

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE BANDA BAJA DE EDGES PARA RESTRINGIR PARÁMETROS DE LAS PRIMERAS FUENTES DE LUZ DEL UNIVERSO

Bryan Josué Mejía Lazo^{1,*}

¹Departamento de Astronomía y Astrofísica, Facultad de Ciencias Espaciales
Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Recibido: 05/septiembre/2022

Aceptado: 15/mayo/2023

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v14i2.16919>

RESUMEN

El universo en sus etapas más tempranas ha sido una gran fuente de preguntas, dada la dificultad que presenta su observación directa. Se ha logrado crear modelos, tanto matemáticos como computacionales, capaces de darnos una idea del universo temprano y de su evolución a lo largo de miles de millones de años. La línea de 21 cm emitida por el hidrógeno neutro es capaz de proveernos de la información observacional que se necesita para comprobar la veracidad de dichos modelos. En este documento se presenta un anteproyecto para el estudio y análisis de condiciones iniciales que dieron origen a un perfil de absorción en 78 MHz detectado por los instrumentos de banda baja del *Experiment to Detect the Global Epoch of Reionization Signature*. Dicho perfil está de acuerdo con los modelos de la señal global de 21 cm del hidrógeno neutro, durante la formación de las primeras estructuras del universo. Se espera que al culminar dicho proyecto se cuente con una herramienta eficiente para el estudio de las señales obtenidas por detectores en tierra y que, comparándolas con diferentes modelos de 21 cm, aporte información que nos ayude a entender mejor las primeras etapas del universo.

Palabras clave: Reionización, Hidrógeno, EDGES, Cosmología.

ABSTRACT

The universe in its earliest stages has been a great source of questions given the difficulty of direct observation. Models have been created, both mathematical and computational, capable of giving us an idea of the early universe and its evolution over billions of years. The 21 cm line emitted by neutral hydrogen can provide us with the observational information needed to check the accuracy of these models. This document presents a preliminary project for the study and analysis of the initial conditions that gave rise to an absorption profile at 78 MHz detected by the low-band instruments of the "Experiment to Detect the Global Epoch of Reionization Signature". This profile agrees with the models of the global 21-cm signal of Neutral Hydrogen, during the formation of the first structures of the universe. It is expected that at the end of this project an efficient tool will be available for the study of the signals obtained by ground detectors and that, comparing them with different 21 cm models, will provide information that will help us better understand the first stages of the universe.

Keywords: Reionization, Hydrogen, EDGES, Cosmology

*bjmejia@yahoo.es  <https://orcid.org/0009-0005-5875-335X>

1 Introducción

Bowman *et al.* (2018) mediante el experimento *Experiment to Detect the Global Epoch of Reionization Signature* (EDGES), detectaron una señal que corresponde a un perfil de absorción centrado en una frecuencia de 78 MHz, que corresponde a un $z \sim 17$ (es decir, a ~ 180 millones de años después del Big Bang, según los parámetros cosmológicos actuales). Dicha señal corresponde a la esperada por los modelos de la señal de 21 cm de HI en estos instantes del universo. Antes de hablar de las implicaciones de esta detección, es necesario conocer la línea de 21 cm del HI y por qué resulta de interés estudiarla.

La línea de 21 cm es un producto de la emisión de un fotón con una energía de $5,8743 \mu\text{eV}$, por el hidrógeno neutro. Dicha energía es equivalente a una longitud de onda de 21,1061 cm, de ahí su nombre. Es observada frecuentemente en radio astronomía, debido a que las ondas de radio pueden penetrar grandes nubes de polvo cósmico interestelar que son opacas a la luz visible. A pesar de que la probabilidad de observar esta línea es excesivamente baja para un átomo de hidrógeno, la cantidad de hidrógeno neutro presente en el universo permite que podamos observarla con relativa facilidad. La observación de esta línea presenta diversas ventajas, siendo tres de ellas: 1) al ser una línea espectral, la información del corrimiento al rojo puede ser usada para trazar la historia tridimensional completa; 2) directamente da información sobre el gas del medio intergaláctico, la cual contiene una vasta mayoría de materia bariónica; y 3) su largo tiempo de vida permite que la línea se encuentre lejos de la saturación y, gracias a esto, es sensible a las variaciones ocurridas durante la reionización (Furlanetto, 2006).

