



Figura 24. Partenón, modelo de proporciones áureas en la arquitectura.



Figura 26. La última cena, modelo de proporciones áureas en la pintura.

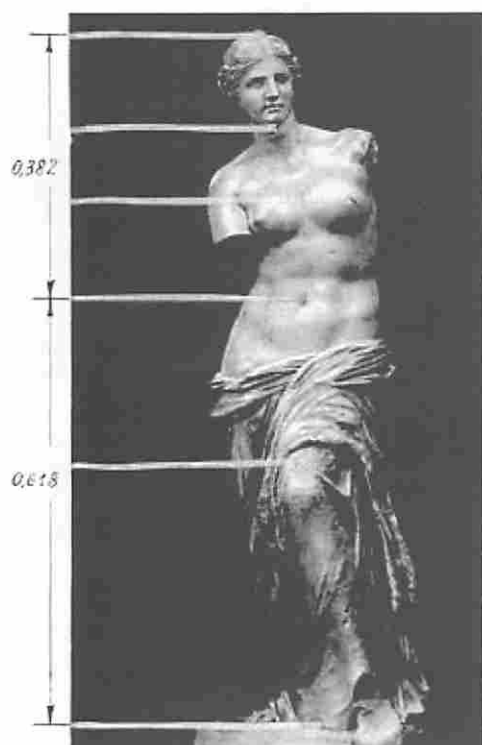


Figura 25. Venus, modelo de proporciones áureas en la escultura.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ghyka, M.: *Estética de las proporciones en la Naturaleza y en las Artes*. Ed. Poseidon (1983).
- Ghyka, M.: *El número de oro*. Ed. Poseidon (1968).
- Coxeter, H.: *Fundamentos de la Geometría*. Ed. Limusa (1971).
- Penrose, R.: *La nueva mente del emperador*. Ed. Biblioteca Mondadori (1991).
- Hawking, S.: *La historia del tiempo*. Ed. Círculo de Lectores (1988).
- Spivak: *Calculus*. Ed. Reverté (1970).
- Alonso, A. y Bermúdez, T.: "De conejos y números. La sorprendente sucesión de Fibonacci". *La Gaceta de la RSME*, Vol. 5, n.º 1, págs. 175-196 (2002).
- Pérez, R.: "Gaudí y la proporción". *La Gaceta de la RSME*, Vol. 5, n.º 3, págs. 540-558 (2002).
- <http://www.fenkefeng.org/essaysm18004.html>, *Museum of Harmony and Golden Section*.
- <http://goldennumber.net/goldsect.htm>, *Golden Section*.
- <http://goldennumber.net/index.html>, *Phi: Golden number*.
- <http://rt000z8y.eresmas.net/EN%20numero%20de%20oro.htm#1>, *Tres números con nombre*.
- <http://www.geocities.com/Athens/Acropolis/4329/aureo.htm>, *Rectángulo áureo*.
- Vídeo: *Donald en el país de las Matemáticas*.
- <http://www.mcs.surrey.ac.uk/Personal/R.Knott/Fibonacci/fib.html>, *Números de Fibonacci*.

Ignacio Garijo y José Leandro de María  
Dpto. de Matemáticas Fundamentales

## El carbón: ¿un material noble o innoble?<sup>1</sup>

Una de las imágenes que conservo de mi primer encuentro con el carbón es la de un camión del que unos hombres completamente tiznados de negro extraían serones, que luego transportaban hacia el sótano del edificio en donde mis padres vivían. La operación duraba casi

todo el día y la acera conservaba durante algún tiempo recuerdos de la descarga. Por supuesto, la prohibición de aproximarnos siquiera a aquellas piedras negras era absoluta.

Más asequible era el acceso a unos trozos de carbón de menor tamaño, que por alguna razón ancestral recibían el nombre de "cisco", destinados al brasero, con respecto a los cuales la prohibición revestía menos importancia, probablemente porque era más fácil de violar.

