

De las fluctuaciones primordiales a los agujeros negros del universo temprano

From primordial fluctuations to black holes in the early Universe

—

Luis David Jiménez Orozco¹
luis.jimenezorozco@ucr.ac.cr
ORCID: 0009-0003-6435-641X

Balbina Guadalupe Rodríguez Chávez²
rc08058@ues.edu.sv
ORCID: 0000-0002-4639-0433

Luis Enrique Padilla Albores³
lepadilla@rikkyo.ac.jp
ORCID: 0000-0002-5681-7699

1 SECCIÓN DE FÍSICA, UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, ALAJUELA, COSTA RICA

2 ESCUELA DE BIOLOGÍA, UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR,
SAN SALVADOR, EL SALVADOR

3 DEPARTMENT OF PHYSICS, RIKKYO UNIVERSITY, TOKYO, JAPAN



Para citar este artículo:

Jiménez Orozco, L. D., Rodríguez Chávez, B. G., & Padilla Albores, L. E. De las fluctuaciones primordiales a los agujeros negros del universo temprano. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 15(45). <https://doi.org/10.31644/IMASD.45.2026.a05>

RESUMEN

El universo actual presenta una gran variedad de estructuras, desde galaxias y cúmulos hasta objetos extremadamente compactos como los agujeros negros. Sin embargo, a gran escala el cosmos es notablemente uniforme. En este artículo se explica, de manera conceptual y accesible, cómo pequeñas fluctuaciones generadas en el universo temprano pueden dar origen a estructuras cósmicas, incluyendo los llamados agujeros negros primordiales. Se describe el marco general de la cosmología estándar, la expansión del universo y el papel del horizonte cosmológico en la evolución de las perturbaciones de densidad. Posteriormente, se introduce la inflación cósmica como el mecanismo responsable de amplificar fluctuaciones cuánticas microscópicas y convertirlas en perturbaciones macroscópicas que actúan como semillas de la estructura cósmica. Finalmente, se analiza el proceso mediante el cual algunas perturbaciones particularmente intensas pueden colapsar gravitacionalmente tras reingresar al horizonte cosmológico, formando agujeros negros primordiales. Estos objetos constituyen una posible ventana hacia la física del universo temprano y podrían estar relacionados con fenómenos actuales como las ondas gravitacionales o incluso con la naturaleza de la materia oscura. El trabajo se presenta desde la Cosmología del Big Bang, inflación y colapso gravitacional, se describe el papel del horizonte cosmológico, el reingreso de perturbaciones y la existencia de un umbral de colapso y no se discuten simulaciones numéricas ni formalismo matemático avanzado.

Palabras clave:

Cosmología; inflación; perturbaciones primordiales; universo temprano; agujeros negros.

— *Abstract* —

The present-day universe exhibits a wide variety of structures, ranging from galaxies and clusters to extremely compact objects such as black holes. At large scales, however, the cosmos is remarkably uniform. This contrast raises a fundamental question in cosmology: how can such extreme structures arise from a universe that was initially nearly homogeneous?

This article explains, in a conceptual and accessible manner, how small fluctuations generated in the early universe can give rise to cosmic structures, including so-called primordial black holes. The general framework of standard cosmology is described, along with the expansion of the universe and the role of the cosmological horizon in the evolution of density perturbations. Cosmic inflation is then introduced as the mechanism responsible for amplifying microscopic quantum fluctuations and converting them into macroscopic perturbations that act as seeds for cosmic structures. Finally, the process by which certain particularly intense perturbations can gravitationally collapse after re-entering the cosmological horizon, forming primordial black holes, is analyzed. These objects constitute a possible window into the physics of the early universe and could be related to current phenomena such as gravitational waves or even to the nature of dark matter.

Keywords:

Cosmology; inflation; primordial perturbations; early universe; black holes.

1. INTRODUCCIÓN: UN UNIVERSO CASI UNIFORME

Una de las lecciones más profundas de la cosmología contemporánea es que el universo, pese a su complejidad aparente, obedece a principios sorprendentemente simples. A grandes escalas, el cosmos es homogéneo e isotrópico: no hay direcciones privilegiadas ni regiones especiales. Sin embargo, esta uniformidad convive con la presencia de estructuras altamente concentradas, como galaxias, cúmulos y agujeros negros. Comprender cómo emergen tales extremos a partir de condiciones casi uniformes constituye uno de los problemas centrales de la cosmología moderna.

En términos cuantitativos, la homogeneidad e isotropía se manifiestan cuando se estudian escalas mayores o iguales a aproximadamente 100 Mpc (Hogg, 1999). En ese régimen, la distribución promedio de la materia y la expansión cósmica son esencialmente las mismas en todas las direcciones. Este principio, conocido como principio cosmológico, constituye la base del modelo estándar de la cosmología (Dodelson, 2003; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008).

Sin embargo, a escalas menores aparecen estructuras muy diversas, desde galaxias y cúmulos hasta objetos extremadamente compactos como los agujeros negros. Esto plantea una pregunta central: ¿cómo pueden surgir tales extremos en un universo que, a gran escala, es casi uniforme?

