

# Agujeros negros primordiales como modelo de Materia oscura.

Luis A. Escamilla, Jonathan Rincón

11 de marzo de 2018

## Resumen

Los agujeros negros son regiones en el espacio-tiempo que generan un campo gravitatorio tal que ninguna partícula material, ni siquiera la luz, puede escapar. Sin embargo, con base en las observaciones se han podido determinar algunas propiedades fundamentales como: la posición, su masa, y recientemente [11 de febrero de 2016] la colaboración LIGO detectó por primera vez ondas gravitacionales debido al choque de dos agujeros negros. Aunque la formación de agujeros negros se relaciona habitualmente con el colapso gravitacional de una estrella lo suficientemente masiva, en los primeros instantes del Big Bang, de acuerdo con el modelo estándar de partículas, hubo regiones donde la densidad era tan grande que pudieron haberse formado agujeros negros primordiales (PBHs) debido al colapso gravitacional. En este trabajo, de acuerdo con la premisa de la existencia de dichos agujeros negros primordiales, se hará un breve repaso a su historia, las teorías y modelos sobre estos fenómenos y cómo se han propuesto como candidatos a ser materia oscura.

## Big bang

### Recuento histórico

Para poder comenzar a hablar sobre los hoyos negros primordiales debemos hacer un breve repaso a lo que se denomina teoría del Big Bang. Este modelo cosmológico afirma que nuestro Universo provino de una singularidad en la que toda la materia, energía e incluso el espacio-tiempo estaban confinados en un punto increíblemente denso y caliente, que luego pasó a expandirse de manera acelerada, enfriándose poco a poco y formando la materia que hoy conocemos.

Podríamos decir que la teoría del Big Bang empezó con la teoría General de la Relatividad de Einstein publicada en 1915, cuya base es que la deformación del espacio-tiempo provocada por objetos masivos provoca lo que nosotros conocemos como gravedad.

Pese a los esfuerzos de Einstein de crear un universo estático, Alexander Friedmann y Georges Lemaitre encontraron soluciones (cada uno por su cuenta) de la teoría de general que indicaban que el universo se expande. Y en 1931

Georges Lemaitre propuso que el universo provino de un “átomo primigenio” un punto en el que todo el universo convergía, esta teoría se sustentaba de las soluciones obtenidas de la relatividad general. Su lógica es simple, debido a que el universo está en expansión si regresáramos en el tiempo, por ejemplo; 1 minuto el tamaño del universo sería más pequeño que el de ahora, entonces que pasaría si volviéramos en el tiempo hasta  $t = 0$ , entonces toda lo que conforma el universo estaría en un sólo punto. A esto se le denominó luego Big Bang. Aún y cuando muchos autores señalan que el motivo por el cual Lemaitre propuso esta teoría, en que el universo fue “creado” o por lo menos no ha existido desde siempre como otras teorías señalaban (lo cual estaba de acuerdo con la doctrina católica), era por sus profundas raíces religiosas, debido a que era un sacerdote. Sin embargo, esta idea ha permanecido hasta nuestros días.

Debemos enfatizar que esta excéntrica propuesta pudo haber estado basada además en las observaciones presentadas por Vesto Slipher y Carl Wilhelm sobre el corrimiento hacia el rojo en 11 galaxias que se alejaban de la Tierra en 1914 y de las observaciones realizadas por Edwin Hubble sobre las velocidades radiales de algunas nebulosas con respecto a la Tierra en 1929, que luego darían paso a la famosa “ley de Hubble”.

Pero quizás la mayor prueba del modelo del Big Bang fue el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas o CMB (cosmic microwave background radiation) en 1965 realizada por Arno Penzias y Robert Wilson en los laboratorios Bell. Cuya radiación correspondía al de un cuerpo negro casi perfecto, con un pico de  $\lambda = 1,9mm$  y una temperatura aproximada de  $T = 2,725K$  [7].

## Modelo del Big Bang caliente

Este modelo es el más aceptado, según el cual todo el universo era una bola de fuego primordial con una temperatura y presión increíblemente grande, que después de un cierto instante se expandió, lo que llevo consecuentemente a enfriarse y crear los elementos que actualmente podemos estudiar.

