

En expansión acelerada: el Premio Nobel de Física 2011

Vladimir Avila-Reese

Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México

Luis Felipe Rodríguez Jorge

Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

Un Universo en expansión

En 1929 el astrónomo estadounidense Edwin Hubble había acumulado observaciones de 24 galaxias que le permitieron cambiar nuestra concepción del Universo. Las galaxias son sistemas autogravitantes donde se forman y evolucionan las estrellas, en interacción con el gas interestelar. Nosotros somos parte de una galaxia constituida por 200,000 millones de estrellas, la Vía Láctea. Pero a Hubble no le interesaba entender a nuestra galaxia sino a las galaxias externas, cuyos movimientos podrían estar trazando la dinámica global del Universo.

Hubble echó mano del efecto Doppler para medir las velocidades de las galaxias. La luz es una onda y así como el sonido de la sirena de una ambulancia cambia de tono con el movimiento del vehículo respecto a un observador estacionario, es posible decir si la galaxia en cuestión se aleja o se acerca respecto a la nuestra y a qué velocidad lo hace. Pero la tarea más difícil fue la de medir las distancias a las galaxias. Para ello hizo uso de patrones lumínicos, como son por ejemplo las estrellas Cefeidas. Éstas son estrellas muy luminosas y pulsantes, cuyo periodo de pulsación define de manera empírica su luminosidad (potencia). Logrando resolver entonces estrellas Cefeidas en las galaxias y midiéndoles su curva de luz y su flujo F (brillo) promedio, Hubble estimó su luminosidad

intrínseca L y calculó las distancias a las galaxias anfitrionas con la simple fórmula

$$D_L = \sqrt{L/4\pi F}.$$

Hubble encontró un sorprendente resultado: la mayoría de las galaxias que él estudió, se alejaban con una velocidad V_r proporcional a su distancia D_L : $V_r = H_0 \times D_L$, donde H_0 es la constante de Hubble. Esta ley cinemática del Universo local se interpreta como evidencia de una expansión uniforme del espacio: todas las galaxias se alejan unas de otras con una tasa de expansión única H_0 . El medir con precisión la tasa actual de expansión pasó a ser uno de los principales retos de la cosmología observational durante décadas. En unidades de km s^{-1} para la velocidad y Mpc para la distancia ($1\text{Mpc} = 3.26 \times 10^6$ años luz), las mediciones actuales arrojan que $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$ con una precisión mejor que el 5%. El inverso de esta tasa, 1.3×10^{10} años, es el tiempo desde el origen del Universo, si dicha tasa fuese constante. Pero no lo es.

El descubrimiento de Hubble impulsó la teoría cosmológica basada en la relatividad general desarrollada por Albert Einstein años antes y según la cual el Universo no puede ser estacionario. Al estar expandiéndose actualmente el espacio, significa que en el pasado las distancias eran más y más pequeñas. La descripción de las condiciones físicas de la materia y radiación en épocas remotas, donde todo era más denso y caliente, dio lugar a la así llamada Teoría de la Gran Explosión; la teoría que mejor

describe nuestro Universo. El resultado de Hubble fue tan importante, que muchos creen que merecía ser reconocido con el Premio Nobel de Física. Falleció en 1949 sin haberlo recibido.

En el contexto de la Teoría de la Gran Explosión, hay múltiples posibilidades de expansión e, incluso, luego de llegar a un máximo, podría haber contracción. La tasa de expansión H_0 que se mide actualmente en realidad cambia con el tiempo cósmico t y esto depende de la densidad de materia-energía de las diferentes componentes del Universo y el tipo de curvatura que tiene el espacio. Si en el Universo hubiese sólo radiación y materia (tanto la ordinaria, llamada bariónica, como la oscura que aparentemente es cerca de 6 veces más abundante), entonces la expansión tendría que frenarse por la acción atractiva de la gravedad que producen estas componentes. Ése es el comportamiento que se esperaba confirmar con las observaciones.

