

1933AChPh...6..110Zwicky F.: Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln
Helvetica Physica Acta, Vol. 6, p. 110-127 (journal existed from 1928 to 1999,
now available in scanned form from the publisher at
<http://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=hpa-001:1933:6::648>

Traducción por H. Andernach y M. M. López Gutiérrez (con ayuda del traductor
<https://tradukka.com/translate> y <https://translate.google.com>)

Términos especiales fueron interpretados como sigue:

- Fluchtgeschwindigkeit = velocidad de recesión (no de escape, ya que no hay escape aquí)
 - Nebel = nebulosa (no galaxia, para mantener el estilo original)
 - Perioden-Helligkeits-Beziehung = Relación Periodo-Brillo
(not period-luminosity, para preservar la palabra original "Helligkeit")
 - radiación penetrante = rayos cósmicos
-

El corrimiento al rojo de las nebulosas extragalácticas

por Fritz Zwicky, Helvetica Physica Acta, Vol. 6, p. 110-127 (1933)

RESUMEN. Este trabajo presenta las características más esenciales de las nebulosas extragalácticas, así como los métodos utilizados para investigar estas. En particular, el llamado corrimiento al rojo de las nebulosas extragalácticas se discute en detalle. Diversas teorías que se han propuesto para explicar este importante fenómeno, se discuten brevemente. Por último, se indicará en qué medida el corrimiento al rojo promete ser de importancia para el estudio de los rayos cósmicos.

1. Introducción

Se ha sabido durante mucho tiempo que hay ciertos objetos en el espacio, que aparecen, cuando se observa con telescopios pequeños, como muy borrosas manchas auto-luminosas. Estos objetos poseen estructuras de diferentes tipos. A menudo tienen forma esférica, a menudo elíptica, y muchos de ellos tienen un aspecto como espiral, razón por la cual en ocasiones se les llama nebulosas espirales. Gracias a la enorme resolución angular de modernos telescopios gigantes, era posible determinar que estas nebulosas se encuentran fuera de los límites de nuestra propia Vía Láctea. Imágenes tomadas con el telescopio de 100 pulgadas de Monte Wilson revelan que estas nebulosas son sistemas estelares similares al de nuestra propia Vía Láctea. En general, las nebulosas extragalácticas se distribuyen uniformemente sobre el cielo y, como se ha demostrado, también son distribuidas uniformemente en el espacio. Se presentan como individuos aislados o se agrupan en cúmulos. Las siguientes líneas intentan hacer un breve resumen de las características más importantes y una descripción de los métodos que hacen posible establecer estas características.

2. Distancias y características generales de las nebulosas extragalácticas

Como ya se mencionó, se logra, con la ayuda de modernos telescopios, resolver un buen número de nebulosas total o parcialmente, en estrellas individuales. En la gran nebulosa de Andrómeda, por ejemplo, un gran número de estrellas individuales se han observado. Recientemente también cúmulos estelares globulares han sido descubiertos en esta nebulosa, similar a los que se encuentran dentro de nuestra propia Vía Láctea. El hecho fortuito de la observación de estrellas individuales en las nebulosas abre dos maneras de determinar sus distancias.

A) Determinación de la distancia con la ayuda de la relación periodo-brillo para Cefeidas.

Cefeidas son estrellas cuyo brillo varía periódicamente con el tiempo. Los periodos están generalmente en el intervalo de uno hasta 60 días. La magnitud absoluta es función única del período, una función que se ha determinado para las estrellas de nuestro propio sistema [Vía Láctea]. Por lo tanto, si se conoce el período, es posible obtener la magnitud absoluta de estas cefeidas de esta relación. Si, además de eso, uno determina la magnitud aparente y lo compara con la magnitud absoluta, inmediatamente se obtiene la distancia de las estrellas. Se han observado varias cefeidas en la nebulosa de Andrómeda. Basado en esto, la distancia y diámetro de Andrómeda fueron determinados como 900.000 y 42.000 años luz, respectivamente. Para comparación, es importante recordar que nuestro sistema tiene un diámetro con límite superior el cual se estima en unos 100.000 años luz. Las distancias de otras ocho nebulosas se han encontrado de la misma manera. En las nebulosas más distantes que algunos millones de años de luz, las cefeidas individuales no pueden resolverse. Por lo tanto, para determinar su distancia deben ser ideados otros métodos.

B) Estadísticas de las estrellas más brillantes de una nebulosa

Este método se basa en el supuesto de que en los sistemas estelares extragalácticos la frecuencia relativa de la magnitud absoluta de las estrellas es la misma como en nuestro propio sistema. La experiencia con los sistemas vecinos previamente examinados están de hecho de acuerdo con este supuesto. La magnitud absoluta de estrellas más brillantes de nuestro sistema y sistemas vecinos resulta ser -6.1 en promedio, con una dispersión de menos de media magnitud. Aquí sólo notamos que se obtuvieron determinaciones de distancia similares con la ayuda de Novas.

