

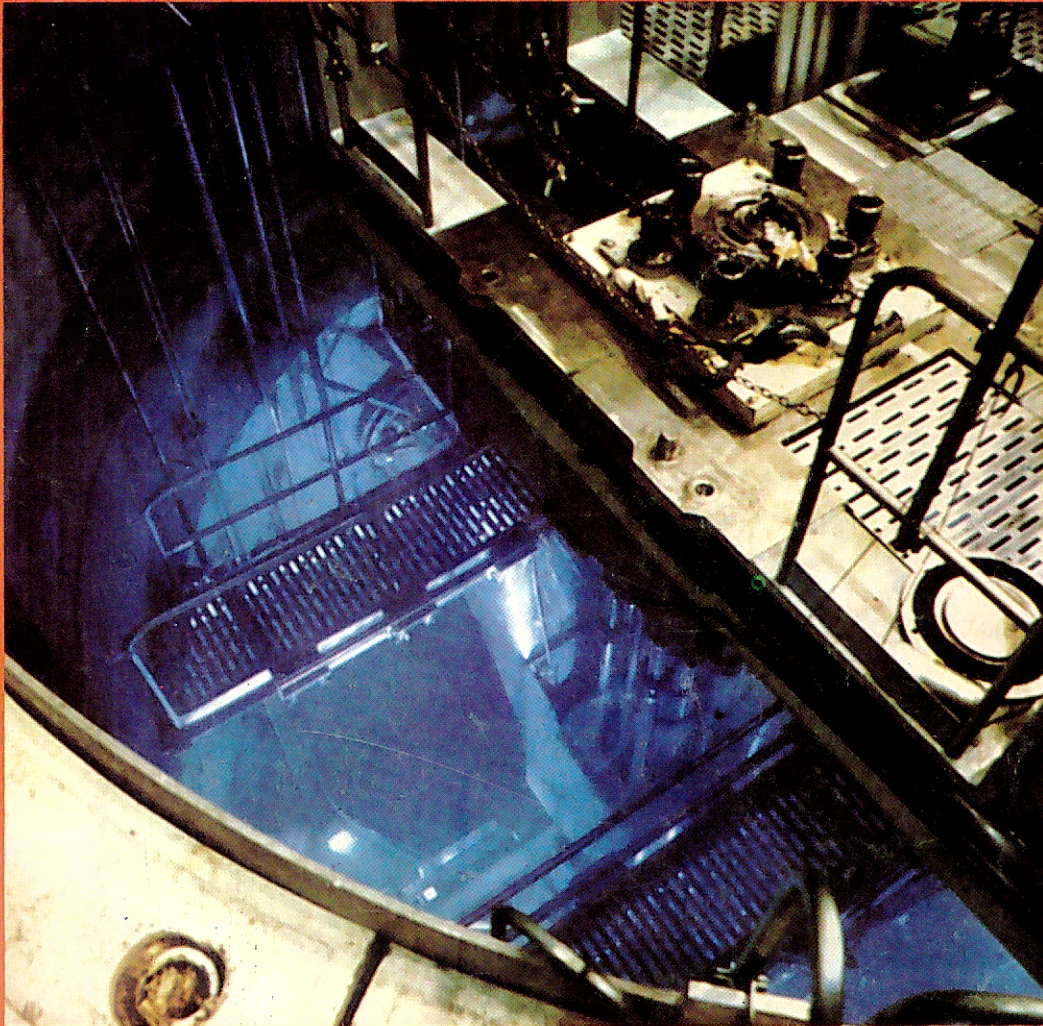
N.º 346

REVISTA DE INFORMACION CIENTIFICA, TECNICA Y CULTURAL

# algo

OCTUBRE 1979 - 125 PESETAS

Entrevista con el profesor  
**RODRIGEZ DELGADO**  
el hombre que puede  
teledirigir un cerebro



dossier

## ¿NO HAY SOLUCION PARA LOS RESIDUOS NUCLEARES?



energía

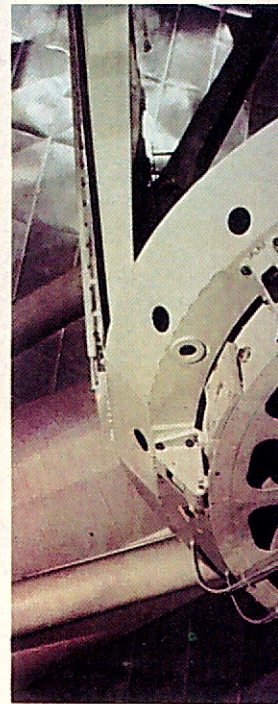
# ***NUESTRO FUTURO ESTA EN LAS ESTRELLAS***

**N**UESTRO pasado  
De una de ellas  
la que llamamos  
mos evolución biológica  
humana es una etapa, d  
contexto de la evolución  
si parte de la evolución  
a ellas tendremos que r  
para resolver el problema  
tra civilización en este m  
gía.

Para obtener energía p  
estrellas como mínimo d  
Está ya en marcha un bu  
tos para intentar aproveca  
energía que nos envía el  
es la única fuente de en  
tanto inagotable, que  
realidad hasta ahora hen  
la energía solar que los s  
nado y que nosotros esta  
ma de petróleo, gas nat

La energía solar es la  
llega a la superficie de  
¿de dónde saca tan eno  
gía el Sol? Si se pudier  
proceso por el cual las

*Astrónomo en el foso Cassegrain  
200 pulgadas en el Monte P*



69 (1401)



mos arrancado a las estrellas el secreto más buscado.

