

Sobre el carbón y el oxígeno en una química primordial no estándar del Big Bang

J.C. Campos-García

*Departamento de Física, Universidad de Sonora,
Apartado Postal 1626, Hermosillo, 83000, Sonora, México,
e-mail: jcampos@cajeme.cifus.uson.mx*

Recibido el 13 de octubre de 2009; aceptado el 10 de agosto de 2010

En el presente trabajo se considera la acumulación de especies basadas en carbón primordial y oxígeno primordial durante las edades oscuras. El análisis de las respectivas acumulaciones, se realiza a través de la conversión acumulativa aplicada a los canales de una amplia red química para el carbón y el oxígeno en un modelo no estándar del Big Bang. Se encuentra que las especies de mayor acumulación resultan ser las especies C, CH, C⁺, CH⁺, CH₂⁺, O, OH, OH⁺, O⁺, H₂O⁺. Además, se realiza una estimación observacional en líneas rotacionales de la molécula CH.

Descriptores: Procesos químicos (astrofísica); cosmología; reacciones nucleares directas; nucleosíntesis; abundancias.

In the present paper its considered the acumulation of species basedes in primordial carbon and primordial oxygen during the dark ages. This analysis its make through the acumulative conversion aplicade to the chanel of a spacious chemical red for carbon and oxygen in a no standard model of the Big Bang. Its find that the species of major acumulation result be the species C, CH, C⁺, CH⁺, CH₂⁺, O, OH, OH⁺, O⁺, H₂O⁺. Moreover, its make an observational estimation in rotational lines of the CH molecule.

Keywords: Chemical processes (astrophysics); cosmology; nuclear reactions direct; nucleosynthesis Big Bang.

PACS: 95.30.Ft; 98.80.-k; 24.50.+g; 26.35.+c

1. Introducción

Dentro del contexto de la teoría del Big Bang, la cual aún permanece vigente, es muy conocido, a través de la literatura, que el estudio de la química primordial comienza con la formación de los primeros ingredientes moleculares, es decir, los basados en hidrógeno, helio, deuterio y litio. Al inicio de esta fase de evolución del plasma primigenio se le conoce como época posrecombinatoria. El estudio de la química primordial puede llevarse a cabo en dos principales contextos: el primero, es el de la formación molecular a través de redes químicas del gas primigenio, tal y como se muestra en las Refs. 1 a la 9 y en el segundo, a través de la formación de las primeras estructuras, como se puede observar en las Refs. 10 a la 15. Durante la última década, se ha registrado un crecimiento notable en la investigación cosmológica de este segundo contexto [16-18]. En relación a estos tipos de estudios, la literatura registra, también, una gran variedad de constricciones observacionales sobre los ingredientes contenidos en objetos con corrimientos al rojo z cercanos a nuestra época actual de $z = 0$ [19-24], las cuales se obtienen por medio de la detección de los objetos más remotos, tal y como los cuasares, galaxias, cúmulos galácticos, entre otros. Por ejemplo, hay varias galaxias candidatas, que han sido identificadas fotométricamente en $z > 7$ [25-26]. Otras galaxias, por medios espectroscópicos, también, se han confirmado en $z \sim 6.6$ [27-31]. En la Ref. 32, se reportó la detección espectroscópica en $z = 6.96$ de una galaxia, que muestra claramente una emisión del tipo Lyman- α en 9682 Å. Entre los descubrimientos más recientes, se tienen galaxias en $z \sim 8 - 9$ observadas en el campo profundo a través del infrarrojo, con ayuda de la cámara WFC3 [33].

En la Refs. 34 y 35, además, se reportan objetos (explosiones de rayos gamma de larga duración) con corrimientos al rojo entre los más altos que se han registrado ($z = 8.2$ y $z = 8.1$, respectivamente). Tales constricciones, pueden verificar las predicciones del modelo estándar Big Bang de nucleosíntesis (EBBN). Sin embargo, existe también constricción observacional que no favorece a la cosmología estándar [36]. Ese tipo de observaciones espectroscópicas, se realizan a objetos con z muy grandes ($z \sim 2 - 4$), tal y como se muestra en la Ref. 37. Recientemente, se ha enfatizado la inspección de cuasares en altos z , con los objetivos de verificar la producción nucleosintética estándar y detectar absorbedores de línea de elementos pesados, ya que son frecuentemente identificados hoy en día a través de las fuentes luminosas más lejanas. Por ejemplo, en las Refs. 38 a la 40 se tiene registrado el descubrimiento de muchos absorbedores, cuyo z convergen todos en $z \sim 6$. De hecho, la información más reciente obtenida [41,40] parece estar sugiriendo que el contenido metálico del medio intergaláctico (IGM) se está incrementando en épocas lejanas, suponiendo que las condiciones de ionización típicas no evolucionan mucho.

La existencia y determinación precisa de especies pesadas primordiales, originadas antes de la formación de las primeras estructuras, es crucial, debido a que mucho conocimiento cosmológico, directo e indirecto, pudiera obtenerse. Por ejemplo, la inclusión de elementos pesados en el gas primordial, contribuiría en forma significativa en la evolución de las primeras proto-estructuras, gracias a que en general poseen grandes momentos dipolares, lo cual los convierte en buenos enfriadores. Además, son serios candidatos para ser detectados a través de su estructura rovibracional, y así obtener información valiosa del universo lejano. Su construc-

ción observacional, podría también ayudar a bosquejar las zonas más alejadas del universo, de tal forma que pudiera facilitarse la localización de la época z correspondiente al fin de las edades oscuras. Para la realización de tales objetivos, se tienen contemplados diversos proyectos, entre los cuales podemos mencionar: GTM (Gran Telescopio Milimétrico), CARMA (Combined Array for Research in Millimeter Wave-Astronomy), ALMA (Atacama Large Millimeter Array) y otros más, debido a que se tienen grandes expectativas por sus rangos potenciales de observabilidad (milimétrico y submilimétrico).

En la literatura, existen modelos no estándar Big Bang de nucleosíntesis (NBBN) [42]. Tales modelos suponen la existencia de fluctuaciones de densidad en el plasma primigenio. Tal suposición genera como consecuencia un aumento considerable de abundancias de elementos pesados [43-45].