Una pregunta muy frecuente sobre el Big Bang es su origen o lo que había antes de que se produjera tal evento. Aunque esta pregunta es muy intrigante cualquier predicción o teoría que señale algún proceso antes del Big Bang es totalmente especulativa ya que se cree que en sus primeros momentos todas las fuerzas fundamentales (gravedad, electromagnética, fuerza nuclear débil y fuerte) estaban unidas y hasta no tener una teoría que pueda unificarlas no podemos explicar los procesos que ocurrieron.

Aunque el hecho de preguntarse el origen del Big Bang suena algo muy normal esto podría ser un error, ya que preguntarse el “antes” del Big Bang no tiene sentido porque en ese punto super caliente y denso estaba incluso el espacio-tiempo. El tiempo mismo se creó a partir del Big Bang.

Aun así, el modelo estándar de partículas elementales ha podido explicar los primeros instantes del Big Bang (después del primer segundo) y la evolución del universo una vez que éste se enfrió para dar paso a la formación de los primeros elementos. Por lo que en esta sección haremos un pequeño repaso a dichas fases o

etapas para comprender un poco más sobre nuestro tema principal, la formación de los agujeros negros primordiales.

## Primeros instantes después del Big Bang

Se cree que los primeros instantes después del fenómeno cosmológico que dió paso al origen del universo, las 4 fuerzas fundamentales: la Gravedad, el Electromagnetismo, La fuerza nuclear Fuerte y Débil. Estaban juntas en una única fuerza fundamental que luego de un brevísimo periodo de tiempo ( $10^{-42}$  a  $10^{-36}$  segundos aproximadamente) empiezan a separarse una a una, por un mecanismo denominado “ruptura de simetría”.

## Inflación

Antes de ver cada una de las transiciones de fase ocurridas en el Big Bang debemos detenernos un momento en un proceso sumamente importante denominado “inflación cósmica”. Esta teoría introducida por primera vez en 1981 por Alan Guth, nos dice que hubo una época en el universo en que el factor de escala se aceleró rápidamente en sólo una fracción de segundo. Es decir, el universo se expandió de tal manera que en un periodo de tiempo aproximadamente de  $10^{-36} - 10^{-33}$  segundos) donde el universo creció hasta llegar a tener un tamaño de  $e^{60}$  veces el inicial.

Debido a este extraordinario proceso el universo pudo enfriarse rápidamente lo que dió paso a las etapas que discutiremos a continuación.

**Transición GUT:** con una temperatura cercana a los  $10^{16} GeV$ , en este momento no hay distinción entre la fuerza fuerte, débil y la electromagnética. Estaban unidas en una única fuerza y sólo la gravedad se separó.

$$G \rightarrow SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1) \quad (1)$$

**Transición Electrodébil:** con una temperatura cerca de los 100 GeV, la condensación de Higgs estaba ausente y los bosones  $W^-$ ,  $Z^-$  tienen masa cero, con la ruptura de simetría electrodébil ocurre la condensación de Higgs y obtenemos bosones  $W^-$  y  $Z^-$  masivos.

$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1) \rightarrow SU(2) \otimes U(1) \quad (2)$$

En esta transición la también fuerza electrodébil se separa en la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil.

**Transición de la materia quark-gluon a materia hadrónica:** con una temperatura de aproximadamente 200 MeV, el plasma de quarks-gluon se enfría hasta formar los hadrones, partículas formadas por la unión de quarks mediante la fuerza nuclear fuerte.

## Nucleosíntesis

Podríamos hablar sobre las distintas etapas especulativas como la Era de Planck que se cree que tuvo lugar  $10^{-42}$  segundos después del Big Bang y donde

la temperatura era superior a los 100 MeV y muchas otras etapas más, pero lo cierto es que el modelo del Big Bang caliente solo puede explicar efectivamente cuando el universo (debido a la expansión cósmica) redujo la energía cinética de las partículas para poder formar núcleos. A esta etapa se le llama nucleosíntesis en la cual se crearon los primeros elementos cuando la temperatura era alrededor de  $T = 0,1\text{MeV}$ , 1 segundo después del Big Bang.

