

Química, astronomía y vida.

Los elementos pesados y las supernovas

MANUEL GONZALEZ*

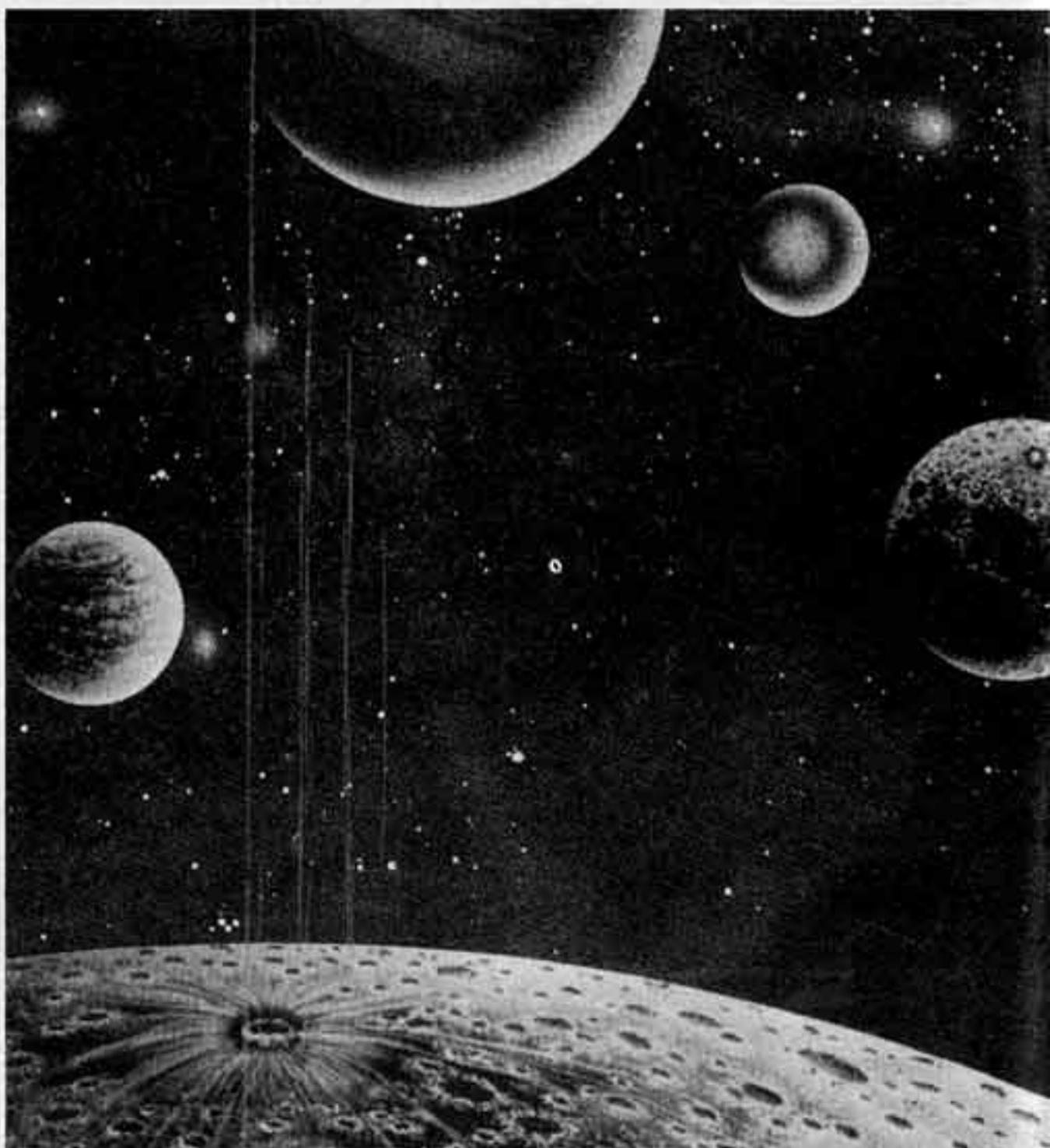
“Todo hombre está hecho de polvo de estrellas...”