1.1 Física de la línea de 21 cm

La línea de 21 cm de HI es producto de una transición prohibida entre los dos estados hiperfinos del nivel $1^2 S_{1/2}$ del átomo de hidrógeno neutro, es decir, de un estado de espín paralelo entre el núcleo y el electrón a un estado antiparalelo (Field, 1958).

Medimos la intensidad de una línea espectral mediante su temperatura diferencial de brillo. Para la línea de 21 cm se mide la diferencia entre la temperatura de brillo de la señal y el fondo cósmico de microondas. Está dada por la siguiente ecuación:

$$\delta T_b(\nu) = \frac{T_s - T_\gamma}{1 + z} (1 - e^{-\tau_{\nu_0}})$$

$$\delta T_b(\nu) \approx 9\chi_{HI}(1 + \delta)(1 + z)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_s} \right]$$

donde τ_{ν_0} es la profundidad óptica a la frecuencia de línea ν_0 ; T_γ es la temperatura de brillo del fondo cósmico de microondas; H_z es el parámetro de Hubble, $dv_{(v/dr_v)}$ es el gradiente de la velocidad en el componente paralelo a la línea de visión; χ_{HI} es la fracción de hidrógeno neutro; y el factor $(1 + \delta)$ da información acerca de la sobre-densidad friccional de bariones.

1.2 Evolución de la señal global de 21 cm.

En la figura 1 de Pritchard y Loeb (2012) se muestra la evolución de la señal global de 21 centímetros. A partir de las ecuaciones mostradas, se observa que la temperatura de brillo depende de la temperatura de espín T_s y esto a su vez dicta si la línea se observa en emisión, absorción o si no se observa. T_s es determinada por tres procesos compitiendo entre sí: absorción de fotones de fondo cósmico de microondas (FCM), así como la emisión estimulada; colisiones con otros átomos de hidrógeno, electrones libres, y

protones; y dispersión de fotones ultravioleta. Y está descrita mediante la siguiente ecuación:

$$T_s^{-1} = \frac{T_\gamma^{-1} + x_c T_K^{-1} + x_\alpha T_c^{-1}}{1 + x_c + x_\alpha}$$

Donde x_s y x_α son los coeficientes de acoplamiento para colisiones y dispersión UV respectivamente; T_k es la temperatura cinética del gas; y T_c es la temperatura de color efectiva del campo de radiación UV (Pritchard y Loeb, 2012).

De esta ecuación se observa que, a muy altos corrimientos al rojo, durante la edad oscura (antes de $z \sim 200$), la temperatura de espín esta acoplada al FCM por medio de dispersión Compton, y a la temperatura del gas vía colisión electrónica. A un $z \sim 200$ el universo tiene la densidad suficiente para que ocurran colisiones frecuentemente y, así, la temperatura de espín y del gas se desacoplan del FCM y se enfrían, de manera que la línea de 21 cm es observada en absorción y se puede ver como un leve pozo de absorción con pico cerca de $z \sim 80$ (ver Figura 1 en (Pritchard y Loeb, 2012; Furlanetto, 2006)).

A medida que el universo se expandía, la densidad del gas decrecía como lo dicta la ley de los gases ideales; las colisiones se volvieron cada vez menos frecuentes y, a $100 > z > 30$, la temperatura de espín se desacopla de la temperatura del gas y se reacopla al FCM, y el gas deja de emitir fotones de 21 cm. A $z \sim 30$, la línea no podía ser observada.