## **Dominación de la materia**

En los primeros momentos del Big Bang como sabemos la radiación era la que dominaba sobre la materia ya que debido a la gran temperatura del universo la energía cinética de las partículas no permitía que éstas pudieran unirse para formar núcleos, por ende, la mayor parte de la energía del universo se encontraba en forma de radiación, pero debido a la expansión del universo provocó que éste se enfriara y pudieran formarse los primeros núcleos. Aproximadamente 70,000 años después del Big Bang las densidades de materia (no-relativista) conformados por los núcleos atómicos y la radiación conformada por fotones fueron iguales. Esta transición es muy importante desde el punto de vista del crecimiento de las perturbaciones de densidad como veremos más adelante.

## **Recombinación**

Luego de aproximadamente 300,000 años del Big Bang, la densidad del universo disminuye y se forman los primeros átomos de hidrógeno y helio, también la radiación se desacopla de la materia hasta que puede viajar libremente. La imagen del CMB corresponde a estos fotones. Luego de esto, millones de años después se formaron las primeras estrellas, las galaxias y los cúmulos de galaxias por medio de procesos gravitatorios.

Como hemos visto el Big Bang es un fenómeno el cual conlleva una serie de procesos los cuales con el paso del tiempo dieron forma a lo que hoy conocemos como universo. Sin embargo, en los primeros momentos del universo cuando éste todavía era muy caliente y denso, pudo haber fluctuaciones en la densidad de materia del universo temprano las cuales pudieron haber originado regiones con mucha densidad hasta colapsar gravitacionalmente, a esto se conoce como “agujero negro primordial”. Esta interesante idea surgió por primera vez de Zel'Dovich y Novik en 1966.

## **Materia Oscura**

La idea de que debe haber materia invisible en el universo está presente desde el año 1933, cuando Fritz Zwicky realizó observaciones sobre cuerpos astronómicos orbitando en la galaxia, de esta forma calcular la velocidad radial de la misma. Estas mediciones las realizó sobre 8 galaxias del Cúmulo de Coma y se dió cuenta de que las velocidades radiales eran bastante grandes si se toma en cuenta únicamente la materia visible, para que las mediciones de las velocidades

concordaran con el valor teórico el Cúmulo debía tener 400 veces más masa de la que se observaba. Esta idea de Zwicky se dejó como un problema sin resolver, hasta que, 3 años después, Sinclair Smith realizó observaciones similares en el Cúmulo de Virgo y llegó a las mismas conclusiones de Zwicky. Esto cimentó la base de la idea sobre la existencia de materia invisible que es más densa que la visible.

Para el año 1975 ya estaba difundida la idea de que existía una gran cantidad de materia invisible en las galaxias, aunque no se supiera de dónde provenía. El concepto de materia oscura surgió de estas observaciones, pues la idea popular era que la materia faltante debía ser un nuevo tipo de materia, la cuál es no-bariónica e interactúa muy débilmente con la materia convencional.

### **Lente gravitacional**

Una de las evidencias acerca de la existencia de materia oscura proviene de las observaciones realizadas usando lentes gravitacionales.

De acuerdo a la relatividad general, si la luz pasa cerca de un objeto muy masivo, la trayectoria de la luz se verá curvada debido a la curvatura del espacio-tiempo provocada por el objeto masivo. Las observaciones realizadas con lentes gravitacionales consisten en utilizar este fenómeno conocido como “curvatura de la luz” para poder determinar la cantidad de materia que se encuentra en un lugar. Existen 3 tipos de fenómenos de lente gravitacional: fuerte, débil y microlente.

**Fuerte:** aquí se observan distorsiones muy claras y se puede llegar a apreciar la formación de figuras como arcos o anillos de Einstein.

**Débil:** en este fenómeno ocurren distorsiones débiles pero apreciables, pero debido a que son distorsiones débiles deben realizarse muchas mediciones para que se pueda asegurar que el fenómeno en cuestión está ocurriendo.

**Microlente:** en este fenómeno no ocurre distorsión aparente, pero si hay un cambio en la cantidad de luz recibida. Este es el fenómeno más utilizado para intentar detectar materia oscura compacta.