Carl Sagan

Hasta 1920 todas las explosiones estelares eran clasificadas como explosiones tipo nova. Estas explosiones permiten a una estrella aumentar su luminosidad de $5(10^3)$ a 10^5 veces durante unos cuantos días. No hay una explicación generalmente aceptada, aunque existe la hipótesis de que la inestabilidad que provoca la explosión es responsabilidad de una segunda estrella cercana a la nova. Pero en esa década algo hizo pensar que había explosiones mucho más violentas que la nova. En 1885 se observó una nova, bautizada S Andrómeda, en la “nebulosa” de Andrómeda. En ese entonces se pensaba que dicha “nebulosa” formaba parte de la Vía Láctea. Pero después de 1920 fue evidente que Andrómeda era en realidad toda una galaxia por derecho propio situada a 2×10^6 años luz de la nuestra. Esto llevaba a la conclusión de que S Andrómeda era más que una nova, pues, para que hubiera sido posible confundirla con una nova a esa distancia e hiciera palidecer junto a ella a una galaxia, debía haber alcanzado una luminosidad 10 000 millones de veces la del Sol. S Andrómeda era una supernova. Se inició la búsqueda en otras galaxias, lo que llevó a identificar hasta la fecha a más de 400 supernovas.

Allá por 1938 W. Baaede y R. L. Minkowsky mostraron que debía hablarse al menos de dos tipos de supernovas:

* *Pasante de la carrera de Física, Fac. de Ciencias, UNAM.*



a) SN I. Yo las llamaría "supernovas", S Andrómeda era una de éstas, al igual que la que originó la nebulosa del Cangrejo. Este tipo de supernovas tiene una magnitud absoluta del orden de -19. Pierden en la explosión entre 1/10 y 9/10 de su masa (una nova pierde alrededor de 1/100 000). La línea H Alfa no aparece en su espectro, por lo que deben ser deficientes en hidrógeno.

El decaimiento de su luminosidad es exponencial. Aparecen en todo tipo de galaxias y se asocian con poblaciones estelares viejas (tipo II). Parecen originarse a partir de estrellas medianamente masivas (entre 3 y 8 masas solares), no produce estrellas neutrónicas como remanente y producen mucho Ni durante la explosión. La explicación de su origen y comportamiento permanece en la "dimensión desconocida".

b) SN-II. Su magnitud absoluta es del orden de -17 (es decir son alrededor de seis veces menos brillantes que las SN-I). Durante la explosión pierden de 1/100 a 1/10 de su masa total. Las abundancias relativas de los elementos son normales. Sólo aparecen en los brazos de galaxias espirales, asociándose por tanto con estrellas de Población I. Aparentemente ocurren en estrellas masivas (masa mayor a ocho veces la del Sol). El decaimiento de su luminosidad inicialmente es muy abrupto, aunque posteriormente se vuelve exponenciales como el de las SN-I.

Se han desarrollado varios modelos de interiores estelares que tendrían como consecuencia una explosión supernova. A continuación exponemos un modelo relativamente simple que podría explicar los procesos y datos observacionales de las supernovas SN-II. Este modelo toma

como punto de partida una estrella gigante roja o una supergigante, ambas masivas. Cuando una de estas estrellas llega al final de su vida normal, nos encontramos con que su núcleo está formado esencialmente por Fe. Durante esta etapa la mayor parte de energía es producida por las capas exteriores de la estrella, y la tasa de liberación de energía decrece continuamente. En un momento dado la presión de radiación del núcleo ya no le permite mantener su volumen constante frente a la atracción gravitacional. Eventualmente la situación se desestabiliza, pues la energía potencial perdida se transforma en calor, implicando un aumento de la temperatura hasta alcanzar el punto en que pueden efectuarse ya reacciones nucleares de fusión de Fe; sin embargo, dichas reacciones son endotérmicas, es decir, provocan serias pérdidas de energía en el núcleo estelar, por lo que el colapso se acentúa.

