

## Urania y Euterpe

### Discurso de ingreso en la Academia de Ciencias Matemáticas, Físico-Químicas y Naturales de Granada.

Eduardo Battaner López

Mi trayectoria científica se ha ido acercando progresivamente, unas veces a saltos, otras continuamente, al objetivo soñado de mis años mozos: la Cosmología. En este tránsito, unos me habéis ayudado a ver el Cosmos como un gran sistema termodinámico fuera del equilibrio; otros, me recordáis, incluso con solo vuestra presencia, que el Universo es sólo accesible, prácticamente, mediante procedimientos ópticos de observación; el Universo se ve, pero no se toca. Otros, como buenos cristalógrafos, me habéis enseñado a desconfiar del Principio de Isotropía del Universo. Insensiblemente, la compañía de muchos de vosotros ha influido en el modelado de mi piedra dura. Con conversaciones con vosotros, aquí y allá, ahora y entonces, algo ha fluido, gota a gota, hacia mi forma de entender la ciencia, a pesar de la costra impermeable que la reviste.

Permitidme que os hable de algunas ideas que han acabado por instalarse en mí. He sobrevolado por el Cosmos cabalgando, como un brujo, en la flecha del vector campo magnético.

El magnetismo fue admitido en sociedad, como una magnitud física más, ya antes del siglo XIX. Pero su influencia en los medios interestelar e intergaláctico fue ignorada por una corriente astrofísica que mi colega Sofue llamó "pangravitacionalismo". El carácter no lineal de la Magnetohidrodinámica introduce una complejidad matemática asociada a una complejidad real, en un medio ya esencialmente turbulento, que convierte al campo magnético en un efecto ignorado por complejo, aunque en realidad, los simples cálculos de orden de magnitud nos están diciendo que no puede serlo. Se calculaba, hace no mucho más de diez años, el campo magnético como una magnitud pasiva; importante, sí, porque nos proporciona un modo adicional de observación del Cosmos, gracias a la radiación sincrotrón. Más recientemente, empezó a reconocerse la importancia dinámica del magnetismo como creador de movimiento, de complejidad –y por tanto de belleza- en el Universo. Muchos subsistemas astrofísicos no pueden entenderse sin su participación activa. Un ejemplo puede ser el caso que nos ocupa: la música del Universo.

El medio interestelar no está vacío. Hay un gas con una densidad ciertamente muy baja, comparada con las típicas terrestres. En la vecindad solar esta densidad es de poco más de  $0,1 \text{ átomos/cm}^3$ , es decir, de unos  $10^{-24} \text{ g/cm}^3$ . Por tanto, el medio interestelar es capaz de propagar ondas consistentes en sucesivas zonas de sobredensidad e infradensidad, es decir, ondas de sonido. A estas ondas se las llaman de Jeans, pues no son exactamente sonido. Con respecto a éste tienen una gran diferencia. En algunas ocasiones, la compresión debida al paso de la onda puede conducir al colapso gravitatorio. Esto ocurre cuando la masa contenida en una media longitud de onda de Jeans supera a la llamada masa de Jeans. En la vecindad solar ésta es de unas  $10^3$  masas solares, formando cúmulos abiertos de formación estelar reciente. Un ejemplo son las hermosas Pléyades, llamadas también popularmente las Cabrillas.

Así pues, unas ondas muy similares al sonido, van dejando a su paso un reguero de estrellas recién nacidas, muchas de ellas grandes y efímeras, y por tanto luminosas y azules, que hacen llamativas las regiones de formación estelar. No podemos los hombres "oír" estas ondas, no podemos "oír" esta música celestial generadora de estrellas. Por ejemplo, su período es muy superior a la vida de un hombre, además de otras limitaciones de nuestros humanos

minúsculos oídos. Pero sí podemos “ver” este sonido. Con nuestros radiotelescopios podemos observar las zonas de mayor y menor densidad de gas, pues su longitud de onda es del orden de 30 años-luz. Y con nuestros telescopios en visible podemos observar las zonas de formación estelar reciente. La verdad es que no observamos tal fenómeno ondulatorio. No es de extrañar. En un bar con tertulianos vociferantes, si nos fuera dado observar el sonido con un potente microscopio, éste estaría formado por la superposición de tantas ondas, que no podríamos reconocer una onda sinusoidal simple. La comparación es apropiada pues, más que de música celestial, podríamos hablar, en el caso de la formación estelar, de ruido de Jeans.

