



Figura 1 (a)

EL UNIVERSO DESDE JAVALAMBRE

1.- UNA BREVE INTRODUCCIÓN

La elaboración de concepciones y teorías cosmológicas no es privativo de nuestra época. Todas las civilizaciones han pretendido comprender la estructura subyacente del Universo, lo que le da coherencia y lo hace inteligible y comprensible. Lo que es nuevo en nuestra época es la capacidad para sondear astros cada vez más lejanos, para estudiar su distribución y sus propiedades y para ahondar en el contenido último y la estructura del Universo.

La Cosmología que hoy conocemos empieza a construirse a principios del siglo XX sobre dos grandes pilares, uno teórico y otro observacional. Siendo la gravedad la única fuerza que puede actuar a cualquier distancia y con independencia del estado en que se encuentren la materia o la energía, la Cosmología, como estudio del Universo a grandes escalas, se constituye en el reino de la gravedad. De modo que cuando Einstein formula una nueva teoría gravitatoria, la Relatividad General, se abre un nuevo mundo para el estudio del Universo. Su planteamiento radicalmente global permite superar los problemas encontrados por la teoría de Newton, de carácter local, de modo que la tentación cosmológica de la teoría es inmediata. Apenas formulada, el mismo Einstein elaborará el primer modelo cosmológico. Sin embargo, en este modelo Einstein no hará uso de una de las características centrales de su teoría, el carácter dinámico del espacio-tiempo que, muy poco después, se va a convertir en elemento clave de la nueva Cosmología, esencial para interpretar los datos que las incipientes observaciones van presentando.

POR MARIANO MOLES

El otro pilar es el descubrimiento de las galaxias como sistemas externos e independientes de nuestra Vía Láctea, similares a ella y situadas a distancias extraordinarias (Figura 1). Este descubrimiento, culminado por Hubble hacia 1924, supone un descomunal cambio de escala que da su verdadera dimensión a esa nueva Cosmología. Son las galaxias, y no las estrellas como hasta entonces se admitía, los ladrillos del Universo, los elementos que lo componen y estructuran. Pero hay más.

Desde finales del siglo XIX se había comenzado a obtener espectros de las galaxias más próximas. En la gran mayoría de los casos se apreciaba que las líneas espectrales bien identificadas, correspondientes a elementos químicos comunes, se presentaban a longitudes de onda superiores a las que se miden en el laboratorio. En la misma segunda década del siglo XX en que se descubrió la existencia de las galaxias, Hubble encontró que el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales emitidas por una galaxia y la distancia a la que ésta se encuentra están relacionadas, de modo que midiendo

“ Cuando Einstein formula una nueva teoría gravitatoria, la Relatividad General, se abre un nuevo mundo para el estudio del Universo. ”

el primero se puede determinar la segunda. La ley de Hubble, como se le conoce actualmente, es un hecho observacional incontestable, que se ratifica cada vez que se observan galaxias con un telescopio (Figura 2). La importancia de tal ley es central para cualquier cosmología pues permite situar a las galaxias en el espacio tridimensional.

La convergencia de teoría y observaciones fue muy rápida. Pocos años después del modelo de Einstein se estableció el primer modelo cosmológico dinámico, en el que el espacio-tiempo ya no es siempre el mismo. La propuesta es relativamente simple y ahí radica su fuerza. Propone que el espacio-tiempo cambia sólo con el tiempo, manteniéndose constante en cada sección espacial. Eso permite inmediatamente asociar un instante a cada una de esas secciones espaciales y definir por tanto un tiempo cósmico. También dar un paso más hacia la caracterización dinámica del Universo. En efecto, dado que la información se propaga a velocidad finita, ordenar las galaxias por sus distancias (determinadas a partir de la medida del desplazamiento de las líneas espectrales y aplicando la ley de Hubble) equivale a ordenarlas en una escala temporal. Si, además, existen argumentos para pensar que las galaxias se han formado en épocas similares, lo anterior significa que es posible situar a las propias galaxias en secuencias evolutivas.

Por lo demás, el modelo es también simple desde el punto de vista matemático. Está descrito por una sola variable, que depende sólo del tiempo, que es el llamado parámetro de escala (α , en términos menos rigurosos, el tamaño del Universo), que determina en cada momento todas las propiedades geométricas. Esta formulación, propuesta por primera vez por el meteorólogo ruso Friedman, no fue aceptada de inmediato e incluso el propio Einstein la desdeñó. Pero tenía una virtud esencial que le hizo imponerse a las críticas: su capacidad para aportar una explicación directa a la ley de Hubble. La deduc-

Figura 1. El mundo de las galaxias.

- a) Galaxia irregular, satélite de M81, catalogada como M82. Presenta una morfología poco estructurada, con intensa formación estelar, manifestada por la emisión de hidrógeno ionizado codificada en rojo (fuente: <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2006-14-a-print.jpg>).
- b) Galaxia de tipo elíptico, catalogada como NGC1132. La distribución de luz es suave, sin estructuras ni irregularidades, a partir de la concentración central (fuente: <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2008-07-a-full.jpg>).
- c) Galaxia de tipo espiral, catalogada como M81. Se aprecia la presencia de un bulbo central y la estructura más extensa de disco con brazos espirales (fuente: <http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2007-19-a-hires.jpg>).

Figura 2. Ilustración de la ley de Hubble que relaciona el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de las galaxias con su distancia, para Supernovas de tipo Ia (fuente: R. P. Kirshner, PNAS, 1, 8-13).

