

EXPLORANDO EL BOSQUE LYMAN- α EN LOS DATOS TEMPRANOS DE DESI

EXPLORING THE LYMAN- α FOREST IN THE DESI EARLY DATA RELEASE

Fernanda Arely Duran Ramirez¹, Oscar Kariel Hernández Serrano², Daniela Jiménez Pano³, Norma Angélica Márquez Sulca⁴, Emilio Toledo Espinoza⁵, Alma Xóchitl González Morales⁶

División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato

fa.duranramirez@ugto.mx¹, ok.hernandezserrano@ugto.mx², d.jimenezpano@ugto.mx³, na.marquezsulca@ugto.mx⁴, e.toledo.espinoza@ugto.mx⁵, gonzalez.alma@ugto.mx⁶

Resumen

En este trabajo se aborda el estudio de los bosques Lyman- α y las observables cosmológicas asociadas tales como las funciones de correlación, en una y tres dimensiones, entre absorciones Lyman- α ; y el espectro de potencias de flujo en una dimensión. Se utilizaron datos públicos de la etapa de validación del experimento DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument), en particular las posiciones de cuásares con desplazamientos al rojo mayores a 1.8, y el catálogo de absorciones Lyman- α . Finalmente, se estudió el efecto de variar el número de cuásares en el cálculo de dichas observables cosmológicas.

Palabras clave: Bosque Lyman- α , cuásar, DESI, BAO, espectro, correlación

Introducción

A lo largo del tiempo, la humanidad ha buscado la manera de formular diversas teorías acerca de la creación del Universo, desde ideas religiosas hasta ideas enmarcadas en las ciencias exactas. En la actualidad la teoría que ha tenido reconocimiento y mejor aceptación de la comunidad científica es *la teoría del Big Bang*.

Sin entrar en detalles, el Universo comenzó en el Big Bang como una gran densidad de materia, tan denso que no sabemos a ciencia cierta cómo se comportaba el Universo en ese instante; posteriormente hubo un periodo de inflación, donde el Universo se expandió rápidamente y se hizo menos denso y más frío. Posteriormente ocurrió la etapa de nucleosíntesis, en esta etapa, como lo indica el nombre, ocurrió la formación de los primeros núcleos atómicos, sin embargo, la formación de átomos completos era imposible debido a que la densidad del Universo aún era tan grande que las partículas de luz (fotones) eran absorbidas y reemitidas por los electrones haciendo así que los electrones no pudieran mantenerse en la estructura del átomo.

Cuando se formaron los primeros átomos la densidad del Universo era la necesaria para que la luz por fin pudiera viajar libremente sin destruir átomos, en esta etapa sucedió lo que hoy en día llamamos radiación de fondo cósmico de microondas. Posteriormente, el Universo continuó su expansión y enfriamiento para dar paso a la formación de estructuras cósmicas. La evidencia actual indica que a causa de existir regiones de densidad mayor en el Universo temprano y debido a la gravedad estas regiones acumularon más y más materia formando así las estructuras cósmicas que conocemos hoy.

Específicamente estas regiones de mayor atracción gravitacional dieron paso a la formación de estrellas y galaxias, las estrellas a su vez permitieron procesos en los que las partículas en su interior se fusionaron para formar elementos más pesados que el Hidrogeno, Helio, etc.

La mayoría de las galaxias están contenidas en estructuras que llamamos cúmulos de galaxias debido a la atracción gravitatoria. Estas estructuras son las más grandes del Universo.