Pero no vamos a hablar de las ondas acústicas en el medio interestelar, ruido que caracteriza el Universo actual. Vamos a hablar del Universo en época muy temprana, de una edad de unos 400000 años después del Big-Bang. En el Universo primitivo sí puede hablarse de una armonía acústica sorprendente, como vamos a ver. Tampoco podemos “oír” el sonido del Universo primitivo pues su período, al igual que la edad del Universo entonces, era de unos 400000 años. Pero podemos “verlo”. Los astrofísicos tenemos la suerte de poder observar el pasado, simplemente mirando lejos. Observamos lejanos cuásares con un desplazamiento al rojo de 5. Incluso, gracias a un efecto de lente gravitatoria, hemos llegado a ver una galaxia con un desplazamiento al rojo de 10. Pero todo esto puede considerarse como el Universo presente, aproximadamente.

Más allá ya no vemos nada, en un amplio rango de desplazamientos al rojo, hasta llegar a  $z = 1000$ . (Se denomina  $z$  al desplazamiento al rojo). Entonces observamos lo que realmente podemos llamar Universo primitivo. Podemos observar el CMB, la Radiación de Fondo Cósmico de Microondas (Permitidme que no traduzca las siglas). Vamos a hablar del CMB, ese elemento del Universo de radiación que convive con el nuestro material, compartiendo nuestro espacio, ignorándose ambos mutuamente, a falta de contacto térmico.

¿Qué es el CMB? Se observa, en torno a 100 GHz, un cuerpo negro casi perfectamente isótropo, a unos 2,7 K, como es sabido. Su isotropía directamente nos previene de su interés cosmológico. ¿Cómo era entonces el Universo, cuando se emitió el CMB?. Sus propiedades físicas son extraordinarias, comparadas con las del Universo actual, 1000 veces más grande. Su densidad era mil millones de veces la densidad actual. Su temperatura era de unas 1000 veces mayor, su campo magnético de 10000 veces el actual. ¡Qué física tan exótica no habrá que esperar para aquel Universo de entonces!.

Pues no es tan exótica. Suponiendo que la densidad de bariones sea hoy el 4% de la densidad crítica del Universo, esa densidad entonces sería del orden de 10 átomos  $\text{cm}^{-3}$ , su temperatura sería de 3000 K y su campo magnético de  $10^{-3}$  gauss. Estas no son condiciones muy diferentes a las reinantes en la ionosfera terrestre, en sus regiones más altas. Estamos en la ionosfera. Para mi experiencia personal esto ha sido providencial, pues mis primeros pasos en la investigación fueron aquí mismo, en la ionosfera., donde me crié. Cuando nos asomamos a esa ventana en el tiempo que es el CMB, vemos algo parecido a lo que observan algunos cohetes de sondeo hollando la ionosfera.

El CMB es muy isótropo, pero no lo es cuando se mide con precisiones superiores a 1/100000, es decir, cuando medimos la temperatura, del cuerpo negro que es, con un error inferior a  $3 \times 10^{-5}$  K. Entonces apreciamos anisotropías de mayor y menor tamaño y de mayor y menor intensidad. A pesar de lo exiguo, estas anisotropías son de especial importancia. “Andando el tiempo” estas anisotropías dieron lugar a galaxias, a cúmulos de galaxias, a supercúmulos y a la estructura a gran escala del Universo. Gracias a estas pequeñísimas separaciones del equilibrio y de la homogeneidad, estamos aquí para contarlos. Pero no podemos ver en el CMB la región del Universo presente que está “aquí” y no a más de diez mil millones de años-luz, que es lo que vemos en el CMB. Lo que sí es esperable es que lo que vemos sea estadísticamente igual a la región del Universo de “aquí” y de “entonces”.