C) Determinación de distancia de las nebulosas usando su magnitud aparente total.

Con la ayuda de los dos primeros métodos, las distancias de unas sesenta nebulosas extragalácticas se han encontrado. De la medida del brillo aparente y de la distancia conocida de estas nebulosas podemos deducir inmediatamente su brillo absoluto. De esta manera obtenemos la siguiente curva de distribución (Fig. 1).

Figura 1: H_P magnitud fotográfica absoluta (eje y: número de nebulosas)

La magnitud visual absoluta promedio de las nebulosas es -14.9 con una dispersión de cerca de cinco magnitudes y un ancho medio de la curva de distribución de cerca de dos magnitudes. Esta dispersión es, por desgracia, demasiado grande para permitir una determinación exacta de la distancia a una nebulosa individual a partir de su brillo aparente y curva de distribución de magnitud absoluta. Discutimos más adelante cómo es posible todavía determinar la distancia a ciertas nebulosas individuales con gran precisión. Sin embargo, el hecho siguiente nos permite encontrar la distancia de un gran número de nebulosas muy débiles. Como ya se mencionó, las nebulosas a menudo se agrupan en cúmulos densos, que contienen de 100 a 1000 individuos. Por supuesto que es muy probable que tal acumulación aparente de nebulosas también es una acumulación real en el espacio y que por lo tanto todas estas nebulosas están situadas a aproximadamente la misma distancia. Es relativamente fácil determinar la curva de distribución de magnitud aparente de las nebulosas de un cúmulo. Esta curva de distribución es prácticamente la misma que la curva de distribución de la magnitud absoluta de las sesenta nebulosas, cuyas distancias se han encontrado en (A) y (B). Esto demuestra que la acumulación aparente de nebulosas [en el cielo] corresponde a un enjambre denso real en el espacio exterior. Una comparación del promedio de brillo aparente de las nebulosas en el cúmulo con la magnitud absoluta promedio de -14.9 inmediatamente nos da la distancia del cúmulo. Las distancias de los siguientes grupos de nebulosas se determinaron de esta manera.

Tabla 1. Distancia en millones de años luz de varios cúmulos de galaxias

Coma-Virgo	6.
Pegaso	23.6
Piscis	22.8
Cáncer	29.3
Perseo	36.
Coma	45.
Osa Mayor I	72.
Leo	104.
Geminis	135.

El número de nebulosas por unidad de volumen en uno de estos enjambres densos es por lo menos cien veces mayor que el correspondiente número promedio de nebulosas individuales dispersadas en el espacio.

Es de interés incluir aquí algunos breves comentarios sobre otras características de nebulosas que son accesibles a la investigación con la ayuda del telescopio de 100 pulgadas.

Con respecto a la estructura del Universo, la primera y principal cuestión es si la distribución de las nebulosas en el espacio es uniforme o no. En el caso de uniformidad esperamos que el número de nebulosas en una cáscara esférica de radio r y constante de espesor dr ha de ser proporcional a r^2 , siempre y cuando se trata de un espacio euclidiano. Esta expectación corresponde en realidad muy exactamente a la realidad, es decir, para la parte del Universo dentro de alcance de el telescopio de 100 pulgadas. Esto no significa, por supuesto, que el espacio no podrá finalmente resultar no-euclidiano, una vez que somos capaces de penetrar más allá en el espacio.

No debemos dejar de mencionar que las conclusiones anteriores sólo son válidas

en caso que la absorción y dispersión de la luz en el espacio pueden ser ignoradas. El hallazgo de una distribución uniforme de las nebulosas a las mayores distancias alcanzables con un método que asume la práctica ausencia de absorción y dispersión, es de hecho por sí mismo casi una prueba de esta suposición. En efecto, una distribución uniforme real de las nebulosas sería sesgada por absorción, de tal manera que el número de nebulosas en cáscaras esféricas de espesor constante aumentaría más débilmente con la distancia que r^2 , y eventualmente disminuirá. En vista de que en efecto la existencia de gases y masas de polvo en el espacio interestelar de nuestro sistema [Vía Láctea] pueden demostrarse, aún así sería de gran importancia tener una prueba independiente de la transparencia del espacio intergaláctico, y mostrar que no es la curvatura del espacio, combinado con la absorción y dispersión, que podría aparentar una distribución uniforme de las nebulosas. Un estudio estadístico de los diámetros aparentes de nebulosas, por ejemplo, respondería a este propósito.

En teoría, la materia intergaláctica debería tener aproximadamente la presión de vapor de los sistemas de estrellas. Suponiendo que el Universo ha llegado un estado estacionario, es posible calcular esta presión (F. Zwicky, Proc. Nat. Acad. Sci., vol. 14, p. 592, 1928). Resulta ser muy pequeña e impediría prácticamente la detección de la materia intergaláctica.