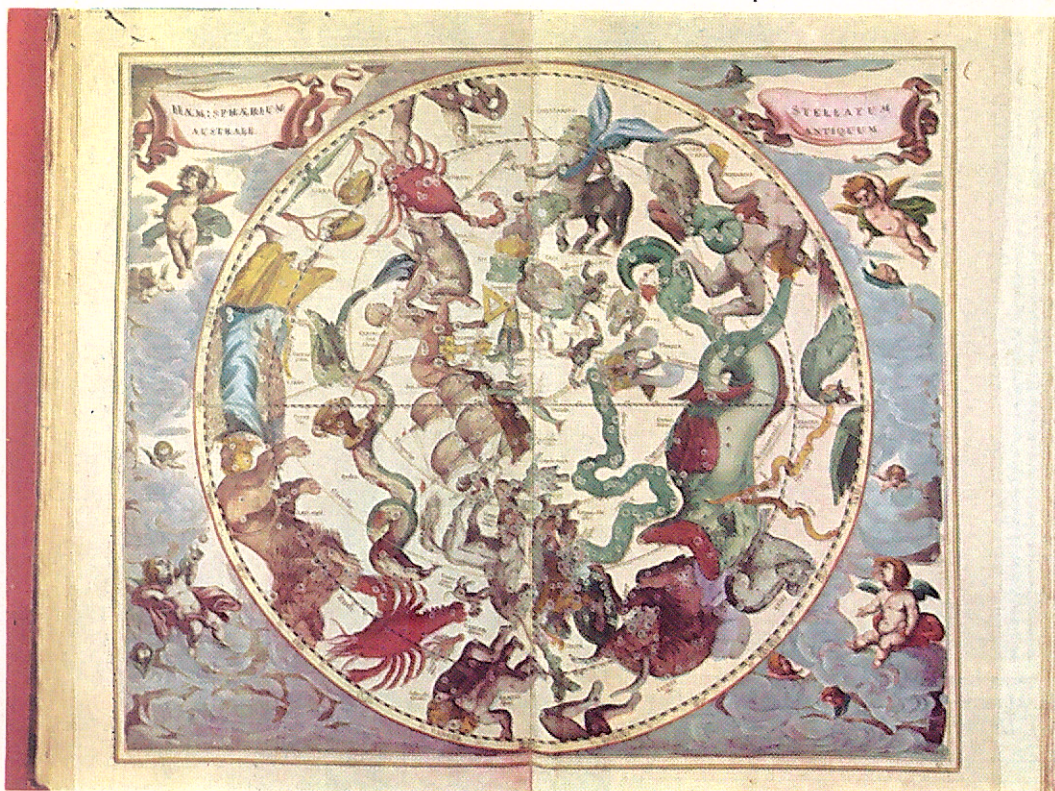
### LA FUSION NUCLEAR

En los reactores nucleares que funcionan actualmente se aprovecha el llamado fenómeno de la fisión nuclear. La fisión se produce en los núcleos atómicos de gran tamaño. Estos tienden a romperse dando núcleos menores que son más estables emitiendo una energía que es la que se utiliza para producir electricidad. Sin embargo en el otro extremo de la tabla periódica ocurre un fenómeno inverso. Ocurre que al unirse los elementos más ligeros para dar núcleos más pesados se desprende también energía y que es muy superior en intensidad a la del proceso de la fisión. Este es el fenómeno que denominamos fusión nuclear y consiste por lo tanto en la unión de dos núcleos de elementos ligeros para dar núcleos de masa intermedia emitiendo gran cantidad de energía. Es éste el proceso que se produce con-

tinuamente en las estrellas y da la enorme cantidad de energía que éstas emiten.

Aparte de la emisión de energía en el proceso de la fusión ocurre según lo dicho una consecuencia interesante, la producción de elementos más pesados. Ya que se supone que el material original del universo son elementos ligeros como el hidrógeno, la fusión nos proporciona un sistema para entender cómo se van produciendo los distintos elementos que encontramos en nuestro planeta. En las estrellas van obteniéndose también distintos elementos y no nos tiene que sorprender que entre los primeros elementos que se producen son precisamente carbono, nitrógeno y oxígeno, imprescindibles para construir las moléculas orgánicas. También es interesante que en la zona de máxima estabilidad de los elementos encontramos por ejemplo el hierro, uno de los elementos más abundantes en nuestro planeta. Así pues la fusión es también el proceso que nos permite explicar la formación de los elementos que encontramos en nuestro planeta.

Ilustración de la *Harmonia Macrocosmica* de Andrea Cellari (Amsterdam 1661). Constelaciones en el hemisferio austral.



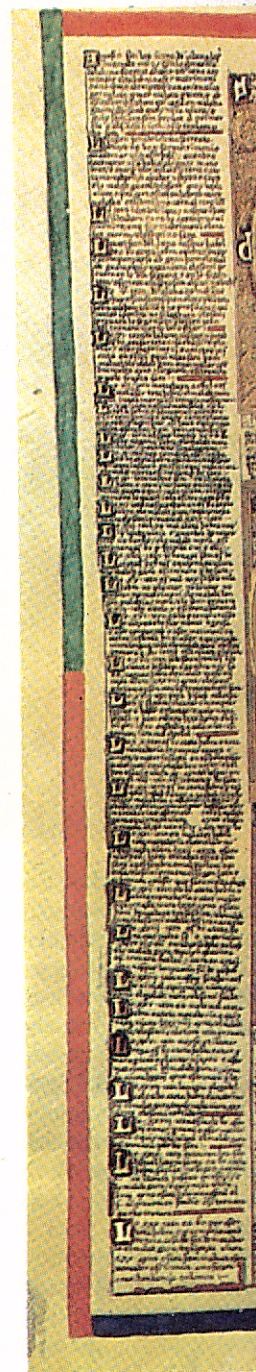
72 (1404)

### LA CERILLA ATOMICA

Muchas reacciones ya sean nucleares o químicas necesitan para desencadenarse de un

primer aporte de energía. Este papel no se realiza espontáneamente; a medida que aumenta la temperatura, el proceso se acelera. A los 451 grados Fahrenheit...