El objetivo de este trabajo es obtener funciones de correlación de las absorciones presentes en la región denominada bosque Lyman- α (*Ly α*) en los espectros de luz de cuásares distantes, así como las correlaciones cruzadas entre las absorciones y los cuásares en sí. Presentamos el contexto necesario del instrumento con el que se obtuvieron los datos que usaremos en la sección "*DESI*"; el marco teórico bajo el cual analizaremos la información en las secciones "*Oscilaciones Acústicas de Bariones*" y "*El bosque de Lyman- α en Cosmología*"; las herramientas técnicas y de análisis con las que trabajamos se definen en las

secciones “Funciones de correlación y espectro de potencias” y “Análisis de datos del bosque de Lyman- α ”; nuestro proceso de selección y análisis se describe en las secciones “Catálogo de Cuásares” y “Un vistazo al bosque de Lyman- α ”. Finalmente, en las secciones “Medición de funciones de correlación y la escala de BAO” y “Medición del espectro de potencias 1D” presentamos los resultados de las observables que nos propusimos calcular.

DESI

DESI son las siglas en inglés para *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura) es un proyecto científico para estudiar la naturaleza de la energía oscura (una fuerza misteriosa que dirige la expansión del Universo y que representa un 70% del contenido en él). El objetivo principal de DESI es cartografiar el Universo proporcionando medidas precisas de los espectros de galaxias para su análisis, a partir del cual se espera obtener información sobre la energía oscura principalmente.

De manera general, - y para comprender cómo funciona DESI-, este instrumento en su plano focal cuenta cinco mil fibras ópticas que se pueden configurar de maneras diferentes. Las fibras ópticas se conectan a diez espectrógrafos de banda ancha con tres detectores cada uno. DESI está montado en el telescopio Mayall, con un espejo de cuatro metros de diámetro, ubicado en el Observatorio Nacional de Kitt Peak en Arizona, Estados Unidos.

DESI está diseñado para medir con gran precisión los espectros de luz emitidos por objetos celestes. El rango de sensibilidad de los espectrógrafos (360 a 980 nanómetros) permite medir el desplazamiento al rojo, o *redshift*, de hasta 3.5, es decir de objetos muy distantes. Esto permitirá estudiar, entre otras cosas, los espectros de los cuásares, particularmente los bosques de Lya para obtener información sobre la localización de materia en el Universo, su evolución, en particular a partir de la técnica de las oscilaciones acústicas de bariones (BAO), lo que a su vez contribuye al entendimiento de la energía oscura, la expansión del Universo y a la creación del mapa 3D más grande del Universo. (Levi, M. *et al.* (2019)).

Recientemente la colaboración DESI realizó la primera liberación de datos tempranos de DESI, también denominada EDR (Early Data Release) por las siglas en inglés. El EDR de DESI contiene espectros de 1.8 millones de objetos únicos, entre los que se encuentra un gran número de cuásares, dichos espectros fueron obtenidos de diciembre de 2020 a junio de 2021, durante la etapa de validación del sondeo. La imagen 1 muestra una visualización de un subconjunto de dichos datos.

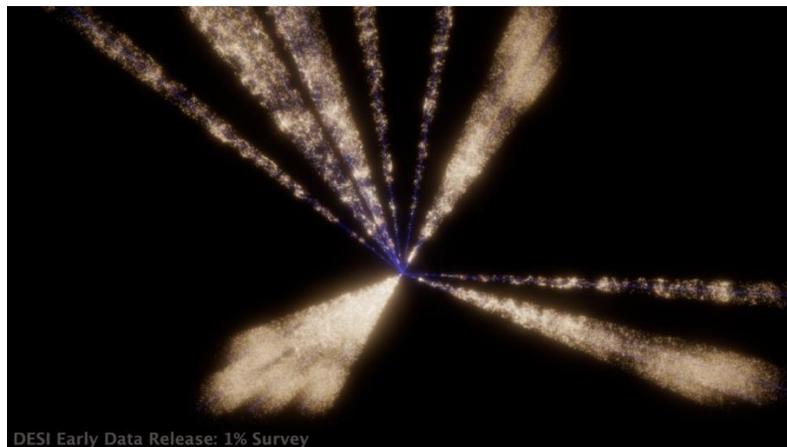


Figura 1. Mapa que muestra el Universo observado por DESI correspondiente al 1% del total del volumen que será observado. Los datos usados para generar esta imagen son parte de la liberación temprana de datos de DESI. Crédito: David Kirkby/colaboración DESI.

