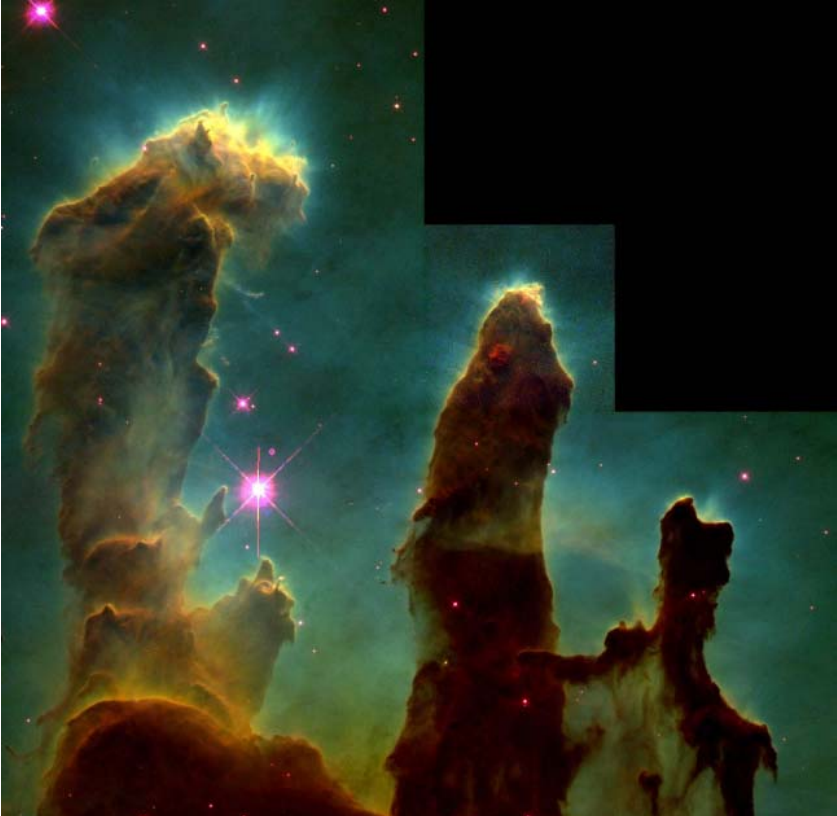


**Figura 14b.** Casiopea A en rayos X. Crédito: O. Krause y colaboradores, SSC, JPL, Caltech, NASA

Todo el gas y el polvo que van eyectando las estrellas durante sus vidas termina mezclándose con el material interestelar, y en este medio interestelar los granos de polvo inician un viaje que puede durar millones o miles de millones de años en el que son modificados por distintos procesos antes de ser destruidos. Las temperaturas de los granos suelen ser muy bajas, del orden de 250 grados bajo cero (a no ser que se acerquen mucho a alguna estrella) y pueden pasar por distintos tipos de nubes interestelares. Cuando se encuentran en las nubes más tenues están muy expuestos a peligros tales como fotones de luz energética y ondas de choque producidas por explosiones de supernova. Creemos que estas explosiones, cuyos efectos se propagan mejor y son más intensos en las nubes menos densas, son los principales agentes destructores del polvo (de hecho, todavía no sabemos si las supernovas producen más polvo del que destruyen).

Los granos están más protegidos cuando se encuentran dentro de nubes densas, donde además pueden crecer al depositarse nuevos átomos o moléculas en su superficie o quedando pegados a otros granos tras chocar con ellos. El polvo es también parte esencial de la vida de estas nubes, pues gran parte de sus moléculas se forman en la superficie de los granos antes de volver al gas. Las partes más densas de las nubes se condensan para formar estrellas nuevas, y esto expone a los granos a la radiación estelar, que puede destruirlos o modificar los compuestos que los cubren formando otros más complejos (figura 15).





*Figura 15. Las partes más densas de la nebulosa del Águila son zonas de formación estelar que están siendo destruidas por la radiación energética de estrellas masivas recién formadas. Crédito: J. Hester, P. Scowen, HST, NASA*

Recapitulando, los granos acaban sus vidas de una de las siguientes formas: devolviendo sus átomos al medio, incorporándose a estrellas nuevas, o uniéndose a montones de otros granos de polvo hasta formar grandes cuerpos sólidos, como cometas, asteroides o planetas. Como punto final, el material procedente de los granos de polvo puede acabar formando seres vivos en dichos planetas.



**Figura 16.** *La nebulosa de Orión (izquierda) y un detalle de su interior (arriba) mostrando estrellas recién formadas con envolturas de polvo y gas. Crédito: C. R. O'Dell, S. Wong, NASA*

## *El universo sólido*

Hace 4600 millones de años, parte de una nube interestelar densa y fría empezó a colapsarse por la gravedad y terminó formando nuestro Sistema Solar. Hoy en día podemos observar ejemplos de este proceso de formación en la nebulosa de Orión, una zona de formación estelar cercana (a una distancia de unos 1500 años luz) que puede observarse a simple vista como una manchita borrosa en la constelación de Orión. Imágenes de alta resolución, que se pueden conseguir desde el espacio utilizando el telescopio espacial Hubble, muestran en su interior estrellas recién formadas que todavía retienen una envoltura rica en polvo del tamaño de nuestro sistema solar. Envolturas de este tipo terminan formando planetas alrededor de las estrellas, como los que podemos detectar actualmente (de hecho ya conocemos más de mil planetas extrasolares y podemos inferir que existen muchísimos más). En el caso de Orión, muchas de las envolturas que observamos pueden acabar destruidas antes de formar sistemas planetarios porque se encuentran cerca de las estrellas jóvenes, masivas y muy energéticas que ionizan e iluminan la nebulosa. Sin embargo, la nebulosa tiene a su alrededor nubes densas y oscuras (oscuras en luz visible) que están formando muchas más estrellas.

La formación del Sistema Solar llevó millones de años, durante los cuales los granos de polvo se agregaron unos a otros, a veces fundiéndose y formando nuevos compuestos, hasta acumularse en rocas que después chocaron entre sí y se agruparon hasta crear cuerpos de gran tamaño. Hoy en día la superficie de la Luna refleja la violencia de este proceso, pues está cubierta de los cráteres que resultaron del intenso bombardeo. De hecho, tenemos evidencia de que la Luna se formó como resultado de la colisión de un cuerpo rocoso con la Tierra. También en nuestro planeta se formaron cráteres similares, pero han sido borrados casi por completo

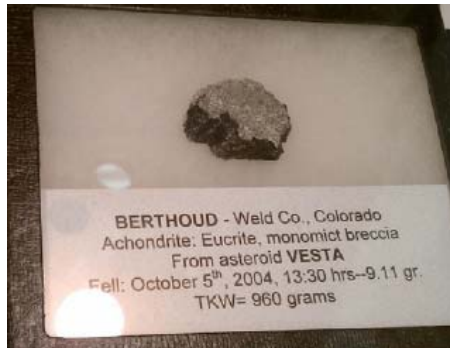
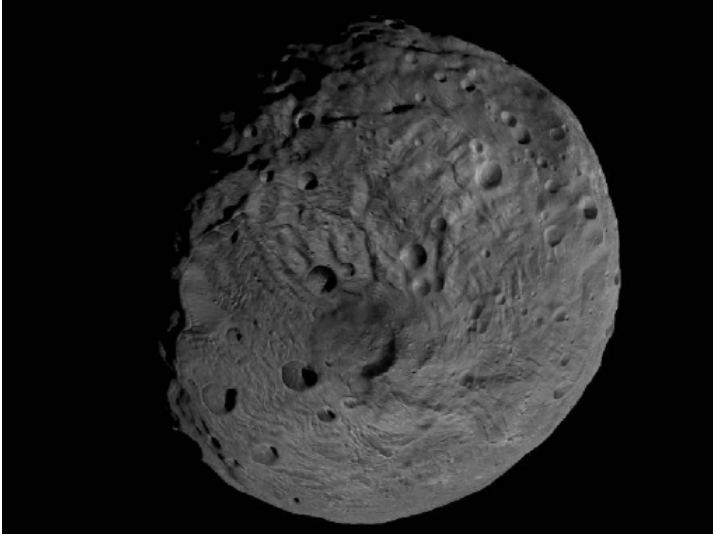
por la erosión y son difíciles de descubrir. Algunos cuerpos no se incorporaron a ningún planeta y forman hoy asteroides y cometas, responsables de que se sigan produciendo colisiones en el Sistema Solar, aunque muchas menos que en su etapa de formación (figura 17).



*Figura 17. Cometa Hartley 2, visitado por la misión espacial EPOXI. Crédito: NASA/JPL-Caltech/UMD*

Las colisiones producen fragmentos de distinto tamaño y algunos caen a la Tierra como meteoritos. La mayoría de los meteoritos encontrados en la Tierra procede de la destrucción de asteroides, pero la composición de unos pocos indica que se originaron en la Luna o en Marte, cuando algún asteroide chocó con estos objetos y les arrancó pedazos, que fueron lanzados al espacio y que, tras algún tiempo, acabaron cayendo sobre nuestro planeta. También por su composición, podemos asociar a algunos meteoritos con el asteroide de donde se originaron, ya que los distintos asteroides tienen

composiciones diferentes. Por ejemplo, disponemos de varios fragmentos procedentes del asteroide Vesta (figura 18), que con 500 km de diámetro es el segundo asteroide más grande. La superficie de Vesta muestra varios cráteres que seguramente fueron producidos por choques con otros asteroides.



**Figura 18.** *Vesta, en una imagen de la misión espacial Dawn (arriba), y uno de los meteoritos que proceden de este asteroide (derecha). Crédito: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA y Phil Plait*

Muchos meteoritos pueden confundirse con piedras comunes, de modo que si no los hemos visto caer del cielo, puede ser difícil distinguirlos. Es por eso que suelen buscarse en sitios donde haya pocas piedras, como el desierto del Sahara, la Antártida, o las grandes llanuras cultivadas de Norteamérica. De esa misma forma podemos identificar meteoritos en las imágenes de la superficie de Marte obtenidas por los vehículos robóticos que se encuentran allí: una roca como la de la imagen de arriba, encontrada en una zona donde no hay rocas, debe de ser un meteorito.

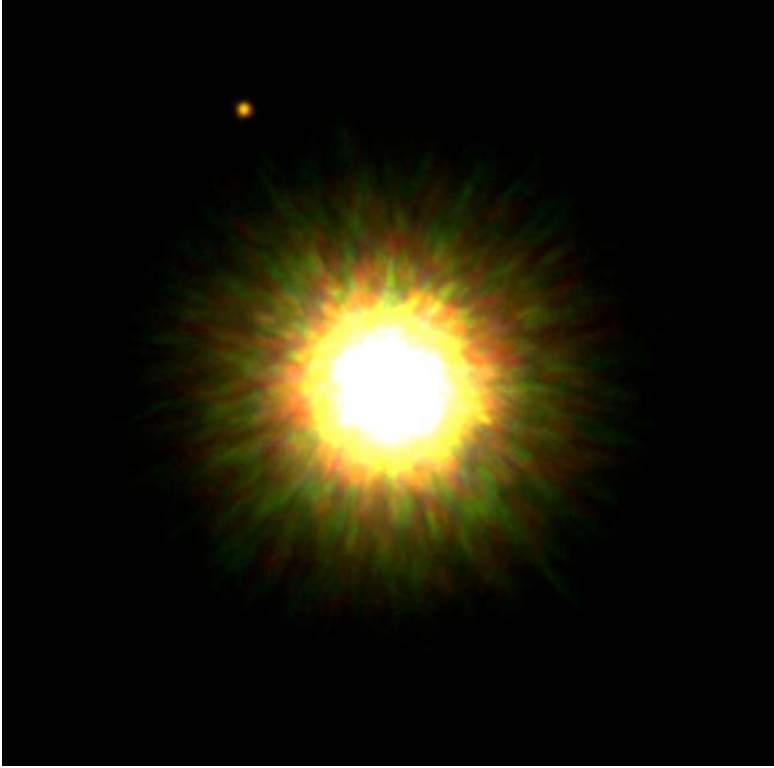


*Figura 19. Meteorito sobre la superficie de Marte. Crédito: NASA/JPL/S. Atkinson*

Por tanto, sabemos que la Tierra, la Luna y Marte pueden intercambiarse rocas. ¿Podría una de estas rocas transportar

seres vivos de un planeta a otro? En principio es posible, y hace unos años hubo mucho revuelo cuando unos científicos afirmaron que habían encontrado evidencia de vida (incluyendo fósiles de microbios) en un meteorito procedente de Marte. Sin embargo, todas las estructuras y detalles de la composición del meteorito que se usaron para argumentar un origen biológico pueden explicarse mediante procesos no biológicos, por lo que no existe evidencia sólida de que el meteorito haya tenido alguna vez relación con seres vivos. Tampoco sabemos todavía si alguna vez existió vida en Marte.

Es todavía más difícil detectar evidencia de vida en planetas alrededor de otras estrellas o exoplanetas. Para empezar, ni siquiera podemos ver a la gran mayoría de exoplanetas conocidos, aunque sí podemos inferir que existen por los efectos que tienen sobre su estrella (efectos gravitatorios que cambian un poquito el movimiento de la estrella o efectos tipo eclipse o tránsito, cuando pasan por delante de la estrella y la oscurecen en una cantidad también diminuta). El problema es que las estrellas son mucho más grandes y brillantes que los planetas que las rodean, por lo que solo podemos obtener imágenes de planetas con masas superiores a la de Júpiter que giran a distancias grandes de estrellas cercanas a nosotros y que no son muy luminosas. La imagen de la figura 20 muestra un planeta con 8 veces la masa de Júpiter que gira alrededor de una estrella un poco más pequeña que el Sol a una distancia 330 veces superior a la distancia de la Tierra al Sol. El sistema se encuentra a 500 años luz. La estrella es mucho más joven que el Sol, solo tiene unos millones de años de vida (el Sol tiene casi cinco mil millones de años) y el planeta todavía está bastante caliente por la energía generada por la contracción gravitatoria que lo formó. Por este motivo, es más fácil detectarlo en luz infrarroja, con la cual se obtuvo la imagen. Con el tiempo, el planeta se irá enfriando y se volverá menos brillante.

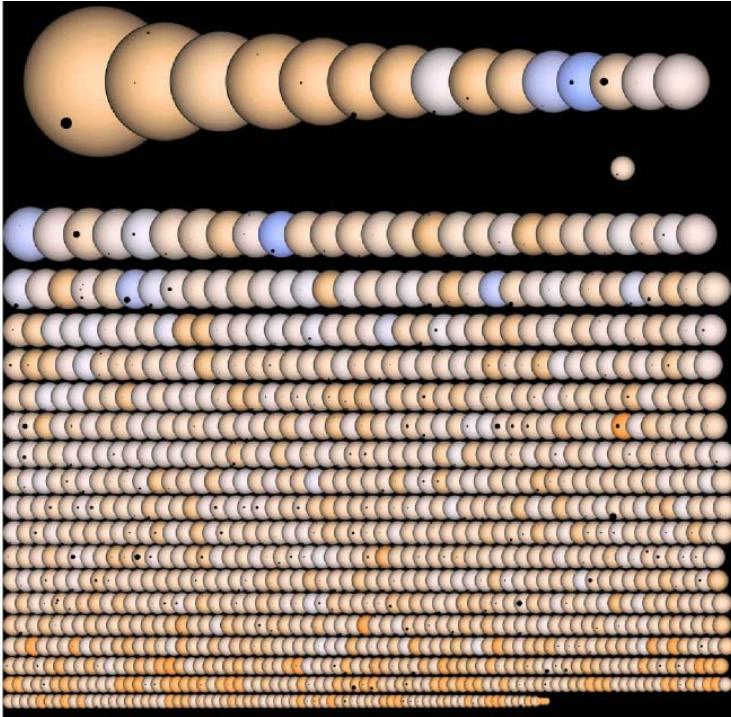


*Figura 20. Un planeta y su estrella. Crédito: Gemini Observatory/Lafreniere y colaboradores.*

La misión de la NASA Kepler colocó en el espacio en el 2009 un telescopio de casi un metro de diámetro que se dedica a observar continuamente una zona del cielo con un tamaño similar al que cubre nuestra mano con el brazo extendido. De este modo, Kepler monitorea cambios en el brillo de unas 150,000 estrellas de nuestra galaxia, buscando disminuciones periódicas que indiquen el paso de planetas por delante de la estrella (tránsitos). La ilustración de la figura 21 muestra los 1235 candidatos a planetas encontrados antes del 2011, con sus 997 estrellas compañeras ordenadas de mayor a menor. Algunos planetas son tan pequeños que

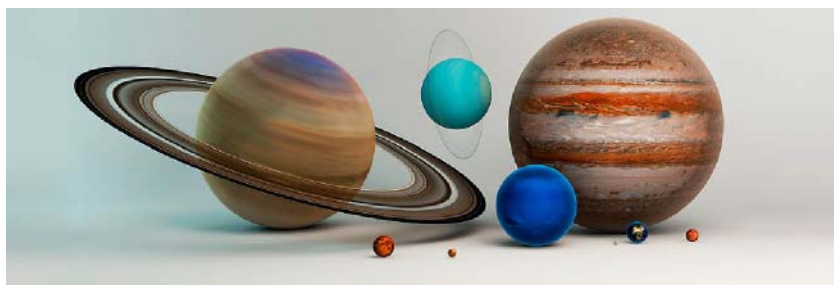


es necesario ampliar la imagen para verlos. El Sol se muestra por separado a la misma escala con las siluetas de Júpiter y la Tierra como si estuvieran en tránsito a la vez sobre su disco. De entre los planetas candidatos, 68 tienen tamaños similares a los de la Tierra. Kepler solo puede detectar aquellos planetas cuyas órbitas tienen la inclinación adecuada para que nosotros los podamos ver pasando por delante de sus estrellas. Por tanto, estos resultados indican que el número de planetas existentes es mucho mayor: algunas estimaciones apuntan a que podría haber más planetas que estrellas en nuestra galaxia.



**Figura 21. Ilustración que muestra los 1235 candidatos a planetas sobrepuestos a las imágenes de sus estrellas encontrados por la misión Kepler antes del 2011. El Sol, Júpiter y la Tierra se muestran por separado a la misma escala. Crédito: Jason Rowe y la misión Kepler.**

De entre los 1235 candidatos, un total de 54 planetas se encuentran en la zona habitable de sus estrellas, es decir a distancias adecuadas para que pueda existir agua líquida en su superficie, condición necesaria para que puedan aparecer en estos planetas seres vivos como los que conocemos. Muchos de estos planetas serán gigantes gaseosos similares a Júpiter, pero si tienen satélites rocosos (como los tiene Júpiter) estos podrían ser capaces de desarrollar vida. Por supuesto, podrían existir seres vivos cuya química fuera diferente a la nuestra y que hubieran evolucionado en otro tipo de ambiente, pero hasta que no los encontremos tenemos que razonar basándonos en lo que conocemos. El campo de estudio de exoplanetas es muy reciente (hace apenas dos décadas que se descubrió el primer planeta extrasolar) y está ahora en plena efervescencia. Aunque sea difícil obtener información sobre otros sistemas planetarios podemos esperar muchos avances en un futuro próximo. Por ejemplo, pronto sabremos cuán comunes son los sistemas planetarios parecidos al nuestro. Y, aunque las distancias involucradas son enormes, puede que algún día podamos visitar alguno de esos planetas extrasolares (aunque tendríamos que empezar por nuestra propia casa: todavía no hemos puesto los pies en ninguno de los otros planetas del Sistema Solar).