Algún tiempo –poco tiempo– después, en el colegio, en una asignatura que recibía el pomposo nombre de Formación del Espíritu Nacional, se nos habló por primera vez de la minería del carbón. No me cabe la menor duda de que para aquel profesor los mineros debían oler a azufre del averno, porque la imagen que recibíamos era terriblemente triste y con ciertas connotaciones malévolas.

Estas imágenes del carbón como algo deleznable, de lo que convenía mantenerse lejos, se conservaron durante largo tiempo en mi mente. Ni siquiera los primeros atisbos de

<sup>1</sup> Extracto de la conferencia pronunciada en el acto académico celebrado con motivo de la festividad de San Alberto Magno, 14 de noviembre de 2002.

formación científica recibidos en la enseñanza secundaria consiguieron disiparlas por completo. Ciertamente, el hecho de aprender que los diamantes están constituidos por carbono prácticamente puro debería haberlas mejorado. Pero en aquellos momentos resultaba casi increíble tal aseveración, sobre todo cuando se contraponía con el hecho de que también el grafito –mucho menos noble, más sucio y capaz de manchar el papel– era carbono puro... Y, finalmente, el poder contemplar en la mano (que siempre resultaba contaminada por el proceso) fragmentos de carbones naturales, completaba la imagen del carbón como algo intrínsecamente innoble y contribuía a hacer desconfiar de la ciencia.

Quiero dedicar en este momento un recuerdo cariñoso a aquel profesor de ciencias naturales, un sacerdote con tres licenciaturas en Química, Geología y Biología, a quien en aquellos momentos yo consideraba poco menos que un demiurgo capaz de afirmar sin ruborizarse que un fragmento de aspecto inequívocamente terroso era también un carbón, al que denominaba “turba”, lo que cerraba el ciclo con la ya mentada asignatura de Formación del Espíritu Nacional, en la que en alguna manera se asociaban momentos históricos de la minería con las “turbas”.

Si he querido comenzar con estas evocaciones es porque supongo que la mayoría de los lectores guarda recuerdos más o menos análogos (aunque, tal vez, reemplazando la Formación del Espíritu Nacional por la asignatura de Ciencias Sociales) que sustentan la imagen del carbón como un material innoble, vocablos que constituyen el pretexto para este pequeño artículo, basado en la conferencia que pronuncié en la Facultad de Ciencias en el día de nuestro patrón, San Alberto Magno.

Partimos, pues, de la imagen del carbón como material innoble. Un material innoble, cuya extracción es, además, (al menos en España) problemática, al tener que operar en

la mayoría de las cuencas carboníferas mediante técnicas de minería de profundidad que conllevan elevados costos materiales y humanos, lo que, a su vez, implica una notable tendencia a la reducción de la actividad en este sector.

Por ejemplo, refiriéndonos a Asturias, durante más de dos siglos esta región ha aportado entre el 50 y el 70% de toda la producción nacional de hulla, mientras que en 1905 se produjeron 1.900.000 toneladas con unos 35.000 mineros trabajando, a finales del año pasado (en el que, dicho sea de paso, Francia y Bélgica ya habían cerrado sus pozos y Alemania mantenía sólo los más productivos) ya sólo operaban en el sector de la minería asturiana del carbón unos 6.300 mineros, cifra que sigue disminuyendo a base de prejubilaciones.

Naturalmente, a la imagen del carbón como algo sucio y cuya extracción es, cuando menos, problemática, es preciso añadir las consecuencias medioambientales que su uso conlleva. Las antiguas centrales térmicas producían casi tanta contaminación como energía, con desastrosos efectos sobre el medio ambiente.