Oscilaciones Acústicas de Bariones

Dentro de las investigaciones realizadas en la cosmología actual se encuentra el estudio de un fenómeno denominado Oscilaciones Acústicas Bariónicas (BAO).

Lo primero que se debe entender consiste en qué es un barión. Los protones y neutrones están hechos de partículas aún más fundamentales llamadas quarks, existen quarks up y quarks down, ambas de las partículas mencionadas anteriormente están conformadas por tres quarks, los protones por dos up y un down, mientras los neutrones por un up y dos down, de manera más general, al conjunto de partículas existentes conformadas por tres quarks, se le conoce como bariones. Sin embargo, en cosmología se suele denominar bariones a toda la materia que conocemos y que se describe por el modelo estándar de partículas.

Las oscilaciones acústicas de bariones se refieren a un fenómeno ocurrido en tiempos prematuros del Universo, cuando el cosmos era más compacto, denso y caliente, antes del periodo de desacoplamiento de la materia y la radiación (el desacoplamiento fue la transición de un Universo opaco a uno donde la luz pudo propagarse libremente). A medida que el Universo se expandía, éste se enfriaba y permitía que los bariones se unieran para formar átomos ligeros, como el hidrógeno, a esta etapa se le conoce como nucleosíntesis.

Las perturbaciones de la densidad de materia bariónica presentan oscilaciones que se propagan como onda. Las oscilaciones fueron producto de la compresión de la materia debido a la gravedad y la descompresión debido a la radiación producida por la propia materia al comprimirse. En el momento del desacoplamiento, los bariones fueron "congelados" en su lugar, dejando impreso un patrón en la distribución de materia, en particular en la distribución de galaxias. La figura 2 muestra una representación gráfica de dichos patrones en la distribución de galaxias. El radio de estas perturbaciones es denominado "escala de BAO".

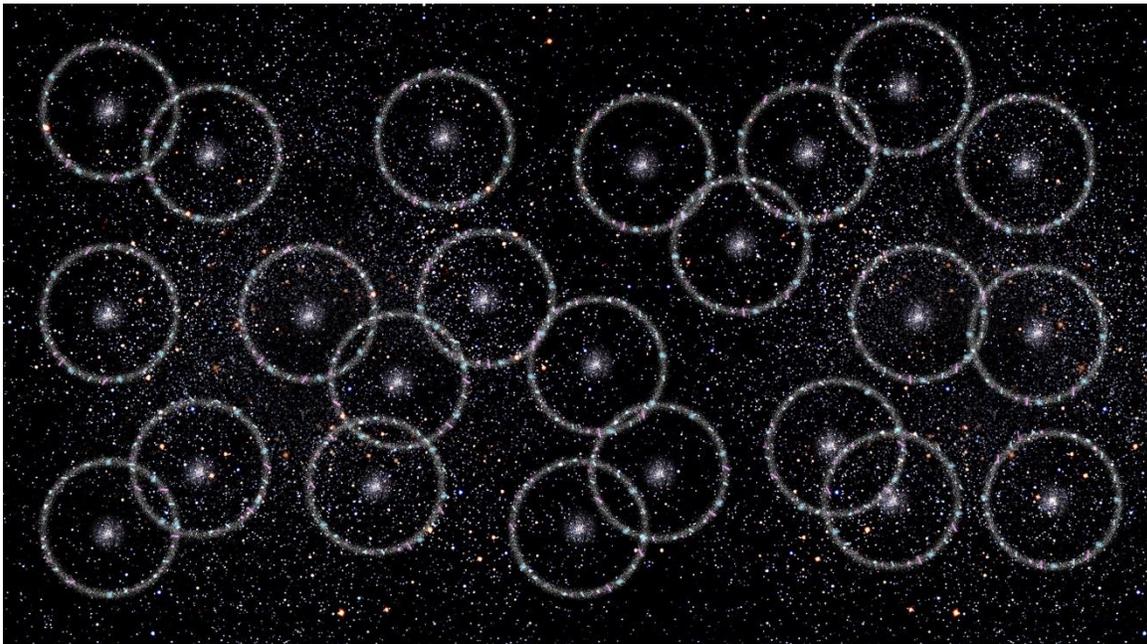


Figura 2. Representación gráfica de los patrones en la distribución de galaxias y la escala de BAO.