Con las primeras fuentes de ionización, la temperatura de espín se desacopla del FCM y se acopla con la temperatura del gas mediante el mecanismo *Wouthuysen-Field* (Field, 1958; Wouthuysen, 1952). Dicho mecanismo consiste en la sobre población de nivel hiperfino fundamental por la continua dispersión de fotones *Lyman Alpha* ($Ly - \alpha$). En este momento la línea se vuelve a observar en absorción. Este momento es el de mayor interés para la presente investigación y tiene un pico cerca de $z \sim 20$ (ver Figura 1 en (Pritchard y Loeb, 2012)).

Luego de esto, a medida el gas es calentado por la saturación de la radiación $Ly - \alpha$, la temperatura de espín supera la temperatura del FCM y la línea se observa en emisión en las regiones más calientes hasta que, eventualmente, todo el medio se vuelve brillante a 21 cm (Pritchard y Loeb, 2012).

1.3 Implicaciones físicas de la detección de EDGES.

La detección de EDGES es un hito en el campo de la cosmología de 21 cm, debido a que es la primera detección directa de un perfil de absorción a 1,42 GHz que data de la época de la reionización. El perfil de absorción detectado ocurre a un corrimiento al rojo esperado, pero presenta una característica interesante: la profundidad del pozo de absorción es aproximadamente dos veces más fuerte que la predicha por modelos astrofísicos estándar (basados en el modelo cosmológico *Lambda Cold Dark Matter* (LCMD) y la formación jerárquica de estructuras), donde el valor esperado más fuerte es $T_s \sim -209 \text{ mK}$, asumiendo que los fotones del FCM forman un fondo de radiación con temperatura de $\sim 48.5 \text{ K}$ y la temperatura más fría posible del medio intergaláctico es de $\sim 7.2 \text{ K}$ en ausencia de fuentes de rayos X. El perfil de absorción detectado requiere, ya sea que el gas sea mucho más frío que lo esperado o que el fondo de radiación sea más fuerte, lo que resulta difícil de explicar con la astrofísica actual (Fialkov y Barkana, 2019). Esto ocasionó que gran parte de la comunidad científica centrara sus esfuerzos en dar una explicación a este hecho, procurando que sus hipótesis sean consistentes con información observacional, como la que se obtiene del FCM.

En esta sección se describirán algunos de los campos de investigación en los que mayormente se está trabajando, con el objetivo de explicar las implicaciones de un pozo de absorción más profundo en una señal global de 21 cm.

1.3.1 Materia oscura

Con la detección del fuerte pozo de absorción de EDGES se tiene una nueva forma de estudiar la materia oscura, ya que se cree que las interacciones con ella podrían enfriar el gas presente en el medio intergaláctico más allá de los niveles esperados (Fialkov *et al.*, 2018).

Otro caso de estudio interesante se da al saber que la materia bariónica (MB) puede ser enfriada si una fracción (menos del 1% del total) de las partículas de materia oscura tuviera poca masa (1 – 100 veces la del electrón) y tuviera una carga eléctrica de cerca de una millonésima parte de la del electrón. Esto ocasionaría que existiese una interacción entre la materia oscura (MO) y la MB (donde se asume que su comportamiento asemeja al de un fluido) causando un arrastre en la velocidad relativa entre estas debido a la dispersión de electrones y protones por interacciones de Coulomb, disipando así la energía cinética en energía térmica. Adicionalmente, la interacción entre MO y MB tenderá a llevar a los dos fluidos al equilibrio térmico. Dado que la temperatura de la MO es muy baja, la interacción puede reducir en gran manera la temperatura de la MB. Para poder enfriar el gas (tanto como se requiere para explicar los datos de EDGES) con interacciones de MO-MB, se requiere que existan tantas partículas de MO mini-cargadas como bariones. Este escenario puede explicar los datos de EDGES sin necesidad de introducir ninguna fuerza fundamental, pero requiere de una evidencia extraordinaria para poder probarlo (Muñoz y Loeb, 2018).