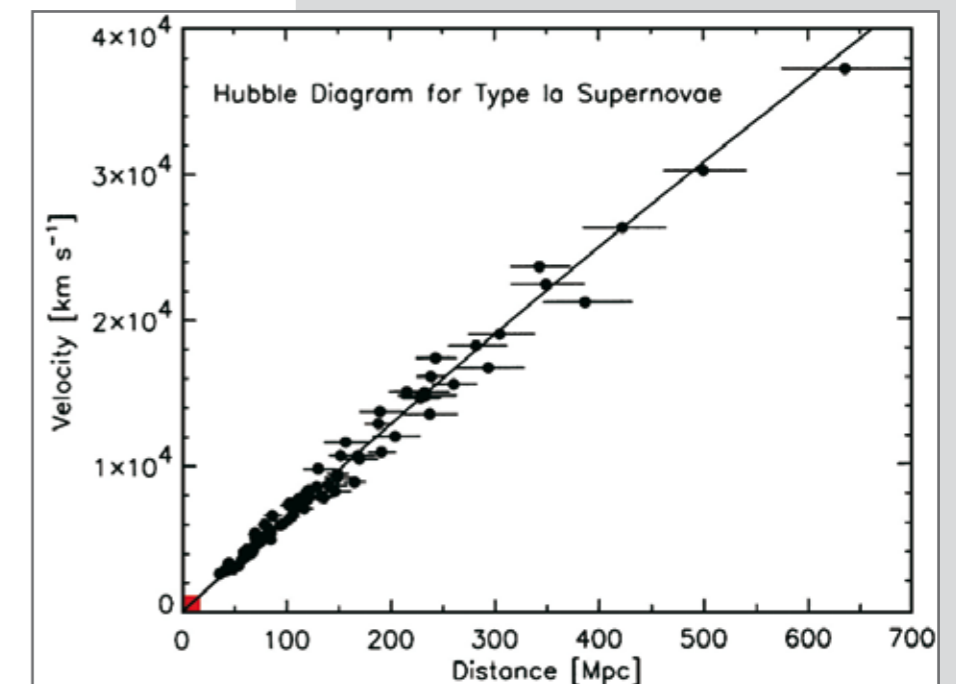
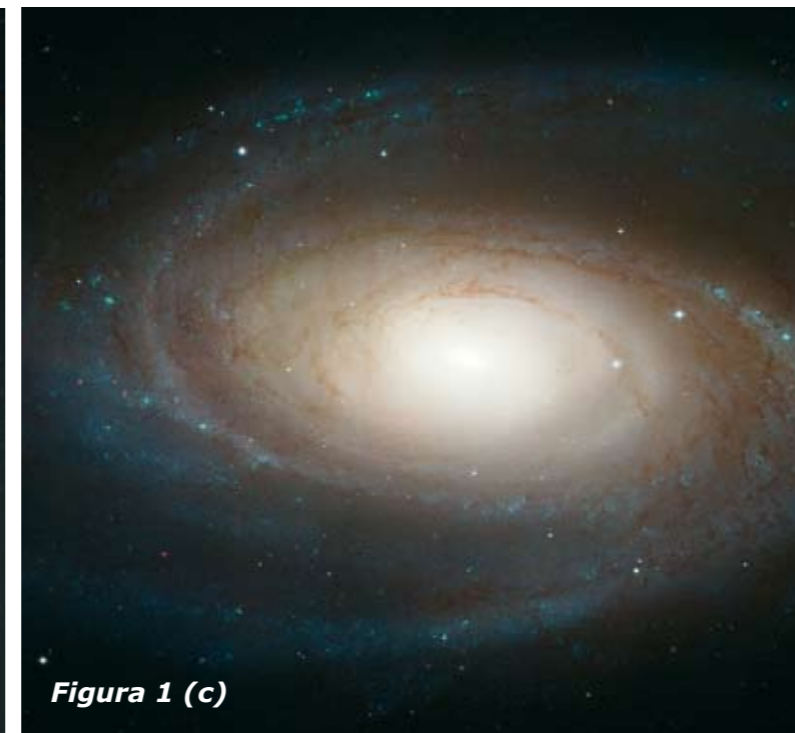
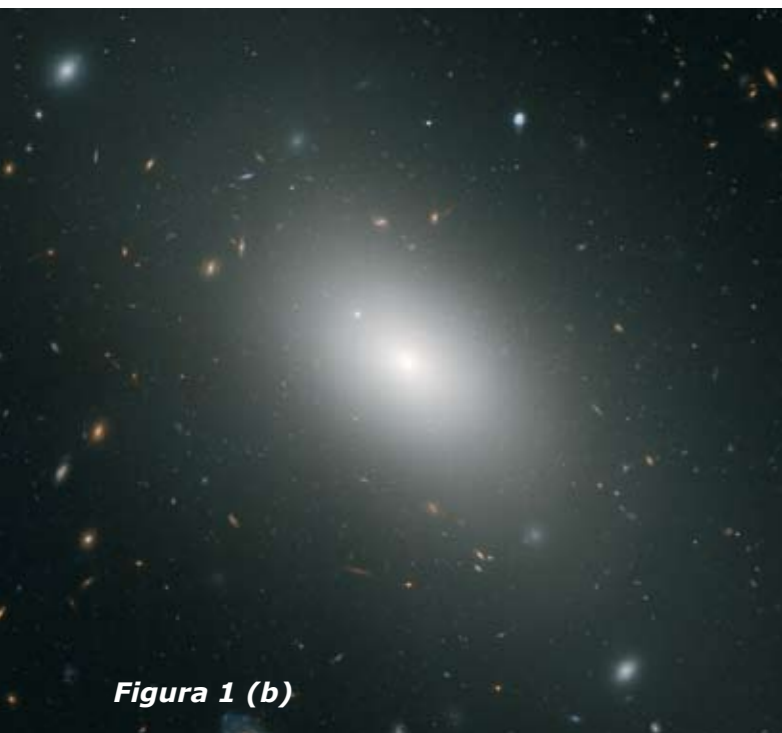
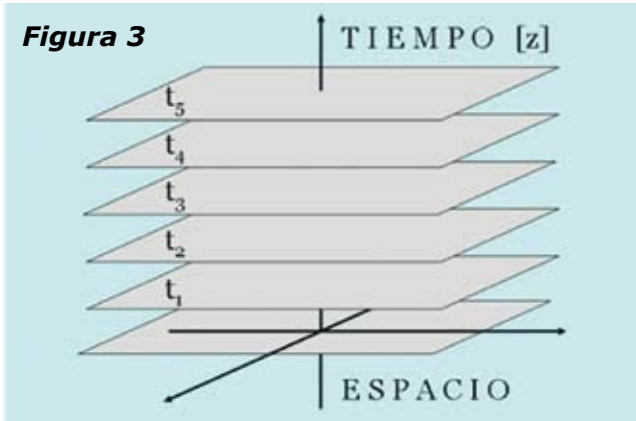


Figura 1 (b)

Figura 1 (c)

Figura 2



ción es inmediata: al igual que el parámetro de escala, la métrica cambia con el tiempo. Y con la métrica las distancias. De modo que la distancia entre dos crestas de un tren de ondas también cambia con el tiempo. Si ese cambio es un aumento, la longitud de onda de ese tren de ondas también aumenta con el tiempo, produciéndose un desplazamiento hacia el rojo, que es lo que

se observa. Y puesto que la distancia cambia también de manera análoga, con el tiempo, ambos cambios deben estar relacionados entre sí. Es la ley de Hubble.