**Figura 22. Los planetas de nuestro Sistema Solar: retrato de familia. Crédito: David Fuhrer.**

Esta es entonces la historia del universo sólido, una parte insignificante de este desde el punto de vista de su masa o del volumen que ocupa, pero fundamental para entender el origen de estructuras tan complejas como nosotros, con la capacidad de descifrar y contar su historia.



## *Guillermo Arreaga García*

---

Universidad de Sonora



**R**ealizó sus estudios de Licenciatura en la Universidad Autónoma Metropolitana en la carrera de Ingeniero Físico. Sus estudios de Maestría y Doctorado los obtuvo en el CINVESTAV. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores en el nivel I desde 2006. Actualmente es Profesor Investigador Titular de la Universidad de Sonora. Ha publicado más de 15 artículos en revistas indexadas con arbitraje y un número similar de contribuciones a congresos de investigación.

## *Silvio Oreste Topa*

---



**B**achiller con Orientación Agropecuaria - Capacitación Docente Nivel II.

Se desempeña como Preceptor Docente en la EESA N° 1 de Tornquist, Pcia. de Buenos Aires, Argentina desde 1992 hasta el presente, y en el ámbito privado en el área de Informática.

# *Simulaciones Numéricas de la formación de proto-estrellas*

Guillermo Arreaga-García  
Centro de Investigación en Física  
Universidad de Sonora.  
Silvio Oreste Topa  
Buenos Aires – ARGENTINA

## *Resumen*

**E**n este trabajo ilustramos la utilidad de las simulaciones numéricas para entender con más detalle el proceso de formación de proto-estrellas poco masivas. Como una manera de resaltar que las simulaciones computacionales constituyen ya una disciplina científica bien consolidada, enfatizamos la aplicación del método científico durante el desarrollo del tema y en particular sobre las simulaciones<sup>2</sup> usadas.

## *Introducción: La física tradicional y el proceso de formación estelar*

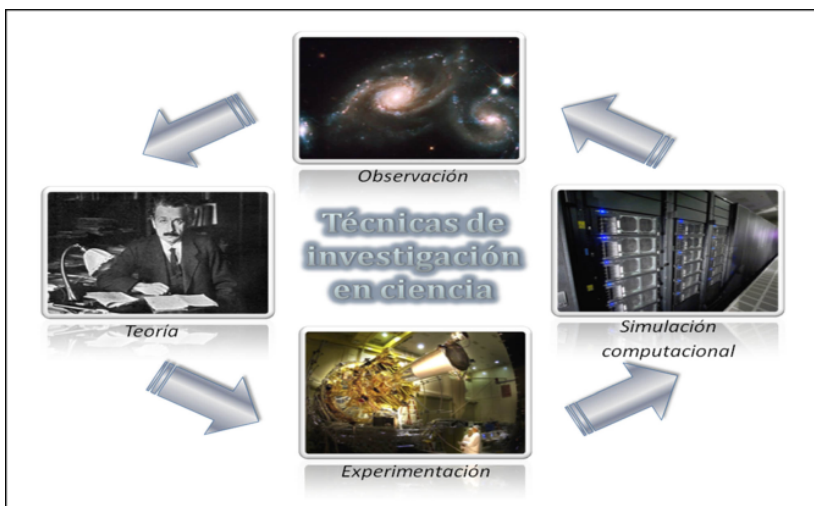
El objetivo de la física es entender la manera de cómo ocurren los procesos en la naturaleza, en particular las propiedades dinámicas del proceso, a saber: el tiempo de duración, la materia y la energía involucradas, así como sus interacciones. Los métodos de investigación tradicionales de la física han sido la teoría y el experimento. Así, cuando una teoría se propone para explicar algún fenómeno físico particular, sus

---

<sup>2</sup> Por esta razón, los conceptos básicos del método científico serán brevemente resumidos en el apéndice A.

predicciones se someten de inmediato a verificación experimental. Asimismo, cuando se obtienen nuevos resultados experimentales que no encajan en el marco de las teorías físicas existentes, se pone en marcha de inmediato la construcción de nuevas teorías que permitan incorporar esos nuevos resultados experimentales. De esta manera, la física ha evolucionado mediante la aparición tanto de nuevas teorías como de nuevos experimentos, que en el curso de los años se suceden y se corrigen mutuamente, y que permiten generar nuevos y mejores conocimientos de los procesos naturales.

Este paradigma de la investigación en física, y en general de la ciencia (ver Figura 1), se ha visto enriquecido con el desarrollo de la computación. Hoy en día, los investigadores estamos en posición de usar la enorme capacidad de cálculo de los computadores digitales para simular procesos físicos muy complejos. La física computacional podría ser definida entonces como una nueva manera de hacer investigación que complementa los resultados de las técnicas tradicionales.



**Fig.1 El paradigma de la investigación científica actual enriquecido por las simulaciones computacionales.**



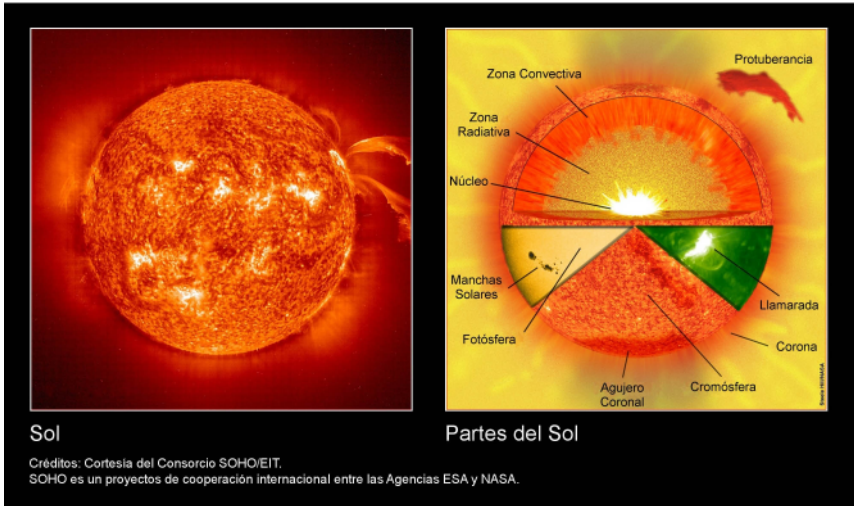
En este trabajo estamos interesados en simular computacionalmente el proceso de formación de proto-estrellas poco masivas. Por observaciones astronómicas, se sabe ahora que las estrellas nacen en enormes nubes de hidrógeno molecular, que se encuentran en equilibrio dinámico a temperaturas bajas y se comportan como enormes cúmulos de gas. Podemos adelantarnos ahora un poco para enunciar –en términos esquemáticos– que el proceso de formación se inicia con la tendencia del gas de la nube a concentrarse cada vez más en su centro, debida a la atracción gravitacional, proceso que se le conoce en física como “colapso gravitacional de la nube”.

Nos interesa particularmente describir algunas de las principales características dinámicas del proceso de colapso gravitacional, haciendo énfasis en la ocurrencia de fragmentación de la nube progenitora. Sin embargo, éste es un fenómeno físico complejo y muy lento, tal que un estudio realizado de la manera tradicional implicaría prácticamente la imposibilidad de visualizar los detalles del proceso. Es aquí en donde la potencia de cálculo de las maquinas y las simulaciones numéricas se vuelven una herramienta muy útil, por no decir indispensable, para estudiar el proceso de formación en detalle.

Así pues, nos apoyaremos en simulaciones numéricas del proceso de formación de proto-estrellas que hemos realizado en años recientes; dichas simulaciones nos han permitido entender, con mayor detalle, el proceso de formación de sistemas binarios de proto-estrellas. En las secciones siguientes intentaremos mostrar al lector algunos de los aspectos físicos más importantes del colapso gravitacional de nubes progenitoras, pero antes vamos a intentar describir brevemente la naturaleza de las simulaciones computacionales en términos generales. También presentamos los conceptos básicos del Método Científico y de las simulaciones numéricas (Apendices A y B, respectivamente)

## Conceptos Básicos : estrellas, proto-estrellas y nubes moleculares

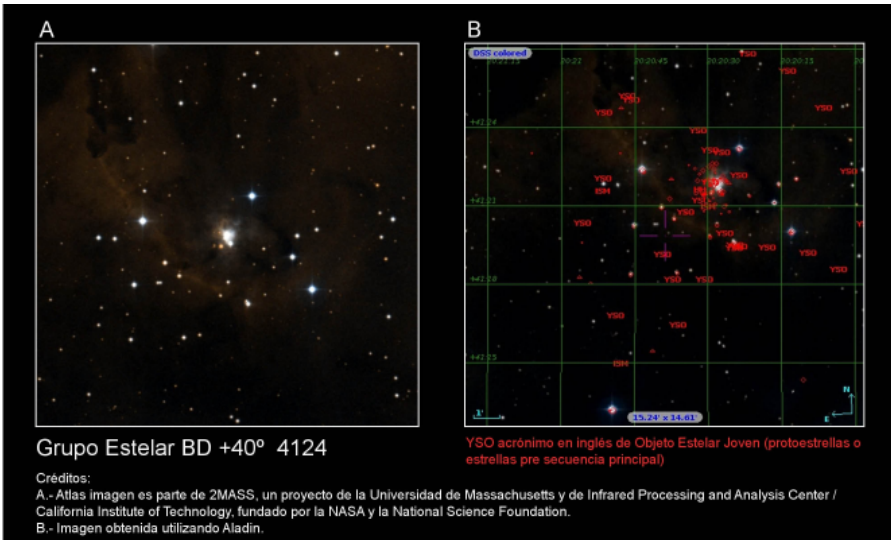
Las estrellas son bolas de plasma en equilibrio termodinámico– que se podría visualizar como un *gas denso y caliente*–, en cuyo interior se producen reacciones termonucleares que generan energía, la cual es emitida al espacio en forma de radiación electromagnética. La luz visible forma parte de esa radiación electromagnética y es por esta razón que notamos a simple vista que hay miles de millones de estrellas en el cielo (ver Figura 2).



**Fig. 2** El Sol es una estrella de masa media del tipo espectral G2. Se encuentra en el centro del Sistema Solar y constituye la mayor fuente de energía electromagnética de este sistema planetario.

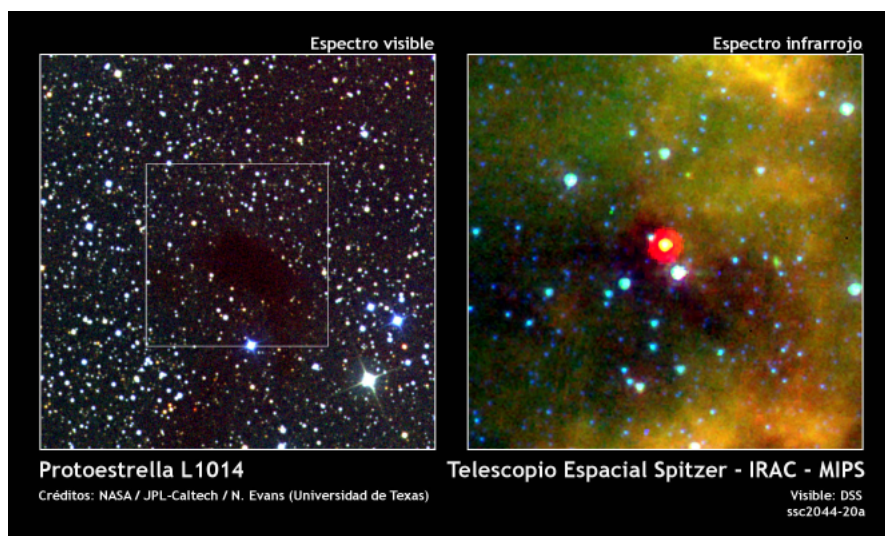
Las estrellas nacen a partir de enormes nubes de gas de hidrógeno molecular muy frío que se encuentra principalmente en los brazos espirales de las galaxias. Estas nubes *colapsan gravitacionalmente* debido a su propio peso, dando lugar a una fuerte concentración de materia en su centro;

esto provoca a su vez que la temperatura del gas aumente significativamente en la medida en que se reducen sus dimensiones espaciales y por consiguiente aumentando su densidad, hasta el punto de iniciar las reacciones nucleares propias de una estrella (ver Figura 3).



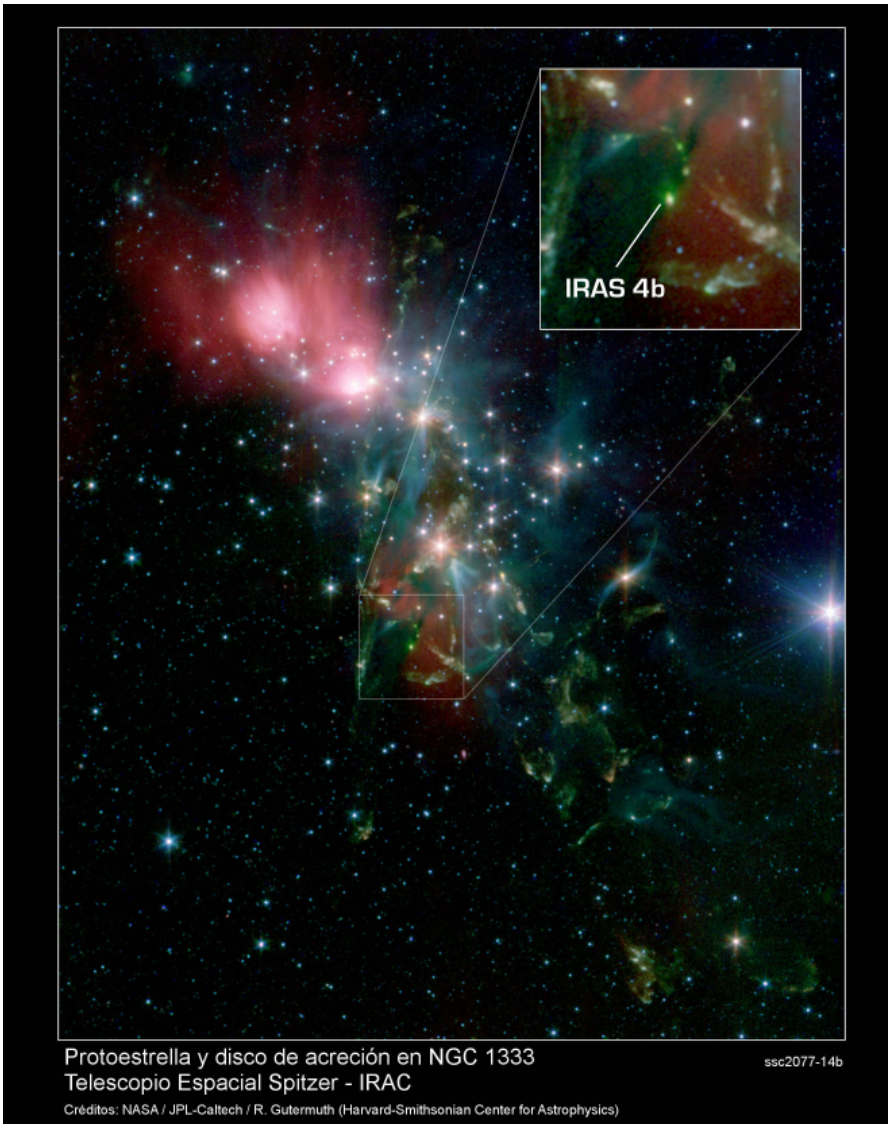
**Fig. 3 Agrupación de estrellas conocida como BD 40° 4124, en la que aun están naciendo estrellas.**

Ahora bien, una proto-estrella es un estado intermedio en el camino de evolución desde una nube hasta una estrella; son una acumulación de gas muy caliente, que emite radiación infra-roja por el efecto de su alta temperatura, pero que aun no genera luz propia mediante reacciones nucleares. Por esta razón, las proto-estrellas sólo se pueden ver usando telescopios que captan luz en el infrarrojo. Si miramos con telescopio óptico hacia una nube de gas, en donde hubiese proto-estrellas en formación, solo veríamos una mancha negra en el cielo, como se ilustra en la Figura 4.



*Fig. 4 Las proto-estrellas no se pueden ver a simple vista, solo se pueden ver en el infrarrojo.*

En la Figura 5 se muestra una fotografía de la nebulosa NGC 1333, una nube de gas progenitora típica de estrellas ubicada en la constelación de Perseus, localizada a 1000 años luz de distancia; se trata de una de las regiones de formación estelar más próximas a la Tierra. Otro ejemplo muy conocido es la nebulosa M42, o nebulosa de Orión, que se encuentra a unos 1270 años luz de la Tierra; es una de las nebulosas más brillantes del cielo nocturno, observable fácilmente a simple vista al sur del cinturón de Orión en la constelación del mismo nombre. Como dijimos antes, estas nubes están formadas principalmente por hidrógeno molecular, aunque también están presentes polvo estelar y pequeñas cantidades de monóxido de carbono, CO. Los tamaños observados de las nubes progenitoras de estrellas van desde las llamadas pequeñas, con masas de hasta algunas masas solares a las llamadas grandes y/o gigantes, las cuales podrían tener masas desde 100 hasta 1 millón de veces la masa del Sol.



*Fig. 5 Nube Molecular en NGC1333 mostrando varias generaciones de estrellas.*

Otro detalle muy interesante que nos conviene resaltar desde ahora, es que los astrónomos han observado que las estrellas recién nacidas casi siempre están agrupadas en pa-

res y en menor proporción en grupos de más de dos miembros. Entonces, en el seno de estas nubes gigantes puede haber miles de estrellas jóvenes apareadas en pequeños grupos binarios y múltiples, como se ilustra en la Figura 3.

*Simulaciones Numéricas: la definición de sistema, de modelo y la física básica involucrada en el proceso de formación de proto-estrellas.*

En los años 40 del siglo XX aparecieron los primeros computadores electrónicos y rápidamente quedó claro que podían ser una importante herramienta de cálculo en la ciencia. Las primeras simulaciones numéricas hechas por computadora fueron realizadas por los matemáticos Stanislaw Ulam, John Von Neumann y Nicholas Metrópolis, en el Proyecto Manhattan del Laboratorio Nacional de los Álamos de California; ellos hicieron uso del método de Monte-Carlo para resolver problemas de difusión de neutrones para el diseño y desarrollo de armas nucleares.

En la actualidad se llevan a cabo diariamente simulaciones numéricas en los más diversos campos de la ciencia y la tecnología: meteorología, vialidad, astronáutica, medicina, adiestramiento de pilotos, química, e incluso en la industria del entretenimiento, con software recreativo que simulan desde ciudades, trenes, aviones, automóviles de carrera hasta escenarios bélicos.

El Dr. Jerry Banks, define la simulación numérica como *“el desarrollo de un modelo lógico matemático de un sistema, de tal forma que se tiene una imitación de la operación de un proceso de la vida real o de un sistema a través del tiempo. La simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema...que nos ayuda a inferir las características operacionales de tal sistema”*. Entonces, una simulación numérica es una re-creación matemática, de un proceso natural, simulado en la computadora, en el cual, la entrada son números, sobre los cuales se realizan operaciones matemáti-

cas y a la salida de la simulación, se obtienen más números. Uno de los trabajos más relevantes del simulador científico es interpretar correctamente todos esos números para obtener imágenes útiles del proceso real.

En la definición del Dr. Banks se usan tres conceptos básicos: Sistema, Modelo y Simulación, los cuales serán aplicados con el objetivo de enmarcar las simulaciones numéricas del proceso de formación proto-estelar (y de algunos otros fenómenos astrofísicos relacionados, como la evolución de los discos de acreción del material remanente) en el marco del método científico. Esto nos permitirá validar o refutar determinadas hipótesis como –por ejemplo, una relacionada a la formación de exo-planetetas .