### **Halo de Materia Oscura**

Se infiere que la materia oscura de una galaxia se encuentra en un halo casi esférico alrededor de la misma. Estos halos no pueden ser observados directamente ya que están hechos de materia oscura, pero se puede inferir su existencia debido a observaciones sobre el movimiento de estrellas y gas en las galaxias.

Si no existiesen los halos esféricos, la velocidad rotacional de la galaxia disminuiría a distancias grandes del centro de la galaxia, pero se ha observado que la velocidad de rotación de las galaxias no disminuye lejos del centro (Bosma, A., 1978, Universidad de Groningen), esto implica una de dos cosas, o que existe materia extra invisible alrededor de las galaxias para compensar este movimiento, o que la Relatividad General está incompleta.

## Candidatos a Materia Oscura

A pesar de que se cuenta con una gran cantidad de observaciones que sirven como evidencia para demostrar la existencia de la materia oscura, aún no se sabe de qué está hecha. En general se proponen dos posibilidades: que exista una partícula de materia oscura o que sea algún objeto compacto astrofísico que no interactúe con la luz.

Un candidato a materia oscura es el neutrino, formando un tipo de materia oscura conocida como “materia oscura caliente”. Esto quiere decir que las partículas tienen velocidades relativistas en algún momento. Otro candidato un poco mejor es un neutrino más pesado (con una masa parecida a la de un protón). Debido a su gran masa tendrá velocidades mucho menores a las del límite relativista. A este tipo de materia se le conoce como “materia oscura fría”. También están los llamados “partícula más ligera supersimétrica” (LSP) y las “partículas masivas débilmente interactuantes” (WIMPs), que consisten en dos tipos hipotéticos de partículas.

Se mencionó que también hay objetos compactos astrofísicos que se cree podrían ser materia oscura, éstos objetos son los agujeros negros primordiales (PBHs) y los objetos masivos de halo compacto (MACHOs). Los MACHOs pueden ser tanto agujeros negros como estrellas de neutrones, o hasta enanas café, es el nombre que se le da a un objeto compuesto de materia bariónica y que no emite (o emite muy poca) radiación. Los MACHOs han sido detectados con lentes gravitacionales usando el fenómeno de microlente aunque aún no se sabe con seguridad qué son. Por último están los PBHs, de los cuáles se hablará con más detalle en secciones posteriores.

## Modelo Lambda-CDM y parámetros de densidad

El modelo  $\Lambda$ CDM es una parametrización del modelo cosmológico del Big Bang, en donde se considera una constante cosmológica  $\Lambda$  cuyo valor está asociado con la energía oscura y la materia oscura fría (CDM).

Se le llama parámetro de densidad ( $\Omega$ ) a la razón entre la densidad de energía y materia en el universo con la densidad crítica, siendo esta última la densidad en la cual el universo deja de expandirse tras un tiempo infinito. Entonces este parámetro está dado por

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (3)$$

siendo  $\rho$  la densidad actual y  $\rho_c$  la densidad crítica, que está dada por

$$\rho_c(t) = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (4)$$

donde  $H$  es el parámetro de Hubble. Si usamos estos valores en la ecuación de Friedmann

$$H^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{k}{a^2} \quad (5)$$

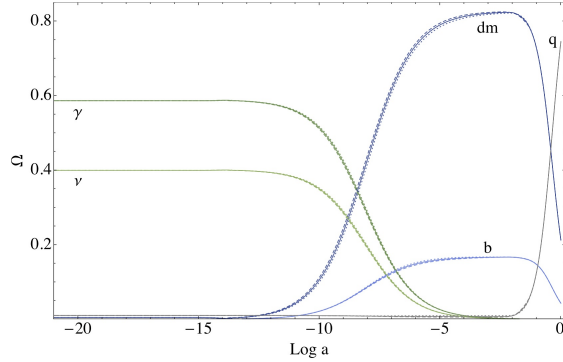


Figura 1: Gráfica que muestra la evolución de los parámetros de densidad desde el Big Bang hasta el día de hoy. Aquí vemos que  $\gamma$  corresponde a los fotones,  $\nu$  a los neutrinos,  $dm$  a materia oscura,  $b$  a materia bariónica y  $q$  a energía oscura.

obtenemos

$$\Omega - 1 = \frac{k}{a^2 H^2} = \Omega_k \quad (6)$$

donde  $k/a^2$  es la curvatura espacial del universo. A  $\Omega_k$  se le considera como un parámetro de densidad relacionado con la curvatura del espacio. En el caso en que  $k = 0$  tenemos un universo plano, lo que implicaría  $\Omega_k = 0$ , y este caso es de mucho interés pues el valor de  $\Omega_k$ , según observaciones, es  $\Omega_k < 0,005$ .