La sorpresa radica en que estos objetos implican enormes concentraciones de materia en regiones muy pequeñas del espacio. Para que se formen tales estructuras, debieron existir pequeñas variaciones iniciales en la densidad del universo que, con el tiempo, crecieron bajo la acción de la gravedad. Según el escenario cosmológico actual, estas pequeñas perturbaciones se originaron en una etapa muy temprana conocida como inflación cósmica, un periodo de expansión acelerada que amplificó fluctuaciones microscópicas y las convirtió en las semillas de todas las estructuras cósmicas posteriores (Guth, 1981; Liddle & Lyth, 2000; Linde, 1982).

Durante la inflación, fluctuaciones cuánticas asociadas al campo inflatón fueron estiradas a escalas cosmológicas y posteriormente se convirtieron en perturbaciones clásicas que dejaron su huella en la radiación cósmica de fondo y en la distribución de materia a gran escala (Dodelson, 2003; Mukhanov, 2005).

En este contexto, surge una pregunta fundamental: ¿cómo pueden pequeñas desviaciones iniciales en la densidad del universo —originadas durante la inflación— amplificarse lo suficiente como para dar lugar a objetos tan extremos como los agujeros negros?

En particular, exploraremos la posibilidad de que algunas de estas fluctuaciones primordiales hayan sido lo suficientemente densas como para colapsar gravitacionalmente poco después de reingresar al horizonte cosmológico, formando así agujeros negros primordiales, cuya posible existencia conecta la física del universo temprano con observables cosmológicos actuales.

2. COSMOLOGÍA ESTÁNDAR Y PERTURBACIONES

2.1. La expansión del universo

El modelo cosmológico estándar describe al universo, a gran escala, como homogéneo e isotrópico (Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008). Dentro de este marco, el cosmos no es estático: se encuentra en expansión desde sus etapas más tempranas.

La primera evidencia observacional de esta expansión fue establecida a finales de la década de 1920, cuando Edwin Hubble mostró que la luz proveniente de galaxias distantes presenta un corrimiento al rojo proporcional a su distancia (Hubble, 1929). Esta relación, conocida como ley de Hubble, indica que cuanto más lejana se encuentra una galaxia, mayor es su velocidad de recesión.

Además del corrimiento al rojo, existen otras dos evidencias fundamentales que respaldan la cosmología del Big Bang. Una de ellas es la radiación cósmica de fondo de microondas, una radiación térmica casi uniforme con temperatura cercana a 2.7 K que constituye un remanente del universo temprano (Dodelson, 2003; Penzias & Wilson, 1965). La otra es la abundancia primordial de elementos ligeros, como el hidrógeno y el helio, cuyas proporciones concuerdan con las predicciones de la nucleosíntesis primordial (Alpher et al., 1948; Weinberg, 2008). En conjunto, estas observaciones sostienen la idea de que el universo tuvo un origen caliente y denso, y que desde entonces ha evolucionado dinámicamente.

Una analogía útil para imaginar la expansión cósmica consiste en pensar en un globo con puntos dibujados sobre su superficie que representan galaxias (ver Fig. 1). Al inflarse el globo, todos los puntos se alejan entre sí. Ninguno ocupa una posición privilegiada: desde cualquiera de ellos parecería que los demás se separan. De forma análoga, el universo se expande de manera global, aunque no lo haga dentro de un espacio preexistente, sino a través de la evolución misma del espacio-tiempo (Ryden, 2017; Weinberg, 2008).

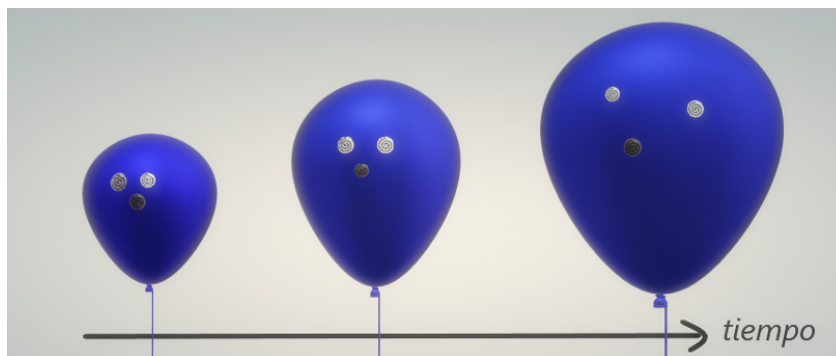


Figura 1. Representación esquemática de la expansión del universo usando como analogía un globo que se infla

2.2. El horizonte cosmológico

Imagina que estás en la playa observando el horizonte. Solo puedes ver la superficie del mar hasta una cierta distancia; más allá de ese límite, el océano se vuelve invisible, oculto por la curvatura de la Tierra. Si deseas ampliar tu campo de visión, puedes subir a un punto más alto, como la cima de un cerro, desde donde es posible observar una región más extensa. Sin embargo, incluso con instrumentos ópticos más potentes, nunca podrás ver más allá del horizonte geométrico, ya que el resto del mar permanece oculto debido a la curvatura terrestre.