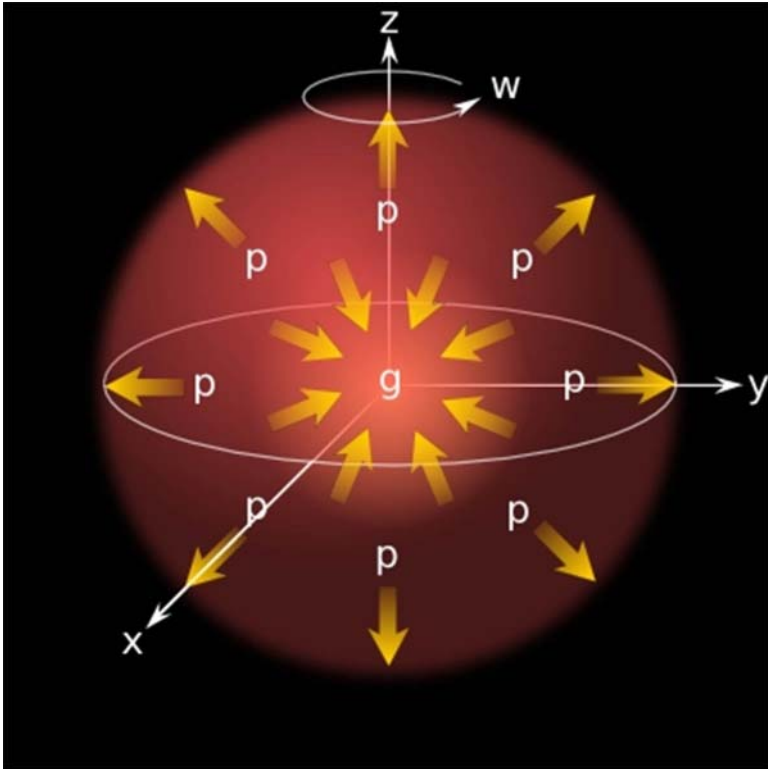
En el caso particular de la formación de proto-estrellas mediante el colapso gravitacional de nubes, podemos entonces definir<sup>3</sup> al *sistema* como una nube de gas cuyo colapso nos interesa estudiar. Las *entidades* del *sistema* son las estrellas ya formadas, el gas remanente de la nube; las partículas de polvo circundante y la radiación que proviene de las estrellas y de otras fuentes. Las propiedades físicas importantes de estas entidades son, entre otras, la temperatura y la densidad, que adicionalmente se relacionan entre sí, a saber: la temperatura del gas aumentará si aumenta su densidad. Las entidades afectan obviamente la evolución de la nube. De hecho, en las nubes progenitoras hay mucha actividad tanto de origen interno (dentro de la nube misma) como externo ( de la galaxia que contiene a la nube e incluso de galaxias vecinas). Entre otros fenómenos, podemos mencionar los siguientes como ejemplo: i) las nubes se calientan porque reciben radiación y rayos cósmicos, proveniente de regiones distantes del Universo; ii) presiones externas debidas a fuertes vientos estelares o provenientes de explosiones de estrellas supernovas localizadas en la misma nube,

---

3 Ver Apéndices A y B para comparar los conceptos en negritas de estas dos secciones.

que generan perturbaciones en la misma nube; iii) y también colisiones entre nubes como consecuencia de fuerzas de marea provocadas por la presencia de galaxias vecinas o incluso por colisiones directas entre galaxias enteras, lo que provoca la redistribución del gas en la nube.

Una vez definido el sistema, se construye un modelo que represente al sistema en las simulaciones. Para estudiar la formación de proto-estrellas, conviene modelar la nube como una esfera de gas que se encuentra en rotación como cuerpo rígido sobre un eje; con pequeñas diferencias de densidad en la distribución de masa, de tal forma que actúan como semillas que favorezcan el colapso gravitacional inicialmente (ver figura 6).



*Fig. 6 El modelo idealizado para estudiar el colapso gravitacional de nubes.*



Debido a los eventos mencionados en los puntos i a iii, en algunas regiones de la nube el gas se acumula en torno a pequeñas perturbaciones de masa que alcanzan de manera fortuita una densidad mayor que su medio ambiente circundante. La gravedad intenta siempre ensamblar más materia sobre estas primeras acumulaciones fortuitas debido a su naturaleza de fuerza siempre de atracción entre toda la materia interactuante (son las fuerzas que apuntan a la “g” en la Figura 6). Sin embargo, aunque la mayoría de las nubes tienen bajas temperaturas, como se trata de un gas, siempre hay una presión que lo empuja hacia la expansión (ilustradas por las fuerzas “p” en la figura 6), esto es, que se opone permanentemente a la compresión del materia por la fuerza de gravedad. Ahora bien, se ha observado que las nubes progenitoras son en general frías: una temperatura típica sería de 10 Kelvin, es decir, unos 263 grados Celsius bajo cero. Mientras que su masa puede llegar a ser tan grande como cientos de veces la masa de nuestro Sol. Así pues, no es sorprendente que la fuerza de gravedad tenga muchas posibilidades de ganarle a la fuerza de presión en esta primera etapa de confrontación entre ellas de tal forma que en varias regiones separadas de la nube se inicia el proceso de acumulación de gas.

Conviene resaltar aquí que un modelo sobre-simplificado podría ser inútil en el momento de hacer predicciones, mientras que uno demasiado complejo puede ser muy difícil de implementar en la computadora y tal vez, no aportaría ninguna mejora significativa en los resultados obtenidos con un modelo mejor diseñado. Para la formación de proto-estrellas, las *variables* importantes del *modelo* son la masa, temperatura y densidad de la nube, el radio de la esfera, la velocidad de rotación y la distribución inicial de las perturbaciones de densidad.

A partir de observaciones, se *deben obtener los datos* y prepararlos para ser incorporados en la simulación del sis-

tema como condiciones iniciales en el proceso de evolución. La *validación del modelo y de la evolución* es una etapa crucial en toda simulación numérica, pues se debe demostrar, sin ninguna duda, que los resultados de la simulación reproducen adecuadamente algunos de los elementos físicos observados en el proceso real de formación. En la siguiente sección vamos a mencionar más evidencia observacional acerca del proceso de formación de proto-estrellas.

### *El proceso de formación estelar: una perspectiva puramente teórica*

Las escalas de tiempo involucradas en el proceso de colapso gravitacional –millones a cientos de millones de años– hacen imperativo que el astrofísico-simulador aplique extrapolación temporal. Haciendo uso de una analogía podemos ilustrar tanto el problema como la solución que tales escalas de tiempo nos imponen. Imaginemos a un zoólogo que solo tiene un mes para estudiar a los leones en alguna región de África. Es lógico esperar que en ese corto período de tiempo le sea imposible observar la evolución de un león en particular, desde su gestación hasta su muerte por vejez. No obstante, gracias a que la población de leones es todavía abundante en esa región, el zoólogo puede mirar en varias direcciones y estará entonces en posibilidad de observar al mismo tiempo los distintos estados de la vida de los leones: leonas preñadas, cachorros, animales jóvenes y adultos, en la vejez y en el final de su vida. Aplica entonces un proceso de extrapolación de sus observaciones para reconstruir la vida de un león típico, con el objetivo de entender la naturaleza de esta clase de animales.

En el caso de la formación de estrellas, se puede aprovechar los datos de los astrónomos que han observado muchas regiones del cielo en busca de todo tipo de nubes, en las cuales se han observado estrellas en nacimiento, en evolución, y

en el momento de su muerte; de esta manera se ha logrado extrapolar todo el proceso de evolución de una estrella típica, tal como se ilustra en la Figura 7.

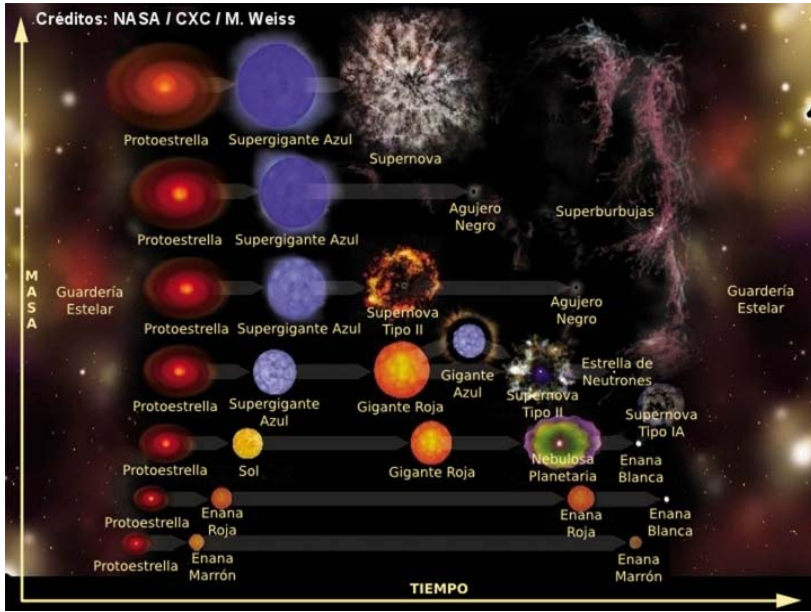
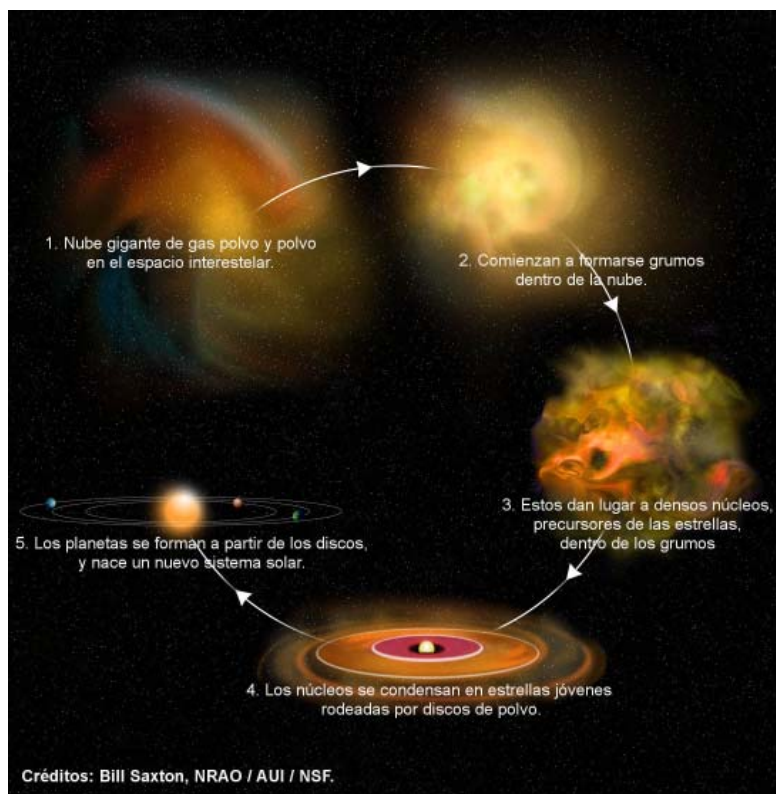


Fig. 7 Diagrama esquemático con el proceso de evolución estelar, desde su nacimiento hasta su muerte.

Esta gran riqueza de observaciones astronómicas en colaboración con el talento de muchos investigadores armados con papel y lápiz para imaginar ideas, ha permitido construir un modelo teórico del proceso de formación estelar, que en la Figura 7 correspondería a concentrarnos sólo en la columna de la región izquierda, en donde se pueden ver las proto-estrellas, en color rojo; las cuales se forman con tamaños y masas diferentes, de acuerdo con el proceso de formación. Resaltamos que el proceso de evolución particular de la estrella, depende fuertemente de la masa de su proto-estrella al momento de su formación ( en otros términos, de su nacimiento).

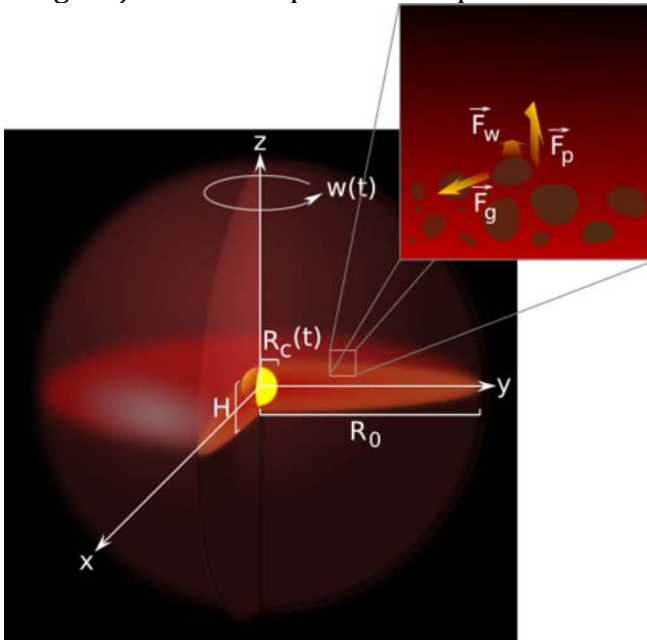
Tal como explicamos en la sección anterior, la aparición de pequeñas perturbaciones en la densidad en algunas regiones de la nube en rotación, provoca la acumulación inicial de más gas en esas regiones. Con mayor razón ocurre este proceso de acumulación de masa en el centro de la nube, pues en general ahí son más densas este tipo de nubes.

Recordemos que el momento angular es una medida de la cantidad de rotación de un cuerpo; además es una cantidad que se conserva durante toda la evolución de la nube ya, que suponemos que no hay torcas externas actuando sobre la nube en el modelo en consideración.



**Fig. 8 Ilustración artística del proceso de colapso gravitacional y de formación estelar y de planetas.**

Así pues, como consecuencia de la rotación y por conservación del momento angular, la nube empieza a aplanarse de los polos hacia el ecuador, de tal manera que se forma un disco aplanado en el ecuador que gira más rápido que el resto del gas que todavía está en la nube esférica; este disco se le conoce como disco de acreción, porque el gas continúa cayendo sobre él por efecto de la fuerza de gravedad (ver figura 9). La anchura del disco de acreción queda determinada por el equilibrio mecánico entre las componentes verticales de la fuerza gravitacional y de presión del gas, tal como mostramos en el recuadro de la figura 9, en el cual se ve un diagrama de cuerpo libre de un elemento de gas. En el equilibrio hidrodinámico, la proyección de la fuerza de gravedad en la dirección vertical, debe cancelar a la fuerza de presión que el gas ejerce como oposición al aplanamiento de la nube.



**Fig. 9.** Anchura del disco de acreción y diagrama de cuerpo libre de un elemento de fluido.

En el modelo puramente teórico que se construye en base a cálculos aproximados, usando papel y lápiz, uno podría concluir fácilmente que se forma una sola proto-estrella en la región central de la nube, tal como se ilustra en la figura 9. Sin embargo, fue Larson uno de los primeros en predecir teóricamente que la fragmentación de la nube es un ingrediente muy importante para el proceso de formación de proto-estrellas. Como veremos en la siguiente sección, las simulaciones numéricas nos permiten obtener grupos de proto-estrellas con pocos miembros, a saber: sistemas de dos y tres miembros (binarios y terciarios) en su mayoría.

La *hipótesis* que nos interesa corroborar mediante simulaciones numéricas es que luego de formarse la acumulación central de gas más denso, el resto de gas circundante forma el disco de acreción, en el cual empiezan a concentrarse más gas y pueden formar proto-planetas. Aquellos de mayor masa atrapan grandes cantidades de gas y forman planetas gigantes gaseosos, parecidos a Júpiter, mientras que los más pequeños no logran atrapar una extensa atmósfera y forman planetas, planetoides o satélites rocosos como la Tierra. Aunque es un tanto difícil, podríamos realizar *experimentación* por medio de un satélite de observación diseñado para realizar un censo de sistemas estelares con jóvenes estrellas centrales unitarias.

Es posible también la *observación* directa haciendo uso de telescopios, para intentar localizar una serie de sistemas estelares con una sola estrella central, en los cuales se estén formando exo-planetas. Debemos generar una *descripción detallada* de esos sistemas, y realizar la acumulación de datos por medio de una exhaustiva investigación. En el mejor de los casos, se espera que sea posible la *inducción*, es decir, extraer características comunes a todos los sistemas observados.

Finalmente, la *demonstración (o refutación)* de la hipótesis se lleva a cabo por la consistencia de los resultados de las simulaciones, la cual se obtiene mediante la *comparación*

*universal* de los resultados de otros investigadores y también cada vez que se observa un nuevo sistema que entra dentro del marco de esta teoría, se contrastan los resultados con las observaciones, y entonces se reafirma, se corrige, se amplía e incluso se pueden encontrar falsos los resultados (ver figura 10).



*Fig. 10 Las etapas principales del método científico considerando el caso de simulaciones numéricas.*

*La versión computacional de la formación proto-estelar*

Para construir un modelo computacional aproximado del proceso teórico descrito justo antes, empecemos por retomar la representación de la nube como una esfera de gas que

rota en torno a un eje, como ilustramos en la figura 6. Como dijimos antes, la nube se encuentra en un estado de equilibrio mecánico: la fuerza de gravedad que intenta colapsar la nube es compensada por las fuerzas de presión del gas. Hasta que la formación de pequeños “grumos” en la densidad hacen que el equilibrio se pierda y se inicie el colapso gravitacional de la nube.

El *estado* de la nube de gas es un valor de los atributos en un tiempo determinado, que puede ser estático, cuando se mantiene constante con el tiempo o dinámico, si evoluciona con el tiempo. Así pues, el valor de la densidad del gas y del polvo del disco de acreción, la velocidad de giro del disco, el valor del campo gravitatorio de la estrella, entre otros, son cantidades que caracterizan el estado físico del sistema.

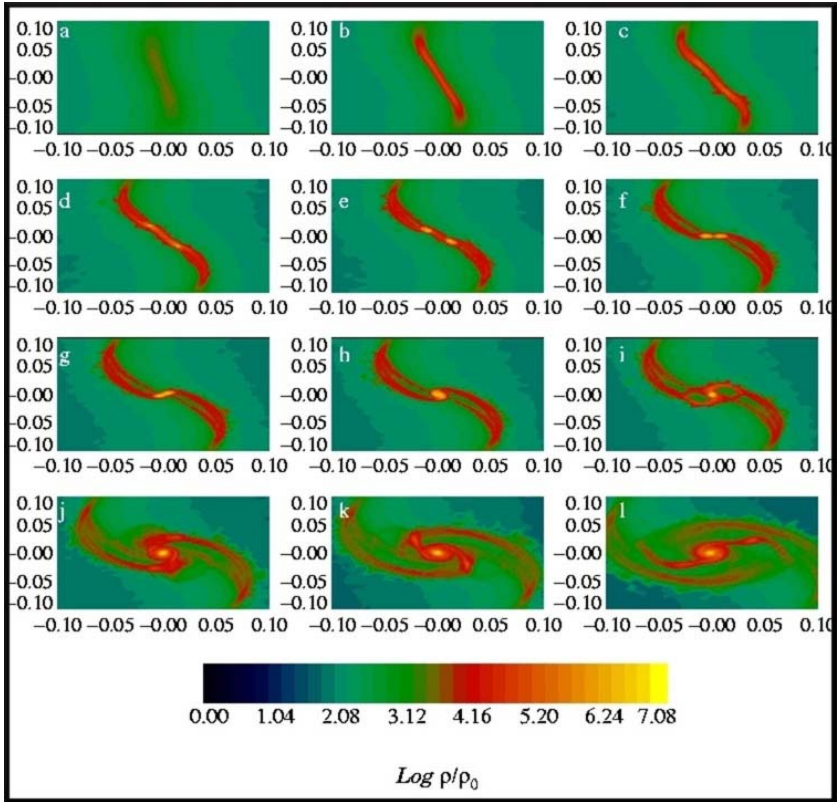
Es este punto es donde las simulaciones numéricas juegan un papel muy relevante, ya que nos permiten considerar un modelo del sistema y ajustar su estado y atributos iniciales y usar las leyes físicas con alguna modificación empírica en base a la experiencia del simulador. De esta forma estamos en posición de ejecutar muchas veces la misma simulación con pequeños cambios, de tal manera que nos permita saber qué tan bueno es el modelo comparándolo con la realidad.