El modelo  $\Lambda$ CDM también propone que  $\Omega$  está formado por varias componentes, y como  $\Omega_k \approx 0$  entonces  $\Omega \approx 1$ , lo que nos da

$$\Omega = \Omega_b + \Omega_{DM} + \Omega_\Lambda \approx 1 \quad (7)$$

siendo  $\Omega_b$  el parámetro de densidad de materia bariónica,  $\Omega_{DM}$  el de materia oscura y  $\Omega_\Lambda$  el de energía oscura. Los parámetros de materia bariónica y materia oscura tienen en conjunto un valor de  $\Omega_b + \Omega_{DM} \approx 0,308$ , y esto implica que, si la materia oscura es unas 7 veces más abundante en el universo que la materia bariónica, como sugieren observaciones actuales, se tendría  $\Omega_b \approx 0,04$ ,  $\Omega_{DM} \approx 0,27$  y  $\Omega_\Lambda \approx 0,69$ .

Como se mencionó antes, en los primeros instantes del Big Bang hubo una época en la que la radiación dominaba, esta radiación estaba compuesta principalmente de neutrinos y fotones altamente energéticos, después del periodo de inflación siguió una época en la que la materia era más abundante, y después de esto empezó a dominar la materia, y seguido de esto comenzó una época en la que la energía oscura se hizo mucho más abundante que la materia. Una forma de visualizar esto es con una gráfica (Figura 1) en la que se observa que, al día de hoy, los parámetros de densidad tienen los valores medidos.

## Agujeros negros primordiales

### ¿Qué es un agujero negro?

Un agujero negro podemos definirlo como una región en el espacio-tiempo cuya distorsión genera una fuerza gravitacional tan fuerte que puede absorber cualquier tipo de partícula incluyendo la luz. Estos objetos se forman debido al colapso gravitacional de una estrella muy masiva donde las fuerzas nucleares ya no son lo suficientemente fuertes para impedir que la estrella se contraiga sobre sí misma debido a su gravedad, originando una singularidad espacio-temporal.

### Espacio-tiempo

Cuando se habla de teoría general de la relatividad normalmente se hace una analogía para comprender mejor la idea del espacio-tiempo. Imaginemos un pedazo de tela extendido, ahora supongamos que dejamos caer una bola de metal de 1 kilogramo, podemos notar 2 cosas inmediatamente. La primera es que el objeto debido a su masa distorsiona la tela y si colocamos otros objetos cerca de la bola estos tenderán a irse hacia ella. Segundo, la distorsión en la tela es proporcional a la masa, lo que significa que mientras más masivo sea el objeto más distorsiona la tela.

Esto es exactamente lo que pasa con el espacio-tiempo según la teoría de Einstein, la tela es el espacio-tiempo, la bola de metal son los objetos astronómicos como: planetas, estrellas, etc. Y la distorsión representa la fuerza que conocemos como gravedad. En un agujero negro el colapso es tan enorme que se genera un fenómeno llamado singularidad, un punto infinitamente pequeño y denso en donde se concentra toda la materia que alguna vez perteneció a la estrella. Esta singularidad es rodeada por un horizonte de sucesos el cual determina la región en donde ninguna partícula puede escapar debido a que la gravedad se intensifica enormemente dentro de dicha región.

### ¿Qué es un agujero negro primordial (PBH)?

Un PBH es en esencia un agujero negro que se formó en los primeros instantes del Big Bang debido a la alta densidad y fluctuaciones en el universo temprano, estas fluctuaciones originaron regiones en donde habría una gran acumulación de materia la cual eventualmente colapsaría gravitacionalmente originando los PBHs. Recordemos que durante los momentos que siguieron al Big Bang había una enorme presión y temperatura estas condiciones extremas junto con una pequeña perturbación en la densidad de materia pueden dar paso a un agujero negro.