La energía liberada por el colapso induce la aparición de fotones de alta energía, que al ser absorbidos por los núcleos de Fe los obligan a romperse formando átomos más ligeros; estas reacciones de fisión son también endotérmicas, por lo que el colapso se hace cada vez más desenfrenado. El proceso sale de todo control posible, con el núcleo colapsándose y calentándose catastróficamente.

Para este momento, las capas externas de la estrella han empezado a sentir los efectos de las primeras reacciones endotérmicas del núcleo, enfriándose, y por lo tanto, iniciando su propio colapso.

Esto lleva a que grandes cantidades de materia caigan en el núcleo, presentándose reacciones de fusión entre electrones y protones, liberándose de este último proceso una inmensa cantidad de neutrinos. Este tipo de partículas normalmente atraviesa la materia como si no existiera pero, como han mostrado varios trabajos en los últimos años, su naturaleza fermiónica los hace quedar atrapados en las capas externas de la estrella, transfiriendo momento y energía a dichas capas. Las ondas de choque resultantes inducen las reacciones de nucleosíntesis de átomos pesados, al mismo tiempo que empujan violentamente a las capas externas. Con esta explosión final, la estrella es destruida. Sólo el núcleo estelar permanece como remanente compacto.

Resumiendo tenemos que, en una estrella masiva o supergigante, una vez que el núcleo está constituido por Fe, la estrella está lista para convertirse en supernova.





La extensión de las posibilidades de exploración del universo se ha traducido —entre otras cosas— en el descubrimiento de nuevos fenómenos como la extrema luminosidad de algunas estrellas.

Como acabamos de ver, la explosión supernova produce elementos pesados que son expulsados violentamente al espacio superestelar. Lo interesante sería mostrar ahora que esto explica la abundancia relativa en el universo, de átomos pesados. Pues bien, las predicciones son satisfactorias y concuerdan con los valores observados.

En primer lugar la restricción de ocurrencia de supernovas del tipo SN-I, en estrellas de Población I y en los brazos espirales, va de acuerdo con una mayor abundancia observada (respecto a las Poblaciones II) de elementos pesados en ese tipo de población y en los brazos de las galaxias espirales.

Además, la abundancia cósmica observada corresponde "a trozos" con las predicciones de los modelos dinámicos para ciertos elementos, es decir, un modelo dinámico con un elemento de explosión predice los valores observados de una cierta secuencia de átomos pesados:

- a) El Carbono como actor de una explosión supernova en las capas externas de una estrella, predice correctamente la proporción cósmica observada de átomos cuyo número atómico esté entre 20 y 30.
- b) Si el Oxígeno está presente en las capas exteriores, lleva la proporción correcta para los núcleos de número atómico entre 30 y 40.

c) La presencia de Silicio colabora para el pico de abundancia del Hierro.

Estas tres condiciones se cumplen para estrellas cuya masa sea mayor que 8 y menor que 15 veces la masa solar.

Las estrellas cuya masa está entre 15 y 70 veces la masa del Sol nos brindan 2/3 partes de las proporciones observadas de Carbono y Hierro.

La tercera parte restante de Carbono la proporcionan las estrellas que trabajan con el ciclo triple alfa (3 núcleos de He 4 fusionándose). El tercio faltante de Hierro pudiera ser proporcionado por las explosiones SN-I y por las reacciones mencionadas descritas en el inciso c.

Finalmente la abundancia relativa de Oxígeno exige supernovas SN-II cuya masa inicial sea del orden de 100 veces la masa del Sol.

Como puede ver cualquier lector, sin necesitar demasiada suspicacia, hemos dejado de lado el estudio de los remanentes compactos, sean estrellas de neutrones, pulsares u hoyos negros; esto se debe a que para nuestros propósitos son temas ajenos.

Como ya hemos dicho, los elementos pesados resultantes de una supernova se dispersan por el espacio en todas direcciones. Estos remanentes contaminan las nubes de material interestelar que posteriormente dan origen a estrellas de segunda generación (es decir, que contienen cenizas de otras estrellas) como nuestro Sol.



La luminosidad de una supernova es equivalente a la de varios millones de estrellas juntas; de esta manera, cuando una estrella se transforma en supernova, es posible observarla con facilidad.