La condición que imponen las observaciones es que se trata de un desplazamiento hacia el rojo, no hacia el azul. Esto se traduce porque el parámetro de escala es una función creciente del tiempo, de modo que el Universo que resulta es cada vez más grande o, en otros términos, representa un Universo en Expansión. Este es el hecho básico, la piedra angular sobre la que se asienta nuestra Cosmología. Como ya dijimos, el modelo conlleva la existencia de un tiempo cósmico, es decir, el mismo para todos los puntos de una sección espacial dada. La ordenación de las secciones espaciales como momentos del tiempo cósmico lleva inmediatamente a la noción de evolución del Universo (Figura 3). Es decir, no sólo evolucionan localmente todos los

Figura 4 (a)

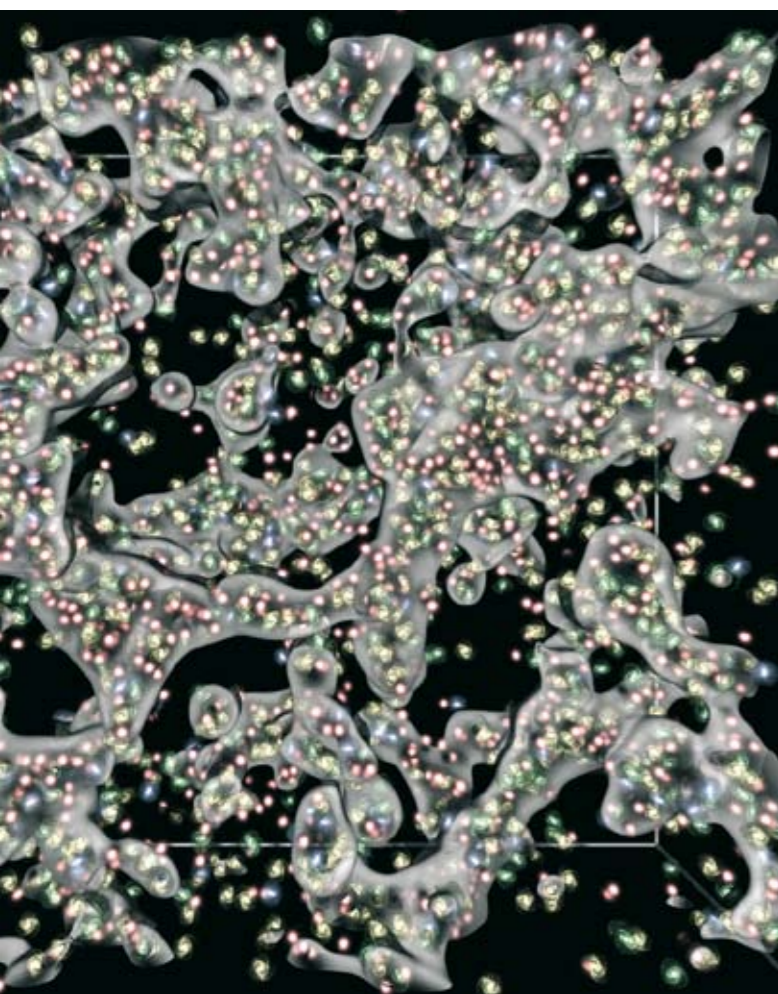
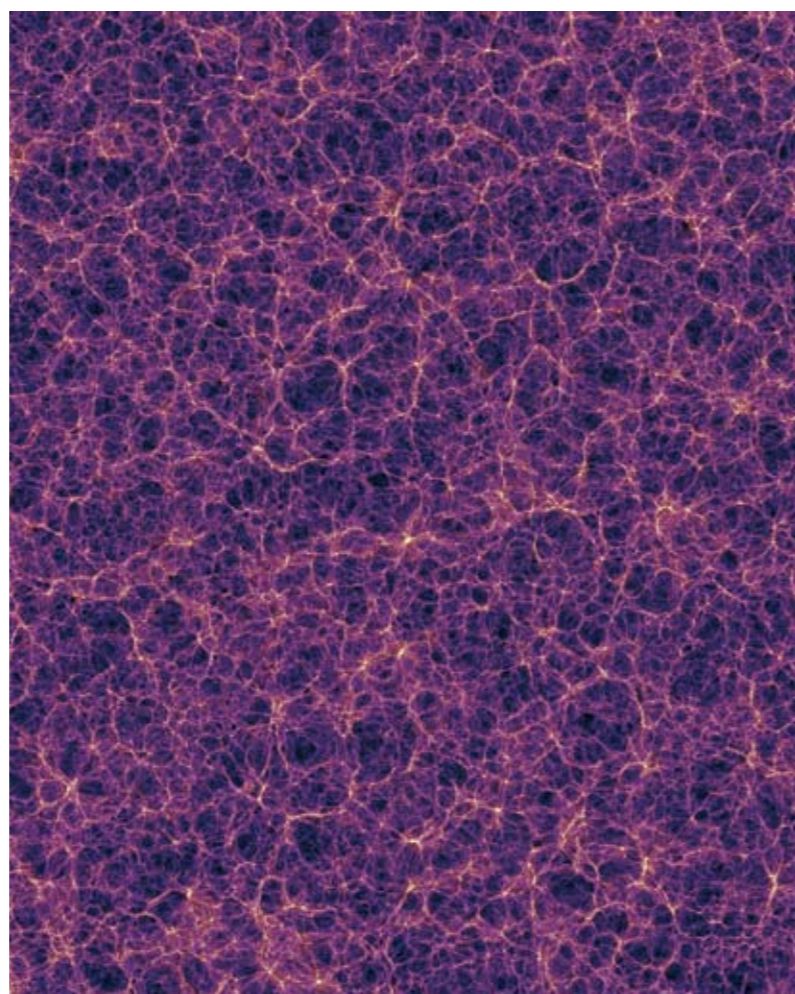


Figura 4 (b)



cuerpos y estructuras que contiene, sino él mismo, su métrica y, en consecuencia, sus propiedades globales.

Siguiendo ya dentro de este modelo, se deduce que en el pasado el Universo era más pequeño, más denso, más caliente y estaba menos estructurado. Incluso, en algún momento de ese pasado, las condiciones fueron tales que la materia y la radiación estaban en equilibrio, formando un todo homogéneo sin estructuras, con tan sólo pequeñas fluctuaciones locales en sus propiedades. De ese pasado denso y caliente nos queda como principal reliquia la radiación de fondo, descubierta en la década de los 60 del siglo XX y cuyas propiedades han podido medirse con extraordinaria precisión. Nos quedan también, de épocas aún más remotas, los elementos químicos más ligeros después del hidrógeno, el helio en particular, que fueron sintetizados cuando el Universo tenía la densidad y temperatura adecuadas para que se produjese la fusión termonuclear del hidrógeno. Y nos quedan, como huellas del pasado cuántico del Universo, todavía más remoto en el tiempo, las galaxias y estructuras que se generaron a partir de las pequeñas fluctuaciones en ese contenido, por los demás indiscriminado y sin estructurar, del Universo en aquella época (ver conCIENCIAS, nº 2, *Los Fósiles del Universo*). Es la gravedad, actuando sobre ellas, la que ha hecho su trabajo de estructuración, como nos muestran las simulaciones (Figura 4).

En este esquema, enriquecido por múltiples datos de observación y elaboraciones teóricas, la expansión del Universo se va frenando por la acción gravitatoria, que se opone a esa expansión. De modo que la expectativa inmediata es que el ritmo de expansión fuese mayor en el pasado ya que se va decelerando con el tiempo. Tan evidente parecía esta conclusión que, cuando se desarrolló la formulación del modelo en base a los llamados parámetros cosmológicos, el que describe el cambio de ritmo de la expansión se denominó parámetro de deceleración. Hasta que los datos, una

Figura 3. Ilustración de la noción de tiempo cósmico que resulta de la estructura espacio-temporal del modelo de Friedman. Las secciones espaciales pueden ordenarse según el valor del parámetro temporal, que juega por lo tanto el papel de un tiempo común.