Si hacemos una comparación de la densidad cosmológica en un tiempo  $t$  después del Big Bang con la densidad asociada a un agujero negro de masa  $M$  [9], tendremos que la masa de un PBH durante la época de radiación es aproximadamente igual a la masa del horizonte de Hubble y vendrá dada por:

$$M_{PBH}(t) \approx M_H = 10^{15} * \left( \frac{t}{10^{-23}s} \right) \text{ gramos} \quad (8)$$



$M_{PBH}$  es la masa del PHB y  $M_H$  es la masa del horizonte de Hubble.

Esta ecuación nos dice que de acuerdo al momento de creación del agujero negro será la masa asociada a él, por ejemplo: si tenemos un agujero negro que se formó en  $t = 10^{-43}s$  (tiempo de Plack) su masa será  $M = 10^{-5}gramos$  y si tenemos un agujero negro que se formó en  $t = 1s$  entonces  $M = 10^5 M_{solar}$  donde  $M_{solar} = 1,98 \times 10^{30}kg$ . Este amplio espectro de masas (que será tratado con más detalle en las proximas secciones) es una de las razones por la que los PBHs se propusieron como candidatos a materia oscura.

Un importante detalle es que si un agujero negro se formara en la actualidad su masa debe ser superior a una masa solar. Si tomamos en cuenta que la masa del horizonte de Hubble al final del periodo de inflación del universo en terminos de la temperatura de recalentamiento  $T_{RH}$  es:

$$M_H = 10^{17}g * \left( \frac{10^7 GeV}{T_{RH}} \right)^2 \quad (9)$$

Podemos darnos una idea de la masa de un PBH y aunque la temperatura de recalentamiento depende del modelo infacionario que se considere, ciertamente la mayoría de los modelos  $T_{RH}$  es del orden de  $10^{10}GeV$  (ya que leptogenesis no permite valores menores a  $10^9 GeV$ ). Esto significa que pudieron formarse PBHs con masas muy pequeñas (alrededor de  $10^{11}g$ ) comparadas con las que se formaron 1 segundo después del Big Bang. Estas masas tan bajas impulsaron la investigación sobre las propiedades cuánticas de los PBHs [7].

### Radiación de Hawking

Fue hasta 1976 cuando el científico Stephen Hawking demostró matemáticamente que los agujeros negros podían emitir radiación, perder masa y eventualmente evaporarse, lo que iba totalmente en contra de lo que se pensaba de un agujero negro. Para entender esto necesitamos conocer lo que son las fluctuaciones cuánticas, este fenómeno se debe al principio de incertidumbre en su forma de indeterminación tiempo-energía cuya expresión matemática es:

$$\Delta E * \Delta \tau \geq \frac{h}{4\pi} \quad (10)$$

Debido a la aparente violación del principio de conservación de la energía se introduce un efecto cuántico en el que se generan pares de partícula y antipartícula virtuales durante un lapso de tiempo muy corto provenientes del vacío. Si estas partículas virtuales se generan en la cercanía del horizonte de eventos de un agujero negro, una de ellas puede ser atrapada por la intensa gravedad (dentro del horizonte) y la otra puede escapar; si la partícula logra escapar, la energía de dicho proceso será proveniente del agujero negro. Lo que significa que el agujero negro deberá perder energía para compensar la creación de las partículas que separó. Este fenómeno se denomina radiación de Hawking ya que el agujero negro por consecuencia emite radiación y a su vez la masa disminuye.

La radiación de Hawking para un agujero negro estático es

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k} = 10^{-7} \left( \frac{M}{M_{solar}} \right)^{-1} K \quad (11)$$

Donde el tiempo de evaporización esta dado por

$$\tau(M) \approx \frac{\hbar c^4}{G^2 M^3} = 10^{64} \left( \frac{M}{M_{solar}} \right)^3 \quad (12)$$

Lo que nos dice que mientras más pequeño sea la masa del agujero negro más rapidamente se evaporará, de hecho utilizando las ecuaciones anteriores podemos ver facilmente que solo los agujeros negros que se crearon antes de  $10^{-23}s$  cuya masa será más pequeña que  $10^{15}g$  se evaporarán en la actualidad, estos agujeros negros emitirán fotones del orden de  $100MeV$  y son los que con el equipo y técnicas adecuadas podrían ser detectados.