En nuestro artículo anterior [46] se obtienen por primera vez abundancias moleculares basadas en carbón primordial y oxígeno primordial. Tales cálculos se realizan adoptando un modelo NBBN [44]. En este modelo se consideran las fluctuaciones de densidad en el universo lejano y a partir de tal escenario se predicen altas abundancias de estas especies primordiales, logrando alcanzar valores hasta de 10^{-9} para ^{12}C , por ejemplo; tal modelo maximiza la producción de núcleos pesados suponiendo una difusión completa de los neutrones fuera de la región de densidad alta. Los protones, permanecen atrapados en esa región debido a que su trayectoria libre media es mucho más corta. Por lo tanto, inhomogeneidades de densidad bariónica resultan en variaciones locales de la razón neutrón a protón, con una cantidad sobrante de neutrones libres en la zona de baja densidad, después de la formación inicial de ^4He . La captura de neutrones puede producir isótopos ricos en neutrones, permitiendo desviar la reacción triple α lenta y, como consecuencia, esto conduce a formación de elementos pesados. Debido a eso, moléculas basadas en estos elementos (CH , OH , CH^+ , OH^+ , ...) es posible que hayan sido creadas en épocas con corrimientos al rojo z muy grandes ($z < 300$). La realización del cálculo de las abundancias moleculares se logra, resolviendo de manera simultánea la ecuación de evolución de las especies en función de z , la ecuación de evolución de la temperatura de la radiación cósmica de fondo (RCF) y la ecuación de evolución de la temperatura del gas. En esa ocasión, los resultados numéricos indicaron una mayor abundancia de CH ($\sim 10^{-14}$) en el caso de moléculas compuestas de carbón. Ahí también se encuentran los canales más importantes de formación y destrucción de las especies basadas en carbón primordial y oxígeno primordial (llamados ahí modelos mínimos). Lo que ahora podemos preguntarnos es ¿podría ser significativa la acumulación de especies moleculares pesadas primordiales, según el modelo NBBN mencionado en los renglones anteriores, así como las basadas en carbón y oxígeno, de tal forma que pudiera existir una influencia importante en el gas primigenio durante las edades oscuras? Para intentar responder a este cuestionamiento, en el presente artículo se analizan reacción por reacción una

amplia red de reacciones que involucran la formación y destrucción de moléculas basadas en carbón y oxígeno, para el caso de un gas homogéneo y obedeciendo al modelo NBBN ya discutido al inicio del parrafo. Una discusión muy similar se llevó a cabo en la Ref. 47. Ahí, se investiga la posibilidad de existencia de elementos pesados (carbón y oxígeno) en el universo lejano a través de la cosmología estándar. En su respectivo análisis, los autores de ese trabajo plantean la conversión acumulativa aplicada a la química estándar del carbón y el oxígeno. Así pues, en la segunda sección se describe el método de análisis. En la tercera sección, se aplica el método a los principales canales de formación y destrucción de las especies primordiales basadas en carbón y oxígeno. En la cuarta sección, se describen los resultados obtenidos. En la quinta sección, se presenta una estimación observacional basada en líneas de rotación de la molécula CH . Por último, en la sexta sección, se presenta una amplia discusión de dicho análisis.

2. La conversión acumulativa durante las edades oscuras

La conversión acumulativa γ por átomo, ion o molécula, integrada sobre el tiempo, es una expresión que nos ayuda a valorar en forma relativa, la importancia de una reacción química, independientemente del tipo de reacción que se tenga en cuenta, tal y como se describe en la Ref. 47. Dicha conversión se puede expresar en la forma

$$\gamma = \int (H) R dt = - \int_{z_{min}}^{z_{max}} 2.4 \times 10^{11} R (1+z)^{1/2} dz, \quad (1)$$

donde $n(\text{H}) \sim 4 \times 10^{-7} (1+z)^3 \text{ cm}^3$ es el número de densidad de átomos de hidrógeno, el cual corresponde a una razón de fotón a barión de $\eta \sim 10^9$ y una densidad de fotones $\sim 400 \text{ cm}^{-3}$ ($\Omega_b h^2 = 0.034$). En la ecuación anterior R representa la razón de reacción, la cual comúnmente se expresa como una función de la temperatura de la RCF (T_r) o del gas (T_g). Los límites superior z_{max} e inferior z_{min} de (1), expresan el rango potencial de evolución en z de una razón de reacción. De manera similar a lo realizado en la Ref. 47, aquí se adopta el valor de $z_{max} \sim 1500$, el cual marca el inicio de la etapa de recombinación del hidrógeno. Además, como se realiza en la Ref. 47, se toma en cuenta que $z_{max} \gg z_{min}$, lo que nos produce una simplificación en el resultado de la integral (1). En vista de lo anterior, la conversión acumulativa γ se puede resolver para z , logrando quedar reescrita como

$$\gamma \sim 0.93 \times 10^{16} R(T) \sim 1 \times 10^{16} R(T), \quad (2)$$

tal y como se obtiene en la Ref. 47. En (2), la razón de reacción $R(T)$ será tomada en cuenta en la siguiente sección, para una gran red de canales importantes, que involucran la formación y destrucción de especies basadas en carbón y oxígeno.

TABLA I. Conversión acumulativa del carbón durante las edades oscuras. En la primer columna de esta tabla, se presenta una red amplia de reacciones para la química del carbón. La segunda columna describe la clase de reacción. La tercer columna proporciona las razones de reacción para cada una de ellas. Estas razones fueron obtenidas desde la base de datos UMIST. La última columna especifica los valores de la conversión acumulativa correspondientes a la primera mitad de las edades oscuras.