Los dos problemas principales de la combustión de carbón en centrales térmicas para la producción de energía son la emisión de contaminantes y el bajo rendimiento. Recordemos que en una central térmica convencional el carbón (u otro combustible) se quema en una caldera y el calor generado se utiliza para producir vapor que mueve una turbina sobre cuyo eje se sitúa un alternador responsable de la producción de electricidad. Una buena parte –la mayor parte– de la energía producida en el proceso se pierde, lo que determina que la eficiencia de una central convencional se sitúe, habitualmente, por debajo del 30%. Por otra parte, los gases procedentes de la combustión contienen productos altamente contaminantes. Y, finalmente, entre estos productos se encuentra el dióxido de carbono que, aunque alejado de la idea tradicional de producto contaminante, es

causante del llamado “efecto invernadero”, probablemente responsable del calentamiento global de la tierra.

Con todo lo dicho, parece muy difícil rebatir la imagen del carbón como material innoble: innoble en su extracción y manipulación e innoble en sus aplicaciones más frecuentes. En lo que sigue intentaré que, sin aburrir a los presentes, mejore algo la imagen que de este material se hayan formado.

Hablemos, en primer lugar, de las centrales térmicas. En realidad, en las de construcción más reciente algunos de los problemas enunciados se han visto considerablemente aliviados. Por una parte, al mejorar la tecnología del proceso de quemado: así, la combustión en lecho fluido (a veces se dice también fluidizado) consiste en quemar el carbón en un lecho de partículas inertes, fluidizado mediante una corriente de aire que hace que burbujee. Al mismo tiempo se inyecta caliza o dolomita (carbonato de calcio y magnesio) que se combinan con el azufre formando escorias que son retiradas con las cenizas, reduciendo así la emisión de dióxido de azufre. En ocasiones (“combustión en lecho fluido circulante”) las partículas son transportadas a cambiadores de calor donde se enfrían y vuelven a la cámara de combustión para mezclarse de nuevo con el carbón.

Una moderna y eficaz vía alternativa supone gasificar el carbón como etapa previa a la combustión total. El proceso consiste en su alimentación a un reactor a presión donde se produce la gasificación con oxígeno de alta pureza (85%) y vapor de agua. Se produce así una combustión incompleta a temperatura suficiente (1500°C-1600°C) para conseguir la fusión de las cenizas originales del carbón (que se transforman en su mayoría en escoria vitrificada inerte). La adición de caliza como fundente reduce la temperatura de fusión y favorece la fluidificación de la escoria, al tiempo que reduce la emisión de contaminantes.

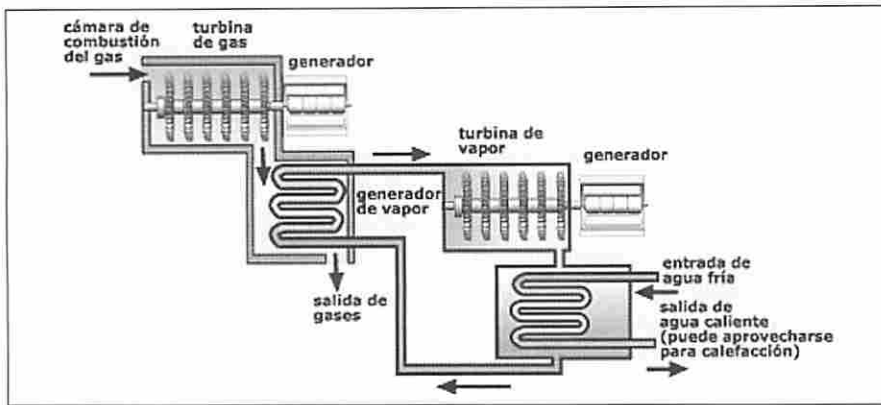


Figura 1. Central de ciclo combinado.

La eficiencia del proceso de gasificación se mide por el grado de utilización del combustible (que puede llegar al 95%) y la conversión del poder calorífico del combustible en energía química del gas (conversión que puede alcanzar el 75%).