Otra pregunta interesante se relaciona con los tipos espectrales de las nebulosas. La mayor parte de las nebulosas extragalácticas poseen espectros de absorción similares a la del sol con fuertes líneas salientes H y K del calcio y una intensa banda G de Ti (4308 Å), Fe (4308 Å) y Ca (4308 Å). Por lo tanto, las nebulosas pertenecen al tipo espectral G. El tipo espectral es independiente de la distancia, hasta donde las observaciones han llegado en distancia. Un desplazamiento del espectro dependiente de la distancia se discutirá más adelante. La anchura de las líneas de absorción es generalmente de varios Angstroms y también es independiente de la distancia.

Un pequeño porcentaje de las nebulosas observadas también muestra líneas de emisión (Nebulium), generalmente originarios de la región del núcleo de las nebulosas. Lamentablemente muy poco se sabe todavía sobre las condiciones físicas en dichos sistemas.

En tercer lugar es importante investigar la frecuencia relativa de las ya mencionadas diferentes formas de las nebulosas. La distribución estadística es aproximadamente 74% nebulosas espirales, 23% esféricas, y cerca de 3% muestran un aspecto irregular.

En cuarto lugar me gustaría mencionar la determinación de la distribución de la luminosidad dentro de una nebulosa. Esta investigación se ha realizado recientemente por E. Hubble en el Monte Wilson. Hubble obtiene el siguiente resultado preliminar. La luminosidad se puede expresar como una función universal $L(r, \alpha)$, donde r es la distancia desde el centro de la nebulosa y α es un parámetro adecuado. Mediante una variación de α , uno puede expresar la distribución de luminosidad en todas las nebulosas con gran precisión (aproximadamente 1%) con la misma función, de hecho hasta valores de r , para el cual la luminosidad ha disminuido a 1/1000 de la del centro. También es de importancia con respecto a la práctica falta de absorción y dispersión en el espacio intergaláctico, que la función de distribución de las alfas de las diferentes nebulosas es independiente de la distancia. Por cierto, cabe mencionar que L coincide con la función que corresponde a la distribución de luminosidad en una esfera de gas Emden isotérmica.

En quinto lugar, es de enorme importancia que las nebulosas a gran distancia muestren espectros corridos al rojo, en donde el desplazamiento se incrementa con la distancia. La discusión del llamado corrimiento al rojo es el tema principal del presente trabajo.

3. El corrimiento al rojo de la nebulosa extragaláctica. Relación entre distancia y corrimiento al rojo

V. M. Slipher del observatorio en Flagstaff, Arizona, fue el primero en observar que algunas nebulosas muestran un desplazamiento de sus espectros, que se corresponden a un efecto Doppler de hasta 1800 km/s. Sin embargo, Slipher no estableció ninguna relación entre el corrimiento al rojo y la distancia. Esta relación primero fue sospechada por G. Stroemberg (1925, ApJ 61, 353-388) en su estudio de la velocidad del sol en relación con los objetos más y más distantes. Él encontró que la velocidad media del sol, con relación al sistema de nebulosas vecinas, es grande, del orden de 500 km/s y que el grupo de las nebulosas utilizado muestra una expansión que parece depender de la distancia de la nebulosa individual.

Dado que en el momento de la investigación de Stroemberg no había ninguna determinación confiable de las distancias de las nebulosas conocidas, K. Lundmark intentó relacionar las altas velocidades observadas con la compactez de las imágenes fotográficas de la nebulosa. Esto se ha demostrado más tarde como un intento en la dirección correcta. Sin embargo, el intento seguía sin éxito positivo, ya que se vio después que el diámetro aparente de las nebulosas a la misma distancia presentan grandes variaciones.

E. Hubble trabajó en Mt. Wilson en la misma dirección. Primero, él también intentó que se relacionara el corrimiento al rojo con la concentración aparente de la nebulosa. Aquí partió de la idea de que el desplazamiento al rojo correspondería al conocido efecto de Einstein. Sin embargo, resultó que no era posible descubrir relaciones sensatas de esta manera.

En consecuencia, E. Hubble intentó relacionar el corrimiento al rojo con la distancia de las diferentes nebulosas. Este intento, como es sabido, desde entonces ha sido de gran éxito. Las nebulosas que estaban disponibles inicialmente para una investigación tenían distancias desde uno hasta a 6 millones de años luz. La discusión de todos los datos reveló una relación lineal entre el desplazamiento al rojo y la distancia, con el resultado de que el corrimiento al rojo corresponde a una velocidad de recesión aparente de 500 km/s por 1 millón parsec (1 parsec igual a aproximadamente 3.26 años luz). La dispersión era sin embargo relativamente grande, como por ejemplo la galaxia vecina de Andrómeda tiene un desplazamiento al violeta de aprox. 200 km/s, es decir, aparentemente o realmente se mueve hacia nosotros. A pesar de esto, fue encontrado más tarde que este corrimiento espectral, calculado aquí por primera vez, fue uno muy bueno. La mejor prueba del increíble cuidado del trabajo de Hubble es tal vez, que en base a la relación anterior hasta ahora podía predecir, dentro de pocos porcientos, el desplazamiento al rojo en cada caso, y de hecho para distancias hasta a treinta veces mayores que las [muestras de nebulosas] inicialmente usadas.