Figura 4. La distribución de materia en el Universo.

(a) La distribución de galaxias según los datos del *2dF Galaxy Survey*, que contiene más de 100.000 galaxias (fuente: <http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>).

(b) Resultado de las simulaciones (*Millennium Simulation*) de la estructura a gran escala del Universo (fuente: http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/seqB_063.jpg).

“ Son las galaxias, y no las estrellas, los ladrillos del Universo, los elementos que lo componen y estructuran. ”

vez más, han obligado a reconsiderar nuestra visión del Universo, obligando a ese parámetro a cambiar de signo.

2.- ESTRUCTURA Y CONTENIDO DEL UNIVERSO. LOS DATOS Y SU ENCAJE

A lo largo de los años, desde su primera formulación, los datos relevantes para la Cosmología se han ido acumulando, cada vez más precisos y numerosos. Y con ellos han venido las constataciones y las sorpresas. Hasta el punto que, a día de hoy, la conclusión (siempre provisional en ciencia) sería que el Universo está, contrariamente a lo esperado, en expansión acelerada. El agente causante de esa aceleración, conocido como Energía Oscura, supondría el 73% del contenido del Universo. Del 27% restante, tan

sólo el 4% correspondería a materia bariónica, mientras que el otro 23% del Universo sería la Materia Oscura, cuya naturaleza se desconoce.

El valor básico de los modelos es el de ofrecer un marco interpretativo para los datos que se van obteniendo. Dentro del modelo cosmológico estándar, hijo de la Relatividad General, la existencia de materia y energía oscuras no es una hipótesis sino que se desprende de las observaciones. Se trata de constituyentes del Universo cuyos efectos gravitatorios se detectan, aunque no conozcamos aún su naturaleza. Puede ocurrir que, en algún momento, se cambie de paradigma y de marco interpretativo, como otras veces en la historia. Pero serán los datos de las observaciones los que impulsen esos cambios y los que, al final, validen las opciones teóricas adecuadas.

2.1 La Materia Oscura.

La primera sorpresa, que produjeron las observaciones a escalas suficientemente grandes, fue el constatar que la mayor parte de la materia que contiene el Universo no está encerrada en estrellas ni emite luz. Resaltemos, en este punto, que para llegar a esta conclusión no es necesario invocar la Cosmología y los modelos cosmológicos, sino que resulta de consideraciones básicas sobre el equilibrio dinámico de sistemas.

Históricamente fue el astrónomo suizo-americano F. Zwicky quien constató esta cuestión por primera vez. Al estudiar el Cúmulo de Galaxias en Coma Berenices (Figura 5) consideró que podría tratarse de un sistema en equilibrio y, por lo tanto, podría aplicársele el teorema del virial: la suma de la energía cinética y potencial debe ser nula. La idea es que las galaxias se

Figura 5. Cúmulo de Galaxias en Coma Berenices, situado a una distancia de unos 332 millones de años-luz. Fue el primer cúmulo del que se estudió la dinámica interna que puso de manifiesto la existencia de materia no-luminosa. El sistema está dominado por las dos galaxias centrales, NGC4874 y NGC4889 (fuente: NASA/JPL-Caltech/GSFC/SDSS).

Figura 5



“ La ley de Hubble es un hecho observacional incontestable que se ratifica cada vez que se observan galaxias con un telescopio. ”



Figura 6

“El parámetro de escala es una función creciente del tiempo, representando un Universo en expansión.”

mueven como partículas de prueba en el potencial general del Cúmulo, de modo que la dispersión de velocidades del sistema, medida a partir de las diferencias de velocidad entre las galaxias del mismo, junto con la medida de un tamaño característico, debería darnos la Masa dinámica (total) del mismo. Al calcularla Zwicky constató que el valor resultante excedía en un factor muy importante, más allá de cualquier error de medida, el de la suma de las masas de las galaxias deducida de sus luminosidades. La diferencia fue bautizada por Zwicky como masa oculta. Este resultado se ha reforzado, sin excepción, con los datos que se han ido acumulando desde entonces.

Hoy sabemos que las galaxias contienen materia oscura, según se deduce de su propia diná-

mica interna. Y sabemos también que hay una componente de materia bariónica en el espacio intergaláctico dentro de cada cúmulo, en forma de gas caliente en equilibrio en el potencial del Cúmulo, que emite en rayos X (Figura 6). Esta componente supera ampliamente a la estelar y es el mayor contribuyente al 4% de materia bariónica, pero no resuelve la cuestión de la materia oscura, que sigue siendo dominante en el balance dinámico global de los Cúmulos de Galaxias.

La Relatividad General prevé otro efecto básico que permite estimar la masa de un sistema, el efecto de lente gravitatoria. La teoría establece que toda forma de materia o de energía produce y experimenta efectos gravitatorios, incluida

la luz. Como consecuencia, cuando los fotones pasan a cierta distancia de un cuerpo, su trayectoria se curva. La desviación depende de la masa de ese cuerpo y, por lo tanto, midiendo esas desviaciones se puede determinar la masa que las produce. Este efecto es puramente relativista pues en la teoría de Newton la energía no gravita. Y por eso constituye un test de la teoría de Einstein, prueba que superó en 1919 cuando se pudo medir por primera vez la desviación de la luz que viene de estrellas situadas a pequeña distancia angular del Sol. Los Cúmulos de galaxias, grandes concentraciones que pueden alcanzar hasta 10^{15} masas solares, producen el mismo tipo de efecto sobre la luz emitida por galaxias lejanas situadas a pequeñas distancias angulares del centro de cada cúmulo (Figura 6). De esa forma se puede ponderar las masas totales de esos cúmulos. Los resultados son totalmente consistentes con los que se obtienen por medios dinámicos.

La materia oscura apenas interacciona con la materia salvo gravitatoriamente. Esto, que supone un gran problema para el estudio de su naturaleza, permite visualizarla en algunas situaciones. Recientemente se han descubierto algunos casos en los que 2 cúmulos de galaxias colisionan. Cuando esto ocurre, la materia bariónica intergaláctica disipa parte de la energía en la interacción puesto que es sensible a otras fuerzas además de las gravitatorias. Por su parte, la materia oscura de un cúmulo pasa a través de la del otro sin prácticamente sentir ninguna otra fuerza más que la gravedad. Como resultado, se observa la materia oscura (detectada por sus efectos de lente gravitatoria) en ambos lados de la zona central de la colisión, mientras que la bariónica difusa (detectada por su emisión en rayos X) se apela en esa zona central (Figura 7). La prueba de su existencia y de su comportamiento, apenas sensible a fuerzas que no sean las gravitatorias (de ahí el nombre de partículas débilmente interactuantes, WIMP, que se da a las partículas que la componen) es contundente.