Por último, otra vía muy utilizada en la actualidad para la mejora de la eficiencia de las centrales térmicas es la que resulta de las denominadas instalaciones de ciclo combinado. En la Figura 1 se presenta un esquema muy simplificado de una central de este tipo. En ellas la energía es producida en dos ciclos diferentes: en el primero de ellos (en la parte superior de la figura) son los gases de combustión a alta presión los que mueven una turbina. Estos gases, que salen calientes del escape de la turbina, se utilizan en un segundo ciclo (representado en la parte inferior) para producir vapor que, a su vez, mueve una segunda turbina. Con estos sistemas se llegan a alcanzar eficiencias hasta del 53% que prácticamente duplican a la de las centrales térmicas convencionales, y con niveles de emisión de contaminantes mucho menores.

Indudablemente, subsiste el problema de las emisiones de dióxido de carbono, causante del efecto invernadero. No obstante, tampoco podemos olvidar que la utilización de las energías renovables competitivas produce, en mayor o menor medida, contaminaciones alternativas... ¿quién no ha sentido desazón al contemplar un paisaje poblado de generadores eólicos, casi de ciencia

ficción? Sin duda es una imagen contaminante. Todo ello sin mencionar los efectos adversos que tales centrales producen en el ecosistema y las aves del entorno, las interferencias electromagnéticas y los perniciosos efectos sónicos. Molinos son, a fin de cuentas, y contra ellos arremetería nuestro buen hidalgo.

Espero que lo expuesto hasta el momento haya podido mejorar algo la imagen sobre el empleo del carbón como fuente de energía. No obstante, estando en mi ánimo alcanzar la conclusión de que el carbón debe ser considerado como un material noble, séame permitido citar otras aplicaciones de este material que trascienden de su uso como combustible. Por supuesto, prescindiré –por obvias– de las referencias al uso industrial y estético de los diamantes.

Quiero, en primer lugar, referirme a los llamados carbones activos. Y ello, por dos razones: una por el enorme interés aplicado de estos materiales. La segunda, mucho más entrañable, por el hecho de que uno de los pioneros en los trabajos sobre preparación y caracterización de estos carbones en España y creador de escuela sobre los mismos, ha sido el que fue Catedrático de la Facultad de Ciencias y Profesor Emérito de la UNED, Dr. D. Juan de Dios López González, a quien quiero con estas palabras rendir un merecidísimo homenaje.

Los carbones activos son materiales obtenidos mediante una gasificación parcial de un carbón pre-

viamente preparado o mediante la obtención directa por combustión limitada de un precursor, tal como un residuo vegetal u otros materiales orgánicos de desecho. Son bien conocidos los ejemplos de la cáscara de coco, el hueso de aceituna o la pulpa residual del procesado de la manzana en la industria de la sidra.

El sólido remanente contiene un gran número de cavidades, allí donde la fase gaseosa se ha generado, lo que implica el desarrollo de una textura porosa muy evolucionada. No son infrecuentes áreas superficiales del orden de los 1000 metros cuadrados por gramo. Ello determina un sinnúmero de aplicaciones como adsorbentes, en ocasiones de muy alta selectividad, como catalizadores (por la facilidad con que es posible funcionalizar esa superficie) y como soportes de catalizadores, aportando una importante fortaleza estructural a la especie catalíticamente activa que se ha depositado previamente sobre su superficie. Sería absurdo (por lo prolijo) enumerar las aplicaciones de los carbones activos de las que muchas, por otra parte, están en la mente de todos. Por ello, me referiré a continuación a otras aplicaciones del carbón.

Una de las más notables es la posibilidad de preparar materiales carbonosos en fibras, habitualmente a partir de precursores que son polímeros orgánicos, como el poliacrilonitrilo, del que por tratamientos térmicos es posible la obtención de fibras. No se conoce con absoluta precisión el proceso, pero una buena aproximación al mismo es la que describiré a continuación:

Según se muestra en la Figura 2, al comenzar a calentar este polímero a partir de las unidades ciano se forman ciclos. Si volvemos a calentar el producto a mayor temperatura los ciclos se aromatizan originando un polímero constituido por anillos de piridina condensados.