La dificultad de fotografiar los espectros de las nebulosas muy distantes se consiste en la necesidad de tiempos de exposición extremadamente largos. De hecho era necesario exponer placas de hasta cincuenta horas y más y parecían casi imposible penetrar más en el espacio con este método. En épocas más recientes grandes avances han sido realizados mediante un espectrógrafo cuyo lente de cámara tiene una razón focal de f/0.6. Sin embargo, con esto se tuvo que sacrificar mucho en la dispersión, y los espectros obtenidos son solamente cerca de 2 milímetros de largo. Sin embargo, los tiempos de exposición podrían reducirse hasta unas horas. Sin embargo, no parece posible penetrar más lejos en el espacio que unos 200 millones de años luz. La razón de esto radica en parte en la ubicación del telescopio de 100 pulgadas en las cercanías de la gran ciudad de Los Ángeles, ya que la iluminación del cielo nocturno y la fuerte dispersión de la luz hacia el telescopio lamentablemente limita las observaciones astronómicas en el Mt. Wilson, a un nivel por debajo del rendimiento real del telescopio. Para el telescopio de 200 pulgadas, actualmente en construcción para el California Institute of Technology se deberá seleccionar una ubicación más adecuada.

Los corrimientos al rojo de varios grupos de nebulosas, expresados como velocidades de recesión Doppler aparentes, se presentan en la siguiente tabla 2.

- (1) grupo de nebulosas
- (2) número de nebulosas en el grupo
- (3) diámetro aparente, en grados
- (4) distancia en 10^6 años luz
- (5) promedio de la velocidad, en km/s

Tabla 2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Virgo	(500)	12.	6.	890
Pegaso	100	1.	23.6	3810
Piscis	20	0.5	22.8	4630
Cáncer	150	1.5	29.3	4820
Perseo	500	2.5	36.	5230
Coma	800	1.7	45.	7500
Osa Mayor I	300	0.7	72.	11800
Leo	400	0.6	104.	19600
Geminis	(300)	-	135.	23500

Estos resultados se graficaron en la Fig. 2.

De esta compilación se desprende que las nebulosas extragalácticas tienen velocidades que son proporcionales a su distancia. La velocidad específica, por millones de parsec, es

$$v_s = 558 \text{ km/s} \quad (1)$$

(véase E. Hubble y M.L. Humason, ApJ 74, 43, 1931. En este trabajo se puede encontrar también la bibliografía más esencial.)

El corrimiento al rojo de cada nebulosa individual en promedio se basa en los corrimientos de al menos tres de las líneas espectrales. Éstos son generalmente las líneas H y K, la banda G (4303 A) y de vez en cuando una de las líneas H_{delta} (4101 A), H_{gamma} (4340 A), Fe (4384 A) y H_{beta} (4861 A). La incertidumbre en el corrimiento al rojo del grupo de nebulosas en Leo resultan de esta manera por ejemplo, en $v = 19621 \pm 300 \text{ km/s}$.

Las distintas líneas de absorción sufren el mismo desplazamiento relativo, así como se espera para el efecto Doppler. Así que tenemos para una cierta nebulosa:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \text{constante} = K = v/c = \kappa r \quad (2)$$

independientemente de la longitud de onda λ y convenientemente el corrimiento puede expresarse, como lo hemos hecho, en unidades de velocidad. El mismo valor de K por lo tanto también se aplica al corrimiento máximo del espectro continuo de emisión.

Hay que tener en cuenta que la figura 1 muestra la media de la velocidad Doppler de los grupos de las nebulosas. Esta velocidad es el promedio de los valores de varias nebulosas individuales (de 2 a 9) en cada grupo. Es de gran importancia para la teoría de los efectos discutidos aquí, que las velocidades de los miembros individuales de un grupo pueden diferir de la media. En el cúmulo de Coma, por ejemplo, que hasta ahora es el mejor investigado, se han medido los siguientes valores individuales.

Velocidades aparentes en el cúmulo de Coma

v = 8500 km/s	6000 km/s
7900	6700
7600	6600
7000	5100(?)

Es posible que el último valor de 5100 km/s corresponde a una nebulosa de campo que no pertenece al sistema de Coma, pero sólo se proyecta sobre él. La probabilidad de esta hipótesis sin embargo no es muy grande (1/16). Incluso si nosotros omitimos la nebulosa, las variaciones en el sistema de Coma siguen siendo muy grandes. En este contexto resulta de interés, para recordar al lector que la densidad media en el cúmulo de Coma es la más grande hasta ahora observada.