La importancia de BAO la cosmología actual radica en ser utilizada como una regla estándar para la medición de distancias ya que estos patrones de distribución de materia nos brindan información para comprender estructuras a grandes escalas y la expansión del Universo.

El bosque de Lyman- α en Cosmología

En la sección anterior se presentaron los antecedentes necesarios para comprender el objeto de estudio principal trabajado en el *Verano de la Ciencia 2023*, los bosques Lyman- α . Para entender este concepto, primero es necesario saber qué es un espectro electromagnético. Éste se forma a partir del conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas, por lo tanto, el espectro de un objeto astronómico corresponde a todas las longitudes de onda que conforman las emisiones y absorciones de radiación electromagnética del objeto, no siempre todas las regiones del espectro electromagnético que emite el objeto son visibles a nuestros telescopios por lo que es necesario diseñar instrumentos en particular para estudiar partes específicas de dichos espectros.

La línea de emisión en el espectro electromagnético asociada con la transición de un electrón en un átomo de hidrógeno desde el segundo nivel de energía más alto ($n = 2$) al nivel de energía más bajo ($n = 1$) se denomina Lyman- α , abreviado como Lya. Esta transición corresponde a la liberación de energía en forma de un fotón ultravioleta (UV) con una longitud de onda de 1215.67 Ångströms (Å).

La línea de emisión/absorción Lya es extremadamente importante en cosmología, ya que es una de las más fuertes en el espectro de objetos tales como cuásares. Debido a su intensidad y prominencia, la línea Lya proporciona información valiosa sobre la composición y la naturaleza física de estos objetos distantes.

Además, dado que el Universo está en constante expansión la luz de objetos astronómicos distantes se desplaza hacia longitudes de onda más grandes, a esto le denominamos desplazamiento al rojo o *redshift*. Como resultado, la línea Lya emitida por objetos distantes puede desplazarse hacia longitudes de onda más grandes en el espectro, lo que permite a los astrónomos estudiar la expansión del Universo y medir la distancia a estos objetos distantes.

La detección y estudio de la línea Lya ha sido crucial para avanzar en nuestra comprensión del Universo y ha proporcionado información valiosa sobre la evolución temprana de las galaxias y las condiciones primordiales del cosmos.

Ahora, los *bosques Lyman- α* son una característica observable en el espectro de galaxias y cuásares distantes. La luz de dichos objetos sufre absorciones debido a que se encuentra con el material intergaláctico, compuesto principalmente por nubes de Hidrógeno, en su camino, ya que dicho material absorbe parte de la radiación. Cuando la luz de un cuásar viaja a través de dichas nubes, los átomos de hidrógeno absorben longitudes de onda de la luz cuyo desplazamiento al rojo coincide con la línea Lya (1215.67 Ångstroms). La serie de líneas de absorción que se produce en el espectro de los cuásares distantes es lo que denominamos *bosque Lyman- α* .

El estudio de los bosques Lya ha sido especialmente útil para los cosmólogos, ya que proporciona pistas importantes sobre la evolución del Universo, la formación de estructuras y la cantidad y distribución de materia oscura en el Universo. También ha sido fundamental para la comprensión de cómo se formaron las primeras galaxias y cómo evolucionaron con el tiempo. Por lo tanto, el bosque Lya es una herramienta valiosa para la cosmología y el estudio de la estructura a gran escala del Universo.