Una página del *Atlas Caelestis* de Johannes Hevelius (1687). Influencia humana.





primer aporte de energía. La combustión del papel no se realiza espontáneamente si no se aumenta la temperatura más allá de los famosos 451 grados Fahrenheit (233 °C). Esto lo

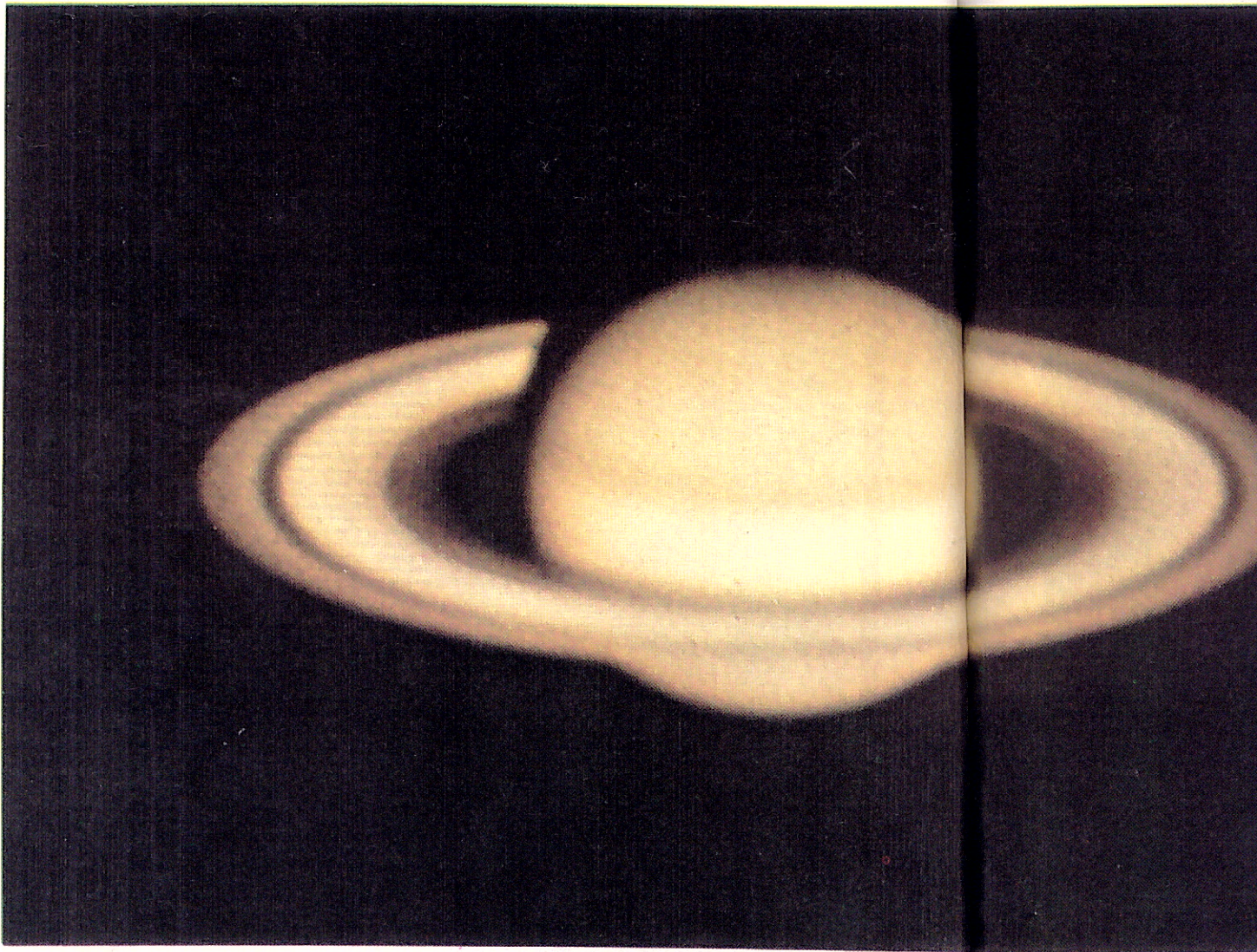
conseguimos con el fuego de una cerilla. Ello se explica porque la reacción del papel con el oxígeno del aire sólo se produce si se supera una cierta barrera de energía. Esta energía la puede aportar por ejemplo el fuego de una cerilla. Tras ello la misma temperatura de la combustión alimenta la continuación de la reacción.

En el proceso de la fisión nuclear no es

Una página del Atlas Catalán de Abraham o Jehuda Cresques (1375). Influencia de los astros en el cuerpo humano.







*El planeta Saturno, con sus característicos anillos (Foto Carnegie Institution de Washington).*

necesario comenzar la reacción mediante ningún tipo de "cerilla" porque para que la fisión se realice basta que se produzca un flujo de neutrones suficiente. Ello se consigue simplemente juntando una masa de material fisible lo suficientemente grande, la llamada masa crítica. Los neutrones que se producen en ella son suficientes para desencadenar la reacción en cadena que da lugar a la explosión de las bombas atómicas o a la energía que se aprovecha en las centrales nucleares.