¡La expansión se acelera!

Durante décadas, muchos astrónomos dedicaron sus esfuerzos a determinar los parámetros cosmológicos locales, mismos que establecen el modelo de nuestro Universo y la ley con la que se expande pero que son insuficientes para lograr alta precisión; hay que combinarlos con más sondeos (ver *Bol. Soc. Mex. Fis.* **23**, (3) 143-146 (2009)).

Los sondeos basados en determinaciones de distancias a diferentes épocas, de tal forma que se construye de manera más directa la historia de expansión, no podían ser aplicados por limitaciones observacionales. Como la luz que nos llega de los cuerpos cósmicos viaja a una velocidad muy grande pero finita, al estudiar cuerpos cósmicos muy lejanos estamos en realidad viendo el pasado. Entonces, para estudiar el pasado del Universo, hay que observar objetos muy distantes y, si además queremos medirles distancias, esos objetos tienen que funcionar como patrones lumínicos. Tarea nada fácil.

El reto lo asumieron en los años 90 dos grupos internacionales de astrónomos en el que jugaron un papel importante los observatorios en Cerro Calán y Cerro Tololo, Chile, así como los chilenos Mario Hamuy y José Maza, entre otros. Existe un tipo de explosiones estelares, llamadas supernovas de tipo Ia (SN Ia), que pueden verse a grandes distancias durante días y semanas posteriores a la explosión. Estas explosiones se espera sean similares en su luminosidad intrínseca, ya que provienen de superar la masa crítica de una estrella enana (1.4 masas solares) al acretar materia de una estrella compañera. En realidad, las observaciones de las SN Ia cercanas muestran que sus luminosida-

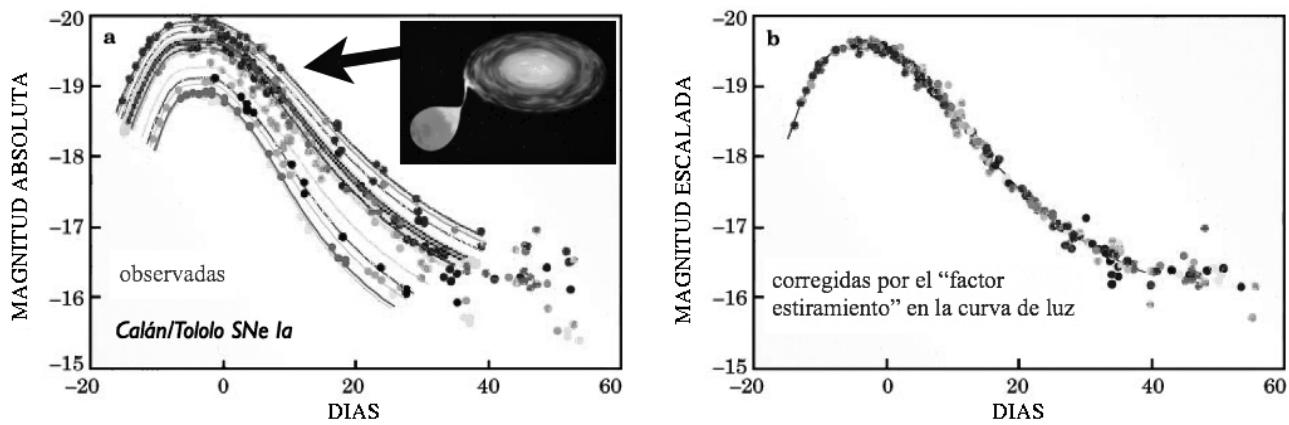


Figura 1. Curvas de luz de varias supernovas tipo Ia. Los puntos son observaciones fotométricas y las líneas corresponden a la plantilla (modelo) que mejor ajusta a cada caso. Las supernovas más luminosas tienen curvas de luz más extendidas que las menos luminosas. Si se “corrigen” las curvas por esta corrección, se obtiene una curva escalada que es prácticamente la misma para todos los eventos. Es esto lo que hace a las SN Ia patrones lumínicos.