Las anisotropías nos interesan en sí mismas pero, en especial, nos interesan estadísticamente. Y nos interesa, en especial, su espectro. De igual forma que una onda sonora puede ser descompuesta en un desarrollo de Fourier para obtener su espectro, podemos obtener el espectro de anisotropías del CMB. Ahora no tenemos una secuencia temporal de datos, sino que tenemos una distribución en la superficie celeste. La obtención del espectro se denomina

entonces descomposición en armónicos esféricos, pero su significado es similar a la descomposición de Fourier.

Pues bien: el espectro de anisotropías del CMB ha resultado ser el más interesante, sorprendente y hermoso de todos los resultados recientes de la Cosmología observacional. El sonido puede ser ruido, con un espectro continuo, como el de una moto, o puede ser armonioso, con una frecuencia pura acompañada de sus armónicos, como el de una soprano. El Fondo Cósmico de Microondas es de este segundo tipo. Es armonioso, con un "multipolo" fundamental y dos o tres o cuatro armónicos bien definidos. Es un espectro de "líneas" que se superponen a un continuo. Esto sí que es música celestial.

Podemos asistir a este gran concierto del Universo primitivo. Nos imaginamos que será un sonido muy intenso, el sonido de todo el Universo.... No tal; unos 90 decibelios; potente pero no doloroso. La "nota" fundamental sería de unos  $10^{-13}$  Hz; esto sí que es inaudible. Pero podríamos imaginar un concierto de "juguete", reduciendo mentalmente su período, pasando de 400000 años a 4 segundos. Oiríamos entonces al bajo, al tenor, a la contralto, dar sus notas en perfecta consonancia. La voz de la soprano se iría extinguiendo a lo largo de los 4 segundos: los multipolos altos sufren amortiguamiento. Pero esto haría aún más variado la música coral del Universo. ¡Si Pitágoras y Kepler levantaran la cabeza...!

Pero además, de igual forma que el timbre nos permite reconocer el instrumento musical tañido, la posición y la intensidad de los armónicos multipolares nos permite conocer la composición del Universo y podemos saber las proporciones exactas de bariones, materia oscura y energía oscura. Vivimos en un universo en el que más del 70% es energía oscura, una energía del vacío que hasta hace unos años se desconocía. O quizá sí se conocía; puesto que su concepción estaba en la papelera de Einstein, quien la desechó porque le llevaba a la "absurda" conclusión de que el Universo estaba en expansión. Einstein: hasta cuando se equivocaba era genial. Hasta cuando se equivocaba tenía razón.

Ciertamente, nos volvemos a encontrar con Einstein. Sus ideas, tenidas tras su muerte por especulaciones interesantes pero inservibles, pues solo conducían a pequeñísimas correcciones, hoy son el fundamento de la Cosmología, de la ciencia del Universo como un todo. Einstein, admirado pero incomprendido, con su pretensión onírica de la gran unificación de las fuerzas de la naturaleza, pretensión entonces desdeñada, hoy buscada afanosamente, vuelve a estar entre nosotros en la celebración del 100 aniversario de su "annus mirabilis", 1905. Recordemos al irónico austriaco Pauli comentando la unificación pretendida por Einstein: *Lo que Dios ha separado que no lo una el hombre.*

Pero volvamos al espectro de anisotropías del CMB. "Oímos" el espectro y de ahí deducimos la composición del Universo. No lo hacemos por comparación y experiencia, como cuando identificamos un instrumento por su sonido. No podemos comparar con nada pues solo tenemos un Universo. Pero en cambio, tenemos la teoría, que nos permite compensar la falta de experiencia.

Esto tiene, sin embargo, su peligro. Decimos: si estos son los datos y esta es la física, así es el Universo. Los datos son los datos. Pero la física empleada está sometida a algo completamente humano: las hipótesis. ¿Y si el escenario físico fuera otro?; ¿Y si, por ejemplo, hubiéramos despreciado una fuerza no despreciable?. Entonces, con los mismos datos, la interpretación sería otra. El Universo podría ser de otra manera.

En este sentido, resulta inquietante ver cómo algunos audaces cosmólogos aseguran con aplomo que conocen "exactamente" cómo es el Universo, caracterizándolo con siete parámetros libres que determinan con una precisión inferior al 1%. No hace ni 10 años que no se admitía la existencia de la energía oscura, que hoy se considera el constituyente fundamental del Universo, y también se pretendía conocerlo con precisión parecida. Transmito mi modesta opinión de que, aunque los avances en Cosmología han sido admirables, podemos estar aún muy lejos del final. Estamos, se dice, y es verdad, en la era de la Cosmología de precisión, pero no en la de la Cosmología de precaución.