El problema de la fusión nuclear es que sí necesita una "cerilla" para que la reacción se inicie. Y no se trata de una temperatura cual-

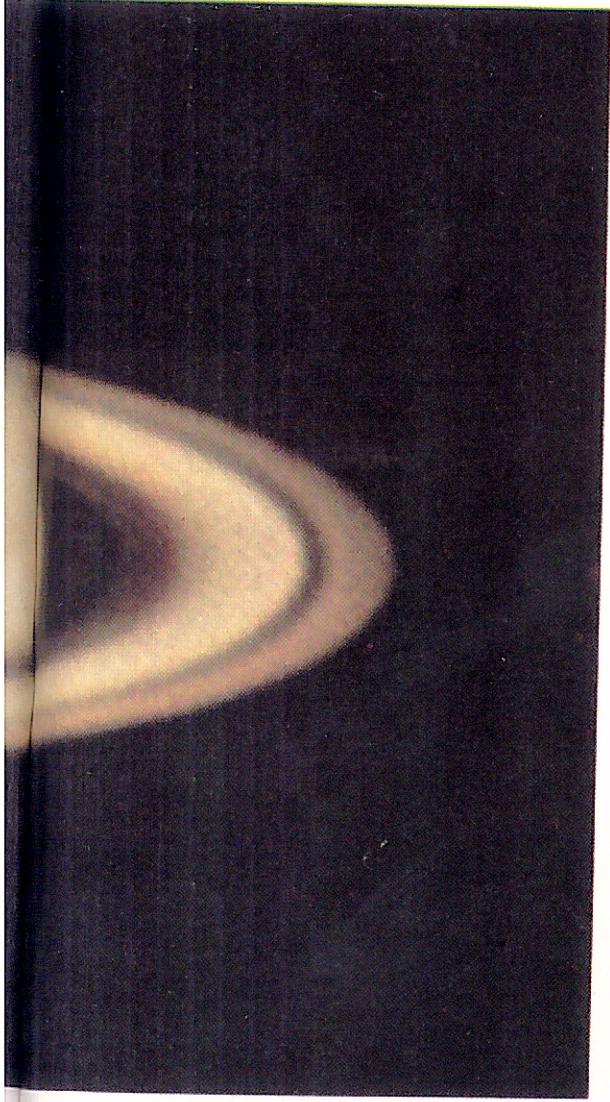
quiera sino de unos 50 millones de grados. Ello es debido a que para que la fusión se produzca los núcleos tienen que acercarse suficientemente y por tanto vencer la barrera impuesta por las fuerzas de repulsión eléctrica. En las bombas de hidrógeno este problema se resuelve haciendo explotar una bomba de fisión de baja potencia pero que produce los millones de grados suficientes para desencadenar la fusión. En las estrellas la enorme masa que poseen mantiene los núcleos a elevadísimas densidades con lo que la fusión no se detiene. Y ahí tenemos el mayor problema técnico para el dominio de la fusión, cómo mantener por un tiempo suficientemente largo elementos ligeros a millones de grados de temperatura, confinados en un pequeño espacio y hacer que esta reacción pueda realizarse de forma continua.

#### **EL PL**

Los tres estados de la materia son el sólido, el líquido y el gaseoso. El primero es el más común y el último el más raro. El segundo es el más raro. Estamos hablando de la materia que nos rodea. Cuando aumentamos la temperatura de un material, éste cambia de estado. Así, el agua se convierte en vapor cuando se calienta lo suficiente. Para producir la fusión nuclear se necesitan temperaturas muy altas que aumentan la energía de las partículas y ello da lugar a otro estado de la materia que conocemos por plasma.

Con el aumento de la temperatura se crean estados de la materia que implican una progresiva pérdida de electrones de los átomos o moléculas que forman la materia. A las altas temperaturas a que se refieren los mismos átomos





### EL PLASMA

Los tres estados de la materia son como mínimo cuatro. Estamos acostumbrados a ver que aumentando la temperatura se producen en los materiales cambios de estructura. Es típico el paso de sólido a líquido y de líquido a gas. Para producir la fusión nuclear tenemos que aumentar la temperatura muy por encima de las temperaturas usuales en nuestro planeta y ello da lugar a otro estado de la materia que conocemos por plasma.

Con el aumento de la temperatura se producen estados de la materia que corresponden a una progresiva pérdida de cohesión de los átomos o moléculas que la componen. A las altísimas temperaturas a que se produce el plasma son los mismos átomos los que pierden la

cohesión. En el estado de plasma los electrones y los núcleos se separan perdiéndose la estructura atómica. Ello le da unas propiedades características que pueden aprovecharse para realizar el dominio de la fusión. Por una parte el plasma posee propiedades eléctricas características ya que si bien es en conjunto eléctricamente neutro, es sensible a los campos magnéticos y es muy conductor de la corriente eléctrica. Esto se entiende considerando que se compone de partículas cargadas eléctricamente. En cuanto a su tendencia de ocupar el mayor espacio posible el plasma se comporta de forma semejante a los gases.

### EL COMBUSTIBLE

La fusión nuclear puede darse entre distintos tipos de elementos ligeros. Las más estudiadas entre las reacciones de fusión son las que hacen intervenir hidrógeno o sus isótopos. La reacción más interesante desde el punto de vista del combustible sería la de fusión entre núcleos de hidrógeno ligero ( $^1\text{H}$ ) del que en el mar tenemos reservas inagotables. Sin embar-

*Protuberancia solar. Con el aumento de la temperatura se produce una pérdida de cohesión de los átomos.*



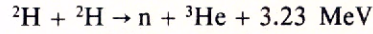


go esta reacción no es muy favorable porque es muy lenta y de baja probabilidad de forma que sólo ha podido ser observada en las estrellas.