Una vez que la relación entre la distancia y el corrimiento al rojo es conocida, podemos utilizar a la relación para deducir las distancias de las nebulosas individuales, si sus corrimientos al rojo se miden espectroscópicamente. También, podemos usarlo como un control independiente de la fiabilidad de los métodos mencionados anteriormente para la determinación de distancia. Para hacer esto, de hecho sólo tenemos que determinar la distribución de luminosidad de todas las nebulosas individuales con el mismo corrimiento al rojo. Esta nueva curva de distribución debe coincidir con la de la figura 1, si nuestra determinación de distancia original fuera correcta. Esto es, de hecho, muy aproximadamente el caso.

Como se mencionó anteriormente, el corrimiento al rojo significa un desplazamiento de todo el espectro de emisión de la nebulosa. Además de la disminución de la aparente magnitud fotográfica en dependencia de la distancia geométrica, hay todavía otro efecto de atenuación causado por el corrimiento al rojo. El problema de la distribución espacial de las nebulosas a distancias grandes no está tan sólo estrechamente vinculada con la curvatura y la absorción del espacio, sino también con el corrimiento al rojo que complica toda la situación mucho.

Al final hay que destacar algunos resultados de van Maanen, que parecen estar en contradicción con la determinación de distancias de Hubble. Durante un período de cerca de veinte años, van Maanen ha medido los movimientos aparentes (en unidades angulares) de nebulosas en la esfera celeste. Puesto que las velocidades angulares correspondientes de las nebulosas más cercana asciende a sólo 0,01 segundos de arco por año, sólo las nebulosas bien definidas, como

con núcleos estelares, son útiles para este propósito, ya que la definición de coordenadas de la nebulosa es más difícil debido a la borrosidad de su imagen fotográfica. Si uno combina velocidades angulares de van Maanen con distancias de Hubble, se obtiene velocidades muy altas. Para NGC 4051, que según Hubble se encuentra a una distancia de 4 millones de años-luz, y tiene una velocidad radial aparente de 650 km/s, van Maanen mide una velocidad angular de 0,015" por año, que se traduce en una velocidad verdadera de 94.000 km/s. Esto constituye un gran problema. Una solución trivial que en principio no parece ser imposible, puede ser que los movimientos observados por van Maanen no se originan en la nebulosa, pero pueden ser atribuidos al sistema de referencia utilizado para el fondo estelar. Hay que destacar sin embargo que van Maanen ha encontrado discrepancias similares para 13 nebulosas. Otro resultado fue que estas nebulosas parecen alejarse del polo de la Vía Láctea, que parece difícil de explicar con un movimiento del sistema de referencia.

Igualmente importante es la determinación de van Maanen de la rotación de nebulosas espirales extragalácticas. Messier 33, según Hubble a una distancia de 900000 años-luz, van Maanen observa, sobrepuesto en el movimiento transversal mencionado, una rotación de la nebulosa entera, cuyos componentes para objetos individuales son del orden de 0.012" hasta 0.024" por año. Con la distancia mencionada, resulta una velocidad de rotación de aproximadamente 33000 km/s, mientras que por ejemplo, para NGC 4594 F.G. Pease ha medido, en base al efecto Doppler en ambos extremos de su diámetro, una rotación de sólo 800 km/s. [Para Messier 33 las observaciones no se ha completado. Sin embargo, las velocidades de rotación son sólo cerca de 50 km/s.]

Si uno no atribuye los resultados de van Maanen a errores observacionales, pero toma a estos como característica de la nebulosa en sí misma y uno no está preparado para abandonar las determinaciones de la distancia de Hubble, uno se enfrenta a un grave problema.

4. Especulaciones sobre el corrimiento al rojo.

Una teoría completa del corrimiento al rojo de tiene que llevar a resultados que cumplan los siguientes requisitos.

1. El corrimiento al rojo es análogo a un efecto Doppler, es decir, $\Delta\lambda / \lambda$ para una nebulosa dada es una constante.
2. La aparente velocidad Doppler es proporcional a la distancia r y asciende a 558 kilómetros por segundo por millón de parsecs.
3. No existe notable absorción y dispersión de la luz en el espacio, que se puede asociar con el corrimiento al rojo.
4. La definición de las imágenes ópticas de las nebulosas es tan buena como lo esperado por el poder de resolución de los instrumentos. La distancia de los objetos aparentemente desempeña el papel esperado por consideraciones geométricas.
5. Los tipos espectrales de las nebulosas son esencialmente independientes de la distancia.
6. La gran dispersión de los valores individuales de las velocidades radiales de las nebulosas de grupos densos deben explicarse en el contexto del corrimiento al rojo.
7. La velocidad de la luz, en su largo camino de la nebulosa a nosotros, es prácticamente la misma velocidad de la luz que conocemos de mediciones terrestres. Esto fue encontrado por mediciones de la aberración en nebulosas por Stroemberg y van Biesbroeck.
8. Una teoría del corrimiento al rojo, que al mismo tiempo no proporciona una explicación de los resultados de van Maanen, es, como mínimo, insatisfactoria.