Para precisar aún más el papel de las supernovas en esta cuestión, sería necesario conocer la tasa de explosiones supernova. Tamman calcula que, con base en la tasa de supernovas observadas en nuestra galaxia (una cada 200 años), podríamos extrapolar considerando que buena parte de la Vía Láctea queda oculta por nubes de polvo y proponer una tasa de una cada 15 años ($1/15 \pm 15$). El mismo autor hace otra extrapolación tomando como base la tasa observada en otras galaxias, lo que conduce a un valor de $1/20 \pm 20$ años.

La razón entre las tasas observadas en la galaxia, de SN-II es I.

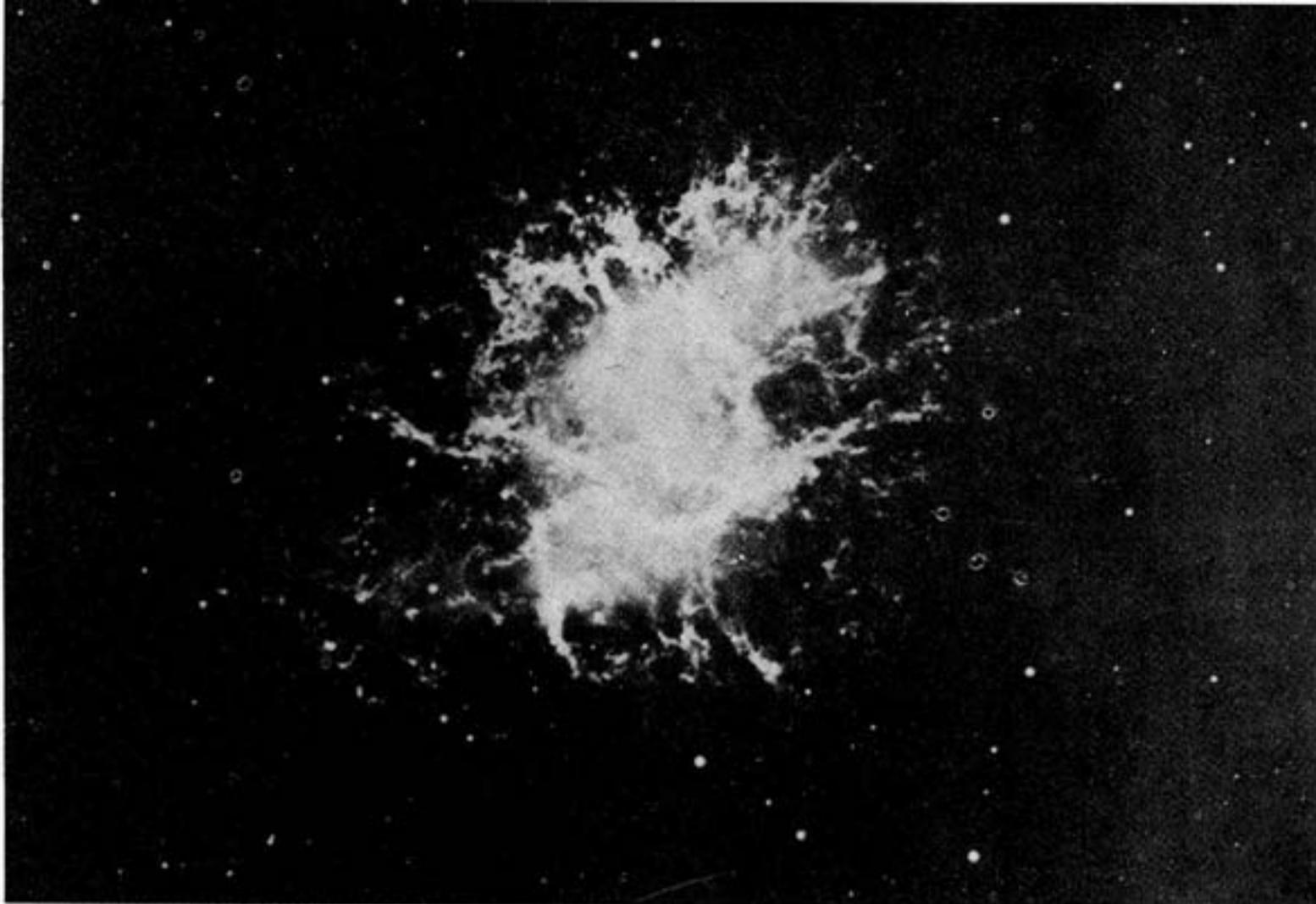
En principio, la mayor abundancia de estrellas medianas respecto a las masivas nos haría esperar quizá un valor menor pero tal vez la razón sea el bajo número de supernovas estudiadas (que esté ocultando la verdadera proporción o algún factor que hemos abstraído del modelo).