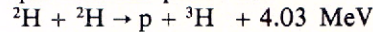
Para el control de la fusión nuclear se están estudiando sobre todo dos reacciones las cuales hacen intervenir los dos isótopos del hidrógeno, el deuterio ( $^2\text{H}$  ó  $\text{D}$ ) que se compone de un protón y un neutrón más. El deuterio se halla en la naturaleza en una proporción de 0,015% del hidrógeno pero como éste es tan abundante, por ejemplo como componente del agua, poseemos de él cantidades inagotables. El deuterio es estable y con el oxígeno forma la llamada agua pesada. El tritio en cambio no es un átomo estable, se descompone dando radiactividad  $\beta$  con una vida media de 12,2 años. Por esta razón no se encuentra en la naturaleza aunque se puede producir fácilmente a partir de litio e incluso pueden diseñarse

reactores que produzcan más tritio del que gastan.

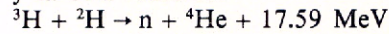
Las dos reacciones principales de fusión son:



que también puede dar:



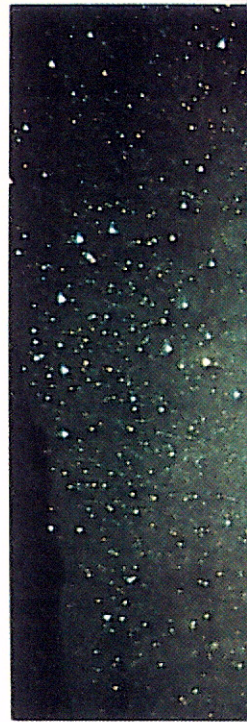
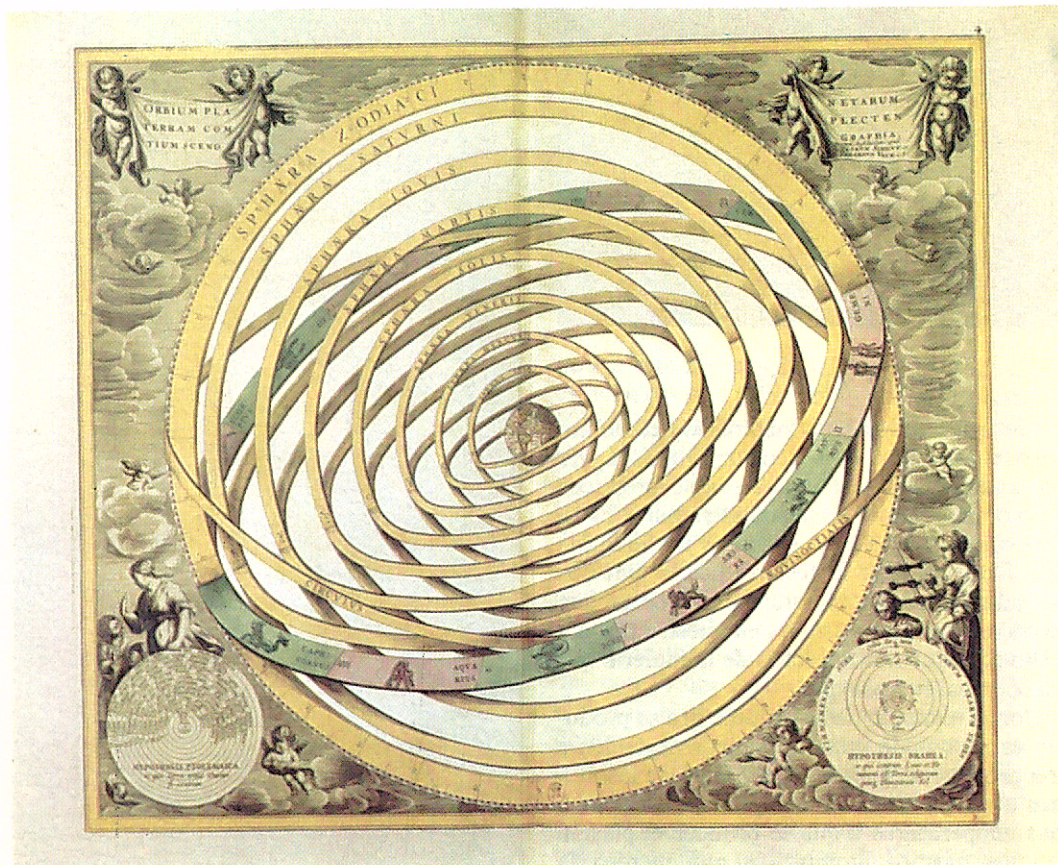
y la otra reacción:



La energía en estas reacciones se expresa en megaelectronvoltios (MeV) y puede verse que la más favorable es la última que es la que se está estudiando actualmente con mayor intensidad. Existe una tercera reacción de hidrógeno ligero y boro que tendría grandes ventajas sobre todo porque el combustible es mucho más abundante pero necesita de condiciones más extremas para que la reacción se dé.

En resumen el combustible previsible para las reacciones de fusión son los isótopos pesados del hidrógeno, deuterio y tritio. Del primero tenemos reservas importantes y no hay peligro de agotamiento, del segundo no tenemos pero puede producirse fácilmente y en los diseños de reactores nucleares de fusión se prevé la

*Detalle de una página del Atlas Catalán de Cresques. Carta del Cielo.*



*Nebulosa M 8 NGC 6523 rio.*

presencia de litio, el cual se puede utilizar para absorber la energía y producir más tritio. En principio la energía de los problemas de control son otros, y entre ellos

## LOS TOKAMAKS

El diseño de sistemas de fusión ha variado a lo largo de los tiempos tal como se ve en los secretos militares por lo que ha estado bajo un velo de misterio. La conclusión que no ha cambiado en tales investigaciones es que el público el diseño general de los experimentales. Entre ellos están los llamados tokamaks.