des al máximo pueden variar hasta por una magnitud (un factor 2.5, Fig. 1a). Sin embargo, en 1993 Mark Phillips encontró una correlación entre la forma de la curva de luz y la luminosidad: las supernovas menos luminosas, tienen curvas de luz que decrecen más rápido con el pasar de los días. Si se “corrige” la luminosidad de las supernovas por la forma de su curva de luz, ahora sí, todas tienen una luminosidad al máximo prácticamente igual (Fig. 1b) y pueden ser usadas como patrones lumínicos para medir distancias hasta ellas.

Lo que seguía era cazar SN Ia muy alejadas. Estas explosiones no son tan comunes. Por ejemplo, en galaxias como la nuestra se estima que pueden ocurrir alrededor de 2 cada 1000 años. Entonces para descubrir algunas SN Ia en un año, hay que monitorear con buena precisión fotométrica decenas de miles de galaxias alejadas. Esta tarea la emprendieron en los años 90, de manera entusiasta, las dos grandes colaboraciones internacionales mencionadas arriba¹, una encabezada por Saul Perlmutter y otra por Brian Schmidt y Adam Riess, los tres nacidos en los EUA, pero con Schmidt realizando la mayor parte de su carrera profesional en Australia. Son estos tres científicos los que recibieron el Premio Nobel de Física en 2011. En los artículos en los que planteaban cómo realizarían sus respectivos proyectos, ambos grupos hablaban de determinar la desaceleración del Universo mediante el estudio de SN Ia en galaxias lejanas. La naturaleza les guardaba una enorme sorpresa.

La metodología para cazar SN “cosmológicas” tenía que ser óptima. Se usaron telescopios ópticos de tamaño intermedio equipados con detectores CCD para barrer campos fijos del cielo, con miles de galaxias cada uno, en las oscuras noches de luna nueva. Tres semanas después, cercanos a la siguiente luna nueva, se volvía a barrer los campos observados para así descubrir galaxias donde su brillo se haya incrementado por una posible SN Ia (candidata). Como el tiempo de crecimiento de la

curva de luz de las SN Ia es mayor a 3 semanas, entonces es alta la probabilidad de que la candidata aún no haya llegado a su máximo. Las SN Ia candidatas eran de inmediato monitoreadas durante semanas con los telescopios más potentes del mundo, incluyendo el Telescopio Espacial Hubble, para así construir su curva de luz, ver si se trata de una SN Ia, corregir por la relación de Phillips y determinar finalmente la luminosidad intrínseca de la SN. Con la luminosidad se puede entonces calcular la distancia según la fórmula $D_L = \sqrt{L/4\pi F}$.

Por otro lado, midiendo el factor de corrimiento al rojo z de las líneas espectrales de la galaxia anfitriona, se calcula el factor de escala que tuvo el Universo cuando la SN explotó. El factor de escala $a(t)$ es una cantidad adimensional que dice cuánto las distancias cambiaron por la expansión entre una época y otra y se normaliza a 1 al día de hoy. La longitud de onda de la radiación crece (se corre al rojo) debido la expansión del Universo proporcionalmente a $a(t)$.

En un medio en expansión la distancia depende de cómo se la mida. Si se trata de la distancia lumínica D_L , el flujo F no sólo se diluye como $1/D_L^2$, sino que además se ve afectado por la expansión del espacio y la dilatación del tiempo entre la fuente y el observador. En otras palabras, D_L en función de a (o z) depende del modelo cosmológico que dicta cómo se expande el espacio. Cada modelo cosmológico es una curva en el diagrama moderno de Hubble, $D_L - z$. Si en este diagrama se ponen muchos puntos observacionales con barras de error pequeñas, entonces con métodos de ajuste como el de mínimos cuadrados se pueden constreñir algunos parámetros del modelo cosmológico, en particular los relacionados a la historia de la expansión del Universo.