En nuestras simulaciones numéricas del colapso de nubes hay muchas decisiones que tomar para establecer el estado físico inicial del modelo de nube, a saber: hay que fijar la velocidad de rotación y la temperatura; el radio y masa iniciales; la densidad total de las nubes y la distribución radial de la densidad. Como en todo fenómeno físico, las condiciones iniciales determinan fuertemente el resultado de la evolución dinámica del sistema de interés. Por esta razón, para investigar algún efecto en particular en el resultado final del colapso, se requiere normalmente generar un grupo de simulaciones, en las cuales el valor de estas elecciones, se cambian sistemáticamente entre cada simulación.



Usamos un programa de cómputo que resuelve las ecuaciones hidrodinámicas que gobiernan la dinámica del gas, en presencia de estas perturbaciones de densidad y de la fuerza de gravedad de la nube, lo cual nos permitió seguir con cierto detalle el proceso de colapso de la nube hasta densidades intermedias. Sin embargo, aún no estamos en posición de seguir el colapso hasta la formación de las estrellas, aunque podemos ya entrever varias de las características típicas de las estrellas reales porque simulamos adecuadamente su proceso de formación.

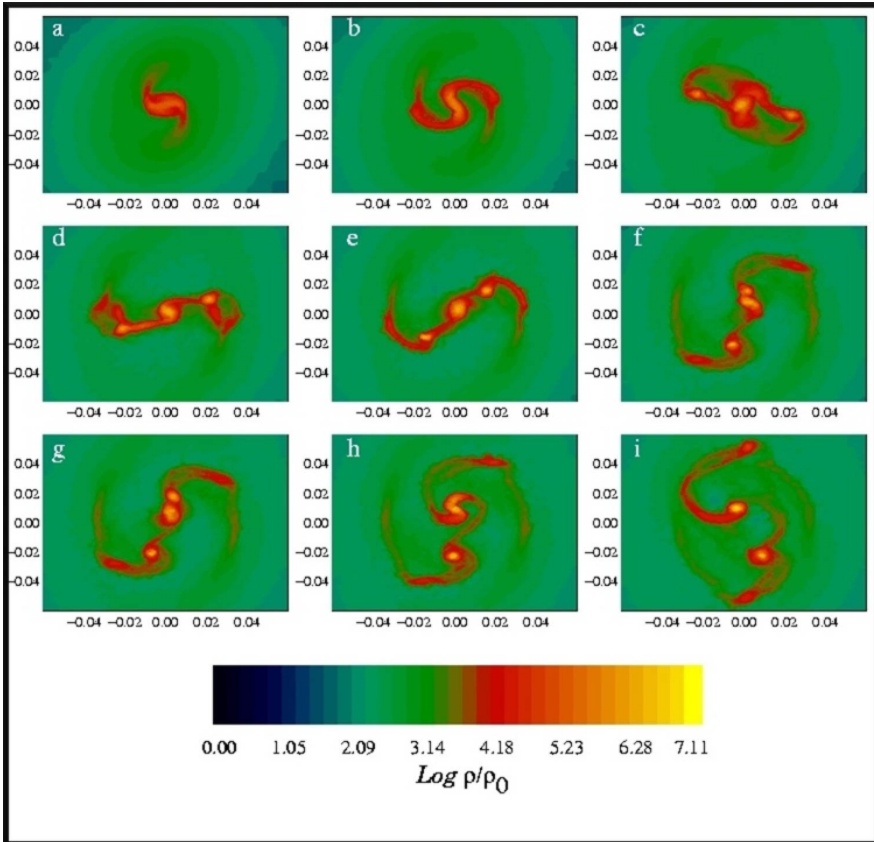
Para mostrar los resultados de algunas de las simulaciones usamos mosaicos formados por varios paneles, como se ilustra en las figuras 11 y 12. Cada panel en el mosaico corresponde a un tiempo de evolución del modelo, tal que el tiempo aumenta de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo en el mosaico. Cada panel muestra -en una misma escala de colores para cada mosaico- la distribución de densidad de una rebanada de nube paralela al plano ecuatorial, tal como se la vería desde arriba. Por ejemplo, de acuerdo con la barra de escala de densidad (que aparece en la parte inferior de cada mosaico) el color amarillo indica regiones de la nube con densidades altas; los colores rojo y verde indican regiones con densidades intermedias y por último, el color azul indica regiones de baja densidad en la nube. Las escalas de longitud que aparecen es los ejes de cada panel están normalizadas con el radio inicial de la nube y la escala de densidad está normalizada con la densidad inicial de la nube. Se deben notar entonces por las escalas en los ejes X (horizontal) e Y (el vertical) en la figura 11 vemos que el gas más denso está contenido en el 10% del radio inicial de la nube, mientras que en la figura 12 el gas más denso se concentra en la región del disco de acreción, cuya extensión es aproximadamente el 4% del radio inicial.



*Fig. 11 Mosaico de imágenes intermedias de una simulación que da como resultado una sola proto-estrella central.*

El mosaico de la figura 11 corresponde a un modelo de nube inicialmente con densidad uniforme mientras que el mosaico de la figura 12 muestra los resultados del colapso para una nube centralmente condensada en su etapa inicial. La primera y más importante diferencia entre estos mosaicos es que en la figura 11 la nube colapsa formando una sola concentración de materia en el centro mientras que en la figura 12 la nube se fragmenta de tal forma que aparecen varias concentraciones de materia resultantes que se encuentran orbitando una con respecto a las otras. En ambos

modelos se ve la formación de brazos espirales alrededor de las concentraciones de materia que aparecen como una consecuencia de la rotación inicial de la nube pre-estelar. ¿Cómo se explica esta diferencia en los resultados?



*Fig. 12 Mosaico de una simulación con varias proto-estrellas como resultado de la ocurrencia de fragmentación.*

Hemos implementado, deliberadamente, una perturbación de masa simétrica con respecto al origen de coordenadas del plano ecuatorial de la nube, con el propósito de favorecer la formación de sistemas binarios. De ahí que los

primeros cúmulos de gas que logran formarse son antípodas el uno del otro, de tal manera que una línea imaginaria que los une pasará a través del origen de coordenadas de la nube esférica original.

Cada uno de los cúmulos de gas recién formados por el fuerte colapso gravitacional de la nube pre-estelar (mostrados en amarillo en las figuras 11 y 12) ejercen por lo tanto un par gravitacional de atracción el uno sobre el otro. La velocidad de los elementos de gas se alinea con el eje imaginario de simetría que une los cúmulos, el efecto neto es que este gas del cúmulo pierde momento angular. Sabemos que el gas que se acumula sobre el disco de acreción tiene poco momento angular comparado con el del gas que se acumula en los brazos espirales. De esta manera es cómo los cúmulos principales pierden su momento angular, de tal manera que la fuerza de gravedad que se ejercen entre ellos los hace acercarse cada vez más hasta que finalmente se fusionan, como se puede ver en los primeros paneles de la figura 11.

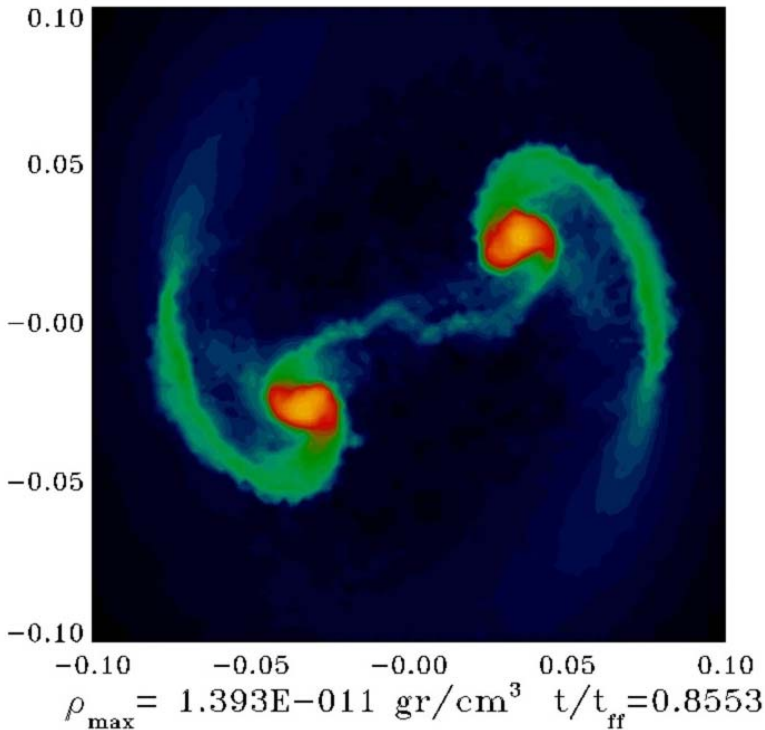
Como podemos ver, muchos detalles técnicos y físicos han sido deliberadamente dejados de lado en este trabajo de divulgación, pues hay que saber cuáles son muy importantes y cuáles no tanto, lo que hará la diferencia entre un modelo viable a uno que no es representativo, de acuerdo con el fenómeno que nos interesa estudiar.

Pensemos que este modelo computacional podría ser apropiado para representar las primeras etapas de la formación de proto-estrellas de masa pequeña, pero tal vez no serlo para proto-estrellas masivas. El modelo también podría fallar claramente en las últimas etapas del proceso de evolución del colapso, pues otro tipo de fenómenos, asociados con una densidad muy alta del gas, podrían llegar a ser también relevantes para la evolución posterior.

En el curso del colapso gravitacional, la densidad de la nube aumenta en un rango que va desde  $10^{-18}$  gr/cm<sup>3</sup> hasta  $10^{-8}$  gr/cm<sup>3</sup>, sobre todo en su región central. A densidades mayores  $10^{-10}$  gr/cm<sup>3</sup>, es posible identificar a los cúmulos

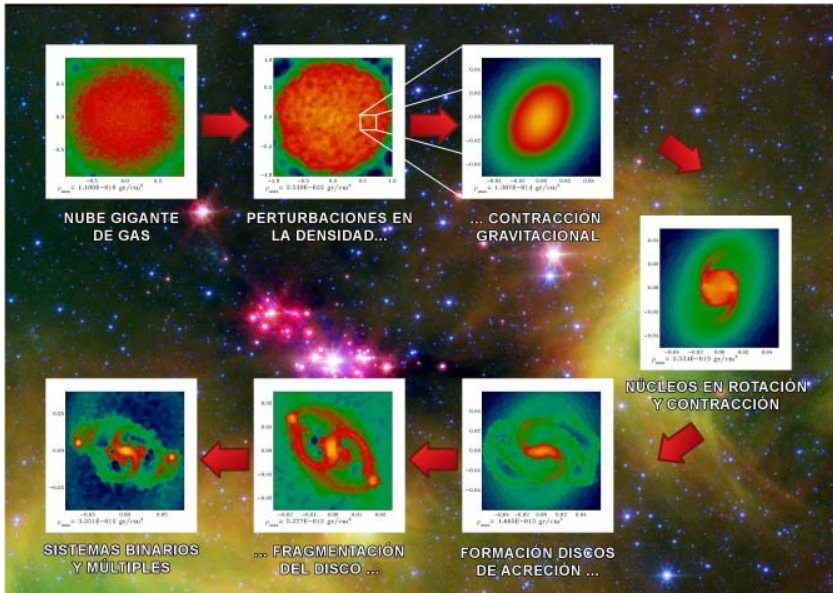
de gas más densos de la simulación como proto-estrellas. Se sabe que muchas de las características dinámicas de una proto-estrella serán heredadas por la estrella real que se formaría de seguir el proceso de colapso, hasta densidades del orden de  $10^{-1}$  gr/cm<sup>3</sup>.

Enfatizamos el hecho de que la evolución de todos los modelos que hemos descrito en los mosaicos anteriores, terminan con un sistema de dos fragmentos en órbita. En astrofísica se le llama “sistema proto-estelar binario”. Este es un resultado muy importante de nuestras simulaciones, porque así es como se ha observado que ocurre en la naturaleza: los astrónomos saben que, en efecto, a las estrellas les gusta nacer y vivir en parejas. (Ver Figura 13).



**Fig. 13** Un sistema binario de proto-estrellas que intercambian masa mientras orbitan uno con respecto la otra.

La imagen del proceso de formación que hemos logrado corroborar y enriquecer mediante simulaciones numéricas idealizadas se muestra finalmente en la Figura 14.



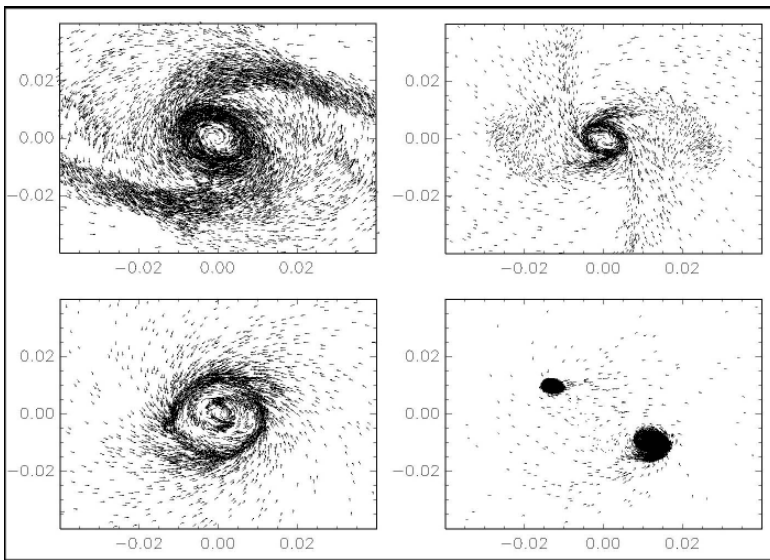
**Fig. 14** La imagen computacional actual del proceso de formación de proto-estrellas típicas no masivas, mediante el colapso y fragmentación de una nube de gas.

## Conclusiones

Las simulaciones que hemos intentado mostrar en este trabajo de divulgación fueron diseñadas para estudiar algunas características de la formación de sistemas de proto-estrellas binarios. Por tal motivo, hemos dejado de lado muchos elementos, tanto físicos como computacionales, que son muy importantes en el área de formación estelar. Por ejemplo, no hemos implementado ni la turbulencia que se ha observado en nubes moleculares grandes; ni los campos magnéticos

que pueden ser importantes en la primeras etapas de evolución de las nubes moleculares; ni los vientos y efectos producidos por las estrellas ya formadas en las nubes, etcétera.

Sin embargo, con los elementos dinámicos que sí hemos implementado, a saber: densidad uniforme o centralmente condensada, rotación de cuerpo rígido y perturbaciones iniciales simétricas, hemos podido observar la formación de filamentos de gas y la fragmentación de la nube original dando lugar a la formación de sistemas múltiples de proto-estrellas, el desarrollo de los brazos espirales alrededor de las proto-estrellas y diferencias muy notables en tanto en la extensión como en la fragmentación de los brazos espirales, como se puede apreciar en la Figura 15.



**Fig. 15** Gráficos en 2D de la distribución de velocidad para los ciertos estados de evolución obtenidos para varios modelos de simulación. Los ejes en todos los paneles están normalizados con el radio inicial del núcleo de la nube.

Curiosamente, los brazos espirales de los paneles 3 y 4 de la Figura 15 –que son delgados y cortos, pero bien defini-

dos- son capaces de dar una vuelta completa alrededor de la condensación central, lo que indica que hay más partículas en proceso de acreción en este anillo de gas que se forma a partir de los brazos espirales en lugar del cúmulo central.



***Fig. 16 La máquina Mezquite propiedad de la Universidad de Sonora, en la cual se han realizado todos los cálculos que se muestran en este artículo.***

La existencia de una buena infraestructura computacional en varias instituciones mexicanas de educación superior; además de la existencia de varios grupos de investigación a



lo largo de todo el país, que se apoyan fuertemente en el uso del cómputo de alto rendimiento con fines de investigación científica, nos permite esperar más y mejores resultados en el corto y mediano plazos, en el desarrollo de diferentes tipos de simulaciones para estudiar procesos complejos de interés en ciencia y en astrofísica en particular.

En general, podemos distinguir varios tipos de simulaciones, de acuerdo con el objetivo particular que se busca conseguir, (ver Apéndice B). Por ejemplo, supongamos ya se tiene una teoría basada en primeros principios y que muestra consistencia teórica, como ha sido el caso que hemos desarrollado en este trabajo. Aquí las simulaciones numéricas sirven para completar el marco teórico, haciendo más preciso el cuadro general del proceso.

Además, este tipo de simulaciones permiten llenar la brecha entre la teoría y las observaciones astronómicas directas. De hecho, varios investigadores ya han usado el término “observaciones astronómicas sintéticas”, para enfatizar el hecho que las simulaciones numéricas de hoy día se han usado para predecir propiedades físicas que no han sido observadas cabalmente en los sistemas astrofísicos reales. En este sentido, las simulaciones numéricas permiten además hacer una propuesta teórica de propiedades físicas que podría corroborarse mediante la observación astronómica directa.

Por otro lado, cuando hay cuestiones teóricas no bien entendidas, ya sea por la complejidad de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno en consideración o bien porque no se sabe qué elementos físicos son relevantes para explicar y entender dicho fenómeno, las simulaciones numéricas son una herramienta valiosísima que nos permitan experimentar con el sistema para tener una mejor perspectiva del fenómeno desde varios ángulos de interés. Se puede ganar inspiración acerca de cómo se lleva a cabo el proceso en consideración y cuales elementos físicos son importantes para finalmente generar nuevas explicaciones teóricas.

## *Apéndice A: Conceptos Básicos del Método Científico*

Podemos definir al conocimiento como el conjunto de información adquirida a través de la experiencia, el aprendizaje o la introspección. En el caso del conocimiento científico, no es suficiente que éste sea válido y consistente desde la perspectiva de la lógica, sino que además debe ser probada su veracidad.

La ciencia hace uso del método científico como una metodología para obtener conocimiento, pero debido a que cada área científica tiene particularidades que la distinguen de otras, la metodología es ligeramente diferente. Sin embargo todas ellas deben satisfacer dos criterios:

- Reproductibilidad, los experimentos y los datos derivados de éstos deben poder repetirse por otros investigadores.
- Falsabilidad, la teoría debe ofrecer la posibilidad de ser sometida a determinadas pruebas que potencialmente podrían contradecirla, es decir debe hacer predicciones que puedan contrastarse con la realidad.

El método científico, en líneas generales, sigue una serie de pasos propios con el objeto de construir y desarrollar nuevas teorías. Básicamente estos son:

- *Observación* del fenómeno.
- *Descripción* detallada y acumulación de datos sobre el mismo.
- *Inducción*, es decir, extraer el principio general que aplica a las observaciones realizadas.
- *Hipótesis*, formular una proposición aceptable que aunque no esté confirmada, sirva para responder de forma provisoria a las observaciones.
- *Experimentación*, llevar a cabo actividades destinadas a comprobar la hipótesis.
- *Demostración o refutación* de la hipótesis original en base al resultado de los experimentos.
- *Comparación universal*, contrastación de la hipótesis con la realidad.