A continuación, calentamos de nuevo entre 400°C y 600°C provocando la fusión de cadenas, según se muestra y, finalmente, entre 600°C y 1300°C originando “bandas” o “cintas” polímeras que contendrán sólo



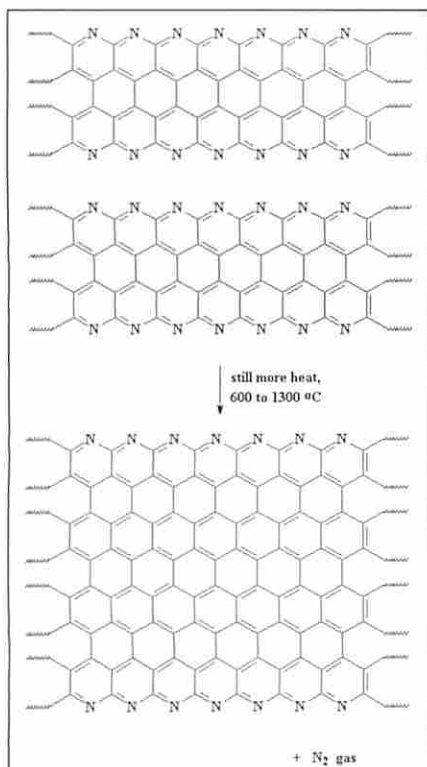


Figura 2. Fibras de carbón.

átomos de nitrógeno en sus bordes, estando constituidas por carbono casi puro en forma de grafito. De esta manera habremos obtenido fibras de carbón.

A partir de estas fibras de carbón, por combinación con otros materiales, es posible la preparación de los llamados "materiales compuestos", presentes en una gran mayoría de objetos con los que estamos muy familiarizados, combinando ligereza de peso con excelentes propiedades mecánicas: desde carrocerías de automóviles y carenajes de motos de competición hasta pértigas de atletas y raquetas de tenis, pasando por prótesis capaces de reemplazar válvulas cardíacas, piezas del oído medio, huesos del esqueleto o cartílagos deteriorados.

¿Más aspectos "nobles" del carbón? Imaginemos por un momento que una de esas "cintas" cuya obtención a partir de poliacrilonitrilo describíamos hace un momento, se enrollase sobre sí misma hasta hacer fusionarse sus bordes, formando así un cilindro. Es evidente que si la "cinta" es suficientemente ancha la distorsión que este proceso

introduce en los ángulos de enlace sería perfectamente soportable por el material.

Pues bien, acabamos de obtener lo que se suele conocer como un "nanotubo" de carbón, como se muestra en la Figura 3. Y más allá de lo que como curiosidad pueda tener esta disposición, la importancia aplicada de los nanotubos es cada vez mayor. Por ejemplo, se ha comprobado que los nanotubos almacenan hidrógeno, aunque todavía no se sabe bien cómo. Cuando se depositan nanotubos en el interior de una cámara y se deja entrar en ella hidrógeno a presión, al evacuarlo posteriormente, la cantidad de gas recogida ha disminuido considerablemente. El hidrógeno ha quedado atrapado en el nanotubo, que se ha comportado como si fuese una esponja. Sin embargo, todavía no se conoce bien cómo se almacena el hidrógeno ni la cantidad de hidrógeno que puede almacenar un nanotubo.

Los nanotubos también se apuntan como futuros protagonistas de la electrónica. Ya se han obtenido transistores que funcionan con menor intensidad de corriente que los con-

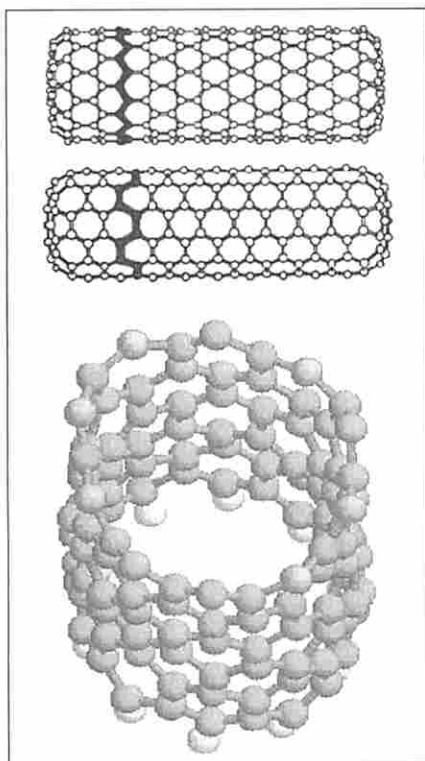


Figura 3. Nanotubos.