2.2 La Energía Oscura.

Utilizando los parámetros cosmológicos, la consistencia del modelo estándar se puede expresar mediante la ecuación:

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda - \Omega_k = 1$$

Figura 6. Cúmulo Abell 1689, situado a unos 2420 millones de años-luz. Sobre la imagen óptica de las galaxias del cúmulo se ha superpuesto la emisión en rayos-X del gas caliente intra-cúmulo, codificado con colores azules-violetáceos. Se aprecia la presencia de numerosas imágenes deformadas de galaxias lejanas, debido al efecto lente gravitatoria de la masa del cúmulo sobre la luz que proviene de esas galaxias lejanas (fuente: <http://chandra.harvard.edu/photo/2008/a1689/a1689.jpg>).

“En el pasado, el Universo era más pequeño, más denso, más caliente y estaba menos estructurado.”

en donde Ω_m representa la contribución de la materia (incluida la oscura) y la energía asociada a los campos conocidos; Ω_Λ representa la contribución de la constante cosmológica, Λ , una constante de integración que aparece en las ecuaciones de Einstein, y Ω_k representa la contribución de la curvatura de las secciones espaciales del espacio-tiempo. Por razones de simplicidad teórica, y para evitar ciertas paradojas con el modelo aceptado, se proponía hasta hace algo más de 10 años que tan sólo la densidad de materia-energía del Universo era relevante, por lo que debería valer 1, el valor crítico que separa los modelos cerrados de los abiertos. Sin embargo, los datos (en particular, los de cúmulos de galaxias) se resistían a entrar en este esquema puesto que proporcionan valores de Ω_m claramente inferiores a 1, abogando así por un Universo abierto, en el que la atracción gravitatoria, aún siendo capaz de decelerar la expansión, es incapaz de detenerla.

Hay que seguir explorando. Las ecuaciones de Einstein ponen en relación la geometría del espacio-tiempo con el contenido energético-material. De modo que midiendo ese contenido puede deducirse y determinarse la geometría del Universo. Y, en el otro sentido, también puede decirse que la geometría del espacio-tiempo fija el contenido material-energético del Universo (y su comportamiento dinámico). De tal forma que midiendo aspectos geométricos del Universo, tales como distancias, ángulos, áreas o volúmenes, se podrá extraer conclusiones sobre su contenido.

Los astros que nos permiten medir las distancias más lejanas son las Supernovas. Estas explosiones estelares son extremadamente brillantes, por lo que pueden ser detectadas a enormes distancias. Además, si se seleccionan aquéllas que pertenecen a una familia bien definida porque manifiestan siempre el mismo fenómeno físico, todas tendrán (aproximadamente) la misma luminosidad intrínseca, por lo que podrán ser utilizadas para medir distancias a partir de

las luminosidades observadas. Precisamente, la comparación de ambas luminosidades permite deducir las distancias y, en consecuencia, la geometría subyacente. Este programa de medida de distancias, llevado a cabo por dos equipos independientes, arrojó una enorme sorpresa: la expansión del Universo, en lugar de frenarse con el tiempo, se va acelerando. Los resultados no pueden ser explicados salvo si se añade un término como Ω_Λ .

Por otro lado, cuando se tienen en cuenta los resultados del análisis de las fluctuaciones de la radiación de fondo, se concluye que el efecto de la curvatura espacial es nulo, de modo que la ecuación maestra se reduce a la suma de dos términos, el de materia-energía y el de la constante cosmológica. Para la época actual, el primero representa el 27% mientras que el segundo representa el 73%.

Este resultado ha conmocionado la Cosmología. Las observaciones que se están planificando tendrán que corroborarlo y, en su caso, avanzar en su análisis. El término responsable de esa aceleración que podría ser, en principio, la constante cosmológica, se analiza en una perspectiva más amplia. En efecto, desde Saharov Λ se relaciona con la energía del vacío pues se puede interpretar como el tensor impulsión-energía para el caso vacío. De modo que, según este punto de vista, la constante cosmológica jugaría, desde el punto de vista cuántico, el papel de densidad de energía del vacío. Esta aproximación a la constante cosmológica plantea serias dificultades puesto que, desde el lado de la teoría de campos, se predice para Λ un valor que es decenas de órdenes de magnitud superior al límite impuesto por las observaciones.

Sea como sea, los datos indican que la expansión se acelera y por tanto debe existir un componente responsable. Es lo que se denomina como Energía Oscura, concepto que de algún modo viene a generalizar la constante cosmológica considerándola como un campo físico, que

evoluciona muy lentamente con el tiempo. La llamada ecuación de estado del Universo es simplemente la que corresponde a ese campo (con $c=1$):

$$p = -w\rho$$

en donde p y ρ son la presión y la densidad del campo en cuestión. El caso $w = 1$ corresponde a la constante cosmológica. Admitida su existencia, el problema es el de hallar cuanto vale w . Y ésta es una cuestión que se puede abordar desde el punto de vista observacional.

Como ya dijimos, la principal característica del Universo, según el modelo estándar, es que evoluciona. Su métrica cambia con el tiempo y con ella la importancia relativa de cada uno de sus constituyentes. En efecto, durante las primeras fases evolutivas la materia-energía domina totalmente, mientras que el efecto de la constante cosmológica (o de la energía oscura) es totalmente despreciable. A medida que la expansión progresa, el efecto de la materia-energía en el balance global va disminuyendo mientras que el de la energía oscura va aumentando (Figura 8). Hasta que llega un momento en esa evolución en que este segundo término llega a dominar, y se produce la aceleración de la expansión. A partir de ahí la situación ya no es reversible y esa aceleración continuará para siempre. Se trata pues de determinar el momento de cambio de régimen y de capturar en los datos esa evolución de la métrica.

Figura 7. Sistema catalogado como MACS J0025.4 – 1222, situado a unos 5700 millones de años-luz. Se trata de 2 cúmulos de galaxias en colisión. En azul está codificada la distribución de materia oscura, medida a partir del efecto lente gravitatoria. En rojo se ha codificado la emisión en rayos-X de la materia bariónica difusa. La imagen pone en evidencia el diferente comportamiento de ambas componentes y, por consiguiente, su distinta naturaleza (fuente: http://chandra.harvard.edu/graphics/resources/desktops/2008/macs_1920.jpg).



Para ello se han propuesto hasta 4 métodos diferentes. Cada uno de ellos tiene sus inconvenientes y sus ventajas, de modo que lo que se recomienda es utilizar los 4 métodos y combinar la potencia de cada uno de ellos para obtener resultados más precisos. El primero es de las Supernovas como indicadores de distancia. Los otros tres tienen que ver con la influencia que la presencia de la energía oscura puede tener sobre la distribución de materia en el Universo y sus cambios con el tiempo: densidad de cúmulos en función de la distancia (es decir, del tiempo), deformaciones de las galaxias lejanas producidas por la presencia de materia oscura (efecto lente gravitatoria débil) y peculiaridades en la distribución de galaxias en función de la escala de agrupamiento. Este último método pretende medir las Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAO de sus siglas en inglés).