Reacción	Clase	R en $[\text{cm}^3 \text{s}^{-1}]$	γ
$C^+ + H^- \rightarrow H + C$	Reacomodo ion-neutro	$2.3 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.3 \times 10^9 - 1.9 \times 10^9$
$He^+ + C \rightarrow C^+ + He$	Transferencia de Carga	$6.3 \times 10^{-15} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.75} \exp \frac{-0.0}{T}$	133.31–80.35
$H^+ + C^- \rightarrow C + H$	Reacomodo ion-neutro	$2.3 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.3 \times 10^9 - 1.9 \times 10^9$
$He^+ + C^- \rightarrow C + He$	Reacomodo ion-neutro	$2.3 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.3 \times 10^9 - 1.9 \times 10^9$
$C^+ + C^- \rightarrow C + C$	Reacomodo ion-neutro	$2.3 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.3 \times 10^9 - 1.9 \times 10^9$
$C + e^- \rightarrow C^- + h\nu$	Transferencia de Carga	3.0×10^{-15}	30–30
$C^- + h\nu \rightarrow C + e^-$	Transferencia de Carga	$3.0 \times 10^5 \left(\frac{T}{300}\right) \exp \frac{-1500}{T}$	$8.2 \times 10^{13} - 8.2 \times 10^5$
$C^+ + H \rightarrow C + H^+$	Transferencia de Carga	1.4×10^{-16}	1.4–1.4
$C + H^+ \rightarrow C^+ + H$	Transferencia de Carga	2.8×10^{-15}	28–28
$H + CH \rightarrow C + H_2$	Reacomodo neutro-neutro	$1.3 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-80.0}{T}$	$1.1 \times 10^6 - 10^6$
$H + CH \rightarrow C + H + H$	Disociación Colisional	$6.0 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-40200.0}{T}$	$2.2 \times 10^{-14} - 5.1 \times 10^{-35}$
$C + H_2 \rightarrow CH + H$	Reacomodo neutro-neutro	$6.6 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-11700.0}{T}$	$3.8 - 3.7 \times 10^{-6}$
$H_2 + CH \rightarrow C + H + H_2$	Disociación Colisional	$6.0 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-40200.0}{T}$	$2.2 \times 10^{-14} - 5.1 \times 10^{-35}$
$C^+ + H_2 \rightarrow CH^+ + H$	Reacomodo ion-molécula	$1.0 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-4640.0}{T}$	3300–13
$C + H \rightarrow CH + h\nu$	Asociación Radiativa	$1.0 \times 10^{-17} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	0.1–0.1
$H^+ + CH \rightarrow CH^+ + H$	Reacomodo ion-molécula	$1.9 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.9 \times 10^7 - 1.9 \times 10^7$
$H^- + C \rightarrow CH + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$1.0 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1 \times 10^7 - 1 \times 10^7$
$H_2^+ + C \rightarrow CH^+ + H$	Reacomodo ion-molécula	$2.4 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.4 \times 10^7 - 2.4 \times 10^7$
$H_2^+ + CH \rightarrow CH^+ + H_2$	Reacomodo ion-molécula	$7.1 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.1 \times 10^6 - 7.1 \times 10^6$
$H_3^+ + C \rightarrow CH^+ + H_2$	Reacomodo ion-molécula	$2.0 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.0 \times 10^7 - 2.0 \times 10^7$
$He^+ + CH \rightarrow C^+ + H + He$	Reacomodo ion-molécula	$1.1 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.1 \times 10^7 - 1.1 \times 10^7$
$He^+ + CH \rightarrow CH^+ + He$	Reacomodo ion-molécula	$5.0 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$5.0 \times 10^6 - 5.0 \times 10^6$
$C^+ + H \rightarrow CH^+ + h\nu$	Reacomodo ion-molécula	$1.7 \times 10^{-17} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	0.17–0.17
$C^+ + CH \rightarrow CH^+ + C$	Transferencia de Carga	$3.8 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.8 \times 10^6 - 3.8 \times 10^6$
$CH^+ + H \rightarrow C^+ + H_2$	Reacomodo ion-molécula	$7.5 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.5 \times 10^6 - 7.5 \times 10^6$
$CH^+ + e^- \rightarrow C + H$	Recombinación Disociativa	$1.5 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.42} \exp \frac{-0.0}{T}$	$9.8 \times 10^8 - 1.3 \times 10^9$
$H + C^- \rightarrow CH + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$5.0 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$5.0 \times 10^6 - 5.0 \times 10^6$
$H + CH_2 \rightarrow CH + H_2$	Reacomodo Neutro-Neutro	$6.6 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$6.6 \times 10^5 - 6.6 \times 10^5$
$H_2 + CH \rightarrow CH_2 + H$	Reacomodo Neutro-Neutro	$5.4 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-1943.0}{T}$	$4.9 \times 10^5 - 5.0 \times 10^4$
$H^+ + CH_2 \rightarrow CH^+ + H_2$	Reacomodo Ion-Molécula	$1.4 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.4 \times 10^7 - 1.4 \times 10^7$
$H + CH_2^+ \rightarrow CH^+ + H_2$	Transferencia de Carga	$1.0 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-7080.0}{T}$	$1.6 \times 10^3 - 0.38$
$H_2^+ + CH \rightarrow CH_2^+ + H$	Reacomodo Ion-Molécula	$7.1 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.1 \times 10^6 - 7.1 \times 10^6$
$H_2 + CH^+ \rightarrow CH_2^+ + H$	Transferencia de Carga	$1.2 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.2 \times 10^7 - 1.2 \times 10^7$
$H_3^+ + CH \rightarrow CH_2^+ + H_2$	Reacomodo Ion-Molécula	$1.2 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.2 \times 10^7 - 1.2 \times 10^7$
$He^+ + CH_2 \rightarrow C^+ + He + H_2$	Transferencia de Carga	$7.5 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.5 \times 10^6 - 7.5 \times 10^6$
$He^+ + CH_2 \rightarrow CH^+ + He + H$	Reacomodo Ion-Molécula	$7.5 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.5 \times 10^6 - 7.5 \times 10^6$
$H^+ + CH_2 \rightarrow CH_2^+ + H$	Reacomodo Ion-Molécula	$1.4 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.4 \times 10^7 - 1.4 \times 10^7$
$C + CH_2 \rightarrow CH + CH$	Reacomodo Neutro-Neutro	$2.6 \times 10^{-12} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-23550.0}{T}$	$7.2 \times 10^{-9} - 5.7 \times 10^{-21}$
$H_2^+ + CH_2 \rightarrow CH_2^+ + H_2$	Transferencia de Carga	$1.0 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^7 - 1.0 \times 10^7$
$C^+ + CH_2 \rightarrow CH_2^+ + C$	Reacomodo Ion-Molécula	$5.2 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$5.2 \times 10^6 - 5.2 \times 10^6$
$CH_2^+ + e^- \rightarrow CH + H$	Transferencia de Carga	$1.6 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.60} \exp \frac{-0.0}{T}$	$8.7 \times 10^8 - 1.3 \times 10^9$
$CH_2^+ + e^- \rightarrow C + H + H$	Recombinación Disociativa	$4.0 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.60} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.1 \times 10^9 - 3.2 \times 10^9$
$CH_2^+ + e^- \rightarrow C + H_2$	Recombinación Disociativa	$7.6 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.60} \exp \frac{-0.0}{T}$	$4.1 \times 10^8 - 6.2 \times 10^8$
$H^- + CH \rightarrow CH_2 + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$1.0 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^6 - 1.0 \times 10^6$
$H_2 + C^- \rightarrow CH_2 + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$1.0 \times 10^{-13} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^3 - 1.0 \times 10^3$
$H_2 + C \rightarrow CH_2 + h\nu$	Asociación Radiativa	$1.0 \times 10^{-17} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^{-1} - 1.0 \times 10^{-1}$
$H_2 + C^+ \rightarrow CH_2^+ + h\nu$	Reacomodo Ion-Molécula	$4.0 \times 10^{-16} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.20} \exp \frac{-0.0}{T}$	3.2–3.7
$C^+ + e^- \rightarrow C + h\nu$	Transferencia de Carga	$4.6 \times 10^{-12} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.60} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.5 \times 10^4 - 3.7 \times 10^4$
$C + h\nu \rightarrow C^+ + e^-$	Transferencia de Carga	$3.0 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-3.0}{T}$	$2.9 \times 10^6 - 2.9 \times 10^6$