Funciones de correlación y espectro de potencias

La distribución del hidrógeno neutro es un trazador de la distribución de materia, por tanto, es posible obtener información estadística de dicha distribución, así como su evolución en el tiempo. En particular, las medidas de las funciones de correlación de dos puntos y el espectro de potencias son las observables más comúnmente utilizadas en estudios Lya en cosmología. De forma general, la medición de una función de correlación de dos puntos, sobre una distribución espacial de objetos determinada, mide el exceso de probabilidad, respecto a una distribución de objetos aleatoria, de encontrar dos objetos separados a diferentes distancias. Por otro lado, el espectro de potencias es la transformada de Fourier de la función de correlación.

En el caso de los bosques Lya, los objetos a los que nos referimos para el cálculo de funciones de correlación y espectros de potencias son las absorciones Lya en el bosque, de forma más precisa las fluctuaciones en el

flujo denominado coloquialmente como deltas, δ_F , y las sobre densidades trazadas por los propios cuásares, δ_χ . En este trabajo nos enfocaremos en 3 tipos de funciones de correlación y un espectro de potencias: a) la autocorrelación entre absorciones Ly α , en una y en tres dimensiones, b) la correlación cruzada, o cross-correlación, entre absorciones Ly α y cuásares, y finalmente, c) el espectro de potencias unidimensional (P1), que es transformada de Fourier de la función de correlación en una dimensión.

La función de autocorrelación en tres dimensiones, ecuación 1, se refiere a absorciones Ly α que se encuentran en diferentes líneas de visión, es decir provienen de diferentes cuásares, separados a una distancia r ; la función de cross-correlación, ecuación 2, involucra absorciones y posiciones de los cuásares separados a una distancia r .

$$\xi_\alpha(\vec{r}) = \langle \delta_F(\vec{x}) \delta_F(\vec{x} + \vec{r}) \rangle_x \quad \text{ec.1}$$

$$\xi_{\alpha\chi}(\vec{r}) = \langle \delta_F(\vec{x}) \delta_\chi(\vec{x} + \vec{r}) \rangle_x \quad \text{ec.2}$$

La función de autocorrelación en una dimensión, ecuación 3, se refiere al cálculo de la correlación entre absorciones Ly α , separadas a una distancia r , que se encuentran a lo largo de la misma línea de visión, es decir que provienen de la luz del mismo cuásar.

$$\xi_{1D,\alpha}(r_\parallel) = \langle \delta_\chi(x) \delta_\chi(x + r_\parallel) \rangle_x \quad \text{ec.3}$$



Figura 3. Izquierda: muestra una configuración del espacio como una autocorrelación en 1D, centro: configuración del espacio como una autocorrelación en 3D, derecha: configuración del espacio como una cross-correlación con cuásares en 3D

La figura 3 muestra gráficamente la relación entre las absorciones Ly α y los cuásares para los diferentes tipos de funciones de correlación. Las funciones de correlación Ly α son de especial utilidad pues nos permiten determinar la escala de BAO descrita en la sección "Oscilaciones Acústicas de Bariones". Se tiene como antecedente las mediciones realizadas con *Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS)* con y *extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (eBOSS)*.

Por otro lado, si las fluctuaciones de flujo se transforman al espacio de Fourier, es posible calcular el espectro de potencias. Nuevamente, tenemos el espectro en tres dimensiones, ecuación 4, y el espectro en una dimensión (P1D), que a su vez es la integral del espectro en tres dimensiones a lo largo de la línea de visión, ecuación 5.

$$P_\alpha(\vec{k}) \delta_D^{(3)}(\vec{k} + \vec{k}') = \frac{1}{(2\pi)^3} \langle \delta_F(\vec{k}) \delta_F(\vec{k}') \rangle \quad \text{ec.4}$$

$$P_{1D,\alpha}(k_\parallel) = \int \frac{d\vec{k}_\perp}{(2\pi)^2} P_\alpha(\vec{k}, k_\parallel) \quad \text{ec.5}$$