Un fenómeno conceptualmente similar ocurre en cosmología, aunque por razones completamente distintas. En el universo no existe un límite visual impuesto por una curvatura local, sino por la naturaleza finita del tiempo y la velocidad de propagación de la luz. Según la teoría de la relatividad, ninguna señal puede viajar más rápido que la luz en el vacío. Dado que el Big Bang ocurrió hace un tiempo finito, existe una distancia máxima desde la cual la luz ha podido alcanzarnos hasta el presente. Este límite se conoce como horizonte de partículas u horizonte cosmológico (Dodelson, 2003; Weinberg, 2008).

Más allá de ese horizonte no hay regiones intrínsecamente inaccesibles por limitaciones tecnológicas, sino regiones cuya luz simplemente no ha tenido tiempo suficiente para llegar hasta nosotros desde el inicio de la expansión cósmica. La porción del espacio contenida dentro de este límite constituye lo que llamamos universo observable (Ryden, 2017).

Si el universo no se estuviera expandiendo, el horizonte cósmico estaría aproximadamente a 13 800 millones de años luz, ya que esa sería la distancia que habría recorrido la luz desde el Big Bang hasta la actualidad. Sin embargo, el universo sí se expande, y esta expansión modifica de manera importante la interpretación de las distancias cosmológicas. Las galaxias que emitieron esa luz se encuentran hoy mucho más lejos que cuando la radiación fue emitida. Al tener en cuenta la expansión cósmica, se estima que el radio actual del universo observable es de aproximadamente 46 500 millones de años luz (Ryden, 2017; Weinberg, 2008).

En escenarios estándar de evolución del universo, como aquellos dominados por radiación o materia, el horizonte de partículas aumenta con el tiempo, ya que la luz dispone de un intervalo cada vez mayor para propagarse. Esto implica que regiones que en un momento dado se encontraban fuera del horizonte pueden, en épocas posteriores, quedar incluidas dentro de él y establecer contacto causal (Mukhanov, 2005).

2.3. Perturbaciones: pequeñas irregularidades

En física clásica, una perturbación se entiende como una pequeña desviación de una magnitud física respecto a una solución de equilibrio o a una configuración de fondo bien definida. Matemáticamente, esto suele formalizarse como la

descomposición de una variable dinámica en un valor de fondo más una corrección pequeña, permitiendo el estudio linealizado del sistema alrededor de dicha solución (Mukhanov, 2005).

En un contexto cosmológico, las perturbaciones se refieren a pequeñas inhomogeneidades en la densidad de energía, la curvatura espacial o el campo inflatón sobre un fondo homogéneo e isótropo (Mukhanov, 2005). Estas pequeñas irregularidades, generadas en el universo temprano, evolucionan bajo la acción de la gravedad.

La gravedad, descrita por la teoría de la relatividad general como la curvatura del espacio-tiempo inducida por la energía y el momento (Einstein, 1915; Misner et al., 1973), desempeña un papel fundamental en la amplificación de dichas perturbaciones. En particular, las fluctuaciones primordiales pueden crecer debido a la inestabilidad gravitacional, proceso que conduce eventualmente a la formación de estructuras cósmicas como galaxias y cúmulos (Peebles, 1980a). Además, en ciertos escenarios del universo temprano, las perturbaciones suficientemente grandes pueden colapsar gravitacionalmente y dar lugar a objetos compactos como los agujeros negros primordiales (B. J. Carr & Hawking, 1974; B. Carr & Kuhnel, 2020).

3. INFLACIÓN Y EL ORIGEN DE LAS PERTURBACIONES

3.1. Aceleración y expansión del universo durante inflación

Para comprender el origen de las estructuras cósmicas —y eventualmente de los agujeros negros primordiales— es necesario remontarnos a una etapa extremadamente temprana del universo: la inflación cósmica (Guth, 1981; Liddle & Lyth, 2000; Linde, 1982).

De manera sencilla, la inflación puede describirse como una fase muy breve de expansión acelerada que ocurrió una fracción diminuta de segundo después del Big Bang. Durante este periodo, el universo no solo se expandía, sino que lo hacía de forma extraordinariamente rápida, aumentando su tamaño en un intervalo de tiempo extremadamente corto.

Esta expansión acelerada tuvo consecuencias profundas. Distancias que inicialmente eran microscópicas fueron “estiradas” hasta alcanzar escalas astronómicas. En cierto sentido, el espacio mismo se expandió de tal manera que regiones que estaban muy próximas entre sí terminaron separadas por distancias enormes.

Sin embargo, hay un aspecto aún más sorprendente. Durante la inflación, el tamaño del horizonte cosmológico —es decir, la distancia máxima a la que las regiones podían influirse causalmente (ver Sec. 2.2)— permanecía aproximadamente constante (Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008). Esto contrasta con lo que ocurre en otras etapas de la historia cósmica, donde el horizonte crece con el tiempo.