Una vez que se conociera adecuadamente la tasa de formación de supernovas junto con una estimación de la masa de elementos pesados liberada en promedio por cada una de ellas, podríamos calcular la masa total de átomos pesados disponibles para la formación de estrellas de segunda generación.

Respecto al Sistema Solar tenemos evidencias de que al menos dos supernovas estallaron cerca de él contaminando la nube originaria de gas y polvo (o nube protosolar). Dichas evidencias consisten en lo siguiente:



Nueve siglos después de la explosión supernova del Cangrejo, ha aparecido una nebulosa en esa región. La expulsión de la materia de la estrella incandescente ha sido la causa.



LAS ESTRELLAS Y LA VIDA

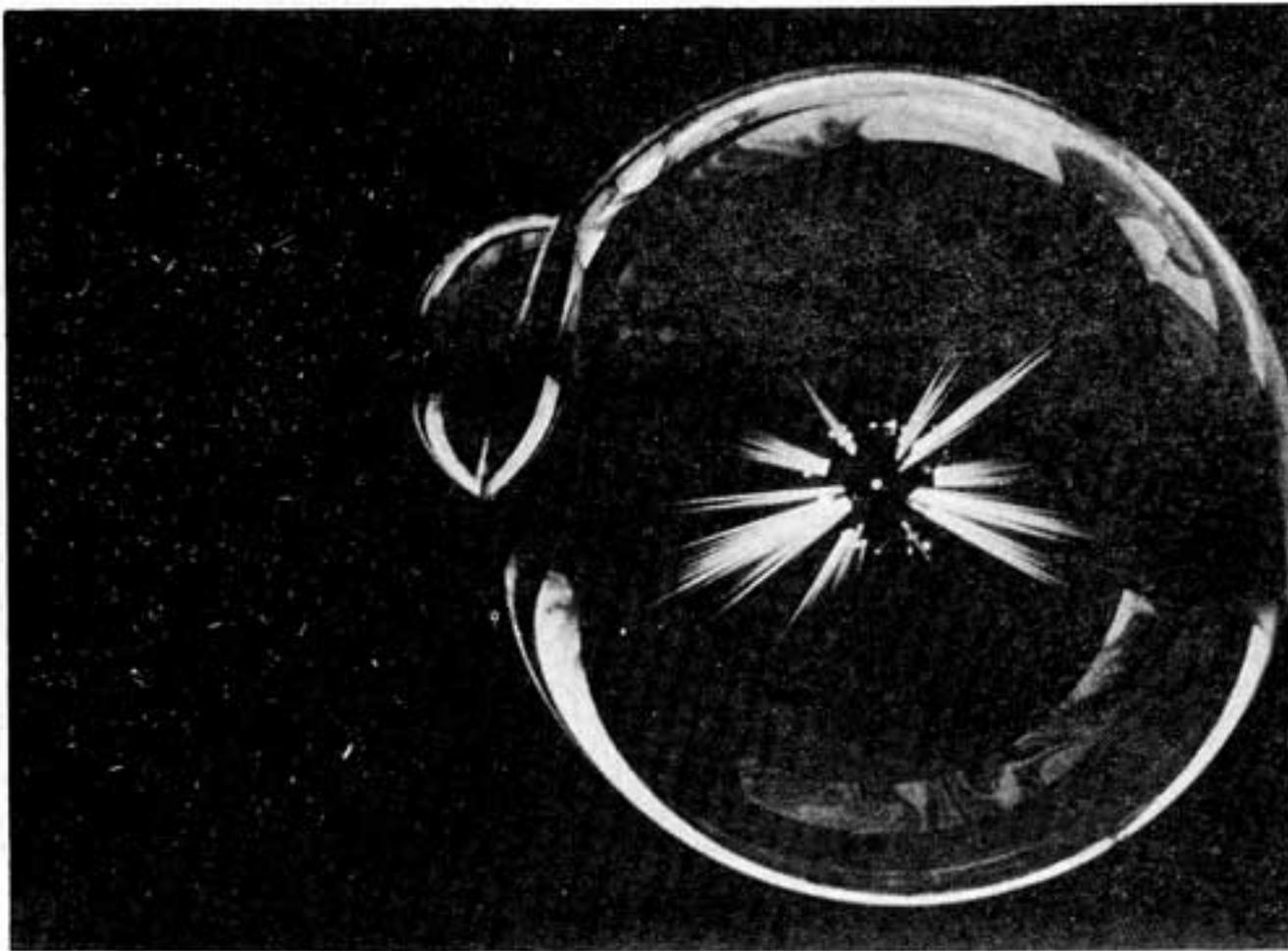
El cálculo probabilístico del número de planetas habitables en la galaxia requiere de una estimación de la probabilidad de que una nebulosa "protosolar" esté contaminada con elementos químicos pesados. La fuente principal de esta contaminación son las explosiones estelares: Supernovas.