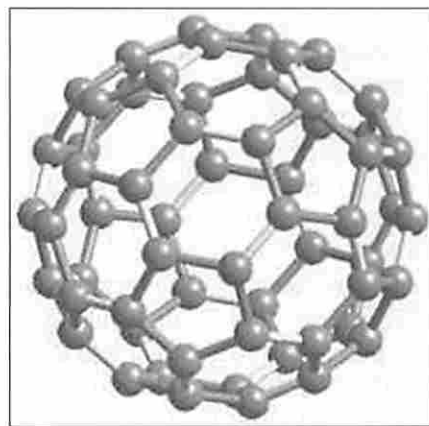


Figura 4. Fullerenos.

vencionales. El reto es conseguir ahora que varios transistores funcionen conjuntamente. El desarrollo de estos sistemas a gran escala para su uso comercial aún queda lejano, pero se trabaja muy activamente en ellos.

¿Qué ocurriría si quisiésemos ahora aproximar entre sí los extremos de un nanotubo cilíndrico de tamaño adecuado para formar una esfera? Evidentemente este proceso requeriría una distorsión extrema de los ángulos de enlace y la formación de tal esfera no sería posible.

Un arquitecto norteamericano, Buckminster Fuller se planteó un problema similar para la construcción de cúpulas semiesféricas o esféricas y observó que tal geometría era fácilmente alcanzable si se reemplazaban parcialmente hexágonos de la estructura por pentágonos. Un paradigma de estas cúpulas puede admirarse en Disney World.

Pues bien (nihil novo sub sole, según el aforismo clásico), la naturaleza ya se había encargado de anticiparse a las construcciones de Fuller diseñando moléculas constituidas por 60 átomos de carbono agrupados en 12 pentágonos y 20 hexágonos con una geometría análoga a un balón de fútbol, tal como se muestra en la Figura 4. El descubrimiento y la síntesis en el laboratorio de estas moléculas, denominadas genéricamente "fullerenos", les valió a los investigadores Curl, Kroto y Smalley la concesión del Premio Nobel en 1996. El fullereno debe ser uno de los contadísimos

casos de especie química que ha merecido figurar en un sello de correos.

Son numerosas las aplicaciones que se prevén para los fullerenos. Entre ellas cabría reseñar su utilización en baterías recargables, teniendo en cuenta la facilidad con que se reducen y la reversibilidad del proceso; su uso como lubricantes, por su forma esférica y la debilidad de las fuerzas intermoleculares; y, particularmente, el empleo como superconductores de alta temperatura crítica de fullerenos dopados con metales alcalinos o, incluso, la utilización de estas singulares moléculas como "balas mágicas", transportando fármacos previamente encapsulados en su interior hasta destinos específicamente seleccionados en el organismo.

Finalmente, ¿qué ocurriría si en vez de introducir en la estructura del grafito anillos de cinco átomos se hubiesen introducido anillos de siete u ocho? La estructura generada sería nuevamente una estructura curvada pero ahora con lo que se