Los hechos mencionados reflejan el material observado hasta una distancia de unos 150 millones de años-luz. Para su explicación en la actualidad hay dos sugerencias generales. La primera incluye todas las teorías de carácter cosmológico, que se basan en la teoría de la relatividad. En la segunda se asume una interacción de la luz con la materia en el Universo.

A) Teorías cosmológicas.

En los últimos años se hicieron un gran número de intentos para explicar el corrimiento al rojo en base a la teoría de la relatividad. Algunas ideas

esenciales en este aspecto son las siguientes.

La teoría general de la relatividad ha dado lugar a dos puntos de vista con respecto a la estructura del espacio. El primero de ellos está representado por el mundo cuasi-esférico de Einstein, mientras que de Sitter se deriva la posibilidad de un espacio hiperbólico para el caso de densidad de masa extremadamente pequeña.

Mientras que la geometría del espacio de Einstein no conduce directamente a un corrimiento al rojo, necesariamente está vinculada con el universo de de Sitter. Sin embargo, R. C. Tolman ha demostrado que para este último caso el valor de $\Delta \lambda / \lambda$ no sólo depende de la distancia de la nebulosa, sino también de su velocidad propia. Se deduce entonces que, aparte del corrimiento al rojo uno también tiene que esperar un corrimiento al azul que en promedio sería más pequeño, pero sin embargo de la misma magnitud como los corrimientos al rojo, lo cual contradice las observaciones. Por lo tanto no era posible relacionar el corrimiento al rojo directamente a la curvatura del espacio.

Una sugerencia más importante proviene de Friedmann, Tolman, Lemaitre y Eddington, cuyo trabajo sugiere que un espacio estático, según la teoría de la relatividad, es dinámicamente inestable y por lo tanto comienza a contraerse o expandirse. Este resultado fue interpretado entonces por él [el autor no deja claro por QUIEN] que el corrimiento al rojo correspondería a una expansión real del Universo. Esta propuesta desde entonces ha sido discutido por muchos investigadores. La formulación más sencilla fue dada recientemente por Einstein y de Sitter (Einstein A. y W. de Sitter, Proc. Nat. Acad. Sci., Vol. 18, p. 213, 1932). Estos dos investigadores temporalmente han abandonado la idea de una curvatura global del espacio. La curvatura del espacio fue esencialmente una consecuencia de la introducción de la llamada constante cosmológica Λ en las ecuaciones de campo de Einstein, que es equivalente a postular una fuerza repulsiva que compensa la atracción de Newton para distancias muy grandes. Este postulado era históricamente necesario para comprender la existencia de una densidad media no despreciable que de lo contrario conduce a potenciales gravitatorios infinitos en el caso límite de un espacio estático infinito. Esta última dificultad sin embargo desaparece automáticamente, si todas las masas en el espacio se alejan, o se acercan uno entre los otros. Omitiendo la constante cosmológica Λ y la curvatura media, la expansión de la materia entonces puede ser relacionada directamente con la densidad media. Una expansión de 500 km/s por millón de parsecs, según Einstein y de Sitter, corresponde a una densidad media $\rho \sim 10^{-28}$ g/cm³. En base a observaciones de la materia auto-luminosa, Hubble estima $\rho \sim 10^{-31}$ g/cm³. Por supuesto es posible que la materia luminosa, junto con la oscura (fría), tenga una densidad significativamente mayor, y el valor de $\rho \sim 10^{-28}$ g/cm³ por lo tanto, no parece irrazonable. Además la teoría de Einstein da la siguiente relación más precisa para el corrimiento al rojo

$$\Delta \lambda / \lambda = \kappa * r [1 + 7 \Delta \lambda / (4 \lambda)]. \quad (3)$$

Esto significa que, para distancias grandes, el corrimiento al rojo debe aumentar más fuerte que linealmente con la distancia. En base al material observado anterior, lamentablemente no es posible todavía demostrar esta importante conclusión. Los valores observados más recientes, de $\Delta \lambda / \lambda \sim 1/7$ para las mayores distancias, son sin embargo suficientemente grandes como para esperar desviaciones considerables (25%) de la relación lineal.

La teoría también conduce a ciertas conclusiones en cuanto a la distribución de brillos, cantidad de nebulosas, diámetro, etc., en función de la distancia, los cuales igualmente aún no se han comprobado.

Hasta ahora ninguna de las teorías cosmológicas ha abordado el problema de la gran dispersión de velocidad en cúmulos densos, tales como el sistema de Coma.