Ambos grupos publicaron sus primeros resultados en 1998 y 1999 usando todavía pocas SN Ia cosmológicas con corrimientos al rojo $z < 1$ o $a > 0.5$. Aunque todavía con mucha incertidumbre, los datos en el diagrama $D_L - z$ se alejaban sistemáticamente de las curvas correspondientes a modelos cosmológicos relativistas con desaceleración (Fig. 2). En vez de la distancia D_L , los astrónomos grafican el módulo de distancia en magnitudes; en

¹ Desde un punto de vista sociológico es interesante comentar que el grupo de Perlmutter venía del estudio de la física de partículas y es muy jerárquico y disciplinado. Por otro lado, el grupo de Schmidt y Riess es de astrónomos, que somos más anárquicos en nuestra manera de trabajar.

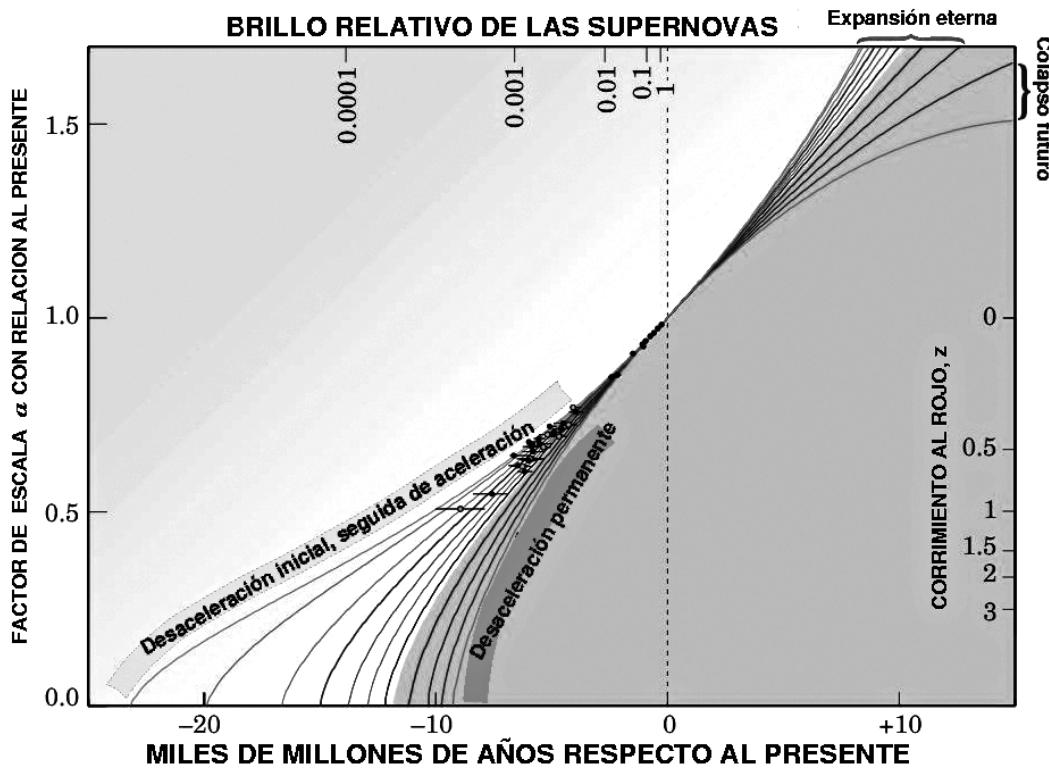


Figura 2. Historia de la expansión cósmica constreñida por las SN Ia (puntos con barras de error) suponiendo una geometría plana. El factor de escala se considera igual a 1 al día de hoy, de tal manera que $a = a/(1+z)$. El tiempo cósmico t es con relación a la edad actual t_0 que es diferente en cada modelo. Las curvas en la región amarilla representan modelos cosmológicos que siempre desaceleran la expansión debido a la acción gravitatoria de la materia; la densidad de materia ρ_M cambia de izq. a der. de 0.8 a 1.4 veces la densidad crítica ρ_{crit} . Las curvas en la región azul corresponden a modelos en los que eventualmente la expansión se acelera desde que ρ_Λ sobrepasa a ρ_M ; ρ_Λ cambia de izq. a der. de 0.95 a 0.4 veces ρ_{crit} . Las observaciones claramente favorecen estos modelos, con $\rho_\Lambda \approx 0.74\rho_{crit}$.

en este diagrama, los datos implicaban que las SN Ia más lejanas se veían apenas ~ 0.3 mag o ~ 1.3 veces más débiles (porque estarían más alejadas) que un modelo cosmológico abierto con densidad de materia de 30% la densidad crítica. En otras palabras, las distancias crecieron más rápido que en un modelo con sólo materia, incluso siendo ésta de muy baja densidad. Tal crecimiento implica una expansión acelerada, lo cual a su vez implica que domina en la densidad de materia-energía del Universo un medio repulsivo. Esto motivó un gran interés en las comunidades tanto de la astronomía como de la física.

Los años posteriores