TABLA II. Conversión acumulativa del oxígeno durante las edades oscuras. En la primer columna de esta tabla, se presenta una red amplia de las reacciones para la química del oxígeno. La segunda columna describe la clase de reacción. La tercer columna proporciona las razones de reacción para cada una de ellas. Estas razones, también, fueron obtenidas desde la base de datos UMIST. La última columna especifica los valores de la conversión acumulativa correspondientes a la primera mitad de las edades oscuras.

Reacción	Clase	Razón	γ
$O + e^- \rightarrow O^- + h\nu$	Transferencia de Carga	$1.50 \times 10^{-15} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	15–15
$H + O^+ \rightarrow O + H^+$	Reacomodo Ion-Ion	$5.60 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.36} \exp \frac{8.6}{T}$	$8.1 \times 10^6 - 6.4 \times 10^6$
$H^+ + O \rightarrow O^+ + H$	Reacomodo Ion-Ion	$3.04 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.47} \exp \frac{11.5}{T}$	$4.9 \times 10^6 - 4.3 \times 10^6$
$H^- + O^+ \rightarrow O + H$	Reacomodo Ion-Neutro	$2.30 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.3 \times 10^9 - 1.9 \times 10^9$
$O^- + h\nu \rightarrow O + e^-$	Transferencia de Carga	$2.40 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.0} \exp \frac{-0.5}{T}$	$2.3 \times 10^9 - 2.3 \times 10^9$
$C^- + O^+ \rightarrow O + C$	Reacomodo Ion-Neutro	$2.30 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.3 \times 10^9 - 1.9 \times 10^9$
$CH + O^+ \rightarrow O + CH^+$	Transferencia de Carga	$3.50 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.0} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.5 \times 10^6 - 3.5 \times 10^6$
$NH + O^+ \rightarrow O + NH^+$	Transferencia de Carga	$3.60 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.0} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.6 \times 10^6 - 3.6 \times 10^6$
$H + O \rightarrow OH + h\nu$	Asociación Radiativa	$9.90 \times 10^{-19} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.38} \exp \frac{-0.0}{T}$	$6.7 \times 10^{-3} - 8.7 \times 10^{-3}$
$H + O^- \rightarrow OH + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$5.00 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$5.0 \times 10^6 - 5.0 \times 10^6$
$H + OH \rightarrow O + H + H$	Disociación Colisional	$6.00 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-50900}{T}$	$4.5 \times 10^{-20} - 3.2 \times 10^{-46}$
$H + OH \rightarrow O + H_2$	Reacomodo Neutro-Neutro	$6.90 \times 10^{-14} \left(\frac{T}{300}\right)^{2.80} \exp \frac{-1950}{T}$	$1.03 \times 10^3 - 1.5 \times 10^1$
$H^- + O \rightarrow OH + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$1.00 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^7 - 1.9 \times 10^7$
$H^+ + OH \rightarrow OH^+ + H$	Reacomodo Ion-Molécula	$2.10 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.1 \times 10^7 - 2.1 \times 10^7$
$H_2 + O \rightarrow OH + H$	Reacomodo Neutro-Neutro	$3.14 \times 10^{-13} \left(\frac{T}{300}\right)^{-2.70} \exp \frac{-3150.0}{T}$	$0.9 \times 10^3 - 3.8$
$H_2 + OH \rightarrow O + H_2 + H$	Disociación Colisional	$6.00 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-50900}{T}$	$4.5 \times 10^{-20} - 3.2 \times 10^{-46}$
$H_2 + O^+ \rightarrow OH^+ + H$	Reacomodo Ion-Molécula	$1.70 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.7 \times 10^7 - 1.7 \times 10^7$
$H_2^+ + O \rightarrow OH^+ + H$	Reacomodo Ion-Molécula	$1.50 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.5 \times 10^7 - 1.5 \times 10^7$
$H_2^+ + OH \rightarrow OH^+ + H_2$	Reacomodo Ion-Molécula	$7.60 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.6 \times 10^6 - 7.6 \times 10^6$
$H_3^+ + O \rightarrow OH^+ + H_2$	Reacomodo Ion-Molécula	$8.40 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$8.4 \times 10^6 - 8.4 \times 10^6$
$O^+ + OH \rightarrow OH^+ + O$	Reacomodo Ion-Molécula	$3.60 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.6 \times 10^6 - 3.6 \times 10^6$
$OH^+ + e^- \rightarrow O + H$	Recombinación Disociativa	$3.70 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.2 \times 10^8 - 3.1 \times 10^8$
$He^+ + OH \rightarrow O^+ + He + H$	Reacomodo Ion-Ion	$1.10 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.1 \times 10^7 - 1.1 \times 10^7$
$C + OH \rightarrow O + CH$	Reacomodo Neutro-Neutro	$2.20 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.50} \exp \frac{-14800}{T}$	$4.3 \times 10^{-3} - 8.2 \times 10^{-11}$
$C + OH^+ \rightarrow O + CH^+$	Transferencia de Carga	$1.20 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.2 \times 10^7 - 1.2 \times 10^7$
$CH + O \rightarrow OH + C$	Reacomodo Neutro-Neutro	$2.52 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-2381.0}{T}$	$0.13 \times 10^5 - 8.06 \times 10^2$
$CH + OH^+ \rightarrow OH + CH^+$	Transferencia de Carga	$3.50 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.5 \times 10^6 - 3.5 \times 10^6$
$OH + F \rightarrow HF + O$	Reacomodo Neutro-Neutro	$1.60 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.6 \times 10^6 - 1.6 \times 10^6$
$N + OH \rightarrow O + NH$	Reacomodo Neutro-Neutro	$1.80 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.10} \exp \frac{-10700.0}{T}$	$0.37 - 1.1 \times 10^{-6}$
$N^+ + OH \rightarrow OH^+ + N$	Reacomodo Ion-Molécula	$3.70 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.7 \times 10^6 - 3.7 \times 10^6$
$NH + O \rightarrow OH + N$	Reacomodo Neutro-Neutro	$1.16 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.1 \times 10^5 - 1.1 \times 10^5$
$NH^+ + O \rightarrow OH^+ + N$	Reacomodo Molécula-Molécula	$1.00 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^7 - 1.0 \times 10^7$
$H_2O^+ + e^- \rightarrow O + H + H$	Recombinación Disociativa	$3.05 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.8 \times 10^9 - 2.5 \times 10^9$
$H_2O^+ + e^- \rightarrow O + H_2$	Recombinación Disociativa	$3.90 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.3 \times 10^8 - 3.3 \times 10^8$
$H_2O^+ + e^- \rightarrow OH + H$	Recombinación Disociativa	$8.60 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.50} \exp \frac{-0.0}{T}$	$5.2 \times 10^8 - 7.3 \times 10^8$
$O + H_2O \rightarrow OH + OH$	Reacomodo Neutro-Neutro	$1.85 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.95} \exp \frac{-8571.0}{T}$	$12.5 - 2.6 \times 10^{-4}$
$O^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + O$	Reacomodo Ion-Molécula	$3.20 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.2 \times 10^7 - 3.2 \times 10^7$
$H_2 + O^- \rightarrow H_2O + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$7.00 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.0 \times 10^6 - 7.0 \times 10^6$
$H_2 + H_2O \rightarrow OH + H_2 + H$	Reacomodo Neutro-Neutro	$5.80 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-52900}{T}$	$3.7 \times 10^{-21} - 2.4 \times 10^{-48}$
$H_2 + OH \rightarrow H_2O + H$	Reacomodo Neutro-Neutro	$2.05 \times 10^{-12} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.52} \exp \frac{-1736}{T}$	$1.1 \times 10^4 - 0.05 \times 10^4$
$H_2 + OH^+ \rightarrow H_2O^+ + H$	Transferencia de Carga	$1.00 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^7 - 1.0 \times 10^7$
$H_2^+ + OH \rightarrow H_2O^+ + H$	Transferencia de Carga	$7.60 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.6 \times 10^6 - 7.6 \times 10^6$
$H_3^+ + O \rightarrow H_2O^+ + H$	Transferencia de Carga	$3.60 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.6 \times 10^6 - 3.6 \times 10^6$
$H_3^+ + OH \rightarrow H_2O^+ + H_2$	Transferencia de Carga	$1.30 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.3 \times 10^7 - 1.3 \times 10^7$