El problema es el siguiente:

- Todos los seres vivos contienen elementos químicos pesados. Entendemos por elementos pesados aquellos cuyo número atómico A es mayor que 12.
- Dichos elementos químicos no se forman durante el Big Bang, pues el modelo de nucleosíntesis de Gamow, según el cual los núcleos absorvieron neutrones uno a uno (con la consiguiente emisión Beta) para aumentar su número atómico, sencillamente no funciona. Cuando el proceso llega a He-4, aparece una brecha difícil de salvar. Este átomo es tan estable que su tendencia a absorber un protón o un neutrón es prácticamente nula. Y si por casualidad llegara a hacerlo, formando Li-3 o He-5, según sea el caso, los tiempos de desintegración son tan breves, (del orden de 10^{-20} segundos) que la zanja no se brinca. ¿Y si dos núcleos de He-4 chocaran? La zanja seguiría ahí, porque el Be-8 resultante se desintegraría también con una velocidad pavorosa.

Para brincar la brecha son necesarias las siguientes reacciones: que el He-4 capture simultáneamente un protón y un neutrón formando Li-6, que ya es estable, o que choquen simultáneamente dos núcleos de He-4 con un neutrón para formar Be-9 estable. Lo malo es que en las condiciones de baja densidad del Big Bang de media hora de edad estos eventos son muy poco probables.

- Fred Hoyle propone otra solución al problema de la nucleosíntesis. Según él, después del Big Bang la composición de sus remanentes es poco menos que un 100 % de H-1. Los átomos mayores se formarían en realidad dentro de las estrellas, donde la densidad es bastante más alta que en el Big Bang de media hora de nacido, lo que haría más probables las reacciones que nos hacen brincar la brecha del He-4. Esta densidad elevada permitiría que el Be-8 chocara con un He-4 antes de desintegrarse, para formar un núcleo de C-12, que ya es estable. De esta manera, pasamos a la teoría de la síntesis de Li, Be y B, cuya formación se efectuaría a través de procesos menos frecuentes, lo que explicaría la relativa rareza cósmica de dichos elementos ligeros.
- Por propiedades del núcleo, el átomo más pesado que se puede formar en los interiores estelares es el Fe. Lo que sucede es que la formación de átomos como el Fe libera energía, mientras que los núcleos más pesados necesitan absorber energía durante su formación, y esta energía no se encuentra disponible en condiciones normales. Podríamos decir entonces que la ceniza más pesada de la fusión nuclear en los interiores estelares es el Fe.
- ¿Cómo es entonces que se formaron los elementos más pesados que el Fe? Una respuesta son las gigantes explosiones estelares llamadas supernovas, a que nos referimos en el cuerpo principal del artículo. Otros procesos menos frecuentes también colaboran, por ejemplo, tenemos la formación del isótopo 99 del Tecnecio (cuya vida media es del orden de 200 000 años) que se encuentra presente, en ciertas estrellas atípicas de la clase S.