Los atributos pueden ser subdivididos en parámetros y variables. Si mantienen un valor fijo, ya sea porque son una constante de la naturaleza, como la velocidad de la luz en el vacío, o porque fueron fijados por el diseñador del sistema, como la cilindrada de un motor se denominan parámetros.

Las variables de sistema, son valores que cambian a través del tiempo, por ejemplo el valor de densidad y temperatura del disco de acreción alrededor del sistema estelar estudiado. Estas a su vez se clasifican en:

- Variables de entrada o exógenas: Son fijadas por el medio-ambiente del sistema. Estas a su vez pueden ser manipulables, por ejemplo la temperatura inicial de la nube de gas.
- Variables de salida: Son las denominadas variables de estado, las que resultan de medidas u observaciones del sistema. Por ejemplo, los valores de temperatura y densidad del gas y polvo que surgen al evolucionar el estado del sistema estelar proto-planetario.
- Variables internas: Son las variables del sistema que no son ni de entrada, ni de salida, ni parámetros. Si éstas son necesarias para describir el estado del sistema, como la entropía del gas en el proceso de colapso gravitacional, se denominan variables de estado, pero si se pueden calcular en base a otras variables se denominan internas.
- Variables de estado: Conforman el conjunto mínimo de variables internas del sistema necesarias para describir completamente su estado.

Un modelo, es una representación simplificada de un sistema. Para realizar un modelo, el analista deberá analizar las variables que intervienen en el sistema y cómo se relacionan entre sí. A medida que el conocimiento sobre el sistema se incrementa, el modelo debe ser ajustado para representar cada vez con mayor fidelidad a la realidad.

Cuando se construye un modelo, se debe tener en cuenta todos aquellos detalles que interesan en el estudio, de tal forma que represente al sistema real y sea un modelo váli-

do, descartando el resto con el objeto de mantenerlo lo más simple posible. El modelo no es necesariamente una réplica del sistema, sino más bien una representación fiel del mismo, es decir, una descripción del sistema conjuntamente con las reglas que lo gobiernan.

### *Apéndice B: Conceptos Básicos de Simulaciones Numéricas*

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos- para el funcionamiento del sistema (Robert Shannon, autor de *Systems simulation: the art and science*).

Conviene aclarar que, al igual que con el método científico, no existe un método único para implementar una simulación exitosa de algún proceso real. No obstante, intentaremos desarrollar una secuencia de los pasos generales.

1. Definición del Sistema: Definir el sistema que va a estudiarse. Hacer una descripción lo más detallada posible y establecer cuál es el objeto del estudio y sus límites y restricciones y en base a ellos qué resultados estamos interesados en poder apreciar. Por ejemplo, en este artículo el sistema fue una nube de gas, el objeto de su estudio fue la formación de proto-estrellas, sus límites fueron “ser poco masivas”. Finalmente, se deseaba obtener era una representación gráfica de los resultados que permitieran compararse con las observaciones reales y concluir así acerca de la plausibilidad del modelo.
2. Elaboración del Modelo: En nuestro caso, el modelo fue una nube esférica en rotación sobre un eje, con pequeñas diferencias de densidad que sirvieran de semilla para iniciar el colapso.

3. Elección de las variables del Modelo: Este punto es una extensión del anterior, dependiendo de los límites impuestos al sistema, el objeto de estudio y los resultados que desean evaluarse, el investigador debe elegir que variables incluirá en el modelo y cuales dejará de lado. En este caso fueron la densidad y la masa total del sistema y sin importar su composición química, por ejemplo.
4. Obtención y preparación de datos del Sistema: Este paso consiste en la observación del sistema, recolectando los datos necesarios para poder definir inicialmente las variables que se utilizarán en el modelo, y su formateo para que éstas puedan ser utilizadas. En nuestro caso, se deberá recolectar información de que cuáles son los márgenes de masa y densidad que tienen las nubes reales donde se originan las proto-estrellas de masas media, así como el radio, la velocidad de rotación, temperaturas y diferencias de densidad.
5. Generación del Programa Informático de Simulación: Se partirá de un estado inicial donde deberán cargarse las variables con los datos del sistema real y que luego se evolucionan, utilizando las reglas de la dinámica de gases y que darán lugar a la historia artificial del modelo, hasta un tiempo máximo. Por ejemplo, el paso de tiempo en el proceso de integración numérica depende de la densidad, de tal forma que cuando la densidad “aumenta mucho”, el paso de tiempo se reduce hasta hacerse “numéricamente cero” y entonces ya no es posible avanzar más la simulación con el software y las maquinas actuales.
6. Validación del Modelo: Se deben primero simular sistemas conocidos y comparar los resultados con los sistemas reales, para validar el desempeño de la simulación. Sin embargo nunca se puede estar totalmente seguro de la validez de un modelo que sirva para todas las situaciones reales posibles.
7. Simulación: Se debe diseñar y planificar la ejecución de la simulación para generar la información que realmente se desea ver, por ejemplo, en nuestro caso estamos más interesados en ver la formación de sistemas binarios de proto-estrellas.

Existen diversos tipos de simulaciones dependiendo del objetivo para el que fueron diseñadas:

- Simulaciones predictivas: para predecir cuál será el resultado final de un sistema en base a las condiciones iniciales del sistema.
- Simulaciones comparativas: para comparar cuál opción de parámetro es mejor o cuál es más relevante.
- Simulaciones Investigativas: Son aquellas que se diseñan con el fin de investigar cómo afectan al sistema el cambio de valor de determinadas variables. Por ejemplo, en el caso del astrofísico, este podría estar interesado en investigar qué resultados produce la simulación si, conservando todos los valores de las demás variables iniciales, se cambiara la densidad inicial del gas en la nube. Aquí no se busca comparar los resultados en busca de cuál es el mejor conjunto de valores iniciales, sino, de observar qué cambios produce la variación de uno solo de ellos.
- Simulaciones visuales e interactivas: aquí los usuarios pueden observar y manipular su contenido: por ejemplo un simulador de vuelo.
- Simulación de caja negra: En este tipo de simulación sólo se modela la relación existente entre la entrada de datos y la salida de los mismos sin contemplar los mecanismos internos. A veces, ya sea por la complejidad del sistema a estudiar o por el desconocimiento de su funcionamiento, puede imaginarse al mismo como una caja negra (no sabemos que hay en su interior), donde a determinados datos de entrada corresponden determinados datos de salida.

8. Interpretación de los datos de la Simulación: Una vez llevada a cabo la simulación, el paso final consiste en analizar e interpretar los resultados. Los resultados numéricos se representan en general gráficamente, por ejemplo, para obtener una imagen en la cual se pueda observar cómo evoluciona el disco de acreción en torno a la estrella.

## **Referencias Bibliográficas**

1. E. A. Bergin y M. Tafalla, "The dark clouds: the initial conditions for star formation," *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol. 45, (2007), págs. 339-396.
2. F. Hoyle, "On the fragmentation of gas clouds into galaxies and stars", *The Astrophysical Journal*, 118, (1953).
3. G. Arreaga y J. Klapp, "Gravitational Collapse and Fragmentation of Molecular Cloud Cores with GadGet2", *The Astrophysical Journal*, 666, (2007), pag. 290-308.
4. G. Arreaga y J. Saucedo, "Hydrodynamical Simulations of the Non-Ideal Gravitational Collapse of a Molecular Gas Cloud", *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, Vol. 44, Num. 2, (2008), 259-284.
5. G. Arreaga y J. Klapp, "The gravitational collapse of Plummer clouds", *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 509, (2010), pag. A96.
6. G. Arreaga y J. Saucedo, "Physical effects of gas envelopes with different extension on the collapse of a gas core", *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, Vol. 48, Núm. 1, (2012), pp.
7. Jeremiah P. Ostriker, "Historical reflexion on the role of numerical modeling in Astrophysics", *Review in Modern Astronomy*, Vol. 13, (2000), pp. 1-11.
8. Richard Larson, "Insights from simulations of star formation", *Reports on progress in physics*, Vol. 70, (2007), pp. 337-356.
9. Richard Larson, "The physics of star formation", (2003), *Reports on Progress in Physics*, Volume 66, Issue 10, pp. 1651-1697, (2003).
10. Shannon, Robert; Johannes, James D. (1976). «Systems simulation: the art and science». *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 6(10). pp. 723-724.
11. Bodenheimer, P., Burkert, A., Klein, R. I. & Boss, A. P., in *Protostars and Planets IV*, ed. V. G. Mannings, A. P. Boss, &

- S. S. Russell, (Tucson: University of Arizona Press), pp. 675-12.
12. Sigalotti, L.D., Klapp, J., "", International Journal of Modern Physics, Vol. D10, (2001), 115.
13. Stahler, Steve and Palla, Francesco, "The Formation of Star", Wiley-VCH, 2006.
14. Falgarone, E., Boulanger, F y Duvert, G. "Fragmentation of Molecular Clouds ans Star Formation", International Astronomical Union, Symposium 147, Kluwer Academic Publishers, 1991.
15. Bodenheimer, P, "Principles of star formation", Astronomy and Astrophysics Library, Springer, 2011.
16. McKee, Christopher F. and Ostriker, Eve C., "Theory of star formation", Annu.Rev.Astron.Astrophys, Vol. 45, (2007), pp.565-687.



## *Luis José Corral Escobedo*

---

Instituto de Astronomía y Meteorología  
Universidad de Guadalajara



**O**btuvo su Licenciatura en Física Teórica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y sus estudios de Maestría y Doctorado los realizó en la UNAM en el Instituto de Astronomía.

Fue Astrónomo Residente del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro del INAOE en Cananea, Son. y en el Gran Telescopio de Canarias (GRANTECAN) en la isla de La Palma, España. Realizó una estancia posdoctoral en el Instituto de Astrofísica de Canarias, España y actualmente es Profesor – Investigador Titular de la U de G.

Ha publicado mas de 25 artículos en revistas de investigación y cerca de 20 contribuciones a congresos. Fue coeditor de un libro de divulgación sobre astronomía, basado en

las conferencias dictadas durante el Año Internacional de la Astronomía 2009 en la U de G.

Sus intereses de investigación incluyen la evolución de las estrellas masivas en la Galaxia y en galaxias cercanas, así como la búsqueda, identificación y análisis de estrellas tipo LBV.

## *Nuestro vecindario galáctico*

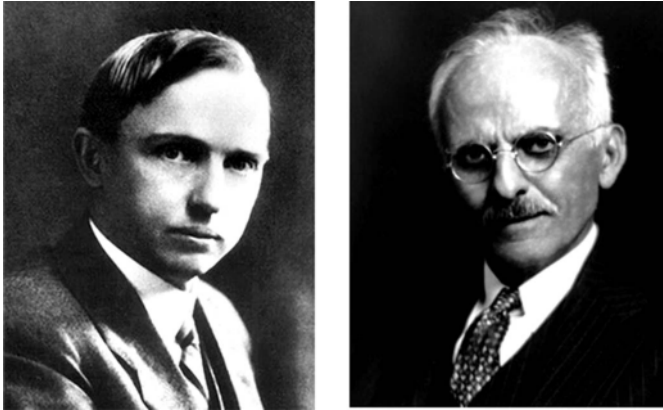
Luis José H. Corral E.  
Instituto de Astronomía y Meteorología  
Universidad de Guadalajara

**A**l principio del siglo XX la Astronomía empezaba a separarse de sus raíces clásicas y se convertía en lo que se conoce ahora como Astrofísica. Se empezaban a utilizar las herramientas de la física para tener una imagen más realista de la naturaleza. Ya no solo se estudiaba el movimiento de los planetas, explicados por la Teoría Gravitacional de Newton, sino que también se trataba ahora de desentrañar los mecanismos por los que el Sol producía su energía, el contenido químico de las estrellas y de las nebulosas que se observan y el origen y destino de los objetos que se ven en el cielo nocturno. En 1919, Eddington logró obtener pruebas de que la Teoría General de la Relatividad de Einstein era correcta, al fotografiar y medir el desplazamiento que mostraban las estrellas que aparecían cercanas al Sol, durante un eclipse parcial. Fue en este ambiente en el que se dio lo que después se llamó 'El gran Debate'

### *La escala del Universo*

Durante la reunión en Washington, D.C. de la Academia Nacional de Ciencias, el 26 de abril de 1920, se presentaron un par de conferencias, ambas con el título: 'La escala del Universo'. Los conferencistas eran, Harold Shapley, del Observatorio del monte Wilson y Heber D. Curtis, del Observatorio de Lyck, ambos en California (Figura 1). La idea era que ambos astrónomos mostraran sus resultados acerca del tamaño de

nuestra propia galaxia, la posición del Sol dentro de ella y la naturaleza de las nebulosas espirales que se observan en el cielo nocturno. En esa época estos objetos recibían el nombre de nebulosas espirales por la forma que algunas de ellas muestran y se clasificaban junto con otros objetos, también llamados nebulosas, que brillan con luz propia pero que no presentaban forma espiral. Las nebulosas espirales más importantes y luminosas conocidas en la época eran la llamada Nebulosa de Andrómeda y la Nebulosa del Triángulo que reciben esos nombres por situarse en las constelaciones así conocidas.



*Figura 1. Harlow Shapley y Herber Curtis.*

Cada investigador tuvo 40 min de tiempo para desarrollar su ponencia, pero sin tiempo extra para refutar las ideas del otro investigador.

Heber Curtis en esa época era un investigador reconocido, con una carrera sólida que se había interesado en estudiar la forma de nuestra galaxia, a través del conteo estelar. Harlow Shapley, por su parte, era un investigador joven, con mucha energía y que había ya presentado algunos artículos en los que estudiaba la posición del Sol con respecto a las estrellas

de nuestra galaxia y mediciones de la posición de algunos cúmulos globulares.

Los principales puntos que ambos astrónomos presentaron en sus conferencias se pueden resumir en el siguiente cuadro:

Harold Shapley	Hereber Curtis
Nuestra Galaxia tiene un diámetro de 100 Kpc (alrededor de 300 años -luz).	Basado en el conteo estelar nuestra Galaxia es relativamente pequeña (10 kpc, alrededor de 30 años-luz). La absorción de la luz por el medio interestelar no es importante.
Se puede conocer la distancia a los cúmulos globulares a través del cambio de brillo observado en las estrellas Cefeidas que son parte de ellos.	La distancia utilizando estrellas tipo Cefeidas no son confiables 'Son necesarios mas datos'.
El Sol se encuentra a una distancia de ~20 kpc (poco más de 60 años-luz) del centro de la galaxia, basado en la distribución de los cúmulos globulares.	El Sol ocupa una posición cercana al centro y la galaxia tiene forma de lente aplana-da.
Las nebulosas espirales son una población menor de objetos, principalmente gaseosos, contenidos dentro de nuestra galaxia. Se separan de la Vía Láctea por efecto de la Presión de Radiación.	Las nebulosas espirales son sistemas de estrellas ('universos islas'), similares a la nuestra. Las estrellas Novas de nuestra galaxia son parecidas a las observadas en las nebulosas espirales.

Antes de pasar a ver quién estaba en lo correcto haremos un pequeño paréntesis histórico para ver cómo se pueden medir algunas distancias a objetos astronómicos.

### *Pequeño paréntesis histórico*

A fines del siglo XIX las mujeres no eran contratadas como astrónomas, de hecho muchas de ellas no podían ni ir a la Universidad. En esa época el director del Observatorio de Harvard, Edward Pickering, molesto por la incompetencia de sus ayudantes, decidió contratar a Williamina Fleming, quien es ese entonces era su criada, la cual realizó un excelente trabajo. En 1886 el Observatorio de Harvard recibió una donación por parte de la viuda de un astrónomo aficionado Henry Draper para que el Observatorio siguiera desarrollando el trabajo de su marido, clasificar espectralmente las estrellas más brillantes que una cierta magnitud límite. Pickering decidió contratar a un grupo de mujeres para realizar el trabajo y puso a Williamina Fleming a cargo de ellas (Figura 2). En 1890 publicaron el primer Catálogo Henry Draper, con más de 10000 estrellas clasificadas espectralmente. Su trabajo fue tan bueno que Pickering decidió seguir contratando mujeres para hacer varios de los trabajos tediosos del Observatorio, aprovechando también que su sueldo, entre 25 y 50 centavos la hora, era la mitad del sueldo de un hombre.



*Figura 2.- Algunas de las calculadoras contratadas por Pickering en el Observatorio de Harvard a principios del s. XX. Williamina Fleming está de pie en el centro de la imagen.*

El trabajo que realizaban este grupo de mujeres se le conocía como “calculadoras”, muchas de estas “calculadoras” realizaron un trabajo excelente. Por ejemplo, Anne J Cannon siguió con los trabajos de clasificación espectral y desarrollo un sistema de clasificación en el que se basa el usado actualmente.

Una forma de medir la distancia a los objetos astronómicos es utilizando el llamado paralaje estelar, es decir, el cambio de la posición aparente de objetos cercanos, con respecto a objetos más lejanos, cuando se observan desde puntos distintos. Al estar nosotros en la Tierra y aprovechando que ésta se mueve a lo largo de su trayectoria anual alrededor del Sol, podemos observar la misma región del cielo en dos fechas distintas separadas por seis meses. Esto hace que tengamos la visión de un punto del cielo desde dos lugares separados por 300 millones de kilómetros, dos veces el radio de la órbita de la Tierra. Aquellos objetos que se encuentren más cercanos a nosotros mostrarán una ligera variación en su posición con respecto a objetos más lejanos. El primero que pudo medir el paralaje de una estrella fue Friedrich Bessel en 1838, cuando observó que la estrella 61 Cygni cambiaba su posición en 0.31 segundos de arco. El valor aceptado actualmente es de 0.28 segundos de arco, lo que nos da una distancia de 11.3 años-luz. Un problema que presenta este método es que es confiable solo para objetos relativamente cercanos. En 1989 se lanzó el satélite Hipparcos de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) y con los datos obtenidos se ha podido medir las distancias a objetos hasta unos 500 pc ( $\sim 16\,000$  años luz). Se espera que con la misión Gaia también de la ESA, que será lanzada en 2013 ó 2014, se logren medir distancias de estrellas de nuestra propia galxia hasta varios miles de parsecs.

Regresando a las “calculadoras” una de ellas fue Henrietta Swan Leavitt, a la que Pickering le asignó el estudio de estrellas variables (figuar 3). Ella publicó un catálogo de estrellas variables de la Nubes de Magallanes que contenía 1777

objetos, y que descubrió a partir de fotografías de las Nubes tomadas en distintas fechas. Henrietta Leavitt observó que veinte de estos objetos tenían las mismas características de variación que la estrella Delta Cefeida, una variable conocida de nuestra propia galaxia. Lo que notó Henrietta Leavitt es que aquellos objetos que tenían un mayor brillo presentaban también períodos de variación más largos y demostró que había una relación simple entre ambas características. Es decir, se puede predecir el período de variación de una estrella tipo cefeida, midiendo el valor de su brillo máximo y viceversa. Leavitt aprovechó que todas esas estrellas eran miembros de las Nubes de Magallanes y que por lo tanto la distancia a la que se encuentran son muy similares.