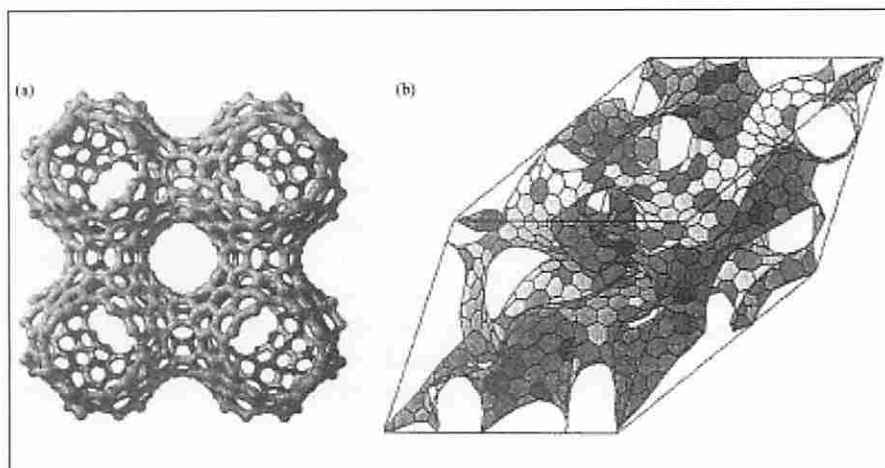


Figura 5. Schwarzita.

denomina "curvatura negativa", sin posibilidad de cerrarse sobre sí misma. Así se origina la denominada estructura tipo schwartzita, que adoptan los llamados carbones nanoporosos o carbones esponjosos, como el que se presenta en la Figura 5, cuya química se está desarrollando en la actualidad. La selectividad que estos materiales han demostrado en la separación de gases es asombrosa: 30:1 en la sepa-

ración de  $O_2/N_2$ , 178:1 en la de  $He/N_2$  y 333:1 en la de  $H_2/N_2$ .

Espero que la somera descripción que de estos sistemas he realizado haya podido, por poco que sea, contribuir a ennoblecer la imagen del carbón. Si así es, grande será mi satisfacción.

**Antonio Jerez Méndez**  
Dpto. de Química Inorgánica  
y Química Técnica

## NOVEDADES CIENTÍFICAS

### Novedades científicas en Física en el año 2002

#### ASTROFÍSICA Y COSMOLOGÍA

- En el año 2000 los experimentos *Boomerang* y *Maxima*, a bordo de globos aerostáticos, realizaron la medida más aproximada hasta entonces de la anisotropía de la radiación cósmica de fondo. Sus resultados eran compatibles con las predicciones del modelo estándar con un universo plano. (Ver 100cias@uned n.º 4, pp. 52-56). No obstante, la resolución angular de tales experimentos sólo era de 10-15 minutos, por lo que no permitían discriminar patrones de tamaño menor. Dos años después, dos nuevos experimentos, *Cosmic Background Imager* (CBI) y *Very Small Array* (VSA), han realizado

medidas mucho más precisas de la anisotropía de la radiación. El VSA utiliza 14 antenas de 14 cm de diámetro situadas a 2.000 m de altura en Tenerife. El CBI utiliza un telescopio de interferencia compuesto por 13 antenas de 90 cm de diámetro y con una separación máxima de 5,5 metros, situado a 5000 metros de altura en el desierto de Atacama (Chile). Con ello se consigue una resolución angular de 4 minutos de arco. Esta resolución ha permitido detectar pequeños puntos calientes que constituyen las semillas de los actuales cúmulos de galaxias. Por otra parte, los resultados anteriores han sido básicamente confirmados. La densidad de materia-energía es aproximadamente igual a la crítica

(universo plano) pero la densidad de materia solo da cuenta de aproximadamente 1/3 de este valor crítico (aunque las nuevas medidas dejan más espacio para la materia no bariónica). Los otros 2/3 de la densidad crítica deben corresponder a la energía de vacío.

- Como es bien sabido, la radiación cósmica de fondo es el residuo que quedó cuando el plasma que constituía el universo se hizo neutro y transparente. Inmediatamente antes de que esto ocurriera las interacciones electrón-fotón dieron una pequeña polarización a la radiación, que también varía de un punto a otro del cielo. Esta polarización ha sido medida por el experimento DASI (*Degree Angular Scale Interferometer*) instalado en el Polo Sur.

- En el número anterior de 100cias@uned (ver 100cias@uned,