En un principio hubo mucha oposición al resultado. Quizá las SN Ia eran intrínsecamente más débiles en el pasado o quizás su luz fue afectada por polvo cósmico de la galaxia anfitriona y del medio intergaláctico a lo largo del trayecto hacia nosotros. Definitivamente se requerían

más observaciones de supernovas "cosmológicas". Los grupos mencionados y otros acumularon durante años centenas de estos objetos, siendo los más alejados hasta corrimientos al rojo $z = 1.7$, es decir cuando las distancias eran $a = 1/(1+1.7) = 0.37$ menores a las actuales. Si el polvo fuese la razón del debilitamiento de la luz de las SN "cosmológicas", mayor y mayor tendría que ser dicho debilitamiento hacia épocas en el pasado (z 's más grandes). Pronto se comprobó que no era el caso, pues el brillo de las SN Ia más alejadas se empezaba a ver ya como el que corresponde a modelos con desaceleración: se logró determinar que las distancias crecen aceleradamente sólo desde $z = 0.4 - 0.5$, pero en épocas anteriores el crecimiento fue desacelerado. Esta época de transición corresponde a una edad del Universo de alrededor de 9×10^9 años; hoy en día su edad es de 13.8×10^9 años. Es decir ese medio repul-

sivo, bautizado como “energía oscura”, comenzó a dominar en la dinámica del Universo no hace mucho tiempo atrás!

Pero, ¿hay manera de corroborar los resultados obtenidos con las supernovas “cosmológicas” con otros métodos? ¿Se puede construir el diagrama de Hubble hacia épocas aún más hacia el pasado que la correspondiente a $z = 1.7$? En una colaboración ítalo-mexicana, donde uno de los autores (V.A.) participó, se logró establecer en los años 2004 y 2005 una de las primeras confirmaciones independientes a las SN Ia de expansión acelerada. Para ello se usaron explosiones estelares mucho más potentes que las SN Ia, los así llamados estallidos de rayos gamma (ERG). Por ser tan potentes, su luz puede ser detectada incluso si estas explosiones ocurrieron cuando se formaron las primeras estrellas del cosmos ($z > 15$). Por otro lado, la radiación gamma no sufre de extinción por polvo. El gran problema es que los ERG son todo menos patrones lumínicos. No obstante el grupo ítalo-mexicano descubrió correlaciones empíricas entre luminosidad o energía y cantidades observables de los ERG, con lo cual se pudo “estandarizar” a estos objetos y usarlos para construir el diagrama de Hubble hasta $z \sim 6$ (épocas menores a un décimo de la edad actual).