1.3.2 Exceso de radiación de fondo

Un exceso de radiación de fondo en radiofrecuencia explicaría la profundidad del pozo de absorción de los datos de EDGES. Fuentes astrofísicas, como agujeros negros supermasivos con acreción o supernovas, podrían generar la radiación en radiofrecuencia extra, vía emisión sincrotrón. Sin embargo, ambos tipos de fuentes necesitarían ser miles de veces más eficientes de lo que son sus contrapartes a pequeños corrimientos al rojo. Esto conlleva a la búsqueda de fuentes de radio creadas por procesos más exóticos, donde la intensidad de estas no está relacionada con la historia de formación estelar. Ejemplos incluyen el decaimiento radiactivo de neutrinos primordiales en neutrinos estériles y modelos mediante los cuales se inyecta radiación a 1,42 GHz adicional al gas, vía decaimiento de partículas de materia oscura ligeras. interesante mente, se ha detectado evidencia de exceso de radiación de fondo sobre el FCM a frecuencias de 3 – 90 GHz de radio por ARCADE2 y recientemente fueron confirmadas por LWA1 a 40 – 80 MHz. Sin embargo, aún no está claro que parte de ese exceso es de origen extra-galáctico. Por lo que la comunidad científica se mantiene en constante investigación (Fialkov y Barkana, 2019).

Con estos ejemplos podemos notar que, en el momento en que se produjo este pozo de absorción, los procesos astrofísicos se volvieron importantes y dominantes, ya que es cuando las estrellas y los cuásares ionizaron el medio intergaláctico (MIG) y se convierte en una etapa del universo de vital interés para la cosmología. Por lo que este campo de estudio intenta responder preguntas fundamentales, como ser: ¿mediante qué proceso se formaron las primeras estrellas?, ¿qué tan masivas eran y cuantos de sus fósiles aún permanecen en el universo local?, ¿cuándo se formaron los elementos pesados por primera vez, y que procesos los distribuyeron a las galaxias y el MIG?, ¿cuándo y cómo se formaron los primeros agujeros negros y que rol tuvieron en la formación de las galaxias?, ¿qué fuentes comenzaron el proceso de reionización? (Furlanetto, 2006).

El estudio del perfil de absorción que se espera que se produzca a estos corrimientos al rojo, nos permite extraer información que se puede traducir en un rango de parámetros que describen el medio en el que se produjo la señal y los procesos físicos involucrados; como ser: fluctuaciones de densidad, reionización cósmica y calentamiento por rayos X, entre otros (Fialkov *et al.*, 2018). De esta manera, el perfil se convierte en una sonda cosmológica directa, que nos permite explorar dichas etapas tempranas del universo y su evolución durante un lapso considerable, aproximadamente $20 > z > 5$ (Bowman *et al.*, 2018).

Este estudio plantea una metodología que permite la extracción de información de una señal global de 21 cm, utilizando la señal detectada por EDGES, para restringir parámetros relevantes para la formación estelar y galáctica. De la misma manera, dicha metodología permitirá estudiar las señales detectadas por la “Sonda Cosmológica de las Islas para la Detección de Hidrógeno Neutro” (Sci-HI) (Voytek *et al.*, 2014), ubicada en México.

2 Metodología

La presente metodología está dividida en varias fases, culminando con la extracción de parámetros a partir de los datos tomados por EDGES.

Datos - Fase 1

El presente estudio hará uso de los datos de banda baja de EDGES (50 MHz – 90 MHz). Los datos que serán utilizados son de los instrumentos “low-1” y “low-2” de EDGES, con varias configuraciones de *hardware* y procesamiento. La radiación del cielo fue recolectada por una antena de dipolo de banda ancha, que consiste en dos paneles de metal rectangulares, montados horizontalmente sobre un plano de metal en tierra. El receptor es instalado bajo el plano en tierra y se usa un *balun* (*balanced-unbalanced line transformer*, por sus siglas en inglés) para guiar la radiación de la antena a los receptores (Bowman *et al.*, 2018). Los datos fueron tomados entre 2016 y 2017.