En sus etapas tempranas, el Universo es un plasma en equilibrio que contiene radiación, materia bariónica, diferentes campos cuánticos y materia oscura. Una fluctuación en la distribución de materia oscura produce el mismo tipo de fluctuación en la materia bariónica que, a medida que el Universo se expande, se va desplazando como una onda esférica alrededor del punto en el que se originó. Pero, a medida que el Universo se expande también se va enfriando, hasta que el equilibrio entre sus constituyentes ya no puede mantenerse. En ese momento, la materia bariónica acumulada en esa fluctuación queda congelada, produciendo una cierta sobredensidad a una distancia característica del centro en el que empezó. Esa distancia es obviamente la que pudo recorrer desde que empezó hasta que quedó congelada, propagándose a la velocidad del sonido en el plasma, distancia que corresponde al horizonte sónico. Esto es lo que se ha observado a distancias relativamente pequeñas (**Figura 9**). Este cuadro simplificado permite ilustrar la predicción de que la distribución de galaxias presenta una anomalía, una sobreconcentración a la escala correspondiente a aquel

horizonte sónico. Esta escala, siempre la misma físicamente, cambia a medida que cambia la métrica de modo que, si la medimos a diferentes distancias, se podrá determinar el ritmo de expansión en diferentes épocas y de ahí determinar la energía oscura en cada una de ellas y, por tanto, si es constante o varía con el tiempo. Así de fácil, al menos en apariencia.

3.- NUEVOS PROBLEMAS, NUEVAS ESTRATEGIAS. EL OBSERVATORIO DE JAVALAMBRE, UNA NUEVA VENTANA AL UNIVERSO

El modelo cosmológico, a la vista de los resultados observacionales, se encuentra en una situación de crisis que hay que resolver con datos nuevos, que permitan poner de manifiesto fenómenos muy sutiles que sólo son perceptibles a gran escala. El desafío no es pequeño. Y lo que está en juego, tampoco. Al decir de los expertos que escribieron el *Dark Energy Task Force Report* (Albrecht et al., *astro-ph/0609501*, 2006):

La aceleración del Universo es, junto con la materia oscura, el fenómeno observado que de forma más directa demuestra que nuestras teorías de partículas elementales y gravedad son incorrectas o incompletas. La mayoría de los expertos creen que se necesita nada menos que una revolución en la manera en que comprendemos la física fundamental para entender plenamente la aceleración cósmica.

Estamos, pues, ante problemas centrales para la Ciencia y para la Física, que se han planteado en el terreno de la Astrofísica y de la Cosmología, y en él hay que resolverlos. Nuevos problemas que demandan nuevas estrategias: será necesario establecer colaboraciones entre especialistas de diferentes ramas de la Física y, además, habrá que desarrollar nuevos instrumentos que permitan llevar a cabo las medidas relevantes en escalas de tiempo razonables.

Sobre estas bases, y para contribuir al estudio de problemas como los citados, se estableció en 2007 el proyecto Javalambre. La propuesta inicial consiste en la realización de un gran cartografiado que permita estudiar, como objetivo central, las BAO a diferentes distancias (proyecto *Physics of the Accelerating Universe*, PAU, Consolider Ingenio 2007, ver Benítez et al., *ApJ*, 691, 241, 2009). Los datos del cartografiado permitirán, también, abordar el problema con dos métodos más de los mencionados antes, el del efecto débil de lente gravitatoria y el de la formación y crecimiento de estructuras y de recuento de cúmulos. Por otro lado, los datos serán del máximo interés, también, para el estudio de la formación y evolución de galaxias, para la Física estelar o para el descubrimiento y análisis de objetos del

“ La expansión del Universo, en lugar de frenarse con el tiempo, se va acelerando. Este resultado ha conmocionado la Cosmología. ”

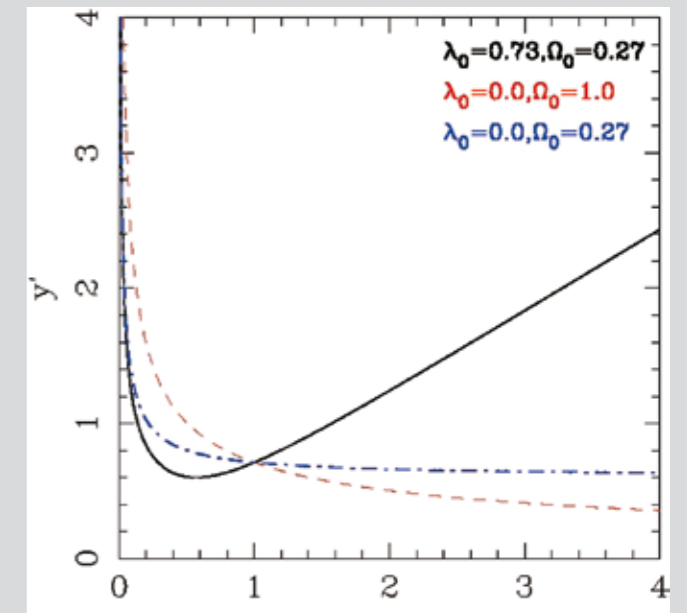


Figura 8. En este diagrama se muestra el comportamiento del ritmo de expansión (derivada con respecto al tiempo del parámetro de escala) con dicho parámetro (directamente relacionado con el desplazamiento hacia el rojo, es decir, con el tiempo). Se aprecia que, en el caso de constante cosmológica no nula, se produce un cambio en ese ritmo que empieza decelerándose para luego acelerarse (fuente: M. Moles, 1991, *ApJ*, 382, 369-376).

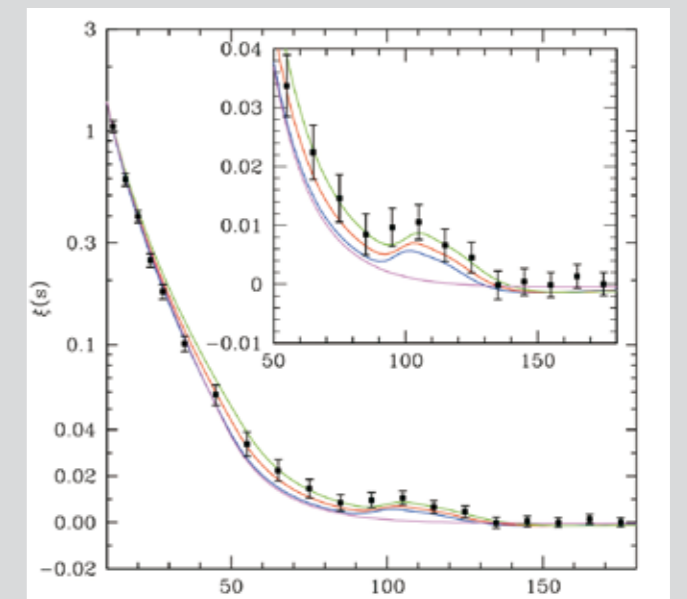


Figura 9. Detección de la señal producida por las oscilaciones acústicas de bariones (BAO) en la distribución de galaxias. Se representa la amplitud de la función de correlación de dos puntos en función de la escala (comóvil), en unidades de $h=100/H$, siendo H la constante de Hubble (fuente: http://cmb.as.arizona.edu/~eisenste/acousticpeak/paperfigs/xi_jack.eps).