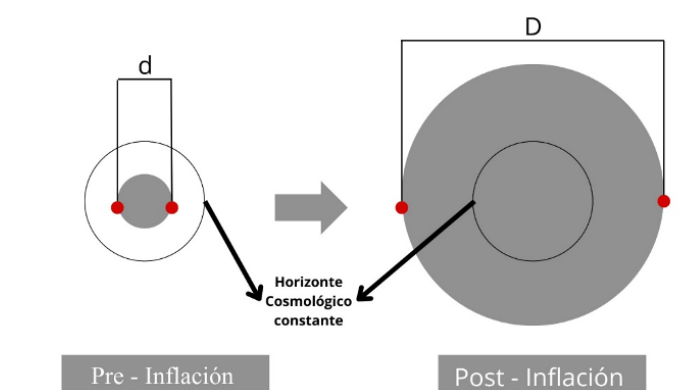
¿Qué significa esto en términos sencillos? Que mientras el universo se expandía de manera explosiva, el “radio de contacto causal” no crecía al mismo ritmo.

Como consecuencia, regiones que inicialmente estaban dentro del horizonte —y por lo tanto podían intercambiar información— fueron estiradas más allá de él. En otras palabras, durante la inflación las distancias crecían más rápido que el propio horizonte.

La Figura 2 ilustra este comportamiento de manera esquemática. Mientras el horizonte se mantiene aproximadamente constante, las distancias “ d ” y “ D ” entre puntos aumentan drásticamente. Esto implica que regiones que estaban inicialmente conectadas causalmente pueden quedar fuera de contacto causal efectivo.

Este comportamiento desempeña un papel central en el origen de las perturbaciones primordiales, pues permite que fluctuaciones inicialmente microscópicas sean llevadas a escalas cosmológicas. Más adelante retomaremos este punto con mayor detalle.

En resumen, la característica distintiva de la inflación no es únicamente que el universo se expandiera rápidamente, sino que lo hiciera mientras el horizonte permanecía casi constante. Esta combinación permitió que pequeñas fluctuaciones del universo temprano se transformaran en las semillas macroscópicas de todas las estructuras cósmicas.



Nota. Tal como se observa en la figura, durante la inflación el horizonte cosmológico permaneció aproximadamente constante, mientras las distancias entre los puntos (donde “ d ” representa el diámetro del universo en etapas pre-inflacionarias y “ D ” representa dicho diámetro post-inflación) crecían rápidamente.

Figura 2. Esquema ilustrativo del efecto de la expansión inflacionaria sobre dos conjuntos de puntos inicialmente cercanos

3.2. Inflación como solución a problemas cosmológicos

Antes de la propuesta inflacionaria, el modelo estándar del Big Bang enfrentaba algunas dificultades conceptuales importantes. Dos de ellas son conocidas como el problema de la planitud y el problema del horizonte (Guth, 1981; Liddle & Lyth, 2000; Weinberg, 2008).

El problema de la planitud surge del hecho de que las observaciones actuales indican que el universo es casi perfectamente plano a gran escala (Aghanim et al., 2018). Sin embargo, dentro del modelo original del Big Bang, esto requería

que las condiciones iniciales estuvieran ajustadas con una precisión extraordinaria (Dodelson, 2003; Liddle & Lyth, 2000). La inflación ofrece una explicación natural: al expandirse de forma acelerada, cualquier curvatura inicial se diluye rápidamente, haciendo que el universo observable parezca hoy prácticamente plano (Guth, 1981; Liddle & Lyth, 2000; Linde, 1982).

Por otro lado, el problema del horizonte se relaciona con la notable uniformidad térmica observada en el fondo cósmico de microondas (Dodelson, 2003; Penzias & Wilson, 1965). Regiones del cielo muy alejadas entre sí presentan casi la misma temperatura, a pesar de que, según el modelo clásico, no habrían tenido tiempo suficiente para intercambiar información (Weinberg, 2008). La inflación resuelve esta aparente paradoja al proponer que dichas regiones estuvieron originalmente en contacto causal antes de la expansión acelerada (Guth, 1981; Liddle & Lyth, 2000). Posteriormente, fueron separadas más allá del horizonte cosmológico, preservando la homogeneidad inicial.

3.3. El origen de las perturbaciones primordiales

Antes de continuar, es importante señalar algo fundamental. A lo largo de las secciones anteriores hemos mencionado que durante la inflación las escalas se estiran y que pequeñas irregularidades pueden cruzar el horizonte cosmológico. Sin embargo, aún no hemos discutido cómo se originan esas irregularidades en primer lugar. ¿De dónde surgen las perturbaciones que más tarde darán lugar a galaxias, cúmulos e incluso, en casos extremos, agujeros negros primordiales?

En mecánica cuántica existe el concepto de fluctuaciones cuánticas. Incluso en lo que llamamos “vacío”, el espacio no está completamente vacío: constantemente surgen pequeñas perturbaciones debido a la naturaleza cuántica de los campos fundamentales (Mukhanov, 2005). En condiciones normales, como en el universo actual, estas fluctuaciones aparecen y desaparecen casi de inmediato, sin llegar a producir efectos macroscópicos.

Sin embargo, la situación era distinta en el universo temprano. Durante la etapa de inflación, el espacio-tiempo se expandía de manera extremadamente acelerada (Guth, 1981; Linde, 1982). Si existían fluctuaciones cuánticas asociadas al campo inflatón —el campo responsable de la inflación—, estas no solo surgían, sino que eran estiradas violentamente por la expansión (Mukhanov, 2005). En lugar de desaparecer rápidamente, eran amplificadas y llevadas a escalas mucho mayores.