Después de un intenso brillo en periodo relativamente corto de tiempo, las supernovas desaparecen (en algunos casos sin dejar rastro).

a) Clayton, Mayeda y Grossman encontraron una proporción anómala de O-16 estudiando material del meteorito Allende (México 1969). La proporción normal es de 99.756% mientras que la del meteorito es 0.012% mayor. De hecho el Oxígeno del meteorito parece estar constituido por dos componentes: una con proporciones normales de los isótopos de Oxígeno y otro de O-16 puro.

El O-16 puro se habría formado en el núcleo de una estrella masiva vieja y habría sido expulsado por una explosión supernova, llegando hasta la nube protosolar antes que ésta se condensara. En la Tierra no observamos esta proporción anómala por la constante redistribución de los isótopos de Oxígeno que resulta de la intensa actividad química propia de la superficie del planeta.

b) Lee Papanastassiou y Wasserburg en 1973 descubrieron más pistas en el meteorito Allende. También el Mg-26 estaba en una proporción anómala. El exceso de Mg-26 se explicaría pensándolo como el residuo del decaimiento radiactivo del Al-26 que se forma en las capas externas de las supernovas. Estudiando la proporción relativa de Mg-26 y Al-26 se concluye que este último llegó a la nube protosolar hace 4 600 millones de años (4.6

evos), es decir antes de que la nube protosolar se condensara, ya que la condensación para una estrella como el Sol toma 10 millones de años. Cósmicamente ambos sucesos fueron simultáneos.

c) En los años setenta, J. H. Reynolds descubrió, estudiando meteoritos, un exceso de los isótopos 129, 131, 132, 134 y 136 del Xe que serían residuos del decaimiento del I-129 y la fusión espontánea del Pu-244, siendo estos últimos elementos introducidos en la nube protosolar por la onda de choque producida por una supernova que habría llegado hace 4.7 evos. Las diferentes anomalías entre estos meteoritos y el Allende hacen pensar que se trata en efecto de dos supernovas diferentes.

d) Los cálculos teóricos respecto al comportamiento de una nube protoestelar cuya masa fuera semejante a la del Sol predicen que su presión interna compensaría la atracción gravitacional, lo que le impediría condensarse, a menos que apareciera un estímulo externo. En el caso de la nube protosolar, dicho estímulo externo habría sido proporcionado por las ondas de choque de la explosión supernova cuyos residuos fueron citados en a) y b). Apoya esta hipótesis la coincidencia temporal mencionada en b).

Según los cálculos, para que la onda de choque proporcionase el impulso necesario, la supernova debió estar situada a una distancia no mayor a los 60 años luz.

No hemos identificado el remanente compacto, pero la velocidad de éste respecto al Sistema Solar podría haberse alejado bastante de nosotros a lo largo de los últimos 4.6 evos.

Tiene sentido decir en efecto, que el hombre está hecho de polvo de estrellas, único material capaz de originar y sostener la vida. ☉

BIBLIOGRAFIA

The origin of supernovae J. Craig Wheeler. University of Texas at Austin. Department of Astronomy & MacDonald Observatory. 1981.

Did a supernova trigger the formation of the Solar System? D. N. Schramm, R. N. Clayton. S. C. A., offprint No. 3022. 1978. *University Astronomy*. J. M. Pasachoff, M. L. Kutner, W. B. Saunders Co. 1978.

Vida e inteligencia extraterrestre, ¿Tiene sentido? L. M. González. *Revista Naturaleza* No. 5. 1980.

El Universo. I. Asimov. Alianza Editorial, Madrid. 1978.