Datos – Fase 2

Los datos son presentados en forma tabular con formato CSV. Cada fila del archivo es una frecuencia diferente entre 50 y 100 MHz con resolución espectral de 0,390625 MHz, para un total de 128 filas de datos. Los datos se encuentran públicamente disponibles en internet¹ y son utilizados para crear la figura 2 en (Bowman *et al.*, 2018).

Para evaluar las restricciones astrofísicas, se evaluará la consistencia entre el espectro de banda baja de EDGES y 10.000 señales globales de 21 cm simuladas mediante el programa 21cmFAST², un código semi-numérico que realiza cálculos aproximados para modelar un universo tridimensional, reduciendo el tiempo de cómputo (Miller, 2018). Fue diseñado para simular la señal de 21 cm durante la reionización.

2.1 Definición de los parámetros.

Para realizar esta tarea se realizarán simulaciones hasta formar una base de datos compuesta por 10.000 señales distintas de 21 cm. Cada simulación estará definida por un set de ocho parámetros distintos definidos por (Park *et al.*, 2018) y son los siguientes:

$f_{*,10}$: Una normalización de la fracción de gas galáctico presente en las estrellas a alto z , f_* evaluado para halos de masa de $10^{10} M_{\odot}$. Se le permitirá variar logarítmica mente en un rango de $\log_{10}(f_{10}) = [-3, 0]$.

¹Los datos pueden ser obtenidos en el siguiente enlace: <https://loco.lab.asu.edu/edges/edgesdata-release/>

²Se puede obtener siguiendo el siguiente enlace <https://github.com/andreimesinger/21cmFAST>

α_* : El factor de escala de ley de potencias de f_* con la masa del halo. Se le permitirá variar linealmente en un rango de $\alpha_* = [-0.5, 1]$.

Los dos anteriores permitirán obtener información sobre la masa estelar promedio en galaxias en halos de masa M_h , mediante la siguiente función:

$$M_*(M_h) = f_{*,10} \left(\frac{M_h}{10^{10} M_\odot} \right)^{\alpha_*} \left(\frac{\Omega_b}{\Omega_m} \right) M_h$$

$f_{esc,10}$: La normalización de la fracción de escape de fotones ionizantes UV de galaxias a alto z , f_{esc} , evaluada para halos de $10^{10} M_\odot$. Se le permitirá variar logarítmicamente en el rango $\log_{10}(f_{esc,10}) = [-3, 0]$

α_{esc} : El factor escala de ley de potencias f_{esc} . Se espera que este valor sea negativo debido a que las supernovas pueden evacuar más fácilmente canales de densidades columnares bajas de pozos de potencial poco profundos. Se permitirá que varíe linealmente en un rango de $\alpha_{esc} = [-1, 0.5]$.

t_* : Tiempo de escala de formación estelar tomado como una fracción del tiempo de Hubble, $(H^{-1}(z))$. Se permitirá que varíe en el rango $t_* = [0, 1]$.

Con el anterior se podrá encontrar valores para tasa de formación estelar promedio (SFR, por sus siglas en inglés) de galaxias alojadas en halos de masa Mh mediante la siguiente función:

$$M_*(M_h, z) = \frac{M_*}{t_* H(z)^{-1}}$$

M_{turn} : La masa de cambio de SFR del halo bajo la cual la abundancia de galaxias con formación estelar activa es suprimida exponencialmente, de acuerdo con la función $f_{duty} = \exp(-M_{turn}/M_h)$. Se permite que este parámetro varíe logarítmicamente en un rango de $\log_{10}(M_{turn}) = [8, 10]$. Donde el límite inferior está motivado por un límite de enfriamiento atómico, mientras que el superior está motivado por la cola tenue observada en las funciones de luminosidad actuales de UV.

E_0 : La energía mínima que un fotón de rayos X debe tener para ser capaz de escapar de la galaxia; los fotones más suaves son absorbidos por el medio interestelar de las galaxias a alto z . Se permite que varíe linealmente en un rango de $E_0 = [0.1, 0.5]$. Análogamente, este parámetro corresponde a $\log_{10}(N_{HI}/cm^2) = [19.3, 23.0]$.