Pronto se sumaron más sondeos basados en el diagrama de Hubble pero usando distancias de diámetro angular en vez de lumínicas, para lo cual se requieren “reglas estándar” en vez de patrones lumínicos. Las oscilaciones acústicas bariónicas del plasma primigenio que quedaron impresas en la distribución espacial de galaxias a gran escala han sido usadas como regla estándar por excelencia. Todos estos resultados sumados a los diferentes sondeos cosmológicos convergen hacia un modelo cosmológico con geometría plana, que de estar frenando pasó a acelerar su expansión a $z = 0.5$, y que al día de hoy tiene densidades de materia-energía correspondientes a aproximadamente 4.5% en bariones, 21% en materia oscura fría y 74% en energía oscura; la contribución de la radiación y los neutrinos es menor al 1%. Este modelo de concordancia se llama “ Λ -Cold Dark Matter” (Λ -CDM).

¿Qué es la energía oscura?

La explicación más inmediata es que se trata de la constante cosmológica de Einstein, Λ . De la ecuación de Friedmann y de la segunda ley de la termodinámica, se infiere que la densidad de energía del término con Λ , ρ_Λ , se mantiene constante a pesar de que el volumen crece con la expansión y su ecuación de estado es $P = w\rho_\Lambda c^2$, con el índice $w = -1$! El vacío cuántico es un medio que tiene justamente esta extraña ecuación de estado; medio que produce una expansión acelerada (exponencial) y que se invoca en la teoría inflacionaria para describir el Universo muy temprano. Una suposición forzada que suele hacerse en esta teoría es que la densidad de energía del vacío se cancela por completo después de la inflación; suponiendo una energía de corte igual a la escala de Planck ($\sim 10^{19} \text{ GeV}$), el valor estimado de ρ_{vac} es 10^{120} veces el de la densidad actual! Ahora, si la expansión acelerada actual se quiere explicar como un efecto repulsivo del vacío cuántico, la pregunta es ¿cómo fue posible que de la densidad inicial del vacío quedó una remanente ~ 120 órdenes de magnitud más pequeña? Esto es un ajuste demasiado fino. Y además, esa remanente infinitesimal tiene una densidad tal que comienza a dominar sobre la densidad (clásica) de la materia-radiación sólo recientemente. Ésta es una coincidencia incómoda.

En la última década hubo una verdadera explosión de propuestas para explicar la expansión acelerada del Universo. Entre ellas están las que invocan un medio repulsivo (energía oscura) como ser campos escalares con índices de ecuación de estado $w < -1/3$, ya sea constante o variable en el tiempo. En estos casos se trata de añadir términos a la parte derecha (fuente) de las ecuaciones de campo de Einstein. Otra familia de propuestas se refieren más bien a modificaciones de la parte izquierda (geometría), es decir, se propone que la expansión acelerada es la manifestación a grandes escalas de una modificación a la gravedad más allá de la relatividad general, algo que puede incluso implicar más dimensiones espaciales. También se ha discutido la posibilidad de que la expansión acelerada sea debido a que el principio cosmológico no se cumple y existen entonces inhomogeneidades a escalas muy grandes; una región subdensa en la cual estaríamos sumergidos, al expandirse más rápido que el promedio, podría emular la expansión acelerada.

Hasta el momento el modelo Λ -CDM ha mostrado ser consistente, dentro de las incertidumbres, con todos los sondeos observacionales. Éste es un modelo acorde con la relatividad general y el principio cosmológico donde la expansión acelerada se describe por el término de la constante cosmológica Λ en la ecuación de Friedmann. Podría ser que este término, más que corresponder a una remanente del vacío cuántico (fuentel), es parte de la descripción geométrica en las ecuaciones de campo de Einstein –es así como en realidad lo introdujo él de tal manera que el Λ medido por los grupos de astrónomos, cuyos líderes fueron galardonados con el Nobel de Física de 2011, es una constante fundamental más de la naturaleza, a la par de G . Siendo éste el caso, el problema que hay que resolver es el de la cancelación total de la energía del vacío cuántico en la inflación.