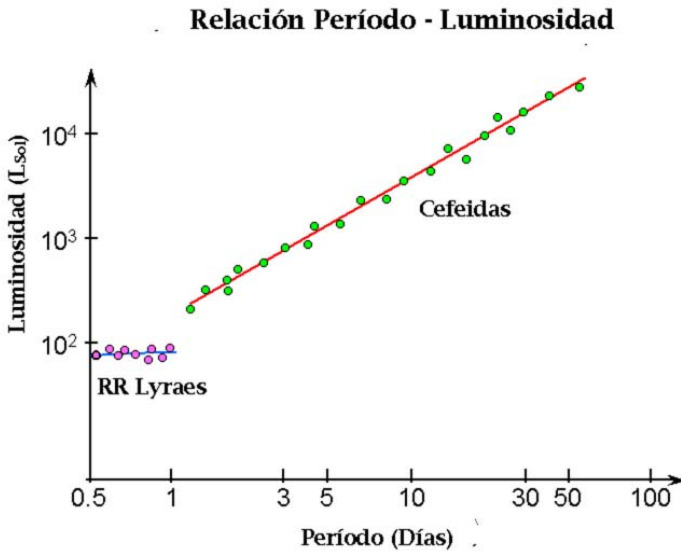


*Figura 3. Henrietta Swan Leavitt descubrió la relación Período-Luminosidad de las estrellas Cefeidas.*

Como consecuencia de esto, el brillo aparente observado está relacionado directamente con su brillo intrínseco. Esta relación de brillos no la podemos asegurar con las estrellas de nuestra propia galaxia, ya que las distancias a nosotros



no son las mismas. Así, podemos tener una estrella intrínsecamente débil, que es aparentemente muy brillante, debido a su proximidad y una estrella que emita con mayor intensidad pero que nos parezca más débil debido a que se encuentra muy lejana (gráfica 1).



*Gráfica 1. Relación entre el Período de pulsación y la Luminosidad de las estrellas Cefeidas encontrada por Hewitt.*

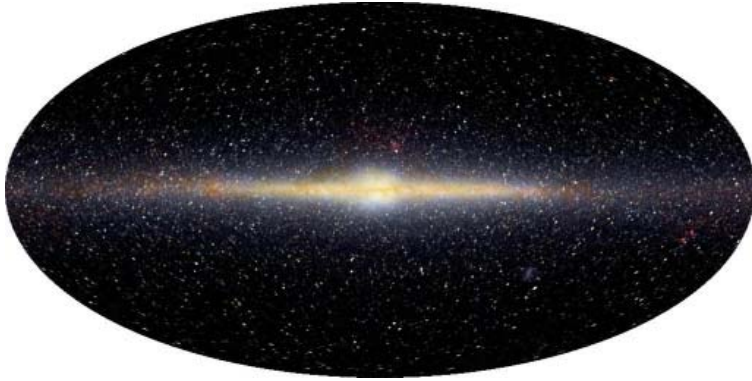
Leavitt propuso que la relación que había encontrado podría servir para medir la distancia a objetos lejanos. Si encontramos estrellas variables tipo Cefeidas que pertenezcan a un cúmulo, por ejemplo, al determinar sus períodos de variación, podremos encontrar sus brillos intrínsecos. Si el brillo aparente es menor, esto se debe solo a la distancia a la que se encuentran y que de esta manera puede ser medida. Desgraciadamente Leavitt no pudo seguir con este trabajo ya que Pickering le encargó que buscara la forma de medir el brillo de las estrellas a partir de las imágenes fotográficas,

un problema difícil, ya que la imagen que se forma en las placas fotográficas no tiene una relación lineal con la cantidad de luz que incide sobre ella y que cada tipo de placa fotográfica y cada telescopio da resultados distintos. Henrietta Leavitt falleció de cáncer a muy temprana edad en 1921. Tres años después un matemático sueco trató de nominarla para el premio Nobel pero desgraciadamente el premio Nobel no se otorga de manera póstuma.

### *... y en el Gran Debate, ¿quién estaba en lo correcto?*

Con los conocimientos actuales podemos encontrar qué tan acertados fueron los principales puntos que presentaron Shapley y Curtis en sus respectivas exposiciones.

Curtis tuvo razón que la forma de nuestra galaxia es como un disco o lente aplanada y que además posee una concentración esférica de estrellas alrededor del núcleo, conocida como el bulbo. Pero ahora sabemos que el método que utilizó Curtis para encontrar el tamaño de la galaxia, el conteo estelar, no es apropiado ya que, a pesar de que el medio interestelar está casi vacío, las distancias involucradas son tan grandes que esa pequeña cantidad de gas y polvo se vuelve importante, ocultándonos las estrellas más alejadas. Además hay lugares en nuestra galaxia en los que el gas y el polvo no son tan tenues y se acumulan en nubes oscuras, absorbiendo la luz de los objetos que se encuentran detrás de ellas. Estos lugares se distribuyen alrededor del disco y no nos permiten, por ejemplo, observar en la región espectral del óptico en núcleo de nuestra galaxia. Debemos utilizar otras regiones espectrales, tales como el infrarrojo y el radio, para poder ver a través de las nubes oscuras y estudiar los objetos que se encuentran dentro y detrás de esas nubes oscuras (Figura 4). El diámetro del disco de nuestra galaxia es de aproximadamente 35 kpc, es decir, unos 100 mil años luz.



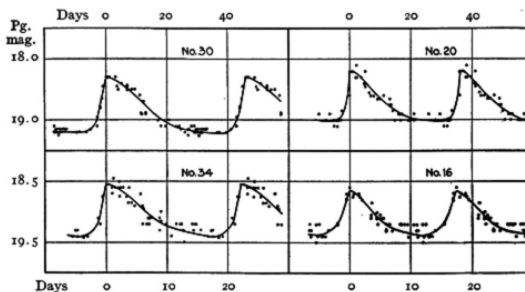
*Figura 4. Imagen de la Vía Láctea en IR tomada por el satélite COBE. Las estrellas aparecen en color blanco y las nubes de polvo interestelar en color rojo. Imagen de la NASA.*

Shapley tuvo razón en afirmar que el Sol no se encuentra en el centro de la Galaxia. Él llegó a esa conclusión al estudiar la distribución de los cúmulos globulares y suponiendo que éstos se distribuyen alrededor del centro galáctico. Un método que utilizó para estimar la distancia a los cúmulos globulares fue el diseñado por Leavitt. Él observó las estrellas variables tipo cefeida que contenían los cúmulos y les determinó sus períodos, con eso dedujo el brillo absoluto que deberían tener esos objetos y comparándolos con los brillos aparentes observados pudo deducir la distancia a las que se encontraban. De esta manera demostró que el método de Leavitt era correcto (hasta cierto punto) y que puede servir para deducir distancias no solo dentro de nuestra propia galaxia (como veremos más adelante).

Otro de los aciertos de Curtis fue decir que la “nebulosas espirales” no eran parte de nuestra galaxia, sino que se trata de objetos similares a nuestra galaxia y que se encuentran a distancias más lejanas, del orden de varios cientos de miles de parsecs. Curtis dedujo ésto al haberse descubierto que en la nebulosa de Andrómeda aparecían estrellas y que éstas eran similares a las Novas en cuanto al aumento en su brillo, duración y curva de luz.

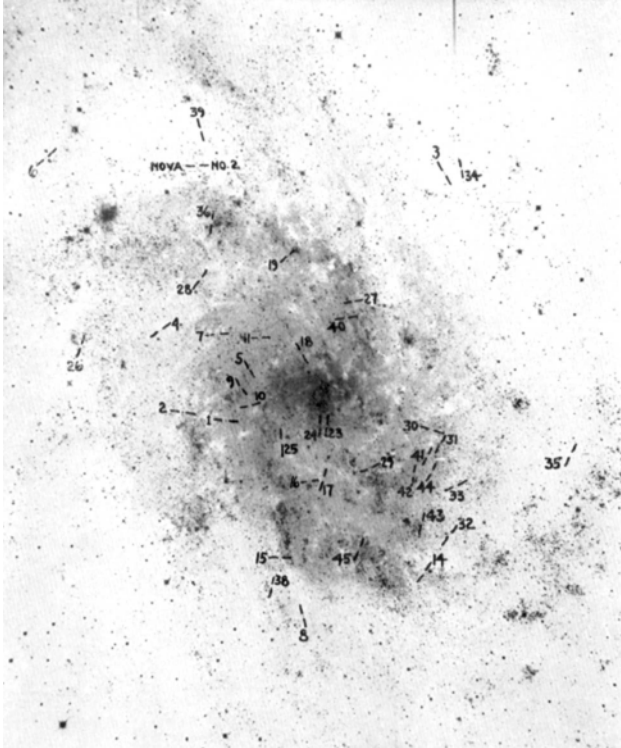
En 1925, Edwin Hubble publicó un artículo en donde estudiaba a una pequeña acumulación de estrellas, conocida como Galaxia de Barnard o NGC 6822. En palabras de Hubble: “NGC6822 es un cúmulo muy debil de estrellas y nebulosas ... que semejan a las Nubes de Magallanes”. Hubble descubrió que entre sus estrellas había estrellas variables con características de ser variables de tipo cefeidas. Utilizando su brillo máximo, el período de variación y la relación período – luminosidad descubierta por Leavitt, la distancia que dedujo a este objeto fue de 214 mil parsecs, siendo el primer objeto identificado como extragalactico, es decir que se trataba de un ente independiente de nuestra galaxia. El valor actual de la distancia a NGC6822 es de 510 mil parsecs, utilizando varios métodos además de la ralización período – luminosidad de las estrellas cefeidas.

¿Y las nebulosas espirales? En un artículo posterior Hubble anunciaba el descubrimiento de 47 estrellas variables en M 33 (la Nebulosa del Triángulo) y 36 en M 31 (la Nebulosa de Andrómeda). No era la primera vez que se reportaban variables en esas nebulosas espirales, ya que Duncan en 1922 había descubierto tres estrellas que habían variado su brillo a lo largo del tiempo. El acierto de Hubble fue notar que entre las estrellas variables descubiertas había varias de tipo cefeida, 22 en M 33 y 14 en M 31 (Figuras 5 y 6).



**Figura 5.** Gráfica de un artículo de Hubble de 1926 en donde se muestra el cambio de brillo (curvas de luz) de algunas de las estrellas variables que descubrió en M33. La curva es característica de estrellas de tipo Cefeidas.

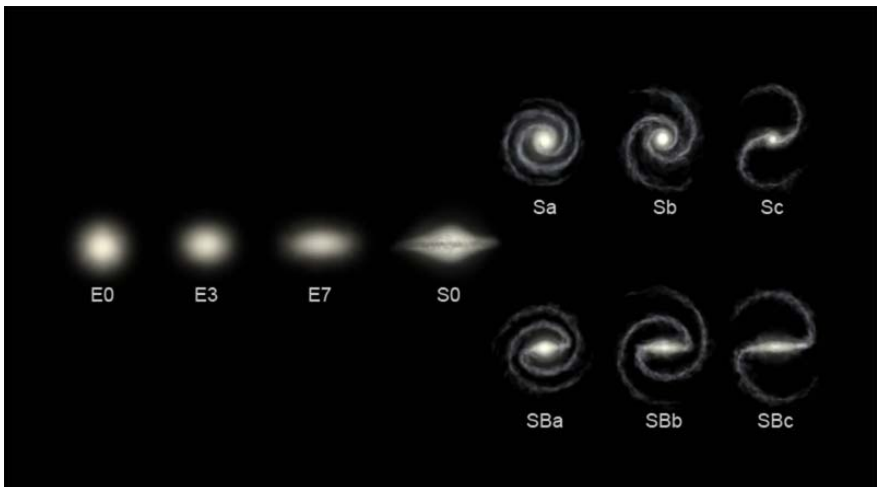
Utilizando de nuevo la relación período – luminosidad, Hubble fue capaz de demostrar que las nebulosas espirales de Andómeda (M 31) y del Triángulo (M33) eran antes completamente separados de nuestra galaxia. Las distancias actuales a estas galaxias es de cerca de 800 mil parsecs y 740 parsecs para M 33 y M 31 respectivamente.



*Figura 6. Imagen de una de las placas fotográficas de Hubble que utilizó para identificar algunas de las estrellas variables de M33. (1926)*

Galileo con su telescopio nos había mostrado que en el cielo nocturno existen más estrellas que las que podemos ver a simple vista, abriéndonos así nuestra visión al tamaño de nuestra galaxia, estos resultados de Hubble nos abrieron de una forma muy gráfica el tamaño del universo. Pero no

fue, ni con mucho, el mayor de sus aportaciones. Pocos años después, en 1929, apareció un artículo con el título “Nebulosas Extra-galácticas”. Bajo este título tan poco atractivo, Hubble analiza la forma de 400 nebulosas extragalácticas (galaxias, diríamos ahora), clasificándolas en varios grupos coherentes, de acuerdo a la estructura de la imagen que tenían en las placas fotográficas que se usaban en esos entonces. Hubble forma 2 grupos principales, aquellas que muestran una estructura regular y aquellas que son irregulares en su forma. A las regulares las divide en: Elípticas y Espirales y estas últimas las divide aún mas en 2 grupos: Espirales y Espirales Barradas. A esta clasificación se le conoce como el Diapasón de Hubble y se puede ver en la figura 7.



*Figura 7. Diagrama de clasificación morfológica de galaxias propuesto por Hubble.*

Utilizando esta clasificación es posible agrupar las galaxias en grupos de forma similar y ahora sabemos bastante más de ellos. Así por ejemplo sabemos que las galaxias elípticas están formadas por estrellas muy evolucionadas, casi no tienen gas y no están formando estrellas actualmente. En cambio las galaxias espirales (espirales normales y barra-

das) poseen gas y polvo libre, tienen una estructura como de plato o lente ancha y están formando estrellas a partir de ese gas y polvo que poseen. Nuestra galaxia creemos que tiene una clasificación de espiral barrada, similar a la que se muestra en la figura 8.



*Figura 8. Imagen de la galaxia NGC 6744, una galaxia espiral del hemisferio sur que se cree tiene la misma estructura morfológica que nuestra galaxia, la Vía Láctea.*

Otro resultado significativo obtenido por Hubble lo hizo junto a Humason, cuando investigaron la velocidad de recesión de las galaxias y su relación con la distancias a esas galaxias. En 1931 presentaron sus resultados y encontraron que la velocidad con que se alejan las galaxias de nosotros no es la misma para todas, sino que aquellas galaxias más alejadas muestran una velocidad de recesión mayor. Al graficar la velocidad encontrada con la distancia de los objetos encontraron una relación lineal. Lo que habían encontrado fue la expansión del universo (Figura 9). En épocas actuales

uno de los proyectos claves del telescopio espacial Hubble fue determinar la relación velocidad - distancia de las galaxias, el valor obtenido fue de 74 km/s por megaparsec.

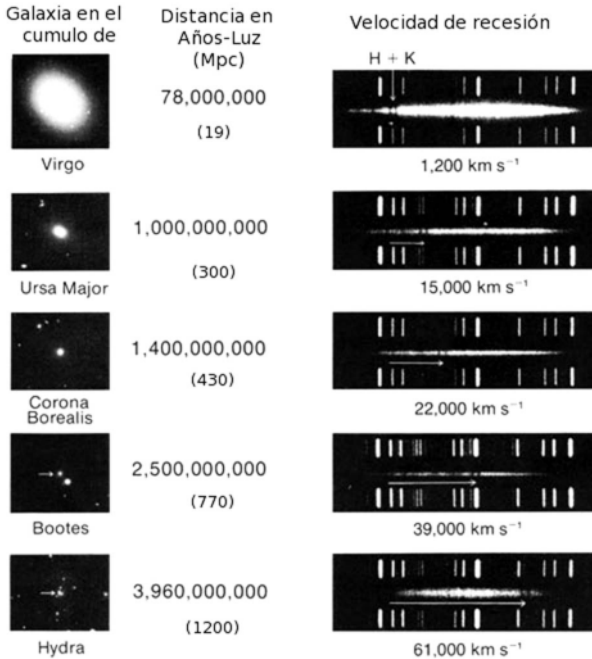


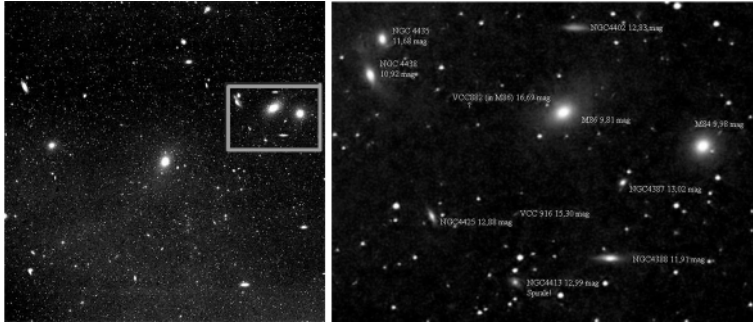
Figura 9. Espectros de galaxias elípticas de distintos cúmulos en donde se muestra el corrimiento espectral de las líneas de Ca. Este corrimiento se debe a la velocidad de recesión de las galaxias que así puede ser medido.

### Nuestro Vecindario

En el universo se conocen una gran cantidad de grupos, cúmulos y supercúmulos de galaxias. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, pertenece a un pequeño conjunto de galaxias conocido como el Grupo Local. No es un grupo muy numeroso, solo lo forman alrededor de 35 galaxias. Cerca del Grupo Local existen otros grupos y cúmulos mucho más numerosos. Por



ejemplo el Cúmulo de Virgo que se encuentra a una distancia aproximada de 59 millones de años luz (19 millones de parsecs) posee alrededor de 2000 galaxias (figura 10).



*Figura 10. Del lado izquierdo se muestra una imagen de un aparte del cúmulo de Virgo, casi cada uno de los puntos brillantes es una galaxia. Del lado derecho se muestra una ampliación de la región enmarcada.*

Este cúmulo, junto al Grupo Local y otros cúmulos cercanos forman lo que se conoce como el Supercúmulo de Virgo o Supercúmulo Local. Su tamaño es de aproximadamente 33 millones de parsecs, mientras que el Grupo Local lo forman las galaxias que se encuentran hasta una distancia aproximada de 1 millón de parsecs.

El Grupo Local está formado por tres galaxias espirales, una elíptica, 10 de tipo irregular y el resto son irregulares enanas o esferoidales enanas. Una lista de las galaxias del Grupo Local se muestra en la tabla 1, donde también aparecen la distancia al Sol y la distancia al centro de masa calculado del Grupo Local.

El tipo morfológico que se lista en la tabla 1 fue hecha de acuerdo a la clasificación DDO definida por Sidney van den Bergh en 1960. El tipo morfológico de las galaxias espirales, como M31 y M33, empiezan con una S (de Spirals) y la siguiente letra nos dice que tan abiertos o cerrados son los brazos espirales. En nuestro caso los brazos espirales de M31 (Sb) son más cerrados que los de M33 (Sc).