$H + H_2O \rightarrow OH + H_2$	Reacomodo Neutro-Neutro	$1.50 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.20} \exp \frac{-9610}{T}$	$3.73-1.9 \times 10^{-5}$
$H + H_2O \rightarrow OH + H + H$	Disociación Colisional	$5.80 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-52900}{T}$	$3.7 \times 10^{-21}-2.4 \times 10^{-48}$
$H + OH \rightarrow H_2O + h\nu$	Asociación Radiativa	$5.20 \times 10^{-18} \left(\frac{T}{300}\right)^{-5.22} \exp \frac{-90.0}{T}$	$2.5 \times 10^{-4}-7.6 \times 10^{-3}$
$H^- + OH \rightarrow H_2O + e^-$	Desprendimiento Asociativo	$1.00 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^6-1.0 \times 10^6$
$He^+ + H_2O \rightarrow OH + He + H^+$	Reacomodo Ion-Ion	$2.00 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.0 \times 10^6-2.0 \times 10^6$
$He^+ + H_2O \rightarrow OH^+ + H + H$	Reacomodo Ion-Ion	$2.00 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.0 \times 10^6-2.0 \times 10^6$
$OH + OH \rightarrow H_2O + O$	Reacomodo Neutro-Neutro	$1.60 \times 10^{-12} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.14} \exp \frac{-50}{T}$	$4.6 \times 10^4-2.05 \times 10^4$
$OH^+ + OH \rightarrow H_2O^+ + O$	Reacomodo Molécula-Molécula	$7.00 \times 10^{-10} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$7.0 \times 10^6-7.0 \times 10^6$
$OH^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + OH$	Transferencia de Carga	$1.50 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.5 \times 10^7-1.5 \times 10^7$
$H_2O + F \rightarrow HF + OH$	Reacomodo Neutro-Neutro	$1.40 \times 10^{-11} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.4 \times 10^5-1.4 \times 10^5$
$C + H_2O^+ \rightarrow OH + CH^+$	Reacomodo Molécula-Molécula	$1.10 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.1 \times 10^7-1.1 \times 10^7$
$NH + OH \rightarrow H_2O + N$	Reacomodo Neutro-Neutro	$3.10 \times 10^{-12} \left(\frac{T}{300}\right)^{1.20} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^5-4.5 \times 10^4$
$NH^+ + OH \rightarrow H_2O^+ + N$	Reacomodo Molécula-Molécula	$1.00 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.0 \times 10^7-1.0 \times 10^7$
$O^+ + e^- \rightarrow O + h\nu$	Reacomodo Ion-Neutro	$3.20 \times 10^{-12} \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.66} \exp \frac{-0.0}{T}$	$1.6 \times 10^4-2.5 \times 10^4$
$O + h\nu \rightarrow O^+ + e^-$	Reacomodo Neutro-Ion	$2.80 \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$2.8 \times 10^{16}-2.8 \times 10^{16}$
$H^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + H$	Transferencia de Carga	$6.90 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$6.9 \times 10^7-6.9 \times 10^7$
$OH^+ + H \rightarrow O^+ + H_2$	Reacomodo Ion-Ion	$1.20 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-4060}{T}$	$8.1 \times 10^4-6.7 \times 10^2$
$H_2O^+ + H \rightarrow H^+ + H_2O$	Transferencia de Carga	$8.20 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-11460}{T}$	$63.9-8.3 \times 10^5$
$H_2^+ + H_2O \rightarrow H_2O^+ + H_2$	Transferencia de Carga	$3.90 \times 10^{-9} \left(\frac{T}{300}\right)^{0.00} \exp \frac{-0.0}{T}$	$3.9 \times 10^7-3.9 \times 10^7$