A medida que estas fluctuaciones eran estiradas, podían superar el horizonte cosmológico, es decir, la distancia máxima a la que las regiones del universo podían influirse causalmente entre sí. Cuando una fluctuación cruza este horizonte, su evolución queda temporalmente “congelada”. Deja de comportarse como una simple fluctuación cuántica microscópica y comienza a comportarse como una perturbación macroscópica clásica.

Más adelante, cuando la expansión del universo se volvió más lenta, estas perturbaciones reingresaron al horizonte cosmológico. En ese momento recuperaron su dinámica causal y comenzaron a evolucionar bajo la acción de la gravedad (Mukhanov, 2005; Peebles, 1980b). La mayoría de ellas dio origen, mucho tiempo después, a galaxias y cúmulos de galaxias.

No obstante, si alguna de estas perturbaciones era lo suficientemente densa, podía colapsar gravitacionalmente poco después de reingresar al horizonte (B. J. Carr & Hawking, 1974; B. Carr & Kuhnel, 2020). Es precisamente en este escenario donde surge la posibilidad de la formación de agujeros negros primordiales.

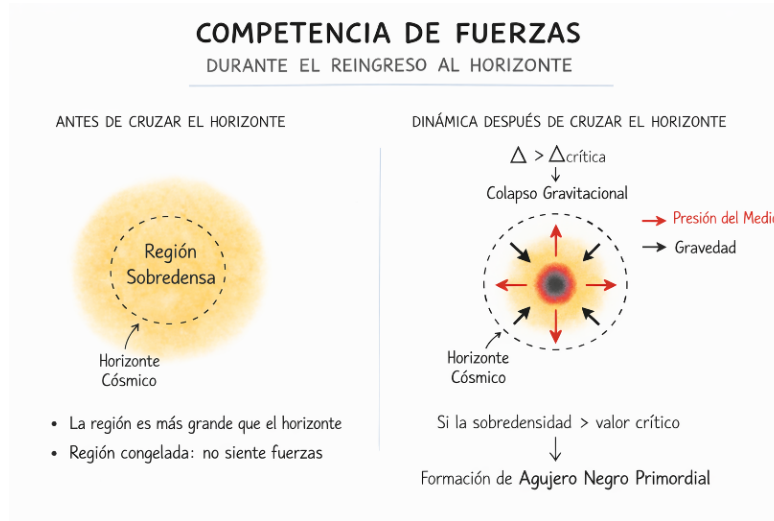
3.4. Una aclaración importante

Es importante enfatizar un punto fundamental: la inflación no produce agujeros negros primordiales de manera directa. Lo que la inflación genera son fluctuaciones primordiales, que más tarde pueden evolucionar bajo la acción de la gravedad. Solo aquellas perturbaciones cuya amplitud sea suficientemente grande, y que cumplan las condiciones de evolución gravitacional no lineal descritas en la siguiente sección, pueden propiciar la formación de agujeros negros primordiales (B. J. Carr & Hawking, 1974; B. Carr & Kuhnel, 2020).

4. DEL REINGRESO AL COLAPSO: FORMACIÓN DE AGUJEROS NEGROS PRIMORDIALES

En la sección anterior se explicó que, durante la inflación, pequeñas fluctuaciones cuánticas fueron amplificadas y estiradas hasta escalas cosmológicas. Una vez fuera del horizonte, estas perturbaciones permanecieron prácticamente congeladas. Sin embargo, esta situación no es permanente. A medida que el universo continúa expandiéndose después de la inflación, el horizonte cosmológico crece, de modo que perturbaciones que antes estaban fuera de contacto causal eventualmente vuelven a entrar en él.

Este momento, conocido como reingreso al horizonte, es crucial para la formación de estructuras. Mientras una perturbación permanece fuera del horizonte, su evolución dinámica es muy limitada. En cambio, cuando reingresa, vuelve a quedar sometida a la competencia entre gravedad, presión y expansión cósmica. Este equilibrio entre fuerzas determina si la región continuará expandiéndose con el resto del universo o si, por el contrario, colapsará gravitacionalmente (véase Fig. 3). A partir de entonces, su destino dependerá de su amplitud y de las condiciones físicas del universo en esa etapa.



Nota. Si la sobredensidad (Δ) supera un valor crítico (Δ_c), la región puede colapsar y formar un agujero negro primordial.

Figura 3. Representación esquemática de la competencia entre la gravedad y la presión del medio durante el reingreso al horizonte

En la mayoría de los casos, las perturbaciones primordiales que reingresan al horizonte no forman objetos compactos. Su amplitud es demasiado pequeña y terminan contribuyendo, con el paso del tiempo, al crecimiento gradual de la estructura cósmica ordinaria: galaxias, cúmulos y filamentos. No obstante, si una perturbación presenta una sobredensidad suficientemente grande, la gravedad puede vencer tanto a la presión del medio como al efecto diluyente de la expansión del universo. Cuando esto ocurre, la región colapsa gravitacionalmente y puede dar origen a un agujero negro primordial (B. J. Carr & Hawking, 1974; B. Carr & Kuhnel, 2020).