Nombre	Alias	Tipo Morfológico	Distancia al Sol (Mpc)	Distancia al centro del G.L. (Mpc)
Vía Lactea	Nuestra Galaxia	S(B)bc I-II	0.01	0.46
Sagittarius		dSph(t)	0.03	0.46
LMC	Nube Mayor de Magallanes	Ir III-IV	0.05	0.48
SMC	Nube Menor de Magallanes	Ir IV/IV-V	0.06	0.48
Ursa Minor	DDO 199	dSph	0.06	0.43
Draco	DDO 208	dSph	0.08	0.43
Sculptor		dSph	0.09	0.44
Sextans		dSph	0.09	0.51
Carina		dSph	0.10	0.51
Fornax		dSph	0.14	0.45
Leo II	DDO 93	dSph	0.21	0.57
Leo I	Regulus	dSph	0.25	0.61
Phoenix		dIr/dSph	0.40	0.59
NGC 6822		Ir IV-V	0.50	0.67
NGC 147	UGC 326	Sph	0.66	0.22
IC 10	UGC 192	Ir IV	0.66	0.27
NGC 185	UGC 396	Sph	0.66	0.22
And II		dSph	0.68	0.26
Leo A	DDO 69	Ir V	0.69	0.88
Cassiopeia	And VII	dSph	0.69	0.29
IC 1613		Ir V	0.72	0.47
And III	A0032+36	dSph	0.76	0.31
NGC 205	M110	Sph	0.76	0.31
M32	NGC 221	E2	0.76	0.31
M31	NGC 224	Sb I-II	0.76	0.30
Pegasus	DDO 216	Ir V	0.76	0.44
Pegasus II	And VI	dSph	0.78	0.38
Cetus		dSph	0.78	0.62
M33	NGC 598	Sc II-III	0.79	0.37
And I	A0043+37	dSph	0.81	0.36
Pisces	LGS 3	dIr/dSph	0.81	0.42
And V		dSph	0.81	0.37
Tucanae		dSph	0.87	1.10
Aquarius	DDO 210	Ir V	0.95	0.95
WLM	DDO 221	Ir IV-V	0.95	0.81

**Tabla 1. Galaxias que forman el Grupo Local.**

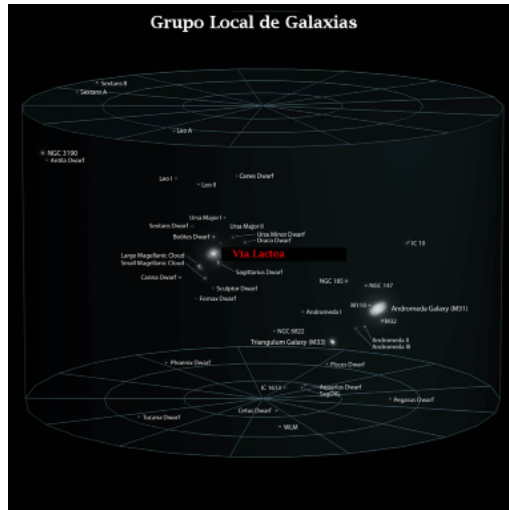
Los números romanos del tipo morfológico nos indican qué tan brillantes son las galaxias (desde I: muy brillantes, hasta V: muy débiles). En el caso de nuestra galaxia el tipo morfológico es S(B) es decir se trata de una espiral con una posible barra en el centro. M32 está catalogada como una E3, es decir, una galaxia elíptica que es tres veces más larga que ancha. También existen irregulares (Ir) y esferoidales (Sph), además si la galaxia es enana se denota con una letra d (dwarf) al principio de la clasificación.



*Figura 11. Las galaxias Leo A, Fornax y Piscis.*

Así por ejemplo, Leo A es de tipo irregular (Ir), Fornax es una galaxia esferoidal (Sph) y Piscis es una galaxia que puede ser clasificada como enana irregular o como enana esferoidal (dIr/dSph) (Figura 11).

La distribución de las galaxias en el Grupo Local no es uniforme, de hecho, se distribuyen en 2 subgrupos alrededor de las dos galaxias más grandes, la Vía Láctea y M31 (Figura 12).



**Figura 12.** Distribución de las galaxias en el Grupo Local. Se puede observar que hay dos grupos principales de galaxias alrededor de las galaxias mayores: M31 y la Vía Láctea.

Al estar tan cerca unas galaxias de otras puede haber interacciones entre ellas. Tal es el caso de las interacciones entre nuestra galaxia y algunas galaxias enanas cercanas, como las enanas esferoidales de Ursa Minor, Sculptor y Sagittarius. Evidencias de estas interacciones fueron descubiertas por David Martínez-Delgado en 2001 y los años posteriores. Lo que encontró fué un exceso de estrellas en algunas posiciones que marcan la órbita de estas galaxias enanas alrededor de la Vía Láctea. Las estrellas que encontró tienen las mismas características en edad y contenido de elementos pesados que las estrellas que forman parte de las galaxias enanas. A estas concentraciones de estrellas se les conoce como corrientes de marea (tidal stream) y son las estrellas que el campo gravitacional de la Vía Láctea logró arrancarles a las galaxias enanas. Estas estrellas después formarán parte de la Vía Láctea y son pruebas de que uno de los mecanismos con los que se formaron las galaxias más grandes es por agregación de galaxias más pequeñas, una especie de canibalismo galáctico (Figura 13).



*Figura 13. Representación artística de la corriente de marea de los restos dejados por la galaxia enana de Sagitario en su órbita alrededor de la Vía Láctea. Estos restos fueron descubiertos por el Dr. David Martínez-Delgado y sus colaboradores del IAC.*

### *Las vecinas más cercanas: las Nubes de Magallanes*

Veremos ahora algunas de las características de algunas galaxias que forman parte del grupo Local. Empezaremos con las Nubes de Magallanes. Estos dos objetos, la Nube Mayor de Magallanes y la Nube Menor son visibles en el hemisferio sur celeste (Fig. 14). Se les conoció como las Nubes del Cabo por que eran los dos objetos más llamativos que veían los marinos portugueses y holandeses cuando viajaban al cabo de Buena Esperanza en el sur de África. Recibieron su nombre actual después de la reseña de la circunavegación del globo por Magallanes que hizo Antonio Pigafetta en 1524. Las describe como conjuntos de grupos de estrellas que simulan nubes muy tenues. En el siglo XIX, John Hershell es

el primero que las estudia de forma extensiva y reporta las coordenadas y descripciones de 244 objetos en la Nube Menor y 919 en la Mayor.



***Figura 14. Imagen de las Nubes Mayor (izquierda) y Menor (derecha) de Magallanes. En la parte inferior izquierda de la Nube Mayor se observa la Nebulosa de la Tarántula y la derecha de la Nube Menor el objeto que simula una estrella muy brillante es en realidad el cúmulo globular 47 Tucanae.***

La Nube Mayor se encuentra a una distancia de 50 kpc (aproximadamente 150 mil años-luz) y la Nube Menor a 60 kpc (180 mil años-luz). Están formadas por cúmulos de estrellas tanto jóvenes como evolucionadas, lo que muestra que la formación estelar es activa en esas regiones. Eso también se observa en el medio interestelar, ya que se detectan nubes cuyo material está ionizado, que se conocen como regiones HII. En estas regiones los fotones energéticos ultravioletas (UV) que provienen de las estrellas masivas han sido absorbidos por los átomos, la energía de los fotones UV es tan alta que algunos electrones son separados de sus átomos. Cuando esos electrones vuelven a ser combinados con los iones emiten la

radiación que absorbieron originalmente, pero ésta puede ser dividida en diversos fotones menos energéticos que observamos en la región espectral del visible (Figura 15).



*Figura 15. Mosaico de la Nube Mayor de Magallanes utilizando un filtro que aisla la línea H $\alpha$  del Hidrógeno. Las estructuras que se observan son nubes iluminadas por estrellas calientes que ionizan el gas interestelar. Se les conoce como Regiones HII.*

Algunos de los cúmulos de estrellas jóvenes presentan características muy notables. Tal es el caso de la región conocida como 30 Doradus, una región HII muy brillante de la Nube Mayor (Fig. 16). Esta región HII está siendo iluminada por las estrellas de R136, un cúmulo muy compacto de estrellas muy jóvenes (con edades menores a dos millones de años) que originalmente se creía que era una sola estrella muy masiva. R 136 es un supercúmulo estelar con cerca de 3500 estrellas, la mayoría dentro de 8 segundos de arco (Fig. 17). De esas estrellas al menos 120 son estrellas cuyas masa son mayores que

10 masas solares y que son las responsables de la radiación energética que crea a la región HII, 30 Doradus.



*Figura 16. Nebulosa de la Tarántula en la Nube Mayor de Magallanes. La imagen es el producto de la sobreposición de tres imágenes en filtros del IR cercano (Y, J y K) a los que se les han asignado colores falsos (azul, verde y rojo respectivamente) Foto de la ESO.*

Una característica de las Nubes de Magallanes es su bajo contenido de elementos más pesados que el hidrógeno, comparado con el de las estrellas de la vecindad solar. Este hecho nos indica que no se ha habido una larga historia de formación estelar. Otra característica de las Nubes de Magallanes es que muestran un puente de gas entre ellas, lo que apunta a que ambas galaxias han tenido encuentros gravitacionales desde su formación.





*Figura 17. En esta imagen obtenida con el Telescopio Espacial Hubble de la NASA se puede ver la parte central del cúmulo que ilumina la Nebulosa de la Tarántula. Esta región se creía que era una sola estrella conocida como R 136. Foto de la NASA.*

En 1987, Ian Shelton era un estudiante de doctorado canadiense que se encontraba observando en el Observatorio del Sur de la Universidad de Toronto en el Observatorio de Las Campanas, en Chile. Al estar tomando fotografías de la Nube Mayor de Magallanes, se dio cuenta de que en la imagen aparecía una estrella muy brillante que no había aparecido en fotografías anteriores. Dudando de la imagen y suponiendo que se trataba de un error o un reflejo en el instrumento, decidió observar a simple vista la región que había fotografiado solo

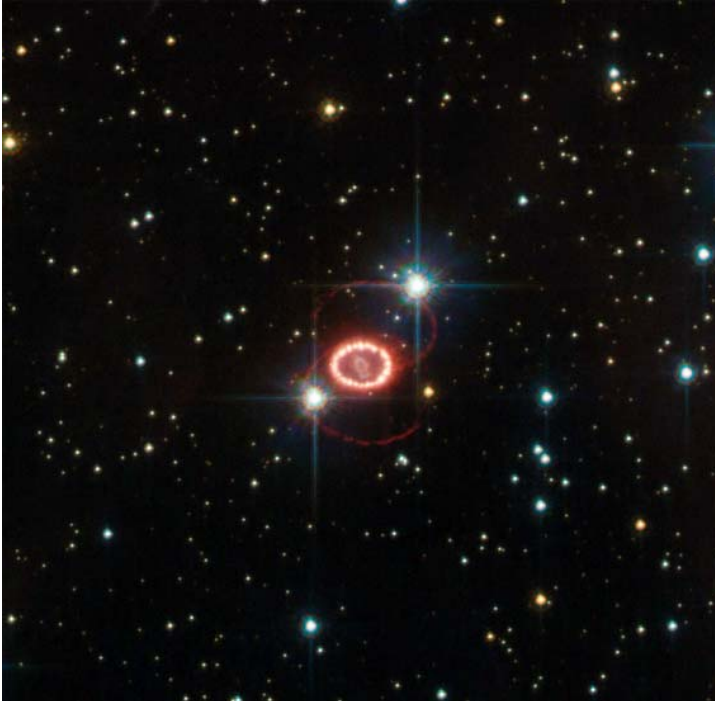
para comprobar que, de hecho, se encontraba una estrella brillante sobre la Nube Mayor. Lo que había descubierto era la supernova más cercana a la Tierra desde la que Kepler, en 1604, había observado y estudiado (Fig. 18).



**Figura 18.** *Imágenes de la Nube Mayor de Magallanes antes (izquierda) y durante (derecha) la explosión de la supernova SN1987A. LA SN1987A se puede observar debajo de la Nebulosa de la Tarántula en la parte superior de la galaxia. Foto ESO.*

Esta supernova fue del tipo SN II-P, esto es que la supernova se originó por el colapso del núcleo de una estrella masiva, cuando las reacciones nucleares del material del centro de la estrella ya no pueden aportar suficiente energía para mantener una configuración estable de la estrella. Al no ser suficiente la energía generada, no existe la presión interna necesaria para contrarrestar a la gravedad y el núcleo de la estrella se colapsa expulsando las capas exteriores en un fenómeno explosivo. La estrella que dio origen a la supernova ya había sido estudiada y catalogada como el objeto Sanduleak -69° 202, una estrella supergigante tipo B. La identificación de esta estrella dio pie a que se revisaran las teorías del origen de las SN II, ya que se creía que solo las supergigantes más frías eran las que podían generar supernovas tipo II. Desde ese entonces se ha seguido observado, para estudiar

la interacción del material expulsado con el medio interestelar circundante y para descubrir la estrella de neutrones que las teorías indican que debió haberse formado (Fig. 19).



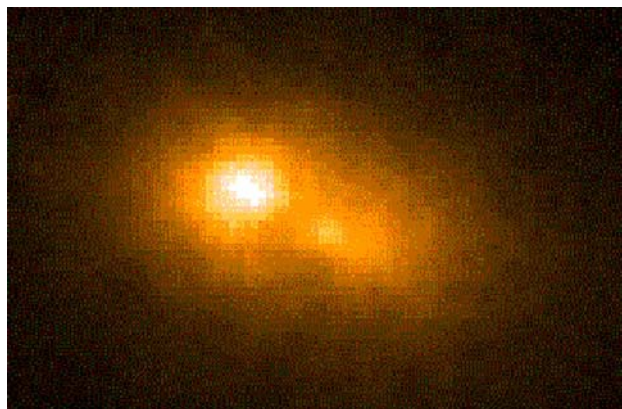
*Figura 19. Imagen tomada con el Telescopio Espacial Hubble en donde se muestra la interacción del material expulsado por la SN1987A con el medio interestelar circundante (anillo central). Los anillos delgados más exteriores no se sabe su origen, pero pueden ser el resultado de la interacción del viento de la estrella progenitora con el medio interestelar.*

### *Las vecinas mayores: M 31 y M 33*

La galaxia de Andrómeda (M 31) es el objeto más luminoso del Grupo Local (Fig. 20). Al ser tan brillante se cree que se pudo haber formado por la fusión de varias galaxias menores.



**Figura 20.** *M 31, también conocida como la galaxia de Andrómeda es el objeto astronómico más lejano que puede ser visto a simple vista. Se encuentra a una distancia aproximada de 2.5 millones de años-luz.*

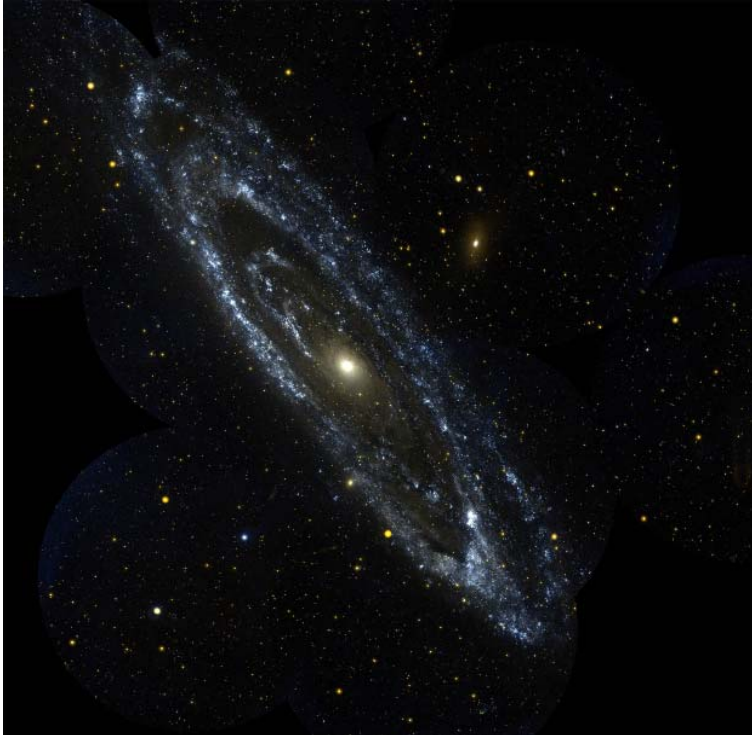


**Figura 21.** *Imagen del núcleo de M 31 tomada con el telescopio Espacial Hubble en 1991. Se puede observar que su estructura es doble, pero su brillo es mucho menor que el del núcleo de nuestra galaxia.*

El núcleo de M31 es también muy brillante y emite tanto como 60 cúmulos globulares juntos (Fig. 21). No es muy probable que su origen sea a partir de cúmulos globulares porque presenta un contenido muy alto en elementos más pesados que el helio. Se ha encontrado además que es doble, con la parte central poco brillante pero con un hoyo negro de 50 millones de masas solares. El núcleo de M31 es también una fuente débil de emisiones en radio, con una luminosidad cercana a 1/20 la luminosidad del núcleo de la Vía Lacta. Esto apunta a que hay poco gas libre en el núcleo que sea atrapado por el hoyo negro, en comparación del que hay en el núcleo de nuestra galaxia.

Nuestra atmósfera no permite el paso de todas las radiaciones electromagnéticas. En particular la atmósfera es opaca al ultravioleta (UV), los rayos X (RX) y los rayos gama (Ry). Para poder estudiar los objetos astronómicos en esas bandas espectrales se han construido satélites y telescopios espaciales. Dos en particular son el telescopio UIT (*Ultraviolet Imaging Telescope*) que voló en dos misiones del transbordador Espacial de la NASA y el observatorio espacial Spitzer que observaron en UV e IR respectivamente. En esas dos bandas del espectro se pueden observar las estrellas más masivas y jóvenes de M 31 (Fig. 22) y las regiones de polvo y gas frío que eventualmente darán origen a más estrellas. (Fig. 23).

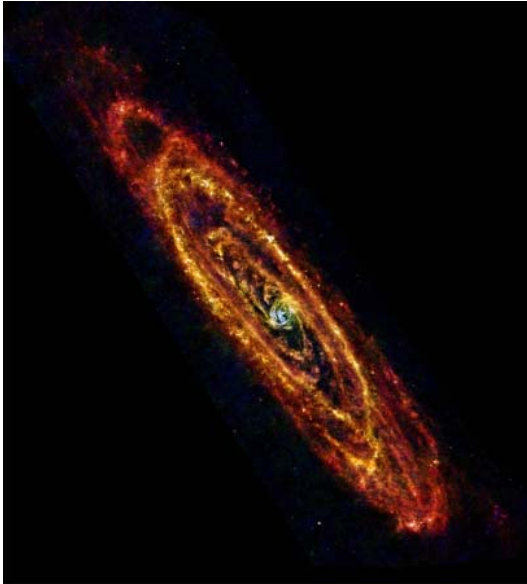
Un dato importante de M31 es que al medir la velocidad con que se está moviendo la galaxia encontramos que tiene una velocidad cercana a -300 km/s, es decir se acerca a la Vía Lactea a 300 km/s (Fig. 24). Esta velocidad es solo la componente radial de la velocidad, es decir solo la velocidad a lo largo de la línea de visión. Para objetos cercanos en algunos casos se puede medir la velocidad transversal, pero para eso es necesario que haya pasado mucho tiempo entre las observaciones y poder medir el cambio de posición del objeto a lo largo del tiempo. En el caso de las galaxias este movimiento relativo es muy pequeño debido a las grandes distancias a las que se encuentran.



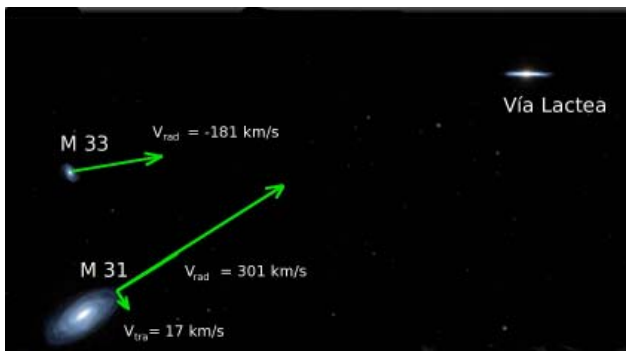
*Figura 22. Imágen de M31 en luz UV tomada con el telescopio UIT. Se pueden apreciar las regiones con estrellas masivas y por lo tanto jóvenes, que emiten en el UV.*

No fue sino hasta 2012 que se pudo medir la velocidad transversal de M31 utilizando fuentes de radio que se pudieron medir simultáneamente con varios radiotelescopios, utilizando una técnica llamada interferometría de base muy grande. La velocidad transversal encontrada fue de solo 13 km/s, es decir M31 y la Vía Láctea eventualmente colisionarán. Esto no sucederá sino hasta dentro de 100 mil millones de años, mucho tiempo después de que el Sol se haya convertido en una gigante roja. Lo que pasará es que las dos galaxias interaccionarán, algunos objetos de ambas galaxias serán expulsados y eventualmente se formará una galaxia aún mayor que bien podría ser una galaxia elíptica. Muchos

de los sistemas estelares y estrellas individuales permanecerán en esta nueva galaxia, pero otros serán despedidos debido a las interacciones de mareas que se llevarán a cabo.