3. Conversión acumulativa aplicada al carbón y al oxígeno en las edades oscuras

Como se mencionó al inicio de este trabajo, la conversión acumulativa se aplicará a una red amplia de reacciones importantes de formación y destrucción de las especies basadas en carbón y oxígeno.

La conversión acumulativa para cada una de las razones, se evalúa para las temperaturas $T_r = T_g = 815-415$ K, las cuales corresponden a los corrimientos al rojo $z=300-150$ (primera mitad de las edades oscuras), respectivamente. Además, se adoptará una cantidad muy modesta para el hidrógeno molecular ($n[H_2]/n_H \sim 10^{-6}$) y se adoptará $n[e^-]/n_H \sim 10^{-4}$. En la Tabla I se muestra la conversión acumulativa para una amplia red química de elementos basados en carbón. En esa misma tabla, se describe la clase de reacción, la razón de reacción y las correspondientes conversiones acumulativas. En la Tabla II, de manera similar, se muestra la información equivalente para elementos basados en oxígeno.

4. Resultados

Durante el intervalo correspondiente a las edades oscuras ($z = 300 - 150$), la acumulación más grande para el caso del carbón, resulta ser proporcionada por reacciones que involucran la formación de C, C⁺, CH, CH⁺ y CH₂⁺. En este caso las reacciones que más compiten son las que forman a los átomos neutros de carbón C y a las moléculas de tipo CH, puesto que los órdenes de acumulación tanto para C como para CH son de 10⁹, por lo menos en el caso del gas homogéneo. Por otro lado, la influencia catalizadora de las abundancias relativas de electrones $n[e^-]/n_H$ y la del hidrógeno molecular $n[H_2]/n_H$ en algunas de las reacciones de la amplia red

química presentada en este trabajo, resulta ser algo modesta. Como puede observarse, en el caso del carbón hay una gran competencia entre las especies atómicas y moleculares. Específicamente, la mayor lucha se realiza entre las reacciones $CH_2^+ + e^- \rightarrow CH + H$ y $CH_2^+ + e^- \rightarrow C + H + H$.

Para el caso del oxígeno sucede algo muy interesante. La acumulación más grande la proporciona la reacción $O + h\nu \rightarrow O^+ + e^-$ con un orden de 10¹⁶, la cual supera hasta con 7 órdenes de magnitud a las acumulaciones efectuadas por las reacciones $H^- + O^+ \rightarrow O + H$, $O^- + h\nu \rightarrow O + e^-$ y $C^- + O^+ \rightarrow O + C$, cuyos órdenes de acumulación resultan ser de 10⁹ para las tres reacciones. La reacción que produce la más baja acumulación para el caso del oxígeno es $H_2 + H_2O \rightarrow OH + H_2 + H$. Como se puede ver, en el caso del oxígeno, también se lleva a cabo una gran competencia entre las especies atómicas y moleculares.

Es interesante observar en este trabajo cómo las especies que resultaron con mayor acumulación durante el intervalo de edades oscuras bajo estudio (primera mitad de las edades oscuras), fueron las especies: C, CH, C⁺, CH⁺, CH₂⁺, O, OH, OH⁺, O⁺, H₂O⁺. Además, se puede notar, también, que el resultado de nuestro análisis es muy similar a los resultados obtenidos mediante otros tipos de análisis observados en la literatura [46,48]. En un futuro trabajo podría realizarse, mediante un análisis similar, la inspección de otras redes químicas, como las de los elementos ligeros primordiales.

5. Una estimación observacional

La realización de estimaciones observacionales a través de opacidades de línea resonante en perturbaciones de masa homogénea son bien conocidas en la literatura. Estas opacidades se producen durante la etapa lineal de evolución de las primeras proto-estructuras.

En esta sección se presentará una estimación sobre la posible detección de líneas características de la molécula primordial CH en proto-estructuras que se encuentran en el estado evolutivo líneal de su formación. Se elige a la molécula CH debido a la alta abundancia estimada en nuestros primeros cálculos realizados en la Ref. 46 ($\sim 10^{-15}$ en $z = 10$) y justificados mediante el análisis realizado en la sección anterior del presente trabajo. Tales opacidades se producen debido a la interacción de fotones de la RCF con las moléculas primordiales de interés. Esta interacción, produce señales de tipo espectral-espacial en el espectro de la RCF, el cual contiene información valiosa acerca del universo lejano. Entonces, a continuación se estimará el tiempo de integración requerido para la detección de las anisotropías secundarias con telescopios modernos (ALMA, CARMA, LMT/GTM). Este tiempo Δt puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \frac{T_n}{\sqrt{\Delta\nu\Delta t}}, \quad (3)$$

donde Δt es la amplitud de las fluctuaciones de la temperatura de la RCF, T_n es la temperatura de ruido y $\Delta\nu$ es el ancho de banda.

Las fluctuaciones Δt de la RCF debido a dispersión resonante de la misma con moléculas de proto-objetos en movimiento se obtienen a partir de la siguiente ecuación [56]:

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{V_p}{c}\tau, \quad (4)$$

donde, $V_p = V_p(z)$ es la velocidad peculiar del proto-objeto en la época z con respecto a la RCF, c es la velocidad de la luz y τ es la correspondiente profundidad óptica del proto-objeto en dicho z .