El espectro de potencias en una dimensión, P1D, es muy sensible a las fluctuaciones a pequeñas escalas por lo que se puede obtener información muy importante sobre los parámetros cosmológicos y astrofísicos, donde se puede destacar las restricciones de la suma de las masas de las 3 especies de neutrinos, a modelos de la materia oscura caliente y para el estado térmico del medio intergaláctico. Las mediciones más recientes fueron hechas precisamente usando datos del DESI EDR además de datos de los dos primeros meses de observaciones formales de DESI (Ravoux et. al 2023, Karaçaylı et al., 2023). En este trabajo nos limitamos a la medición del espectro de potencias 1D en los datos tempranos de DESI.

Análisis de datos del bosque de Lyman- α

En el estudio del Bosque de Lya, se emplearon los primeros datos liberados por el instrumento DESI, es decir el conjunto de datos denominado [DESI EDR](#), se utilizaron los [tutoriales](#) proporcionados por DESI para el manejo de dichos datos, y los cuadernos de trabajo del programa [DESI High](#). Con dichos datos y herramientas se llevó a cabo un análisis y clasificación de los datos. El objetivo principal era identificar y estudiar cuásares que exhibieran características particulares, como líneas de emisión específicas, en especial las líneas Lya, los bosques Lya, y corrimientos al rojo particulares, entre otros parámetros relevantes.

Catálogo de cuásares

Para llevar a cabo el análisis, se creó un nuevo notebook en Google Colab utilizando el código proporcionado por un [tutorial de DESI](#), el cual también estaba disponible en GitHub junto con los datos relevantes para el estudio. En este contexto, también se utilizó el [catálogo](#) de objetos clasificados por DESI.

Con el propósito de seleccionar cuásares con un corrimiento al rojo específico ($z > 2.1$), se diseñó un filtro en el segundo notebook creado. Posteriormente, se establecieron valores mínimos adicionales para el redshift en 1.8, 2.1, 2.3, 2.6, 2.9 y 3.14, para crear catálogos adicionales. Este proceso permitió obtener una selección más específica y precisa de cuásares en los surveys "sv1" y "sv3" del programa "dark".

El análisis demostró que al reducir el corrimiento al rojo mínimo, se obtuvo una mayor cantidad de datos disponibles para el estudio, puesto que había un mayor número de cuásares que cumplían las características requeridas.

El filtro desarrollado llevó a cabo el proceso de identificación y selección de un conjunto de 37,383 cuásares que cumplían adecuadamente con los criterios establecidos. Los espectros de estos cuásares seleccionados fueron procesados y se obtuvieron gráficas que mostraban claramente las líneas de Lyman- α y Lyman- β , así como el bosque Lya, proporcionando así una visión detallada y valiosa de estos objetos celestes, algunos ejemplos se muestran en la figura 4.

Este proceso de análisis y selección de cuásares nos permitió avanzar en el estudio del bosque de Lya y obtener información relevante sobre las características y propiedades de los cuásares identificados.