B) Influencia directa de la materia existente en el espacio en la frecuencia de la luz

Hace varios años ya intenté tomar en cuenta varios efectos físicos tales como el efecto Compton en electrones estacionarios o en movimiento en el espacio exterior, el efecto Raman, etc., para explicar el corrimiento al rojo (F. Zwicky, Proc. Nat. Acad. Sci., Vol. 15, p. 773, 1929). Resultó que ninguno de ellos puede jugar un papel importante. Al considerar los efectos, que tienen su origen en una interacción inmediata espacial entre la luz y la materia, resulta imposible explicar la transparencia del espacio intergaláctico.

En cambio, yo había sugerido otro posible efecto, que sin embargo será difícilmente observable en la Tierra, pero para su existencia se pueden presentar

algunas razones teóricas. Según la teoría de la relatividad, cada fotón, o cuanto de luz, de la frecuencia $\{\nu\}$ puede asignarse una masa tanto inerte como gravitatoria, de $h \{\nu\} / c^2$. Por lo tanto, existe una interacción (atracción) entre la luz y la materia. Si el fotón es emitido y absorbido en dos diferentes puntos, P1 y P2, respectivamente, con idénticos potenciales gravitacionales, entonces, en el camino de P1 a P2, el fotón perderá una cierta cantidad de movimiento [impulso] lineal y lo liberará a la materia. Este fotón enrojecerá. Este efecto podría ser descrito como fricción gravitacional y es causada básicamente por la velocidad finita de la propagación de efectos gravitatorios. La fuerza del efecto depende en la densidad media de la materia, así como de su distribución. En este caso el corrimiento al rojo Delta $\{\lambda\} / \{\lambda\}$ depende no sólo de distancia, sino también en la la distribución de la materia. Estudios para probar estas conclusiones están en curso.

En conclusión hay que decir que ninguna de las teorías actualmente propuestas es satisfactoria. Todos se han desarrollado sobre bases extremadamente hipotéticas, y ninguno de éstos ha permitido descubrir nuevas relaciones físicas.

5. Comentarios sobre la dispersión de la velocidad en el cúmulo de Coma de nebulosas

Como hemos visto en la secc. 3, existen en el cúmulo de Coma diferencias evidentes en la velocidad de al menos 1500 a 2000 km/s. En relación con esta enorme dispersión de la velocidad se pueden hacer las siguientes consideraciones.

1. Si uno asume que el sistema de Coma ha alcanzado un estado mecánicamente estacionario, se desprende del teorema Virial que

$$\langle E_{kin} \rangle = -1/2 \langle E_{pot} \rangle$$

donde $\langle E_{kin} \rangle$ y $\langle E_{pot} \rangle$ denotan las energías cinéticas y potenciales medias de, por ejemplo, una unidad de masa en el sistema. A efectos de valoración, asumimos que la materia se distribuye uniformemente en el cúmulo. El cúmulo tiene un radio R de aproximadamente 1 millón de años luz (igual a 10^{24} cm) y contiene 800 nebulosas individuales de una masa de 10^9 masas solares. La masa total M del sistema es por lo tanto

$$M \sim 800 \times 10^9 \times 2 \times 10^{33} = 1.6 \times 10^{45} \text{ g.} \quad (5)$$

De esto tenemos para la energía potencial total Omega:

$$\text{Omega} = -(3/5) \text{Gamma} M^2/R \quad (6)$$

donde Gamma = constante gravitacional

$$\text{o } \langle E_{pot} \rangle = \text{Omega}/M \sim -64 \times 10^{12} \text{ cm}^2/\text{s}^2 \quad (7)$$

y además

$$\langle E_{kin} \rangle = \langle v^2 \rangle / 2 = -E_{pot} / 2 = 32 \times 10^{12} \text{ cm}^2/\text{s}^2$$

$$\text{sqrt}\{\langle v^2 \rangle\} = 80 \text{ km/s} \quad (8)$$

Con el fin de obtener, como se observa, un efecto Doppler de tamaño medio de 1000 km/s o más, la densidad promedio en el sistema de Coma tendría que ser por lo menos 400 veces mayor que la derivada en base a observaciones de la materia luminosa [Esto sería aproximadamente de acuerdo con la opinión de Einstein y de Sitter como comentamos en la secc. 4.]. Si esto es verificado, conduciría al resultado sorprendente que la materia oscura existe en una densidad mucho mayor que la materia luminosa.

2. También uno puede asumir que el sistema de Coma no está en equilibrio estacionario, pero que la energía potencial disponible total aparece como energía cinética. Nosotros tendríamos entonces $E_{kin} = - E_{pot}$.

Así uno puede ahorrar sólo un factor de 2 respecto a la hipótesis 1 y la necesidad de una enorme densidad de materia oscura persiste.