La profundidad óptica para un proto-objeto de tamaño L es dada por

$$\tau_\nu(L) = \int_0^L \alpha_\nu dx, \quad (5)$$

donde α_ν es el coeficiente de absorción, dado por la siguiente expresión:

$$\alpha_\nu = \frac{\lambda^3(2J'+1)}{8\pi(2J+1)V_T} X_{CH} n_J n_{Tot} A_{J'J} (1 - \exp \frac{-h\nu}{kT_r}). \quad (6)$$

En esta última expresión, λ es la longitud de onda, J es el número cuántico rotacional, X_{CH} es la abundancia relativa de la molécula CH, n_J representa a la población de los niveles rotacionales en la época z y $A_{J'J}$ es el coeficiente de Einstein.

La contribución más alta de la profundidad óptica en líneas rotacionales de CH en los primeros proto-objetos resultó ser hasta de $\tau_{5/2-3/2} \simeq 10^{-4}$ en $z=20$. Este valor corresponde a la transición de línea rotacional base $5/2(2\Pi_{1/2}) - 3/2(2\Pi_{1/2})$ para las primeras estructuras. Sustituyendo este valor de τ en (4) y usando el valor de $V_p(z = 0) \approx 650$ km/s, el cual es adoptado desde las

Refs. 57 a la 59 se logra estimar la fluctuación ΔT de la RCF, obteniéndose el valor de $\Delta T/T \approx 2 \times 10^{-7}$ para proto-objetos al final de su etapa líneal. Por lo tanto, si se toma a $\Delta\nu/\nu \approx 0.001$ y $T_n \approx 50$ K, se puede obtener un tiempo de integración requerido para la detección de una posible señal observable de la transición rotacional de moléculas CH, el cual resulta ser del orden $\Delta t \approx 3.9 \times 10^7$ s=10833.3 h. Por lo tanto, con base a este tiempo, podría ser viable una redistribución del mismo en varios conjuntos de tiempo observacional.

6. Discusión

En los últimos años, los cosmólogos se han interesado en las implicaciones posibles de los campos magnéticos primordiales, por ejemplo, en la Ref. 54 se investigan los cambios en la historia estándar de la formación de estrellas en el universo. En la Ref. 55 se estudian las implicaciones de la presencia de estos campos magnéticos para la historia térmica y de ionización en la época posrecombinatoria. También se estudia su efecto directo en la formación de H₂. Ahí mismo se encuentra que dicha influencia produce un considerable aumento en la abundancia de H₂ hasta de $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$, en el medio intergaláctico. Este aumento considerable de hasta tres órdenes de magnitud en la época primordial, tiene su efecto significativo en las acumulaciones de las especies que resultaron con órdenes mayores, es decir, los canales que involucren algún tipo de interacción con H₂ producirían un incremento de tres ordenes de magnitud para γ .

Obtener conocimiento de la química primordial basada en elementos pesados es de gran interés por muchas razones; por ejemplo en la Ref. 48, se realiza un estudio de la química de elementos pesados durante las edades oscuras. Ahí mismo, se toman en cuenta tanto el modelo estándar de nucleosíntesis como dos modelos no estándar. En esos modelos no estándar, también, se suponen fluctuaciones de densidad, permitiendo diferentes densidades barionicas ρ_1, ρ_2, \dots en diferentes zonas y produciéndose como consecuencia una nucleosíntesis alterada. En dichos modelos se supone que ocurrieron tales fluctuaciones y se usa la geometría como parámetro abierto. Se aplica un modelo de dos zonas, con ρ_1 y ρ_2 como las densidades de las zonas, las cuales son dadas por la razón de densidad $R = \rho_1/\rho_2 = \eta^1/\eta^2$ la fracción de volumen $0 \leq f_v \leq 1$ de la zona 1 y la restricción adicional de que la densidad promedio tiene que reproducir el valor estándar de WMAP del parámetro adimensional $\eta_{10}^{WMAP} = 6.22 = \eta^1 f_v + \eta^2(1 - f_v)$. Entonces, se tienen ahí dos parámetros abiertos (R y f_v), pero también están limitados por las abundancias observadas de los elementos ligeros. Para el primer caso ($f_v = 0.8, R = 10$), el cual, es un escenario similar al adoptado por nosotros en la Ref. 46 y ya mencionado en la introducción del presente trabajo, se obtienen las abundancias $[C] = 4.00 \times 10^{-15}$ y $[O] = 3.37 \times 10^{-19}$ en el fin de la nucleosíntesis no estándar. El segundo caso ($f_v = 10^{-5}, R = 1000$) abre el camino para producir elementos pesados por medio de una reacción triple α muy efi-

ciente en la región de alta densidad. Al mismo tiempo se incrementa la destrucción de ${}^7\text{Li}$ manteniendo su abundancia baja. Esto, simultáneamente, permite obtener abundancias de elementos ligeros compatibles con las establecidas por el modelo estándar e incrementa la producción de elementos pesados en forma considerable. Sin embargo, debido a la pequeña fracción de volumen de la zona de densidad alta, las abundancias de elementos pesados permanece pequeña, por ejemplo, al final de esta nucleosíntesis no estándar (caso 2) se obtienen las abundancias $[\text{C}] = 8.45 \times 10^{-14}$ y $[\text{O}] = 8.20 \times 10^{-17}$. Como puede observarse estos dos modelos no estándar presentan una considerable variación en las abundancias de $[\text{C}]$ y $[\text{O}]$ en varios órdenes de magnitud de diferencia, resultando más eficiente el primero. A través de uno de estos modelos no estándar, los autores de ese trabajo obtienen conclusiones muy parecidas a las obtenidas en nuestro primer artículo [46] y al presente artículo. Una de dichas razones para tal estudio,

es que este tipo de moléculas poseen propiedades muy interesantes (momentos dipolares relativamente grandes y una estructura rovibracional muy conveniente para la observación), las cuales las convierten en candidatas idóneas para ser detectadas a través de los proyectos observacionales ya mencionados arriba. Además, la localización de objetos a z cada vez más grandes y con grandes abundancias relativas de elementos pesados tal como el carbón, a generado muchas interrogantes al respecto. La detección de posibles señales de estas especies pesadas durante la época oscura, generaría información sobre la influencia de estas en las etapas de formación de las primeras proto-estructuras. Tal información nos la proporcionarían las anisotropías de la RCF, las cuales fueron inicialmente descritas en la Ref. 49. Entre los estudios más recientes sobre las anisotropías en la RCF se pueden revisar los trabajos de las Refs. 1 y 50 a la 53.