Los tokamaks son dispositivos que permiten a la mayoría de los reactores termonucleares responder a la necesidad de mantener una alta temperatura de plasma durante un lapso de tiempo suficiente. En los tokamaks esto se logra al dar al plasma la forma de un toro es una figura geométrica que se llama un anillo de sección





*Nebulosa M 8 NGC 6523 en la constelación de Sagitario.*

presencia de litio, el cual como veremos puede utilizarse para absorber la energía y para que produzca más tritio del que se gasta. Es decir, en principio la energía de fusión no tiene grandes problemas de combustible. Los problemas son otros, y entre ellos el diseño del reactor.

### **LOS TOKAMAKS**

El diseño de sistemas para dominar la energía de fusión ha variado mucho. En los primeros tiempos tal investigación fue considerada secreto militar por lo que estuvo envuelta en un velo de misterio. Hacia 1958 se llegó a la conclusión que no había utilidad bélica alguna en tales investigaciones y desde entonces es público el diseño general de los reactores experimentales. Entre ellos los más estudiados son los llamados tokamaks.

Los tokamaks son dispositivos que responden a la mayoría de criterios que debe ofrecer un reactor termonuclear. En primer lugar debe responder a la necesidad de tener un plasma a alta temperatura de suficiente densidad durante un lapso de tiempo suficientemente largo. En los tokamaks estos requerimientos se cumplen al dar al plasma una forma toroidal. Un toro es una figura geométrica que corresponde a un anillo de sección circular. En estas condi-

ciones el plasma genera un campo magnético por el hecho de que se comporta como una espira de corriente eléctrica. Este campo magnético tiende a conservar la forma toroidal. Además para estabilizar el conjunto se aplican campos magnéticos externos de forma que el plasma puede mantenerse de forma permanente confinado en un espacio eliminando la tendencia a expansionarse.

La misma corriente que pasa por el plasma proporciona la manera de producir altas temperaturas de la misma forma que nuestras resistencias eléctricas que utilizamos en las calefacciones eléctricas. Se ha calculado sin embargo que para alcanzar la temperatura necesaria para desencadenar la fusión serían necesarias corrientes de 10 a 15 megaamperios (un megaamperio es igual a un millón de amperios, recordemos que nuestros fusibles domésticos saltan cuando por ellos pasan 25 amperios por lo general). Por esta razón la calefacción eléctrica por sí sola no se utiliza para llegar a la temperatura de fusión, hace falta otro sistema que la desencadene. Se están estudiando diversos sistemas como la inyección de iones acelerados a muy alta energía, lo cual provocaría un aumento local de temperatura de forma súbita. También se estudia la inyección de chorros de electrones o de microondas, o la acción de los campos magnéticos exteriores que podrían provocar una compresión de material. Hay que pensar que



al mantenimiento de las altas temperaturas contribuye también en gran manera el alejamiento del plasma respecto de las paredes a través de las cuales puede escaparse energía con el consiguiente enfriamiento.

### RESISTENCIA Y SEGURIDAD

Sin embargo en los tokamaks se presentan grandes problemas para conseguir que tan altas temperaturas se mantengan por un tiempo suficientemente largo. Un importante pro-

blema lo plantean las impurezas del plasma, es decir, iones distintos de los isótopos del hidrógeno. Por una parte su presencia produce inestabilidad en el plasma, lo cual es una importante causa de enfriamiento de éste y por ello son necesarias corrientes más intensas. Por

Fotografía de la Luna tomada desde el Apolo XVII.



78 (1410)