### Proceso de Formación de PBHs a partir de inhomogeneidades

Como ya hemos mencionado los PBHs pudieron haberse formado en los primeros instantes del Big Bang, debido a la alta densidad en el universo. Pero además necesitamos que haya fluctuaciones para que las regiones en donde haya sobre densidad detengan su expansión y colapsen. Los primeros cálculos realizandos por Bernard Carr y Hawking revelaron que dichas regiones que eventualmente generarían un PBH debían ser más grande que la longitud de Jeans

$$r_J = 4\pi \frac{\sqrt{w}}{5 + 9w} d_H \quad (13)$$

Donde  $d_H$  es el horizonte de partículas (que es del orden del radio de Hubble  $r_H = 1/H$ ) y  $w$  una constante de la ecuación de estado

$$p = w\rho \quad (14)$$

(Con  $0 < w < 1$ , por ejemplo para la época de radiación  $w = 1/3$ ).

Pero también dicha región no puede ser más grande que el tamaño del horizonte ya que de ser así formaría un universo cerrado separado del nuestro. Veremos 2 implicaciones muy importantes de lo anterior. Primero como habíamos mencionado, para un PBH que se formó un tiempo  $t$  después del Big Bang éste debe ser del orden de la masa del horizonte.

Y segundo, se requiere que la región que colapsará en un PBH debe ser más grande que una cierta densidad critica  $\delta = \Delta M/M_H$ . Donde  $\delta > w$ .

A lo largo de los años muchos autores han calculado valores para esta densidad critica ya que esta es esencial si queremos calcular el espectro de masas de los PBHs.

El primer cálculo fue realizado por Carr en 1975, el cual encontró que  $\delta \approx 1/3$ . Carr asumió un modelo de Friedmann cerrado con pequeñas perturbaciones en la densidad dando como resultado un espectro de masas que solo depende de

la amplitud cuadrática media  $\epsilon$  en la densidad de fluctuaciones y de la ecuación de estado (9). Para la época de radiación tomando  $w = 1/3$  y asumiendo una distribución gaussiana con simetría esférica para la densidad de fluctuaciones, la fracción de regiones de masa  $M$  que colapsarán es[9]:

$$\beta(M) \sim \epsilon(M) * \exp\left(\frac{-\gamma^2}{2\epsilon(M)^2}\right) \quad (15)$$

Donde  $\epsilon(M)$  es la amplitud de fluctuación con una masa horizonte  $M$ . Uno de los puntos más importantes a resaltar de los cálculos realizados por Carr es que los PBHs sólo pueden tener un espectro de masas amplio si las fluctuaciones son invariantes escalares. Si éste es el caso el espectro de masas es:

$$\frac{dn}{dM} = (\alpha - 2)(M/M_*)^{-\alpha} M_*^{-2} \Omega_{PBH} \rho_{critica} \quad (16)$$

Donde  $M_* \approx 10^{15}g$ ,  $\Omega_{PBH}$  es el parámetro de densidad total de los PBHs y  $\alpha$  está dada por:

$$\alpha = \left(\frac{1 + 3w}{1 + w}\right) + 1 \quad (17)$$

(Si  $w = 1/3$  entonces  $\alpha = 5/2$ , esto significa que si la densidad de los PBHs es más grande que  $M$  decaen como  $M^{-1/2}$ , entonces la mayor parte de esta densidad está contenida en los PBHs más pequeños).

Por último el parámetro de densidad actual  $\Omega_{PBH}$  asociado a un PBH en un tiempo  $t$  esta relacionado con  $\beta$  por:

$$\Omega_{PBH} = \beta \Omega_R (1 + z) \approx 10^{18} \beta \left(\frac{M}{10^{15}}\right)^{-1/2} \quad (18)$$

Donde  $M$  es la masa de la región colapsada,  $z$  el corrimiento hacia el rojo y  $\Omega_R$  es el parámetro de densidad del fondo de microondas ( $\Omega_R \approx 10^{-4}$ ).