Medidas admirables fueron, en efecto, las de las misiones espaciales COBE y WMAP, así como otras realizadas en tierra o a bordo de globos de sondeo. Son de reconocer, entre otros realizados "aquí abajo", el llamado "Experimento de Tenerife" y el más reciente VSA, ambos realizados por un equipo internacional, pero en Tenerife, habiendo salido dos de sus más destacados investigadores de las aulas de la Universidad de Granada: Rafael Rebolo y José Alberto Rubiño.

El magnetismo pudiera haber sido eliminado prematuramente del escenario físico con que analizar las medidas. El magnetismo está presente en todos los subsistemas astrofísicos: el Sol, el medio interplanetario, las atmósferas planetarias y estelares, los medios interestelar e intergaláctico, etc. ¿Por qué no habría de estar presente en el medio pregaláctico, al menos en el período anterior a la Recombinación, cuando el Universo estaba completamente ionizado? No se ha observado campo magnético en la Radiación de Fondo, pero es posible que pueda medirse con la sensibilidad que tendrá la misión espacial PLANCK de la Agencia Espacial Europea, como pronto vamos a considerar. En todos estos subsistemas el magnetismo se caracteriza por crear estructuras filamentosas del plasma.

Mientras que en todos los subsistemas astrofísicos enunciados la Magnetohidrodinámica Clásica proporciona una descripción suficientemente correcta, en aquella época del CMB el tratamiento matemático a utilizar es el de la Relatividad General. La Magnetohidrodinámica Relativista constituye una aplicación interesante e inesperada de la Relatividad General, en modo alguno previsto por Einstein, lo que ocurre frecuentemente con teorías generales y por ende fecundas: sirven para mucho más de aquello para lo que fueron concebidas.

El campo magnético tiene su tensor energía-momento y como tal debe ser introducido en las Ecuaciones del Campo de Einstein. Y por tanto, el campo magnético crea curvatura del espacio-tiempo. La idea es simple aunque su interpretación es algo paradójica en términos clásicos: en realidad estamos hablando de la gravitación creada por el magnetismo. Quizá, la diferencia resaltable con respecto a otras fuentes de curvatura es que el magnetismo tiene una acción anisótropa, puesto que su tensor energía-impulso, como función del tensor de Faraday muestra bien su carácter anisótropo.

Si se acepta el Principio Cosmológico de Homogeneidad e Isotropía de las propiedades termodinámicas y de curvatura en el Universo, hemos de aceptar que no existe un campo magnético homogéneo del Universo, puesto que sería una fuente de anisotropía. Khalatnikov, un discípulo de Landau, en su visita a Granada, nos comunicó que, hacía mucho tiempo, él había obtenido un universo alargado con un campo magnético homogéneo. Hoy ni siquiera se intenta una hipótesis tan peculiar.

Pero si bien no hay un campo magnético medio, sí puede hablarse de una densidad de energía magnética media en el Universo. Al depender esta densidad de energía del cuadrado de la intensidad de campo, no existen compensaciones al promediar en todo el Universo. El campo aparece en células de coherencia con tamaño, intensidad y orientación diversa, en las cuales adquiere un valor constante o, al menos, regular. Aparecen de forma natural tubos de flujo magnético, a modo de gavillas de líneas de campo, que serán la sede, con el tiempo, de zonas de mayor temperatura radiativa y, posteriormente, quizá, la sede de zonas sobredensas de la estructura a gran escala del Universo. En una de ellas, al menos, surgió la vida.

La idea de un magnetismo cósmico puede rastrearse hasta Lemaître. Al analizar los tres tipos de universo posibles (abierto, cerrado o plano) pensó que en un universo cerrado, con rebote en el recolapso, podría mantenerse el flujo magnético, y que el campo creado en las galaxias antes del rebote pudiera ser la semilla de nuevas concentraciones de materia tras el rebote. Era una forma curiosa, casi poética, de establecer una conexión causal entre las fases temporales recurrentes consecutivas de un universo cíclico. Pero esta idea injustificada y peregrina, a pesar del prestigio de su autor, no tuvo seguidores ni trascendencia, y hoy estaría olvidada si no hubiera sido desempolvada por J. Pebbles.