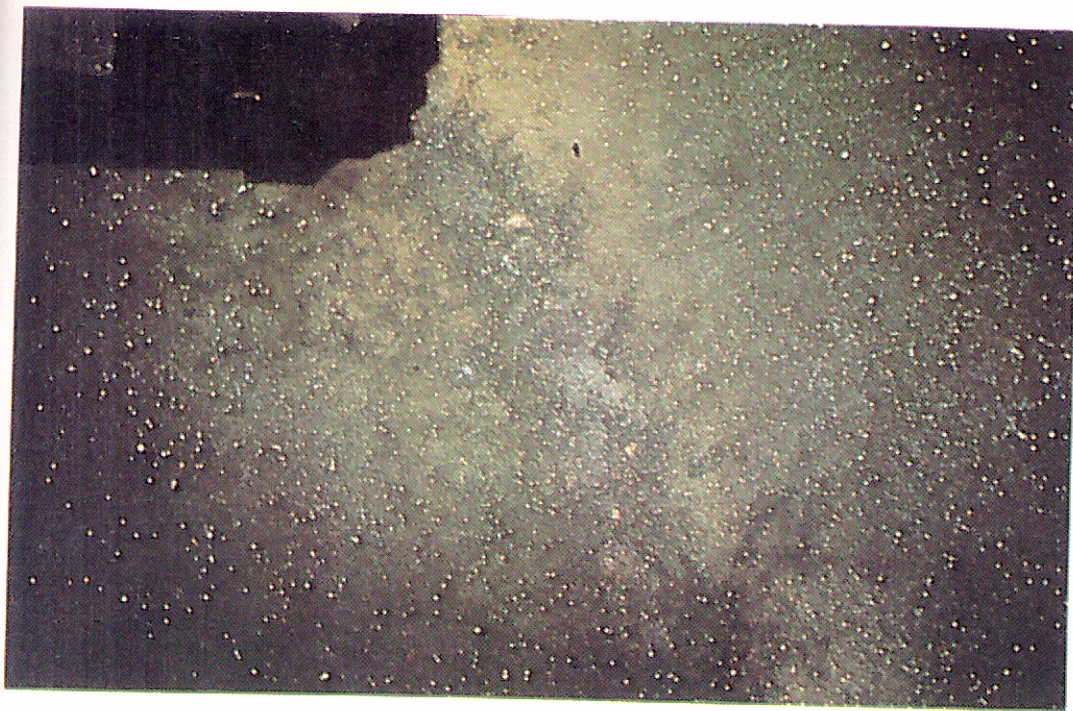


otra parte son ellas la problemas para la se,

En efecto, los reac en principio plantear seguridad que los rea debido a que en el pr producen elementos. En el caso de los reactores subproducto es el pl peligrosa que se con fusión los posibles pr los neutrones produc impurezas. Del prim nos ocuparemos más el tritio son problem subproductos de las impurezas pueden p radiaciones importar corrosión que pueden del reactor. Por ello como el vanadio o el propiedades hasta m ciertos tipos de acer

Estas cuestiones m cómo se va a apro fusión. En este proces la llevan los neutron char se ha pensado estar rodeado por una Este tiene la propieda





otra parte son ellas las que plantean mayores problemas para la seguridad.

En efecto, los reactores de fusión deberían en principio plantear menores problemas de seguridad que los reactores de fisión. Ello es debido a que en el proceso de la fusión no se producen elementos peligrosos como en el caso de los reactores de uranio en los que un subproducto es el plutonio, la sustancia más peligrosa que se conoce. En los reactores de fusión los posibles problemas pueden venir de los neutrones producidos, del tritio o de las impurezas. Del primero de estos problemas nos ocuparemos más tarde y tanto ellos como el tritio son problemas bien conocidos como subproductos de las reacciones de fisión. Las impurezas pueden producir otros tipos de radiaciones importantes, sobre todo por la corrosión que pueden producir en las paredes del reactor. Por ello se estudian materiales como el vanadio o el niobio que conservan sus propiedades hasta muy altas temperaturas o ciertos tipos de aceros inoxidables.

Estas cuestiones nos llevan también a la de cómo se va a aprovechar la energía de la fusión. En este proceso el 80% de la energía se la llevan los neutrones. Para poderla aprovechar se ha pensado en que el plasma podría estar rodeado por una corriente de litio líquido. Este tiene la propiedad de absorber los neutro-

---

*La Vía Láctea en Sagitario.*

---

nes y de que al hacerlo se produce tritio. De esta forma se eliminarían varios problemas a la vez, se recogería la energía, se absorberían los neutrones y se iría produciendo cada vez más combustible. En resumen los problemas de seguridad parecen ser menores en los reactores de fusión que en los actuales de fisión. Desde luego el problema del calentamiento de agua por las turbinas productoras de electricidad no está resuelto, pero es el común a todas las centrales de producción de energía eléctrica. Se estudian sistemas que produjeran electricidad por medios más directos, pero ello está aún muy atrasado.

### **LA FUSION POR LASER**

Los tokamaks continúan concentrando la mayor parte del interés por la fusión controlada. Sin embargo existe otra vía de investigación completamente distinta. Acerca de ella existen muchas incógnitas y ello es debido en parte a que esta investigación es todavía secreta en algunas naciones, lo cual ha provocado no pocas protestas. Sin embargo el principio es



conocido, se trata de aprovechar las propiedades de los láseres de gran potencia.

La idea de la fusión por láser es en cierto sentido inversa a la de los tokamaks. No se trata de conseguir la mínima temperatura necesaria para la fusión durante un tiempo relativamente largo sino de conseguir una temperatura enorme durante pequeñísimas fracciones de segundo. Para ello se concentra en un pequeño espacio la radiación de varios láseres de gran potencia de forma intermitente con lo que se consigue de forma periódica la enorme cantidad de energía capaz de desencadenar la fusión. Los láseres que se utilizan para ello producen luz en la región del infrarrojo y es su tecnología lo que se guarda más en secreto por sus posibles aplicaciones militares.

Uno de los problemas que plantea es cómo mantener el material confinado en el reducido espacio donde se concentra la energía de los láseres. Ello se consigue encerrando el combustible en pequeñas esferas donde la mezcla de deuterio y tritio está a gran presión. Además llevan un material que al incidir el láser en él explota con lo que comprime el combustible llegándose a las condiciones de fusión. De esta

forma se han conseguido ya energías mayores que las que aportan los láseres, lo cual no es poco si se tiene en cuenta las enormes potencias de éstos. En la actualidad se están desarrollando láseres de rayos x los cuales además podrán tener importantes aplicaciones en la investigación de estructuras de moléculas biológicas. Existen ya proyectos y diseños precisos de reactores de fusión por láseres de funcionamiento intermitente (unas cien explosiones por segundo) basados en las mismas reacciones que en los tokamaks, pero aún no existe ningún reactor en funcionamiento.

### ¿PARA MAÑANA O PARA PASADO MAÑANA?

No hay en el mundo todavía ningún reactor que utilice todavía la energía termonuclear ni siquiera a nivel experimental. Lo que sí se ha conseguido es obtener más energía de la que se gasta en algunas reacciones concretas y de forma momentánea, lo cual no es poco. Pero ¿Qué credibilidad debemos dar a la energía de fusión como fuente futura de energía? ¿A qué horizonte en el futuro podemos esperar el aprovechamiento de esta energía y con qué probabilidad podemos hacerlo? Estas son desde luego cuestiones cruciales para tratar de prever el futuro de nuestra civilización.