$L_{X < 2keV}/SFR$: La normalización de la banda suave de luminosidad de rayos X por unidad de formación estelar, calculado sobre la banda $E_0 = -2keV$. Se permite que el parámetro varíe de forma logarítmica en un rango definido por $\log_{10}(L_{X < 2keV}/SFR) = [38, 42]$.

Los dos anteriores aportan información acerca de la emisividad específica en rayos X comóvil calculada en el marco emitido $E_e = E(1+z)/(1+z)$, y está dada por la siguiente función:

$$\epsilon_X(x, E_e, z') = \frac{L_x}{SFR} \left[(1 + \overline{\delta_{nl}}) \int_0^\infty dM_h \left(\frac{dn}{dM_h} \right) f_{duty}(M) \right] \quad (2.1)$$

Donde x es una posición espacial dada, $\overline{\delta_{nl}}$ es la sobre densidad no lineal media de la capa alrededor de (x, z) , el termino entre corchetes corresponde a la densidad de la tasa de formación estelar a lo largo del cono de luz y dn/dMh es la función de masa de halo condicional (HMF).

2.2 Creación de las simulaciones

Para realizar las simulaciones, se procederá a la instalación del programa “21cmFAST”, es un código escrito en un lenguaje de programación de alto nivel conocido como “C”. Y será ejecutado en el sistema operativo “Linux”.

Los sets de parámetros para cada simulación serán definidos mediante una rutina en lenguaje Python diseñada exclusivamente para dicha tarea. Serán introducidos en los archivos de formato “*.H”. Dichos archivos se encuentran en una carpeta llamada “Parameter_files”, creada por el autor.

Los archivos que serán modificados son:

- ANAL_PARAMS.H
- COSMOLOGY.H
- HEAT_PARAMS.H
- INIT_PARAMS.

En el archivo “ANAL_PARAMS.H” se introduce el set de parámetros astrofísicos, mismos que son leídos por el programa “driver_logZscroll_Ts” para realizar la simulación.

En el archivo “COSMOLOGY.H” se introduce el modelo cosmológico a ser utilizado, en esta investigación se utilizarán los datos recopilados por la sonda Planck para el modelo Λ CMD. (Ade *et al.*, 2016). Los mismos se muestran en la tabla 1.

En el archivo “INIT_PARAMS.H” es posible modificar los requerimientos computacionales para la simulación. Configurados para que, a más altos requerimientos, mayor es la precisión de los resultados. En este estudio se creará un volumen de 300 Mpc que contiene una caja de alta resolución (albergada en la variable DIM) de 1200^3 celdas y una caja de baja resolución (alojada en la variable HII_DIM) de 400^3 celdas, donde serán muestreadas las condiciones iniciales que el programa tomará para la subsecuente evolución de densidad, la simulación de los campos de ionización, etc.(Mesinger *et al.*, 2011).

Tabla 1: Parámetros que serán introducidos en el archivo COSMOLOGY.H

Parámetro Cosmológico	Valor
Fluctuación de densidad a $8 h^{-1}$ Mpc	$\sigma_B = 0.81$
Parámetro de Hubble	$h = 0.67$
Parámetro de densidad de materia	$\Omega_m = 0.31$
Parámetro de densidad bariónica	$\Omega_b = 0,048$
Parámetro de densidad de Energía Oscura	$\Omega_\lambda = 0,69$
Índice Espectral Escalar	$n_s = 0,97$
Parámetro de densidad total	$\Omega_{\text{tot}} = 1$

Los valores de las dimensiones de las cajas de alta y baja resolución son elegidos de acuerdo con los requerimientos de RAM del código, denotado por la siguiente formula:

$$4 \cdot (DIM^3 + 4 \cdot (HII_{DIM})^3) / 10^9 \text{GB} \quad (2.2)$$

Para la realización de este trabajo se necesita un mínimo de 8 GB de memoria RAM disponible en el sistema para poder generar la señal exitosamente.