Enrico Fermi, tras sus implicaciones norteamericanas en la bomba atómica, en 1949, se dedicó al estudio de los rayos cósmicos. Supuso que las partículas cargadas de estos rayos estaban confinadas por un campo magnético galáctico. Basado en esta idea, estimó el campo galáctico

en  $10^{-6}$  gauss, lo que es realmente asombroso, pues éste es el campo que hoy se mide. Incluso, Fermi llegó a suponer un origen primordial. Se basaba en la demostración anterior de Alfvén de que el campo, en un fluido de conductividad muy alta, podía mantenerse indefinidamente.

Fermi y Chandrasekhar, en 1953, desarrollaron un primer modelo en el cual las inestabilidades gravitatorias se producían en el seno de un campo magnético. Sirva esta modesta cita de Chandrasekhar para recordar (volver a pasar por el corazón), más que para recordar (volver a pasar por la memoria), la inolvidable visita a Granada de este sabio sin igual. Fred Hoyle en 1958, supuso también que el campo tenía una antigüedad superior a la de la Galaxia. Piddington fue un defensor del origen pregaláctico del campo magnético y Wasserman merece aquí también nuestro saludo, así como Zeldovich y Novikov, quienes en 1965 supusieron que “todas” las anisotropías del CMB eran de origen magnético, algo que hoy nos parece, cuando menos, exagerado.

Pero estas ideas eran demasiado especulativas. Aunque la polarización en visible se atribuía, en parte, a un campo magnético galáctico, las medidas de este campo empezaron a ser realmente fiables cuando Wielebinski y Shakeshaft en 1962 descubrieron la radiación sincrotrón polarizada. Richard Wielebinski es otro de los grandes científicos que nos visitaron en Granada y es ahora también un buen momento para recordarlo.

En 1975 la teoría cambia. Parker propone la teoría de la dinamo “alfa-omega”, seguido de otros meritorios investigadores. Según Parker el campo es amplificado por una combinación de efectos turbulentos y rotación diferencial. No es momento de exponer los elementos de esta teoría, que requeriría una paciencia de la audiencia de varios *megajobs*. Quizá resulte interesante recordar que es una teoría en la que la turbulencia, fenómeno caótico por excelencia, no sólo amplifica, sino que ordena el campo, que adquiere una disposición esencialmente toroidal. Es un brillante ejemplo, observable macroscópicamente, en el que el desorden completo conduce al orden. Ciertamente es que para que se produzca la amplificación se precisa un campo semilla, cuyo origen sólo puede ser pregaláctico, pero éste es, en este caso, mucho menor.

En efecto, el campo se amplifica, según esta teoría dinamo, en un factor  $e$  en cada vuelta de la Galaxia y si ésta ha dado unas 20 vueltas desde su formación, el campo se ha amplificado en un factor  $e^{20}$ , es decir,  $5 \times 10^8$  aproximadamente. El campo puede haber aumentado en un factor 100 en el proceso de colapso de la formación galáctica. Resulta entonces que, para llegar a los  $10^{-6}$  gauss actuales, se precisa un campo primordial de  $10^{-6} \times 10^{-8} \times 10^{-2}$  igual a  $10^{-16}$  gauss, insignificante para haber tenido una influencia cosmológica. Hay que tener en cuenta que la intensidad de campo disminuye en la expansión del Universo, según  $(z+1)^{-2}$ , siendo  $z$  el desplazamiento al rojo. Por tanto, en la época de la Recombinación, así llamada la época en la que se emitió el CMB que hoy vemos, con  $z = 1000$ , el campo podría haber sido de solamente  $10^{-10}$  gauss, completamente despreciable.