Los cálculos realizados por Carr dan soporte al amplio espectro de masas que podrían tener los PBHs y con esto muchos científicos han propuesto modelos que mejoran la teoría de Carr para poder observarlos.

## Observaciones de PBHs

Con la reciente detección de ondas gravitacionales se ampliaron los métodos de detección de objetos masivos como agujeros negros y PBHs y se han propuesto algunos nuevos.

LIGO y VIRGO lograron detectar ondas gravitacionales de sistemas binarios de agujeros negros, y existe la posibilidad de que estos agujeros negros sean primordiales debido a que, al menos en teoría, las masas en los modelos canónicos sobre la distribución de materia oscura están dentro del rango especificado por LIGO. No es seguro que el sistema binario de agujeros negros esté formado de PBHs, pero no podemos descartar la opción de que así sea.

Hay propuestas de utilizar un método llamado “microlente difractivo”, que consiste en realizar observaciones de microlente gravitacional en quásares usando PBHs sub-lunares como lentes. Éste método es reciente y aún no está del todo implementado pero, si funciona, podría usarse para determinar el porcentaje de materia oscura que está hecho de PBHs, pues es posible que la materia oscura esté formada de otros componentes distintos.

## Conclusiones

Los PBHs cumplen con las propiedades que se espera tenga la materia oscura, como su poca o nula interacción con la luz, su gran densidad y su aparente distribución en la galaxia, pero esto no es mas que un modelo propuesto, dado que aún no se ha logrado demostrar que existen los PBHs directamente, y las observaciones encuentran objetos que podrían ser PBHs, pero no se sabe con seguridad si lo son o no, por lo que tal vez sea necesario esperar a experimentos más sensibles de detección de ondas gravitacionales, como el telescopio Einstein, DECIGO (Deci-Hertz Interferometer Gravitational wave Observatory) y BBO (Big Bang Observer).

## Bibliografía

- [1]Blais, D., Kiefer, C. and Polarski, D. (2002). Can primordial black holes be a significant part of dark matter?. *Physics Letters B*, 535(1-4), pp.11-16.
- [2]Inomata, K., Kawasaki, M., Mukaida, K., Tada, Y. and Yanagida, T. (2017). Inflationary primordial black holes as all dark matter. *Physical Review D*, 96(4).
- [3]Lacki, B. and Beacom, J. (2010). PRIMORDIAL BLACK HOLES AS DARK MATTER: ALMOST ALL OR ALMOST NOTHING. *The Astrophysical Journal*, 720(1), pp.L67-L71.
- [4]Frampton, P., Kawasaki, M., Takahashi, F. and Yanagida, T. (2010). Primordial black holes as all dark matter. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2010(04), pp.023-023.
- [5]Hawkins, M. (2011). The case for primordial black holes as dark matter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415(3), pp.2744-2757.
- [6]Carr, B., Kühnel, F. and Sandstad, M. (2016). Primordial black holes as dark matter. *Physical Review D*, 94(8).
- [7]Hidalgo Cuellar, J. (2009). Primordial black holes in non-linear perturbation theory. Doctorado. University of London.
- [8]Kohri, K. and Yokoyama, J. (1999). Primordial black holes and primordial nucleosynthesis: Effects of hadron injection from low mass holes. *Physical Review D*, 61(2).
- [9]B. J., C. (2005). Primordial Black Holes: Do They Exist and Are They Useful?. *Inflating Horizon of Particle Astrophysics and Cosmology*.
- [10]Planck Collaboration (2015). Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. arXiv:1502.01589 [astro-ph.CO]

- . [11] T. Naderi, A. Mehrabi, S. Rahvar1. (2016). Primordial black hole detection through diffractive microlensing. arXiv:1711.06312
- . [12] Hawkins, M. (2011). The case for primordial black holes as dark matter. arXiv:1106.3875
- . [13] Beyer, J. (2014). Linear Perturbations in coupled cosmon-bolon cosmology. arXiv:1407.0497
- . [14] The Virgo collaboration (2017). Gravitational waves from a binary black hole merger observed by LIGO and Virgo. <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20170927>