En otras palabras, la formación de un agujero negro primordial no depende únicamente de que exista una fluctuación primordial, sino de que esa fluctuación alcance la amplitud necesaria en el momento adecuado. Esto convierte el reingreso al horizonte en una etapa decisiva: es allí donde se determina si una perturbación seguirá una evolución ordinaria o si, por el contrario, colapsará para formar un objeto extremadamente compacto.

4.1. El umbral de colapso

La posibilidad de que una perturbación forme un agujero negro primordial está asociada a la existencia de un umbral de colapso. De manera general, este umbral representa la amplitud mínima que debe tener una sobredensidad al momento de reingresar al horizonte para que la gravedad pueda dominar sobre los efectos que tienden a impedir el colapso (B. J. Carr, 1975; B. Carr & Kuhnel, 2020; Escrivà et al., 2022).

Para describir esta idea, suele introducirse la sobredensidad fraccional

$$\Delta \equiv \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}},$$

donde ρ representa la densidad local de energía y $\bar{\rho}$ la densidad promedio del universo. En términos sencillos, Δ mide cuánto más densa es una región con respecto al fondo cosmológico que la rodea. Si la sobredensidad es demasiado pequeña, la perturbación no colapsa: la presión y la expansión del universo son suficientes para dispersarla o reincorporarla a la evolución cosmológica ordinaria. Si, por el contrario, la sobredensidad supera cierto valor crítico, el colapso gravitacional se vuelve posible.

De forma esquemática, la condición de formación puede expresarse como

$$\Delta > \Delta_c, \quad (1)$$

donde Δ_c es el valor crítico o umbral de colapso. Su valor exacto no es universal, ya que depende del contenido del universo en el momento del colapso y también del perfil espacial de la perturbación (Escrivà et al., 2022; Musco et al., 2005). En la época dominada por radiación, los estudios numéricos muestran que este umbral suele ser del orden de $\Delta_c \sim 0.4$ - 0.6 , aunque el valor preciso puede variar según el escenario considerado (Escrivà et al., 2022; Musco et al., 2005).

Esta condición permite entender por qué la formación de agujeros negros primordiales es un fenómeno excepcional. No basta con que existan fluctuaciones primordiales: estas deben ser significativamente mayores que las perturbaciones responsables de la formación ordinaria de estructuras. Mientras las inhomogeneidades pequeñas contribuyen al desarrollo gradual de galaxias y cúmulos, solo las sobredensidades más extremas pueden colapsar casi de inmediato tras el reingreso al horizonte y dar origen a un agujero negro primordial.

Dicho de manera intuitiva, el umbral de colapso marca la frontera entre dos comportamientos posibles. Por debajo de él, la perturbación no logra desacoplarse de la expansión del universo y termina disipándose o evolucionando como una inhomogeneidad ordinaria. Por encima de él, la gravedad domina y la región puede contraerse hasta formar un objeto compacto. En este sentido, la formación de agujeros negros primordiales puede interpretarse como el resultado más extremo de la evolución no lineal de las perturbaciones generadas en el universo temprano.

5. DIFERENCIA CON AGUJEROS NEGROS ASTROFÍSICOS

Una vez descrito el mecanismo de formación de los agujeros negros primordiales, resulta natural compararlos con los agujeros negros que se originan mediante procesos astrofísicos convencionales. Aunque ambos objetos están descritos por

las mismas soluciones de la relatividad general, existen diferencias importantes relacionadas principalmente con su origen y con las escalas de masa involucradas.

La primera diferencia, y quizá la más evidente, es su origen. Los agujeros negros primordiales se formarían a partir del colapso gravitacional de perturbaciones primordiales de densidad en el universo temprano, cuando algunas sobredensidades superan el umbral crítico de colapso discutido en la sección anterior. Este proceso habría ocurrido mucho antes de la formación de estrellas y galaxias (Vázquez et al., 2021).

En contraste, los agujeros negros astrofísicos se forman a partir de la evolución y muerte de estrellas masivas. En estos escenarios, el colapso gravitacional puede ocurrir de distintas maneras. Por ejemplo, una estrella suficientemente masiva puede colapsar directamente en un agujero negro sin producir una supernova visible, o bien puede producirse una explosión de supernova en la que parte de la envoltura estelar no logra escapar y termina cayendo nuevamente sobre el remanente compacto, dando lugar finalmente a la formación de un agujero negro (Mirabel, 2016).

Una segunda diferencia importante se relaciona con las masas características de estos objetos. Los agujeros negros de origen estelar suelen formarse con masas del orden de unas pocas a decenas de masas solares, típicamente entre ~ 1 y ~ 50 masas solares. En cambio, los agujeros negros primordiales no están restringidos por los procesos de evolución estelar, por lo que en principio podrían formarse con una gama mucho más amplia de masas, determinada principalmente por la escala física de la perturbación que colapsa en el momento de reingresar al horizonte (B. Carr & Kühnel, 2026).