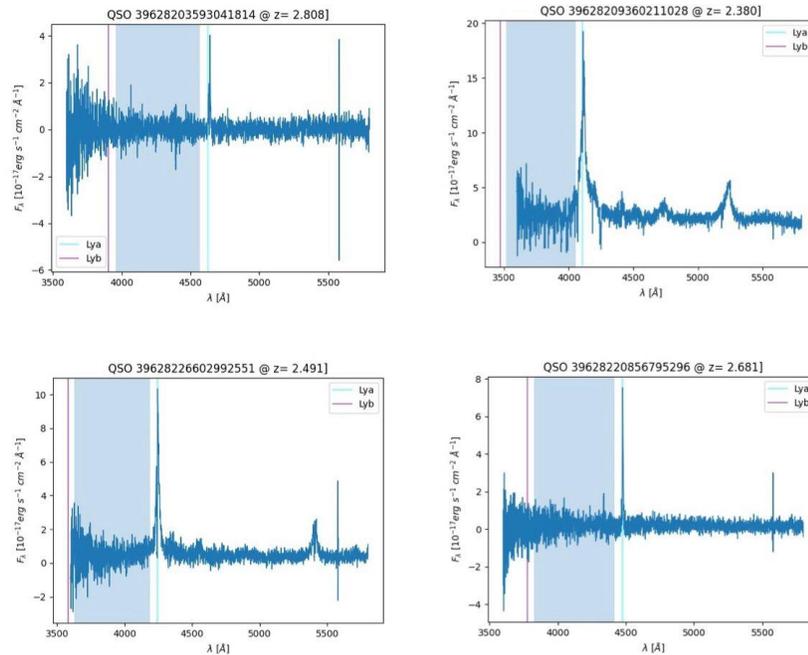


Figura 4. Gráfica de flujo respecto a la longitud de onda para cuásares con un redshift mayor a 2.1. Se muestran la ubicación de las líneas de emisión Lyman- α y Lyman- β , así como los bosques de Lya sombreados en azul.

Un vistazo al bosque de Lyman-a

Una vez obtenido el catálogo de cuásares, se procedió a explorar y analizar los espectros asociados a estos objetos astronómicos con el objetivo principal de identificar la región de Lya en estos espectros.

Para realizar esta exploración, adaptamos los códigos disponibles en el repositorio DESIhigh, específicamente el cuaderno de trabajo *exploring the Lyman-a forest*. Esto fue esencial para comprender las bases físicas de los resultados esperados y procesar adecuadamente los datos que se tenían.

A medida que se progresó, fueron generados las gráficas mostradas en la *figura 4* donde es posible observar los espectros de los cuásares seleccionados e identificar claramente el bosque de Lya. Esta identificación visualmente intuitiva fue lograda gracias al sombreado mostrado en las gráficas, es decir, en esa zona se pueden apreciar las absorciones causadas por el medio intergaláctico a lo largo de la línea de visión.

Medición de funciones de correlación y la escala de BAO

La función de auto correlación obtiene la correlación entre las absorciones Ly α de diferentes cuásares, a diferente ascensión recta, declinación y corrimiento al rojo, lo que nos brinda información sobre la distribución de gas intergaláctico y de materia en general.

Además de utilizar el catálogo de cuásares anteriormente mencionado, también utilizamos el catálogo de absorciones Ly α , que también es parte del DESI EDR y el código [picca](#), para calcular las funciones de auto correlación 3D, y 1D, y de correlación cruzada.

Una vez obtenidas las funciones de auto-correlación las graficamos como función de la distancia entre bosques, como se puede ver en las figuras 5 y 6.