Para discriminar entre el gran número de propuestas (mismas que siguen aumentando aceleradamente), se requiere de una nueva generación de sondeos observacionales que puedan determinar con exactitudes mejores que el 5% si $w = -1$ o no y si w cambia con z . De confirmarse que $w = -1$ =constante con esta exactitud, entonces Λ sería la explicación a la expansión acelerada. Por otro lado, para discriminar modificaciones a la gravedad se requieren de determinaciones de w sensibles tanto a la historia de expansión (métodos geométricos, p. ej., con las SN Ia y los ERG), como al crecimiento de estructuras cósmicas. Diferencias entre ambas determinacio-

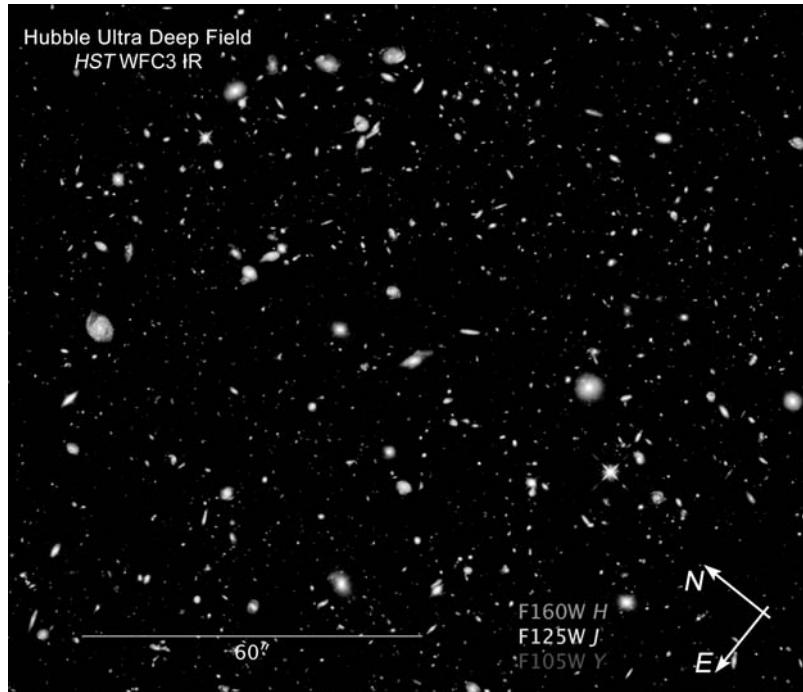


Figura 3. "Imagen Ultraprofunda de un campo extragaláctico, obtenida con el Telescopio Espacial Hubble. El que existan poblaciones de galaxias tan viejas y con las características que se observan en este tipo de campos ultraprofundos, requiere de un factor de expansión en función del tiempo y de factores de crecimiento de estructuras que se acomodan bien sólo en un Universo con constante cosmológica del tipo Λ -CDM. Mayor precisión en este tipo de estudios ayudará a constreñir mejor qué está determinando la expansión acelerada reciente del Universo." (y aca los agradecimientos que ya tienes). Foto: NASA, ESA, G. Illingworth [UCO/Lick Observatory and the University of California, Santa Cruz], R. Bouwens [UCO/Lick Observatory and Leiden University], and the HUDF09 Team.

nes señalarían una necesidad de modificar la relatividad general.

Los astrónomos han abierto una caja de Pandora en la cosmología, astronomía y física de partículas. Les toca posiblemente ahora cerrarla. Por ello, varios de los grandes proyectos astronómicos más ambiciosos y costosos de los siguientes años están enfocados a medir con precisión la historia de expansión del Universo, de evolución de las galaxias (ver Fig. 3), así como los diversos parámetros cosmológicos.