Debido a esta diferencia en los mecanismos de formación, la posible detección de agujeros negros con masas fuera de los rangos típicamente esperados para remanentes estelares ha motivado la discusión sobre un posible origen primordial para algunos de estos objetos. No obstante, la identificación observacional de agujeros negros primordiales sigue siendo un tema abierto de investigación en la cosmología moderna.

6. DISCUSIÓN

El posible hallazgo de agujeros negros primordiales tendría implicaciones importantes para la cosmología moderna. A diferencia de los agujeros negros de origen astrofísico, estos objetos habrían surgido en etapas muy tempranas del universo como consecuencia del colapso de sobredensidades primordiales. Por ello, su estudio no solo resulta relevante para comprender la formación de objetos compactos, sino también para reconstruir aspectos de la física del universo primitivo que difícilmente pueden explorarse por otros medios.

Uno de los principales atractivos de los agujeros negros primordiales es que su existencia estaría directamente vinculada a la amplitud y distribución de las

perturbaciones generadas en el universo temprano. En consecuencia, cualquier restricción observacional sobre su abundancia permite acotar escenarios de inflación y modelos capaces de producir fluctuaciones grandes a escalas pequeñas. En este sentido, los agujeros negros primordiales complementan otras sondas cosmológicas tradicionales, como la radiación cósmica de fondo, que describen principalmente perturbaciones de pequeña amplitud y régimen lineal.

Otro aspecto de gran interés es su posible relación con las ondas gravitacionales. Las detecciones realizadas por LIGO, Virgo y KAGRA han abierto una nueva posibilidad para investigar poblaciones de agujeros negros a través de sus eventos de fusión. A partir de ello, se ha considerado la hipótesis de que al menos una fracción de estos sistemas pudiera tener un origen primordial. Aunque esta posibilidad continúa siendo incierta y sigue en discusión, ha fortalecido el interés por los agujeros negros primordiales como un tema de conexión entre cosmología, relatividad general y astronomía multimensajero (Bianchini, 2017; Eroshenko & Stasenko, 2023).

Además, los agujeros negros primordiales también han sido propuestos como candidatos a materia oscura. Esta idea resulta atractiva porque, al tratarse de objetos compactos no luminosos, satisfacen de manera natural la condición de no interactuar electromagnéticamente de forma apreciable, mientras que su presencia puede manifestarse gravitacionalmente (Bertone et al., 2005). En particular, aquellos con masas suficientemente grandes como para no haberse evaporado por radiación de Hawking hasta la época actual podrían, en principio, sobrevivir como parte del contenido material del universo (B. Carr & Kuhnel, 2022).

Sin embargo, esta posibilidad debe tomarse con cautela. Las restricciones observacionales disponibles limitan fuertemente los intervalos de masa y abundancia en los que los agujeros negros primordiales podrían constituir una fracción significativa de la materia oscura. Por ello, más que considerar resuelto este problema, lo adecuado es entender a los agujeros negros primordiales como una hipótesis físicamente bien motivada cuya viabilidad depende de manera sensible del escenario cosmológico adoptado y de la evidencia observacional futura.

En conjunto, el estudio de los agujeros negros primordiales ocupa un lugar particularmente interesante dentro de la cosmología contemporánea. Su relevancia no radica únicamente en la posibilidad de confirmar la existencia de una nueva población de agujeros negros, sino en que su formación, abundancia y propiedades podrían ofrecer información valiosa sobre la inflación, la evolución no lineal de las perturbaciones y la composición del universo. Así, los agujeros negros primordiales se mantienen como uno de los escenarios más sugestivos para conectar la física del universo temprano con observables actuales.

7. CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo hemos visto que los agujeros negros primordiales constituyen una posibilidad fascinante dentro de la cosmología moderna, porque conectan fenómenos del universo muy temprano con observables que podrían estudiarse en la actualidad. A diferencia de los agujeros negros astrofísicos, estos objetos no se habrían originado a partir del colapso de estrellas, sino del colapso gravitacional de sobredensidades generadas en las primeras etapas de la historia cósmica. Por ello, su estudio permite tender un puente entre la física del universo temprano, la teoría de la inflación y la formación de estructura.

También se discutió que la inflación desempeña un papel central en este escenario. Durante esta etapa de expansión acelerada, pequeñas fluctuaciones cuánticas fueron estiradas hasta escalas cosmológicas y se convirtieron en las semillas de las perturbaciones primordiales. Más tarde, al reingresar al horizonte cosmológico, estas perturbaciones comenzaron a evolucionar bajo la acción de la gravedad, la presión y la expansión del universo. Solo aquellas cuya amplitud superó un umbral crítico pudieron colapsar y formar agujeros negros primordiales, lo que muestra que su producción habría sido un fenómeno excepcional, pero físicamente posible.

En este sentido, los agujeros negros primordiales son relevantes no solo como objetos compactos, sino como una herramienta conceptual para explorar condiciones físicas inaccesibles por otros medios. Su posible existencia podría aportar información sobre la amplitud de las perturbaciones a escalas pequeñas, sobre modelos inflacionarios y sobre la evolución no lineal del universo temprano. Además, su estudio ha cobrado aún mayor interés por su posible relación con la materia oscura y con la producción de ondas gravitacionales, dos de los temas más activos de la investigación actual.