Sistema Solar. En suma, gracias a la técnica observacional utilizada y, como consecuencia de ello, a la ausencia de sesgos de selección, el cartografiado se constituirá en un Proyecto-Legado de máxima utilidad para todas las ramas de la Astrofísica.

La naturaleza del proyecto y de los problemas que aborda imponen sus exigencias sobre los instrumentos necesarios para llevarlo a cabo. El Universo, se admite, es homogéneo (e isótropo) a escalas suficientemente grandes. Por debajo de esa escala, que todavía no está bien determinada, cualquier característica que se considere presenta fluctuaciones que suponen una especie de ruido sobre esa homogeneidad básica y que se conoce como varianza cósmica. A lo que hay que añadir el ruido inherente a las propias medidas y a la determinación de aspectos básicos como el desplazamiento hacia el rojo, es decir, la distancia. Para que el muestreo de las escalas sea suficiente y el fenómeno que se busca detectar pueda aflorar por encima de esa varianza combinada con los errores de medida, hay que muestrear grandes volúmenes cósmicos, del orden de varios Gp^3 ($1Gpc = 3,24 \times 10^{27}$ cm). En efecto, el análisis de errores nos indica que, para que se puedan poner condiciones estrictas sobre la ecuación de estado, el error con que hay que determinar la escala de los BAO no debe superar el 0.5%. La conclusión de ese análisis, habida cuenta de los errores esperados en los datos, es que es necesario muestrear un volumen $V > 10 Gp^3$. Dado que la técnica utilizada permite muestrear de manera sistemática hasta distancias correspondientes a un desplazamiento hacia el rojo, $z \sim 1$ (que corresponde a una distancia radial comóvil de 10.800 millones de años luz) es necesario cubrir una superficie de unos 8.000 grados cuadrados. O, lo que es lo mismo, si descontamos la superficie ocupada por el plano galáctico y las zonas relativamente próximas al horizonte, para las que las condiciones de observación no son adecuadas (menos de 40° de elevación), se necesita cubrir prácticamente todo el cielo accesible desde una localización.

¿Cómo se traduce todo eso a la hora de escoger o diseñar los instrumentos necesarios? Se conoce como *Etendue* el producto del área colectora de un telescopio (en m^2) por el campo de visión (en grados cuadrados). La *Etendue* es el parámetro que traduce la eficiencia de un telescopio para observar una cierta superficie sobre la esfera celeste hasta una cierta profundidad. En general la *Etendue* disminuye con el tamaño del telescopio, lo que indica que es un auténtico desafío técnico hacer un telescopio, con una escala apropiada de imagen, en que ese factor sea suficientemente grande (Figura 10). En nuestro proyecto para el Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ) proponemos la construcción de un telescopio de 2.5 m de apertura, con escala de $0.34''/15\mu m$ y 3 grados de campo (diámetro), lo que proporciona un valor nominal de *Etendue* de 34,7, que es un factor 5-10, al menos, superior al de los telescopios existentes. En ese sentido es único y el primero en su género. Además, hay otro aspecto a considerar para calibrar la magnitud del esfuerzo y la necesidad de un planteamiento adecuado. Normalmente el acceso a los telescopios se distribuye entre diferentes proyectos, de modo que cada uno de ellos dispone de una pequeña fracción del tiempo, digamos algunas noches por año. Incluso proyectos especiales suelen tener una fracción que rara vez supera el 10% del total, llegando muy excepcionalmente al 30%. De modo que la capacidad nominal, dada por la *Etendue*, tiene que ser modulada a la baja por el tiempo que realmente se va a dedicar a un proyecto determinado. En el caso del telescopio de Javalambre, cada proyecto, producto de amplias colaboraciones y definido sobre criterios científicos, con una duración típica de varios años, ocupará todo el tiempo útil hasta su compleción, contando así con toda la potencialidad de los instrumentos.

El Observatorio de Javalambre se completará con otro telescopio de 80 cm de apertura y 1.7 grados de campo (diámetro) que se usará como auxiliar, para tareas de calibración y para otros

proyectos científicos. Y, por supuesto, con las instalaciones e infraestructuras necesarias para su funcionamiento (Figura 11).

Los telescopios contarán con cámaras CCD de gran formato como instrumentos de plano focal. La cámara para el telescopio de 2.5 m es particularmente compleja pues debe cubrir un campo de $47,2$ cm de diámetro. Se contempla la opción de montar un mosaico de *chips*, en principio un total de 14 de gran formato (110 millones de píxeles cada uno). Para el telescopio auxiliar la cámara contendrá un solo chip, similar a los anteriores.

Antes de finalizar, quizás sea conveniente dar, aunque sea brevemente, las razones por las que se ha escogido el Pico del Buitre, municipio de Arcos de las Salinas (Teruel), en la vertiente SE de la Sierra de Javalambre, para instalar nuestro Observatorio. Hay que comenzar diciendo que este lugar ya fue identificado hace casi 20 años como de gran calidad, a partir de un análisis general de las condiciones para la Astronomía en la península Ibérica. Por aquel entonces, el estudio del lugar se vio interrumpido por diferentes avatares y sólo fue posible tomar algunas medidas que, si bien no eran estadísticamente concluyentes, claramente indicaban que se trata de un lugar de alta calidad. Una vez que el proyecto de construir un Observatorio en Javalambre fuera positivamente reconsiderado en 2007, las medidas efectuadas a partir de Marzo de 2008, con instrumentos y monitores adecuados y homologados confirman que se trata de un lugar con grandes condiciones por la transparencia de la atmósfera, la oscuridad del cielo, el número de noches disponibles para la observación y la calidad de imagen (*seeing* en el lenguaje astronómico), que le sitúan en el primer nivel entre todos los conocidos (Figura 12).

El OAJ forma parte del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón, CEFCA (<http://www.cefca.es>), que fue implementado a finales de 2008 y que es el primer

Figura 10. Ilustración de las diferencias características de telescopios de campo grande y menor tamaño, frente a grandes telescopios de pequeño campo. El fondo es una imagen del *Hubble Deep Field*.