2.3 Diseño del proyecto – Fase III

Se diseñará un programa que utilice el método Cadena de *Markov* Montecarlo. Es posible programar el método en cualquier lenguaje de programación de alto nivel, como, por ejemplo: Fortran, C o C++. Para este trabajo se utilizará el lenguaje de programación Python. Es un método de simulación para generar muestras de las distribuciones y estimar cantidades de interés *a posteriori*. Se simulan valores sucesivamente de una densidad propuesta, que no tiene que ser necesariamente parecida a la distribución deseada. Cada valor simulado depende del valor generado anteriormente, de ahí la noción de cadena de Markov. La convergencia se da cuando los valores tienen la similitud suficiente con la distribución deseada, es decir, se encuentran dentro de un rango de aceptabilidad.

2.3.1 Distribución de probabilidad *a priori*

Para poder realizar una comparación entre datos utilizando estadística Bayesiana, se requiere de un modelo de distribución de probabilidad a priori, un modelo preliminar a partir del cual se creará la cadena de Markov y se esperará que converja con el método de Monte Carlo. Se definirá un modelo a priori que involucre los ocho parámetros a analizar. Se listan en la siguiente tabla y fueron elegido de manera que el momento en el que se dio el final de la reionización sea consistente con observaciones actuales ([Park et al., 2018](#); [Monsalve et al., 2018](#); [Greig y Mesinger, 2018](#)):

Tabla 2: Parámetros para la distribución a priori

Parámetro	Paso Inicial
$f_{,10}$	0.05
α_*	0.5
$f_{esc,10}$	0.1
α_{esc}	-0.5
M_{turn}	5×10^8
t_*	0,5
$L_{X<2keV})/SFR$	$10^{40.5}$
E_0	0.5

2.4 Diseño del Proyecto – Fase IV

Se observará la distribución de probabilidad posterior de cada parámetro producto de la comparación, usando el método de Cadena de Markov Monte Carlo y, de esta manera, se obtendrán los rangos de los parámetros que producen una señal de 21 cm a alto z, similar a la detectada por EDGES con un 68 % y 95 % de nivel de credibilidad.

2.5 Diseño del proyecto – Fase V

Los rangos de parámetros, previamente obtenidos, serán comparados con restricciones encontradas por distintos métodos encontrados en la literatura, como ser, el estudio de galaxias emisoras de Lyman-alpha o las supernovas tipo Ia (Dijkstra, 2014). Al igual que con mediciones cosmológicas realizadas por telescopios en tierra y sondas espaciales, como ser el observatorio espacial Planck.

3 Resultados esperados

- Se espera que la base de datos creada a partir de las simulaciones genere un conjunto de señales similar al mostrado en la figura 4 en (Monsalve *et al.*, 2018)
- Se espera que, una vez realizadas las simulaciones, y se comparen con los datos de EDGES, se obtenga una gráfica similar a la figura 3 en (Monsalve *et al.*, 2018)
- Con esta investigación se podrá ser capaz de encontrar rangos para los parámetros definidos, con un 95% de nivel de credibilidad. Así como, descartar rangos de valores al encontrarlos muy poco probables, definiendo cotas inferiores o superiores para cada parámetro.

4 Conclusiones

1. Con esta investigación se logrará desarrollar una herramienta eficiente para el estudio de las señales obtenidas por detectores en tierra y que, comparándolas con diferentes modelos de 21-cm, aporte a la comunidad científica información útil para el entendimiento de las primeras etapas del universo.
2. Se obtendrán restricciones con alto nivel de credibilidad respecto a los datos de EDGES, a espera de ser comparadas con futuras investigaciones utilizando distintas detecciones de la señal global de 21cm.
3. Se espera ser capaz de extender el método, utilizando otros códigos numéricos computacionales para la simulación de 21-cm como, por ejemplo: “21cmSense”³ y “CUBE3M”⁴. De igual manera, utilizando otros métodos estadísticos. Así, de esta forma, estudiar los modelos existentes con el propósito de afinarlos en su descripción de la física de 21-cm.