Pero una serie de hechos nos han hecho pensar que las antiguas ideas de Fermi y Hoyle eran correctas. Solo mencionaré una de estas razones aunque ésta es ya, por sí sola, suficiente. Observamos unas nubes gaseosas que se interpretan como estructuras pregalácticas. Son las llamadas “Bosques de Lyman-alfa”. En Astrofísica no sólo somos capaces de observar el pasado. Debido al desplazamiento al rojo de los objetos lejanos somos capaces de hacer “visible” lo invisible; es decir, de hacer visible el ultravioleta. Vemos en el rango visible, no ya una raya de absorción del espectro del hidrógeno, la conocida Lyman-alfa, escrita Ly- $\alpha$  sino todo un “bosque” de ellas. En efecto, el continuo ultravioleta de un cuásar lejano puede ser extinguido por estas nubes de hidrógeno, cada una en una longitud de onda Lyman-alfa diferente, a la frecuencia que a cada una le corresponde por su variado desplazamiento al rojo. Pues bien: los bosques de Lyman-alfa están magnetizados; y la intensidad de campo es similar a la del medio interestelar de la vecindad solar.

No hace falta, pues, amplificar un campo semilla pregaláctico. Cuando las galaxias nacieron lo hicieron ya del colapso de un medio altamente magnetizado. En consecuencia, el campo magnético en la época que nos ocupa, la época de la Recombinación, de la emisión del CMB, seguramente no era  $10^{-10}$  gauss, sino quizá  $10^{-2}$  gauss. Esto ya no es despreciable en absoluto.

Este campo magnético es capaz de generar anisotropías tan grandes como los efectos puramente gravitatorios.

Es posible que grandes filamentos, testigos de tubos de flujo magnético primordiales, atravesaran esa superficie esférica donde se generó el CMB que hoy vemos, produciendo anisotropías superpuestas a las otras anisotropías generadas por otras causas. El campo gravitatorio puede generar anisotropías de alto multipolo, es decir, de pequeño tamaño angular, a partir de inhomogeneidades primordiales semilla. Estas anisotropías tienen un tamaño angular inferior a un grado, aproximadamente, coincidiendo con el tamaño del horizonte relativista en la época de la Recombinación y coincidiendo con el llamado Pico Doppler, la posición de la nota fundamental de la gran sinfonía cósmica. Pero son muy interesantes las anisotropías de tamaño angular mayor que un grado, las anisotropías del llamado efecto Sachs-Wolfe. Como son mayores que el horizonte relativista, no han podido cambiar desde que se generaron. Nos muestran las condiciones iniciales en toda su virginal pureza.

Al decir “condiciones iniciales” no podemos referirnos al Big-Bang que, quizá, ni siquiera existió, sino que nos referimos al momento en que se originaron las inhomogeneidades semilla, a la llamada época de la Inflación. Si observamos esa sintonía en el espectro musical del Cosmos, es porque todas las vibraciones se produjeron a la vez. (Imaginémonos unos tubos de órgano en el que se hubieran practicado agujeros al azar a lo largo del tubo. Su sonido sería horroroso)

La Inflación es una era del Universo de crecimiento exponencial, tan rápido que fue más rápido que el horizonte relativista. Creemos en su existencia porque nos explica por qué el Universo es isótropo y por qué es plano. Creemos en su existencia porque nos explica el espectro primordial necesario para explicar las anisotropías del CMB. Y ahora resulta que, quizá, en esta época, se generó también el campo magnético cósmico, y que éste puede producir anisotropías tanto en la región de Sachs-Wolfe como en la región de los multipolos altos. Sólo el campo magnético creado en la Inflación, puede tener células de coherencia grandes, incluso mayores que el horizonte, porque las células pequeñas no pueden sobrevivir a la era altamente resistiva del Universo dominado por la radiación.

Pero todo puede quedar en una hermosa especulación si no se mide. Hay que medir el campo magnético en las observaciones del CMB. Ciertamente, hasta ahora no se ha conseguido. Pero es posible que pueda hacerse en el año 2007, año en el que será lanzado el satélite PLANCK, de una sensibilidad muy superior a la de sus predecesores. Hay que estar preparado para ello pues nuestra concepción del Universo puede cambiar. Solo falta decir cómo podríamos medirlo.