En conclusión, los agujeros negros primordiales representan una de las ideas más sugerentes de la cosmología contemporánea. Aunque su existencia aún no ha sido confirmada, su estudio permite comprender mejor cómo pequeñas irregularidades surgidas en el universo temprano pudieron dar lugar a algunos de los objetos más extremos del cosmos. Así, más que una curiosidad teórica, los agujeros negros primordiales constituyen una ventana hacia la física del universo primigenio.

REFERENCIAS

- Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Ballardini, M., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartolo, N., Basak, S., Battye, R., Benabed, K., Bernard, J. P., Bersanelli, M., Bielewicz, P., Bock, J. J., Bond, J. R., Borrill, J., Bouchet, F. R., ... Zonca, A. (2018). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy and Astrophysics*, 641, 1–67. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
- Alpher, R. A., Bethe, H., & Gamow, G. (1948). The Origin of Chemical Elements. *Physical Review*, 73(7), 803–804. <https://doi.org/10.1103/PHYSREV.73.803>
- Bertone, G., Hooper, D., & Silk, J. (2005). Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Physics Reports*, 405(5–6), 279–390. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>
- Bianchini, S. (2017). *Buchi neri primordiali dalle bolle di vuoto*. Università di Bologna.
- Carr, B. J. (1975). The primordial black hole mass spectrum. *Astrophysical Journal*, 201, 1–19. <https://doi.org/10.1086/153853>
- Carr, B. J., & Hawking, S. W. (1974). Black holes in the early Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 168(2), 399–416. <https://doi.org/10.1093/MNRAS/168.2.399>
- Carr, B., & Kuhnel, F. (2020). Primordial black holes as dark matter: Recent developments. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 70, 355–394. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-NUCL-050520-125911/CITE/REFWORKS>
- Carr, B., & Kuhnel, F. (2022). Primordial black holes as dark matter candidates. *SciPost Physics Lecture Notes*, 48, 56. <https://doi.org/10.21468/SCIPOSTPHYSLECTNOTES.48>
- Carr, B., & Kühnel, F. (2026). Primordial black holes. *Encyclopedia of Astrophysics*, 254–265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21439-4.00143-7>
- Dodelson, S. (2003). Modern Cosmology. In *Modern Cosmology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-219141-1.X5019-0>
- Einstein, A. (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsberichte Der Königlich Preußischen Akademie Der Wissenschaften*, 844–847. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1915SPAW.....844E/abstract>
- Eroshenko, Y., & Stasenko, V. (2023). Gravitational Waves from the Merger of Two Primordial Black Hole Clusters. *Symmetry*, 15(3), 637. <https://doi.org/10.3390/sym15030637>
- Escrivà, A., Kuhnel, F., & Tada, Y. (2022). Primordial Black Holes. *ArXiv*, 261–377. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-395636-9.00012-8>
- Guth, A. H. (1981). Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D*, 23(2), 347. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.23.347>
- Hogg, D. W. (1999). Distance measures in cosmology. *ArXiv E-Prints*, 1–16. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9905116>

- Hubble, E.** (1929). A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *PNAS*, 15(3), 168–173. <https://doi.org/10.1073/PNAS.15.3.168>
- Liddle, A. R., & Lyth, D. H.** (2000). Cosmological Inflation and Large-Scale Structure. *Cambridge University Press*, 414. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000cils.book.....L/abstract>
- Linde, A. D.** (1982). A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Physics Letters B*, 108(6), 389–393. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)91219-9](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)91219-9)
- Mirabel, I. F.** (2016). The Formation of Stellar Black Holes. *ArXiv*, 1–32. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1609.08411>
- Misner, C. W., Thorne Kip S., & Wheeler John A.** (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman and Company. https://physicsgg.me/wp-content/uploads/2023/05/misner_thorne_wheeler_gravitation_freema.pdf
- Mukhanov, V.** (2005). Physical Foundations of Cosmology. *Cambridge University Press*.
- Musco, I., Miller, J. C., & Rezzolla, L.** (2005). Computations of primordial black-hole formation. *Classical and Quantum Gravity*, 22(7), 1405. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/7/013>
- Peebles, P. J. E.** (1980a). The large-scale structure of the universe. In *Issu*. Princeton University Press. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980lssu.book.....P/abstract>
- Peebles, P. J. E.** (1980b). The large-scale structure of the universe. *Princeton University Press*, 440. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980lssu.book.....P/abstract>
- Penzias, A. A., & Wilson, R. W.** (1965). A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *Astrophysical Journal*, 142, 419–421. <https://doi.org/10.1086/148307>
- Ryden, B.** (2017). Introduction to Cosmology. In *Cambridge University Press* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Vázquez, J. A., Padilla, L. E., & Matos, T.** (2021). Inflationary Cosmology: From Theory to Observations. *Revista Mexicana de Física E*, 17(1), 73–91. <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.17.73>
- Weinberg, S.** (2008). *Cosmology*. Oxford University Press.