5 Referencias

Ade, P. A. R., Aghanim, N., Arnaud, M., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartlett, J. G., Bartolo, N., Battaner, E., Battye, R., Benabed, K., Benoît, A., Benoit-Lévy, A., Bernard, J.-P., Bersanelli, M., Bielewicz, P., Bock, J. J., ..., y Zonca, A. (2016). Planck2015 results: XIII. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 594:A13. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.01589>.

Bowman, J., Rogers, A., Monsalve, R., Mozdzen, T., y Mahesh, N. (2018). An absorption profile centred at 78 Megahertz in the sky-averaged spectrum. *Nature*, 555:67–70. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature25792>.

³<https://github.com/jpober/21cmSense>

⁴<https://github.com/jharno/cubep3m>

- Dijkstra, M. (2014). Ly-alpha emitting galaxies as a probe of reionization. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 31. DOI: <https://doi.org/10.1017/pasa.2014.33>.
- Fialkov, A. y Barkana, R. (2019). Signature of excess radio background in the 21-cm global signal and power spectrum. , 486(2):1763–1773. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stz873>.
- Fialkov, A., Barkana, R., y Cohen, A. (2018). Constraining baryon–dark-matter scattering with the cosmic dawn 21-cm signal. *Phys. Rev. Lett.*, 121:011101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.011101>.
- Field, G. B. (1958). Excitation of the Hydrogen 21-CM Line. *Proceedings of the IRE*, 46:240–250. DOI: <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1958.286741>.
- Furlanetto, S. R. (2006). The global 21-centimeter background from high redshifts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 371(2):867–878. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10725.x>.
- Greig, B. y Mesinger, A. (2018). Simultaneously constraining the astrophysics of reionisation and the epoch of heating with 21cmmc. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12(3):18–21. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1743921317011103>.
- Mesinger, A., Furlanetto, S., y Cen, R. (2011). 21cmFAST: Fast, Semi-Numerical Simulation of the High-Redshift 21-cm Signal. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411(2):955–972. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17731.x>.
- Miller, M. (2018). *Recovering the Physics of the Epoch of Reionization using Semi-Analytic 21CMMC code*. PhD Thesis. Disponible en: https://www.brown.edu/academics/physics/sites/physics/files/images/Miller_Michelle_Miller_Final_Thesis.pdf.
- Monsalve, R. A., Greig, B., Bowman, J. D., Mesinger, A., Rogers, A. E., Mozdzen, T. J., y Mahesh, N. (2018). Results from EDGES High-Band: II. Constraints on Parameters of Early Galaxies. *Astrophysical Journal*, 863(1). DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aace54>.
- Muñoz, J. B. y Loeb, A. (2018). A small amount of mini-charged dark matter could cool the baryons in the early universe. *Nature*, 557:684–686. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0151-x>.
- Park, J., Mesinger, A., Greig, B., y Gillet, N. (2018). Inferring the astrophysics of reionization and cosmic dawn from galaxy luminosity function and the 21-cm signal. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484(1):933–949. DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/stz032>.
- Pritchard, J. y Loeb, A. (2012). 21 cm cosmology in the 21st century. *Reports on Progress in Physics*, 75(8). DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/75/8/086901/pdf>.
- Voytek, T., Natarajan, A., García, J. M., Peterson, J., y Cruz, O. (2014). Probing the dark ages at $z \sim 20$: The sci-hi 21 cm all-sky spectrum experiment. *The Astronomical Journal Letters*, 782(1):1–5. DOI: <https://doi.org/10.1088/2041-8205/782/1/L9>.
- Wouthuysen, S. (1952). On the excitation mechanism of the 21-cm (radio-frequency) interstellar hydrogen emission line. *Astronomical Journal*, 57:31–32. DOI: <https://doi.org/10.1086/106661>.