El insigne Faraday, en el siglo XIX, nos proporcionó la herramienta necesaria. Pretendía Faraday unificar la electricidad, el magnetismo, la luz, la gravedad... ; otro físico anterior a Einstein cautivado por la idea de la unificación. La relación entre la luz y el magnetismo se escapaba a los múltiples experimentos que realizaba con este fin. ¿Quién le iba a decir que, muy poco después, demostraría Maxwell que la luz es una onda electromagnética?. El caso es que, por fin, Faraday consiguió su propósito. Hizo pasar luz polarizada a través de un campo magnético y ... el plano de polarización giró. Es lo que se llama la Rotación de Faraday, uno de los más grandes descubrimientos que hizo este eminente físico experimental, aunque no sea el más conocido de sus hallazgos..

Sabemos que la luz del CMB está polarizada. Esto sí que se ha observado. Es el llamado “scattering” de Thomson lo que produce la polarización lineal. (Pido perdón por no traducir la palabra “scattering”). Para saber lo que ha rotado el plano de polarización hace falta saber la orientación inicial de ese plano. Pero como el ángulo rotado depende de la longitud de onda al cuadrado, midiendo en varias longitudes de onda, mediante ajuste, podemos determinar tanto la orientación del plano inicial como la capacidad del medio para rotarlo, y esta capacidad es lo que depende de la intensidad del campo magnético.

La rotación de Faraday se utiliza en Astrofísica para determinar, por ejemplo, el campo magnético en una galaxia. Pero éste es muy inferior en una galaxia y sólo es capaz de producir rotación de Faraday a longitudes de onda mucho mayores, del orden del centímetro, mientras

que el CMB se observa en milimétricas y submilimétricas. No hay pues riesgo de contaminación de la rotación de Faraday producida por nuestra propia galaxia. Sí es cierto que el medio intracumular produce rotación del CMB, aunque este efecto es de fácil descontaminación, por estar muy localizado.

Aún no sabemos si la introducción del campo magnético en la física del CMB producirá una alteración substancial en nuestra concepción del Universo, o si obligará a un pequeño retoque de los parámetros que parecen definirlo. Muchos prevén esto último, más que nada por estar impresionados por el éxito del modelo actual, donde se conjugan varias observaciones diferentes y se logra una imagen unitaria y coherente del Universo. Este escenario, que empieza a merecer la categoría de "estándar", constituye lo que se llama el paradigma de materia oscura fría jerarquizada con constante cosmológica, llamado abreviadamente  $\Lambda$ CDM. Pero este paradigma, con ser admirable, no es perfecto. Es admirable porque aúna una gran variedad de fenómenos que van desde la interpretación del CMB y desde la estructura a gran escala hasta la rotación de las galaxias. No es perfecto porque no explica de forma completamente satisfactoria algunos hechos susceptibles de ser medidos. Con cierta ironía malintencionada podríamos decir que explica mejor lo que no puede verse que lo que se ve. Aunque, en verdad, no podamos sino reverenciar a los diversos autores que han construido este admirable edificio, no perdamos de vista que es un edificio. En el año 2007 este modelo  $\Lambda$ CDM va a ser sometido a una prueba que quizá sea dura, o quizá sea blanda. En cualquier caso, en ese año, vamos a conocer mucho mejor este Universo que, o bien nos ha tocado en suerte, o bien, es el único posible.

La Cosmología ha pasado en muy pocos años de ser una ciencia marginada por su escasa información experimental, por su carácter excesivamente especulativo y por su objetivo demasiado ambicioso, a ser una ciencia admirada, divulgada, imaginativa y precisa. Puede ser que estemos cerca de su completitud, o puede ser que no hayamos hecho más que descorrer el primer velo. Puede ser que su objeto sea inalcanzable, pero si partimos de esa premisa, la investigación es inútil y absurda. Trabajamos porque creemos que el Universo puede entenderse y que la investigación cosmológica, como cualquier otra investigación, tiene un punto final. La ciencia ha pasado a ser princesa, pero aún no sabemos lo que pasará a las doce de la noche.

Con esto termino, agradeciendo vuestra atención, y pidiendo una llave de vuestra casa la Academia, donde espero disfrutar de vuestra sabiduría y de vuestra bonhomía; en esta casa que espero que sea mi templo, mi escuela y mi refugio. Os pido un rincón cerca de la chimenea, al amor de la lumbre; de la lumbre de la ciencia que aquí chisporrotea.

Muchas gracias