1. M. Signore y D. Puy, *Eur. Phys. J. C* **59** (2009) 117.
2. S.C.O. Glover y D.W. Savin, *MNRAS* **393** (2009) 911.
3. S.C.O. Glover y T. Abel, *MNRAS* **388** (2008) 1627.
4. D. Puy y M. Signore, *NewAR* **51** (2007) 411.
5. D. Galli y F. Palla, *A & A* **335** (1998) 403.
6. P.C. Stancil, S. Lepp y A. Dalgarno, *ApJ* **458** (1996) 401.
7. D. Puy, G. Alecian, J. Le Bourlot, J. Leorat y G. Pineau Des Forest, *A & A* **267** (1993) 337.
8. W. Latter y J. Black, *ApJ* **371** (1991) 161.
9. S. Lepp y M. Shull, *ApJ* **280** (1984) 465.
10. D. Puy y M. Signore, *New Astr.* **3** (1998b) 247.
11. D. Puy y M. Signore, *New Astr.* **3** (1998a) 27.
12. D. Puy y M. Signore, *New Astr.* **27** (1997) 622.
13. T. Abel, P. Anninos, Y. Zhang y L. Michael, *New Astr.* **2** (1997) 181.
14. D. Puy y M. Signore, *A & A* **305** (1996) 371.
15. F. Palla, D. Galli y J. Silk, *ApJ* **451** (1995) 44.
16. S.C.O. Glover y D.W. Savin, *MNRAS* **393** (2008) 911.
17. P. Vonlanthen y D. Puy, *sf2a.conf..355V* (2008).
18. N. Yoshida, K. Omukai y L. Hernquist, *Science* **321** (2008) 669.
19. S. Naoz y R. Barkana, *MNRAS* **385** (2008) L63.
20. F. Xiaohui, C.L. Carilli y B. Keating, *ARAA* **44** (2006) 415.
21. R. Barkana, *Science* **313** (2006) 931.
22. B. Ciardi y A. Ferrara, *SSRV* **116** (2005) 625.
23. K. Jedamzik, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 3248.
24. J. Yang, M.S. Turner, D.N. Schramm, G. Steigman y K.A. Olive, *ApJ* **281** (1984) 493.
25. E. Egami *et al.*, *Astrophys. J.* **618** (2005) L5.
26. R.J. Bouwens, G.D. Illingworth, R.I. Thompson y M. Franx, *Astrophys. J.* **624** (2005) L5.
27. Y. Taniguchi *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **57** (2005) 165.
28. N. Kashikawa *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **56** (2004) 1011.
29. M. Ajiki *et al.*, *Astron. J.* **126** (2003) 2091.
30. E.M. Hu *et al.*, *Astrophys. J.* **568** (2002) L75.
31. E.M. Hu, R.G. Mc Mahon y L.L. Cowle, *Astrophys. J.* **521** (1999) L9.
32. M. Iye *et al.*, *Nature* **443** (2006) 186.
33. R.J. Bouwens *et al.*, *ApJ* **709** (2010) L133.
34. N.R. Tanvir *et al.*, *Nature* **461** (2009) 1254.
35. R. Salvaterra *et al.*, *Nature* **461** (2009) 1258.
36. Y. Juarez *et al.*, *A & A* **494** (2009) L25.
37. A. Songalia y L.L. Cowie, *IAU Symp. 204, The Extragalactic Infrared Background and its Cosmological Implications* (2001) 323.
38. E.V. Ryan-Weber, M. Pettini, P. Madau y B.J. Zych, *MNRAS* **395** (2009) 1476.
39. R.A. Simcoe, *ApJ* **653** (2006) 977.
40. E.V. Ryan-Weber, M. Pettini y P. Madau, *MNRAS* **371** (2006) L78.
41. G.D. Becker, M. Rauch y W.L.W. Sargent, *ApJ* **698** (2009) 1010.
42. M. Shunji, F. Shin Ichirou, N. Sunao, H. Masa-Aki y S. Katsuhiko, *PRD* **72** (2005) 123505.
43. M.Y. Khlopov y C. Kouvaris, *Phys. Rev. D* **77** (2008) 065002.
44. T. Rauscher, J.H. Applegate, J.J. Cowan, F.K. Thielemann y M. Wiescher, *ApJ* **429** (1994) 499.
45. K. Jedamzik, G.M. Fuller, G.J. Mathews y T. Kajino, *ApJ* **422** (1994) 423.
46. A. Lipovka, J. Saucedo y J. Campos, *RMF* **48** (2002) 325.
47. M. Harwit y M. Spaans, *ApJ* **589** (2003) 53.

48. P. Vonlanthen *et al.*, *A & A* **503** (2009) 47.
49. V. Dubrovich, *Sov. Astron. Lett.* **3** (1977) 128.
50. K. Basu, *New Astron. Rev.* **51** (2007) 431.
51. D.R.G. Schleicher *et al.*, *A & A* **490** (2008) 521.
52. R. Núñez, A. Lipovka y V. Avila, *MNRAS* **369** (2006) 2005.
53. A. Lipovka, J. Saucedo y N.M. Lipovka, *ArXiv e-prints* 0703547.
54. S. Sethi y K. Subramanian, *MNRAS* **356** (2005) 778.
55. S. Sethi, B. Biman y K. Subramanian, *MNRAS* **387** (2008) 1589.
56. R.A. Sunyaev y Ya. B. Zeldovich, *Ap&SS* **7** (1970) 3.
57. M.J. Hudson, R.J. Smith, J.R. Lucey, D.J. Schlegel y R.L. Davis, *Ap.J* **512** (1999) L79.
58. M.J. Hudson, R.J. Smith, J.R. Lucey y E. Branchini, *MNRAS* **352** (2004) 61.
59. T.R. Lauer y M. Potsman, *ApJ* **425** (1994) 418.