“ Se conoce como *Etendue* el producto del área colectora de un telescopio (en m^2) por el campo de visión (en grados cuadrados). ”

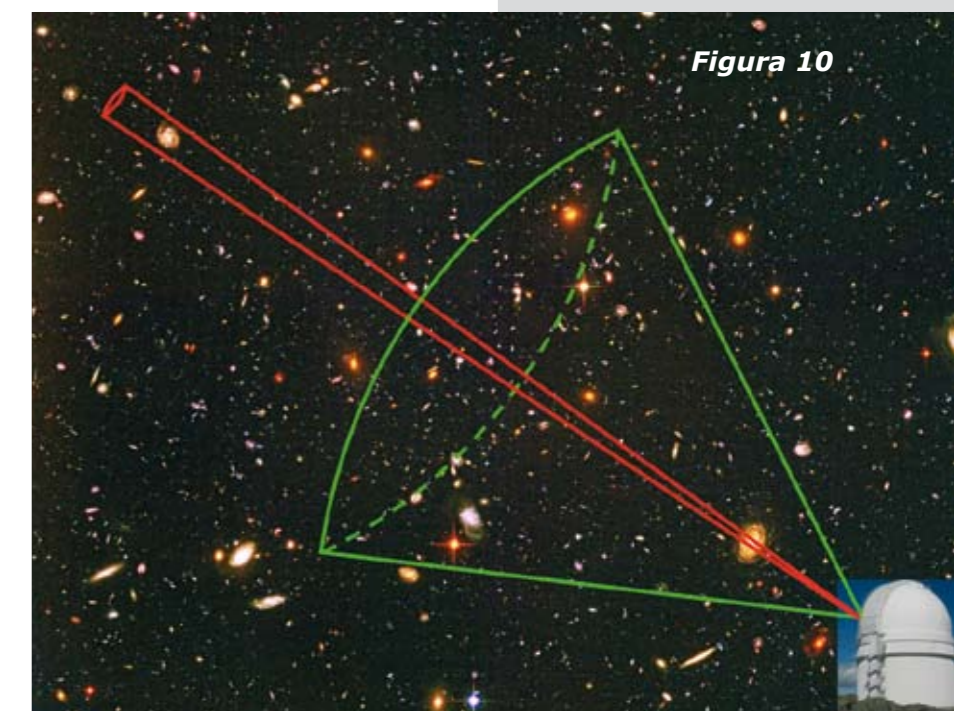
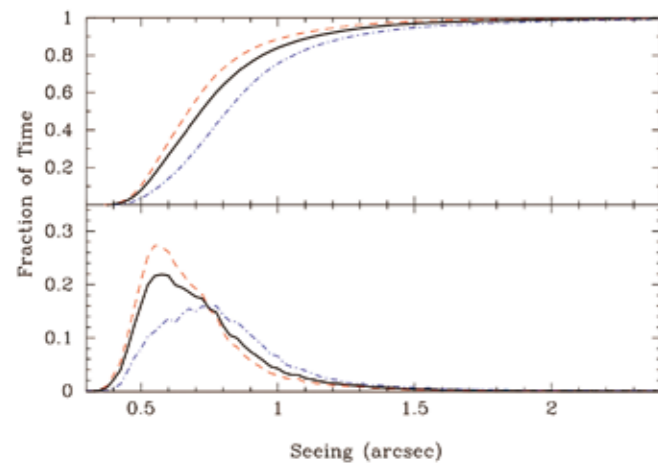


Figura 10

centro de investigación dedicado a la Astrofísica en Aragón. Su objetivo es precisamente la construcción del OAJ y la explotación científica de los datos que se generen. En este momento, el proyecto está completamente definido y se halla en fase de licitación. La previsión es que la firma del contrato pueda hacerse antes de finales de Enero 2010. A partir de dicha firma, los plazos para tener los telescopios instalados son de 12 meses para el telescopio auxiliar y de 105 semanas para el telescopio de 2.5 m. Una vez verificados y puestos a punto se inicia-



rá el primer cartografiado, el *Javalambre-PAU Astrophysical Survey*, al que ya hemos aludido anteriormente.

Además del reto que supone la construcción de los telescopios, con sus cámaras, y el Observatorio, nos enfrentamos a otro problema de considerables proporciones, el de la transmisión y tratamiento del enorme volumen de datos que se va a generar. Se prevé que, entre los dos telescopios, se produzca un total de 1,5 Terabytes de datos por noche de observación. Estos datos serán enviados al CEFGA (Teruel) en tiempo real para que allí sean primero validados y luego tratados, calibrados y analizados para extraer la información requerida. Los datos, una vez terminado ese proceso, serán archivados y puestos a disposición de la comunidad internacional. El

archivo final de ese primer cartografiado podría contener, incluidas las imágenes, por encima de 1 Petabyte de datos. Para hacer frente a este reto se contempla, en la planificación del CEFGA, la creación de la Unidad de Procesado y Archivo de Datos, UPAD, que tendrá la responsabilidad de todo el proceso de datos, desde el almacenamiento en el OAJ y su transmisión a la sede del CEFGA en Teruel, hasta la construcción de las "pipelines" de tratamiento, la constitución del Archivo y el servicio a la comunidad para que pueda acceder a ellos.

El CEFGA es, como hemos indicado, el primer centro de investigación específicamente dedicado a la Astrofísica en Aragón. Por otro lado la actividad investigadora en nuestra Comunidad en algunas ramas de la Astrofísica, en particular en Cosmología, es bien conoci-

“ El Pico del Buitre fue identificado, hace casi veinte años, como de gran calidad, a partir de un análisis general de las condiciones para la Astronomía en la Península Ibérica. ”

da. Pretendemos que el proyecto que encarna el CEFGA con el OAJ impulse la creación de un foro científico alrededor de problemas centrales de Física y Astrofísica, capaz de atraer a todos los científicos interesados y a estudiantes que pretendan iniciar una carrera de investigación en las líneas que el avance de la Astrofísica ha abierto. El proyecto, una vez completado el Observatorio Astrofísico de Javalambre, representa una magnífica oportunidad de investigación y desarrollo instrumental para, contando con esa nueva ventana al Universo de la que dispondremos en el Pico del Buitre, proponer las colaboraciones y proyectos necesarios para dar respuesta a los retos científicos que los desarrollos de los últimos decenios han planteado.

Mariano Moles

Director del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón Teruel

Figura 11. Boceto del Observatorio de Javalambre. El proyecto está en fase de licitación. Se pueden ver las dos cúpulas de los telescopios de 2.5m y 80cm de apertura, y los diferentes edificios.

Figura 12. Distribución diferencial (figura inferior) e integral (figura superior) de los valores medidos de seeing en el Pico del Buitre. La línea media es el promedio, mientras que las azul y roja corresponden a verano e invierno, respectivamente. Datos tomados desde Marzo/2008 hasta Septiembre/2009. El valor mediano de la distribución es 0.70". En la figura superior puede constatar que el valor de seeing es inferior a 0.8" en el ~70% de los casos. También se ha estudiado la estabilidad del seeing, encontrando que se mantiene estable en escalas típicas de 5 horas. Estos valores colocan al Pico del Buitre entre los mejores conocidos.