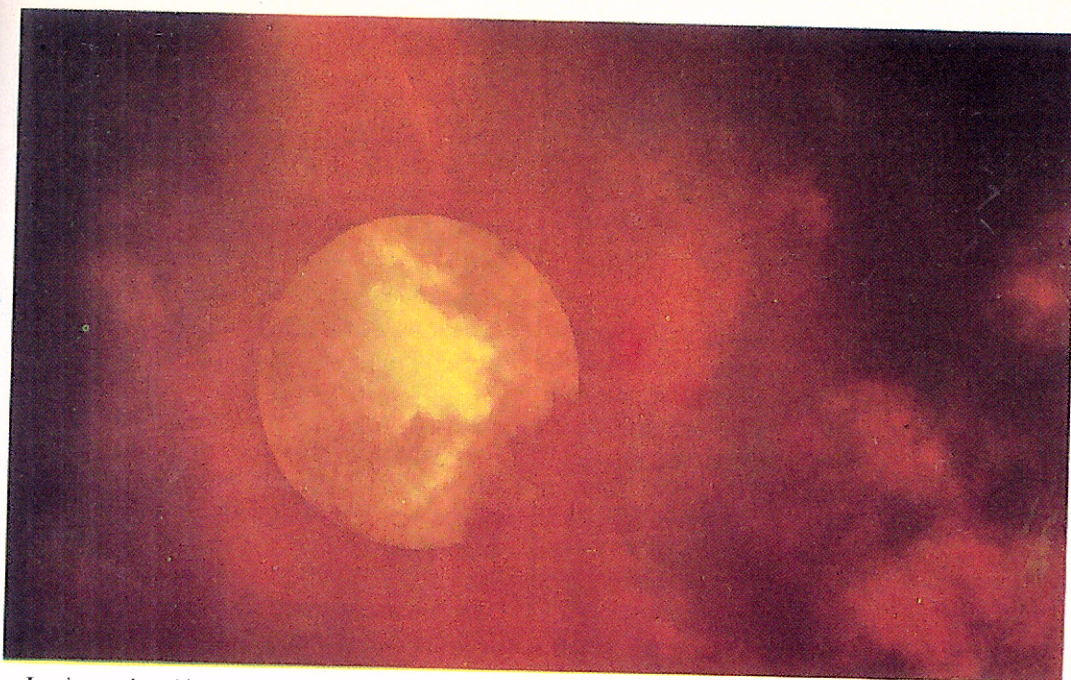
Gran Galaxia M.31 NGC 224 en la constelación de Andrómeda.



La investigación que el mundo corresponde a él en el tema. En los próximos se en marcha varios proyectos. Entre ellos hay construcción de tres grandes: los proyectos TFTR de T-20 de la Unión Sov (European Thorus) rea por Francia, Gran Bretal. De ellos el más ambig cuanto a envergadura d tendrá 5 metros de radio ha estado retrasado var entre los países particip de emplazamiento que h temente y que será la grandes tokamaks entr 1980 y 1983 aproximad espera por fin consigui controlada.

Por lo que se ha dicho rología auguran que la algo para el horizonte d que los problemas técn del plasma, de los méto acerca de los materiales parecen insolubles. Los están llevando a cabo condiciones de comprom exigencias en presencia. rrollo de reactores de fu ció esperanzas rápidas e parece estancada pero





*Una espectacular vista del sol tomada desde las Islas del Caribe.*

La investigación que se está llevando en el mundo corresponde a las esperanzas puestas en el tema. En los próximos años van a ponerse en marcha varios proyectos de gran envergadura. Entre ellos hay que destacar la construcción de tres grandes tokamaks. Son éstos los proyectos TFTR de los Estados Unidos, el T-20 de la Unión Soviética y el JET (Joint European Thorus) realizado conjuntamente por Francia, Gran Bretaña y Alemania Federal. De ellos el más ambicioso es el soviético en cuanto a envergadura del instrumento, ya que tendrá 5 metros de radio. El proyecto europeo ha estado retrasado varios años por disputas entre los países participantes acerca del lugar de emplazamiento que ha sido decidido recientemente y que será la Gran Bretaña. Estos grandes tokamaks entrarán en servicio entre 1980 y 1983 aproximadamente y con ellos se espera por fin conseguir reacciones de fusión controlada.

Por lo que se ha dicho los técnicos en futurología auguran que la fusión controlada es algo para el horizonte de 1990. Ello es así porque los problemas técnicos tanto de dominio del plasma, de los métodos de ignición como acerca de los materiales de construcción no parecen insolubles. Los experimentos que se están llevando a cabo deben permitir llegar a condiciones de compromiso entre las distintas exigencias en presencia. Paralelamente el desarrollo de reactores de fusión por láser que ofreció esperanzas rápidas en los primeros tiempos parece estancada pero con sus posibilidades

no agotadas. En los Estados Unidos se trabaja activamente en ello y se supone que igualmente en la Unión Soviética.

En cualquier caso si hacia 1990 se consigue el primer reactor experimental de fusión, el horizonte para su utilización industrial debe situarse hacia los comienzos del próximo siglo. ¿Será ello demasiado tarde para tomar el relevo de la energía fósil y de fisión? ¿Aparecerá algún problema técnico en los reactores de gran potencia que haga imposible su utilización comercial? Si bien la esperanza es razonable en el horizonte de los próximos veinte años esta esperanza no debe por una parte esconder los problemas técnicos que aún no están resueltos, y por otra que un reactor de fusión planteará los problemas de contaminación térmica típicos de toda central de producción de energía eléctrica. Hay que tener en cuenta, además, que la conservación de nuestras reservas de petróleo y carbón son importantes también en tanto que fuentes y materias primas de industrias variadísimas que van desde la farmacéutica a la de fibras artificiales. Por todo ello, si la energía de fusión nos da una esperanza real a medio plazo no evita que la conservación de nuestras reservas energéticas sea asunto urgente.

**Pere Puigdomènech**