3. Que la densidad media en el cúmulo de Coma esté determinado puramente por materia luminosa (el valor M arriba mencionado). Entonces las grandes velocidades no pueden ser explicadas en base a consideraciones del tipo 1 ó 2 anteriores. Si las velocidades observadas son reales de todos modos, el sistema de Coma debe desintegrarse en el curso del tiempo. El resultado final de esta expansión serían 800 nebulosas individuales (nebulosas de campo), que tendrían velocidades, como se muestra en la 2., del mismo orden de los originales (1000 a 2000 km/s). En analogía, habría que esperar que nebulosas con tan grandes velocidades propias también se pueden observar en el presente estado evolutivo del Universo. Esta conclusión no coincide con los hechos experimentales, que muestra que la dispersión de velocidad de las nebulosas individuales no supera los 200 km/s.

4. También puede intentarse de considerar las velocidades como aparentes, interpretándolas como debido al corrimiento al rojo de Einstein. Suponiendo la masa anterior M , uno tendría para el correspondiente cambio de la longitud de onda

$$\Delta\{\lambda\}/\{\lambda\} \sim E_{\text{pot}}/c^2 \sim 3.5 \times 10^{-8} \quad (10)$$

que equivale a una velocidad de solamente 10 m/s. Así, con el fin de llegar a una explicación de la dispersión de gran velocidad, uno tendría que permitir una densidad de materia oscura mucho mayor que bajo las suposiciones 1 ó 2.

Estas consideraciones indican que la gran dispersión de velocidad en el sistema de Coma (y otros grupos densos de nebulosas) conlleva un problema no resuelto.

6. Los rayos cósmicos y el corrimiento al rojo

Comparando la intensidad de la luz visible de nuestra Vía Láctea (L_m) con la intensidad de la luz (L_w), que nos llega del resto del Universo, se obtiene

$$L_m/L_w \gg 1 \quad (11).$$

Bajo el supuesto de que los rayos cósmicos no son de carácter local, se obtiene para éstos la relación de intensidades, S , análoga a la de (11)

$$S_m/S_w < 0.01. \quad (12)$$

Esto se desprende de la práctica ausencia de variaciones de rayos cósmicos con tiempo sideral. Como ya lo comentamos en otra parte (F. Zwicky, Phys Rev., Enero de 1933) la desigualdad (12) es difícil de entender porque los rayos cósmicos se originan a distancias muy grandes, llegando a la tierra con energía muy reducida como resultado del corrimiento al rojo. Si por ejemplo el corrimiento al rojo fuera consistentemente proporcional a la distancia, entonces los cuantos de luz de una distancia mayor que 2000 millones de años luz nos llegarían con cero energía. (Esta consideración implica por cierto, que incluso en presencia de un número infinito de estrellas en el Universo, la intensidad de la luz tendría un valor finito, y bien definida, en todas partes). Bajo supuestos razonables sobre el tipo de reacción que produce rayos cósmicos, la desigualdad (11) es muy difícil de entender y la principal dificultad yace, como se indica, en la existencia del corrimiento al rojo (F. Zwicky, Phys Rev., Enero de 1933).

Por último me gustaría señalar que la coexistencia de las dos desigualdades (11) y (12) plantean grandes dificultades para algunas opiniones recientes sobre el origen de los rayos cósmicos. Por ejemplo, G. Lemaitre ha propuesto que se pueden considerar rayos cósmicos como remanentes de ciertos procesos super-radioactivos que sucedieron hace mucho tiempo. Sin embargo, al mismo tiempo una cantidad correspondientemente enorme de luz visible y ultravioleta debio haber sido emitida. Dado que los gases interestelares (al igual como nuestra atmósfera) absorben los rayos cósmicos más que la luz visible, la coexistencia de las desigualdades (11) y (12) es incomprensible.

También es importante, en este contexto, señalar los siguientes hechos interesantes. Un cinturón de límites de forma irregular que se extiende a lo largo de la Vía Láctea y desde aproximadamente $-10\{\text{grados}\}$ a $+10\{\text{grados}\}$ de latitud Galáctica, bloqueando completamente nuestra visión del espacio extragaláctico, es decir, ninguna nebulosa extragaláctica puede ser observada en esta banda. Se sabe que se puede atribuir parte de esta absorción a masas de polvo muy extendidas y densas. Si los rayos cósmicos son de origen extragaláctico, uno realmente esperaría que también se absorbieran a lo largo de la Vía Láctea, es decir, se debe observar en la Tierra una variación de intensidad de rayos cósmicos con el tiempo sideral. Ya que dicha variación no se encuentra, uno se siente tentado a concluir que los rayos cósmicos no pueden ser de origen extragaláctico. Sin embargo, la densidad y medida de la materia interestelar en la Vía Láctea debe ser examinada más a fondo.

El presente trabajo surgió de las numerosas conversaciones con investigadores del Observatorio de Monte Wilson trabajando en esta área. Estoy particularmente agradecido con el Dr. W. Baade por muchos consejos valiosos.

California Institute of Technology, Pasadena.