**Figura 23.** Imagen de M31 obtenida con el telescopio espacial Spitzer que observa en el IR. Se observan las nubes oscuras y frías que eventualmente formarán nuevas estrellas



**Figura 24.** Representación artística de las velocidades radial ( $V_{\text{rad}}$ ) y transversal ( $V_{\text{tra}}$ ) de M 31 con respecto a la Vía Lactea. De M 33 solo conocemos su velocidad radial

La galaxia M33, también conocida como del Triángulo, es una galaxia espiral, que a diferencia de M31, podemos apreciar mejor porque se nos presenta en una inclinación menor (Fig. 25) . Su tamaño es menor a M31 y a la Vía Láctea y sus brazos están más abiertos que en las otras dos galaxias espirales. La orientación de la galaxia nos permite estudiar con mucho detalle sus estrellas y los grupos que ellas forman.



*Figura 25. M 33 o Galaxia del Triángulo. Se encuentra a ~880 kpc y afortunadamente se presenta casi de frente a nosotros por lo que podemos estudiarla mejor que a M 31.*

De hecho el análisis de una estrella de M33 fue un trabajo realizado por el Dr. Miguel Urbaneja de la Universidad de Hawaii y sus colaboradores. El observó la estrella conocida como UIT 005 y analizó su espectro. El resultado fué que UIT005 era una estrella de aproximadamente 50 masas solares, con una temperatura superficial cercana a 19 000 K (la del Sol es de 5700 K), 86 veces más grande que el Sol y que tiene una luminosidad cercana a las 800 mil veces la del Sol. Para realizar ese análisis el Dr. Urbaneja y sus colaboradores utilizaron modelos generados por computadora de atmósferas estelares, calculados con una combinación amplia de



parámetros (masa de la estrella, gravedad superficial, contenido de elementos pesados, etc). Cada espectro generado fue comparado con el espectro observado y aquel que reprodujo mejor el espectro observado fue escogido como el representativo de la estrella. Los valores de los parámetros físicos que dieron origen a ese modelo se adquirieron como representativos de la estrella. Esta técnica permite analizar el espectro de algunas estrellas y deducir así sus parámetros. (Fig. 26).

Utilizando ésta y otras estrellas se sabe ahora que a lo largo de M33 la cantidad de elementos más pesados que el hidrógeno (cantidad conocida como la metalicidad) no es la misma en todas las posiciones de la galaxia, sino que las regiones más cercanas al centro son más ricas en metales que las partes externas. Esto se puede explicar debido a las distintas historias de formación estelar en zonas a lo largo del disco de la galaxia. En las zonas más cercanas al centro de la galaxia ha habido más eventos de formación estelar. Al morir las estrellas formadas enriquecen el medio interestelar con los elementos pesados que formaron en su centro. Las siguientes estrellas que se forman de ese material tendrán así una mayor metalicidad.

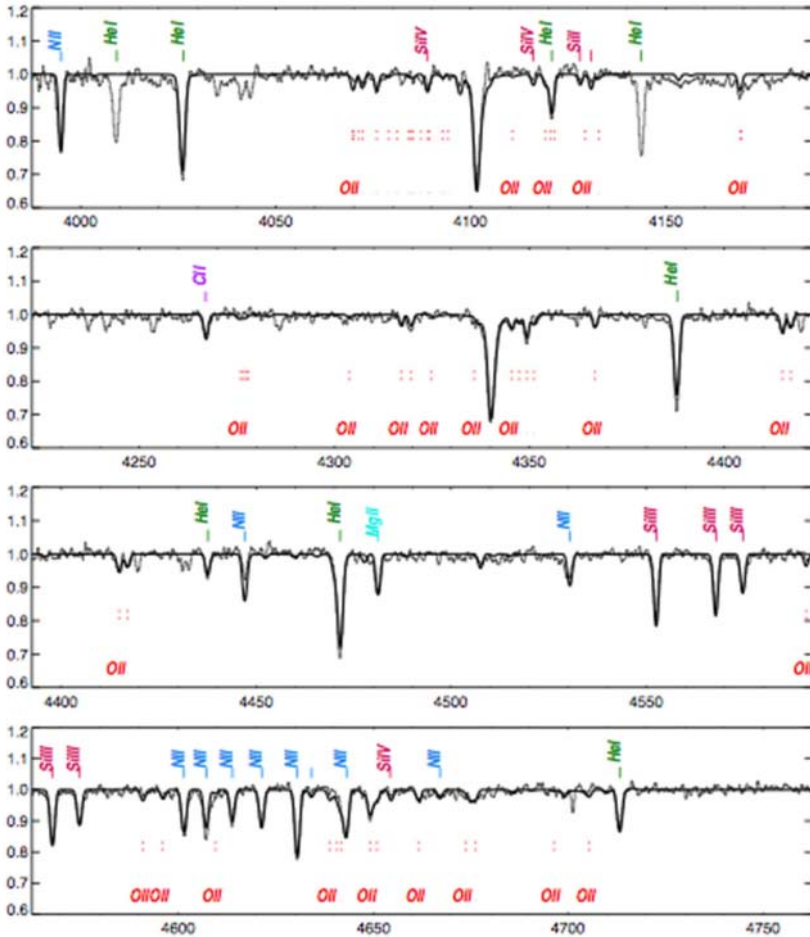
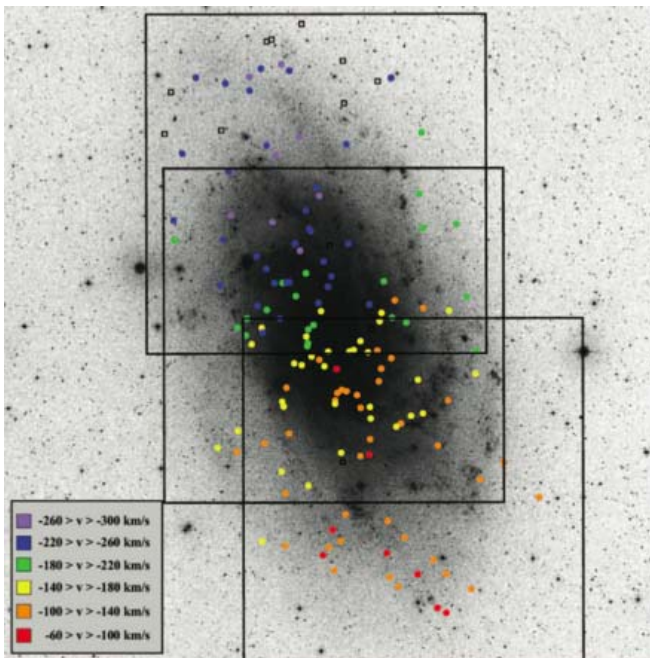


Figura 26. Comparación de los espectros observado (línea delgada) y calculado (línea gruesa) por el Dr. Urbaneja y colaboradores para la estrella UIT 005 de M33. Se marcaron las identificaciones de los elementos que dan origen a las líneas espectrales

Otro resultado interesante fue obtenido por la Dra. Laura Magrini del Instituto Nacional de Astrofísica, de Florencia, Italia y sus colaboradores. Ella estudió las Nebulosas Planetarias de M 33 y otras galaxias cercanas. Las Nebulosas Planetarias son uno de los últimos estadios de la evolución

de las estrellas de masa intermedia (hasta 8 masas solares aproximadamente). Son el resultado de la expulsión de las capas exteriores de la estrella que son iluminadas e ionizadas por el núcleo muy caliente que queda en el centro. Analizando estos objetos Magrini y colaboradores midieron con precisión su velocidad radial con respecto a nosotros. Si graficamos esa velocidad radial en una escala de colores sobre la imagen de M33, podemos ver que la parte norte de M33 se acerca a nosotros, mientras que la parte sur se aleja, ya que las velocidades son más negativas hacia el norte de la galaxia. Es decir, en la galaxia M33 no solo rota el plano del disco, sino que este disco galáctico rota también alrededor de un eje que es perpendicular a la línea de visión (Fig. 27).



**Figura 27.** *Velocidades radiales de algunas Nebulosas Planetarias de M33. La escala de velocidades se muestra a la izquierda. La velocidad de las Nebulosas Planetarias son más negativas (es decir se acercan a nosotros con mayor velocidad) que las del sur.*

### *Algunas galaxias enanas del Grupo Local*

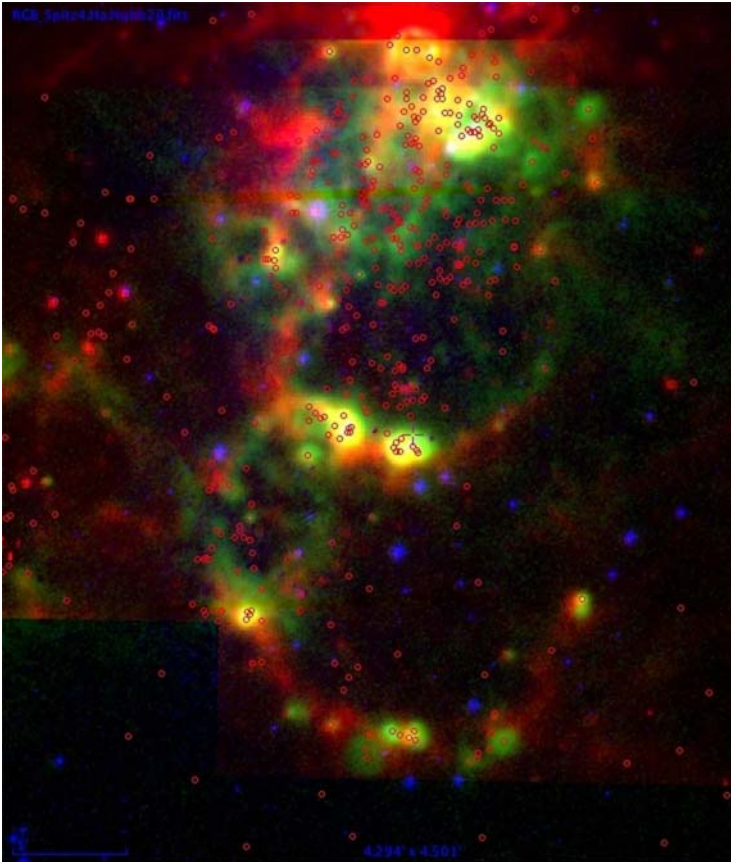
Las galaxias espirales no son las únicas en las cuales se están formando estrellas actualmente, en algunas galaxias enanas se forman estrellas y a veces se forman de manera más intensa que en las galaxias espirales. Tal es el caso de la galaxia IC10, (Fig. 28) una enana irregular que se encuentra a una distancia aproximada de 660 000 parsecs. Esta galaxia sabemos que está formando estrellas en un evento muy intenso conocido como Brote Estelar (Stellar Burst, por su nombre en inglés).



*Figura 28. LA galaxia irregular IC10. La imagen es el resultado de tres imágenes tomadas con filtros V, Ha y [O III]. Las nubes rojizas son algunas de las zonas de formación estelar intensa.*

Las estrellas, en su mayoría, se forman formando cúmulos, es decir, acumulaciones de estrellas cuya edad es muy parecida. Debido a la evolución estelar, las estrellas más masivas tienen tiempo de vida menores, viven y se destruyen más rápidamente que las estrellas de menor masa. Así una estrella de 50 veces la masa del Sol vive aproximadamente unos 10 millones de años, mientras que una estrella como el Sol vivirá unos 10 mil millones de años. Si en una región podemos ver estrellas masivas, eso quiere decir que la formación estelar sucedió de forma muy reciente. Pero, ¿cómo podemos identificar a las estrellas masivas de las que tienen masas más pequeñas? Aquí lo que utilizamos son imágenes tomadas con distintos filtros.

Para analizar la luz de las estrellas, podemos medir la cantidad de luz que nos llega utilizando distintos filtros. Estos filtros, lo que hace es dejar pasar una parte pequeña de toda la luz de la estrella. Dependiendo de la temperatura de las estrellas, la luz que recibimos tienen distintas componentes, así una estrella muy caliente, como UIT005, emitirá principalmente luz azul (más energética) que luz roja (menos energética). Por el contrario, una estrella como el Sol o más fría emitirá principalmente luz roja. Separando las estrellas por sus distintos colores podemos identificar aquellas que emiten más en el azul, es decir que son más calientes y por lo tanto son las más masivas. Este método no nos da la temperatura de la estrella directamente, pero si nos reduce enormemente el número de estrellas que debemos observar y obtener su espectro para analizarlo (Fig 29).



*Figura 29. Imagen de una zona central de IC10. La imagen fue formada con imágenes de los telescopios espaciales Spitzer (IR, rojo) y Hubble (Visible, azul) y una imagen tomada con un filtro H $\alpha$  (verde). Los pequeños círculos rojos son las posiciones de las estrellas masivas identificadas por el autor.*

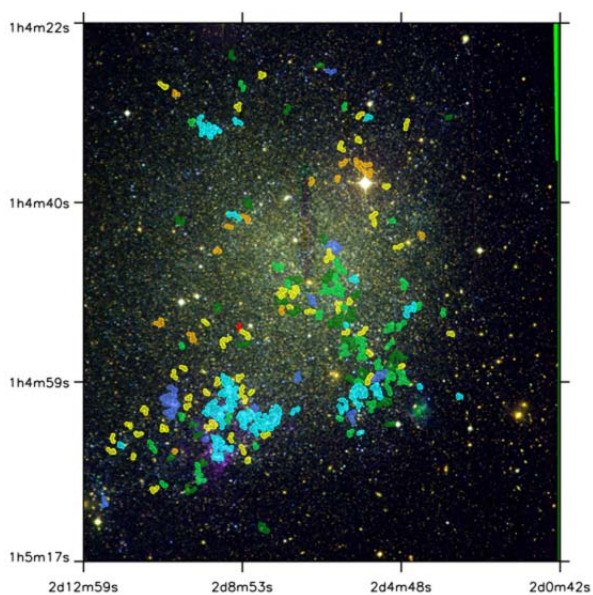
Un caso similar es el de IC1613 (Fig 30). En esta galaxia, utilizando el método de los colores se pudo identificar aquellas estrellas masivas, es decir, la población joven de la galaxia. Un problema que es interesante encontrar es el poder saber cuáles de los grupos que forman esas estrellas se formaron primero y cuáles fueron formados en épocas posteriores. Esto nos dará pistas sobre cómo se lleva a cabo la

formación estelar, si un grupo que se formó antes induce que una nube cercana empiece a formar estrellas (formación secuencial) o si por el contrario la formación de un grupo, por la radiación UV que emite, deshace las nubes cercanas y detiene la formación estelar en esa parte de la galaxia. Este fue el trabajo que realizó la Dra. Miriam García que en ese momento se encontraba trabajando en el Instituto de Astrofísica de Canarias, en España, y sus colaboradores. Uno de los problemas que la Dra. García encontró es saber si la acumulación de estrellas masivas que se observan en realidad forman un grupo o si son dos o varios grupos a distintas distancias, pero que los vemos mezclados al estar uno enfrente de otro; otro problema es saber en donde termina un grupo y empieza otro. Para resolver esto la Dra. García desarrolló un código que analiza las posiciones de los objetos identificados como estrellas masivas y encuentra los grupos que se forman utilizando una técnica llamada 'amigos de amigos'. En esta técnica las estrellas forman parte de un grupo si su distancia es menor que una distancia de prueba, se analizan las distancias a los demás objetos y aquellos que estén dentro de una distancia menor de miembros del grupo pasan a formar parte de él. El grupo deja de crecer hasta que las distancias de todas las demás estrellas han sido medidas y éstas son mayores que la distancia de prueba. Los grupos que se forman de esta manera son analizados utilizando los llamados diagramas color-magnitud. Un grupo de estrellas que se hayan formado al mismo tiempo tienen una distribución definida por la evolución de sus miembros, analizando esa distribución es posible determinar no solo la certeza de que forman un grupo de la misma edad sino también la edad del cúmulo. En las siguientes figuras se muestran las edades de los cúmulos de las estrellas de IC1613 con una escala de color; los cúmulos pintados en morado son más jóvenes (de un millón de años aproximadamente) y los rojos son más viejos (alrededor de 20 millones de años) (Fig. 31). Una ca-

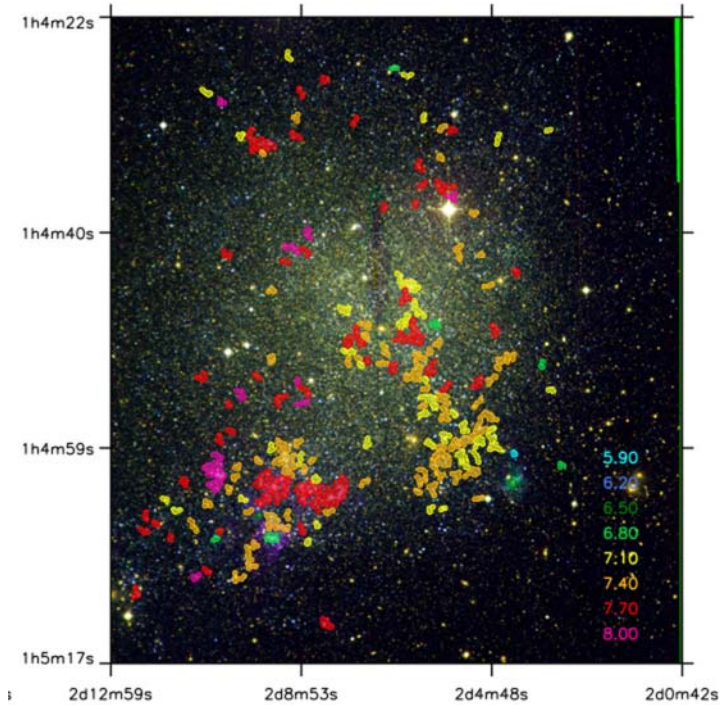
racterística de IC10 e IC1613 es su bajo contenido de elementos pesados, que simulan las condiciones que tenía el universo en edades más tempranas.



*Figura 30. La galaxia irregular IC 1613.*







**Figuras 31.** *Edades de los cúmulos de IC1613. Los cúmulos azul claro son los más jóvenes (cerca de 800-900 mil años) y los rojos los más viejos (100 millones de años)*

En resumen el Grupo Local nos permite no solo estudiar algunas de los tipos de galaxias que encontramos en el universo, sino también las estrellas que se forman en esas galaxias ayudándonos así a entender mejor la evolución de las estrellas a lo largo de las distintas edades del universo.

Semana de Astronomía 2011  
Se terminó de imprimir en agosto de 2013  
en los talleres de Astra Ediciones S.A. de C.V.  
Valle de los cedros 2837-1  
Jardines del Valle, C.P. 45138  
Zapopan, Jalisco, México.

E-mail:

[grupoastra@prodigy.net.mx](mailto:grupoastra@prodigy.net.mx)

Impresión digital con interiores en papel bond 75 g,  
portada en cartulina sulfatada 12 pts.