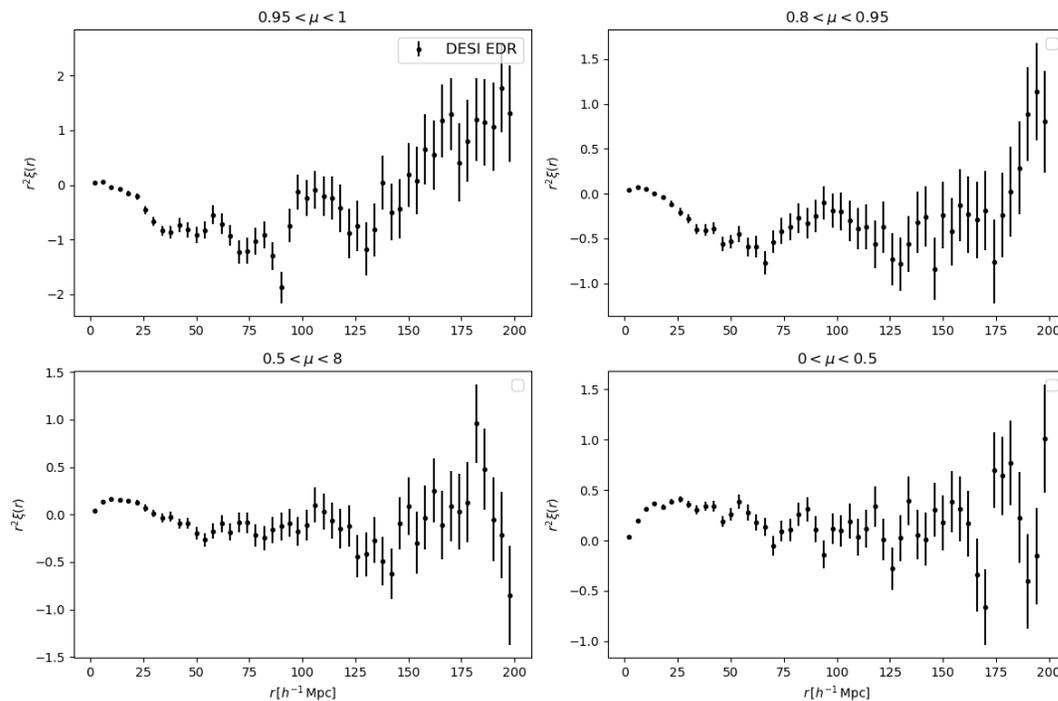


Figura 3. Gráfica de la función de autocorrelación entre absorciones Ly α respecto a la distancia entre ellas

El pico de BAO es un máximo en la función de auto correlación, en la figura 5 la función de auto correlación muestra la probabilidad de encontrar dos objetos a cierta distancia de separación, con relación a una separación promedio, al observar el pico de BAO, podemos conocer la región en la que hay una probabilidad muy alta de encontrar dichos objetos a una separación específica, indicando la escala característica de las oscilaciones acústicas primordiales.

En la figura 5 se puede observar un pico alrededor de $100 h^{-1} Mpc$, el cual corresponde al pico de BAO, para mayor precisión es necesario usar modelos que se ajusten, sin embargo, podemos detectarlo a simple vista, de manera aproximada.

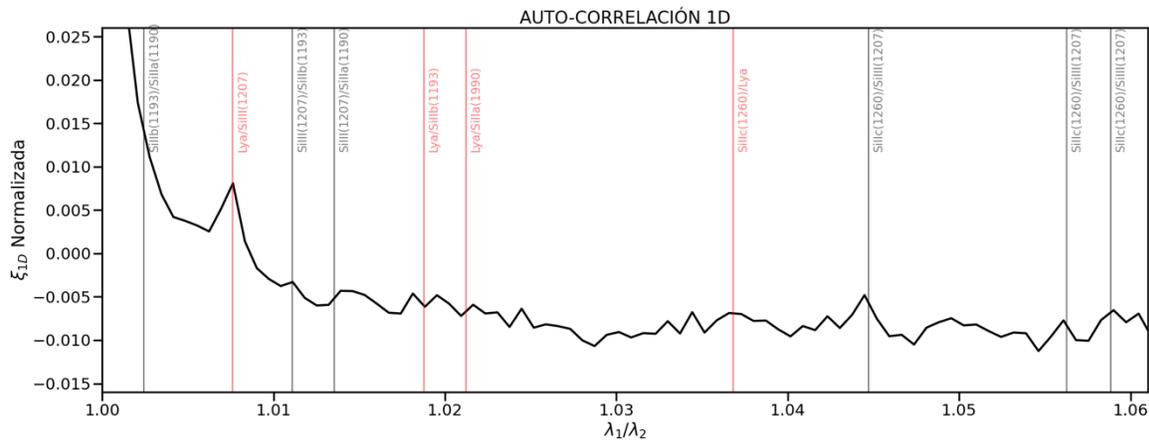


Figura 4. Función de autocorrelación (normalizada) entre absorciones Lya sobre la misma línea de visión. Las líneas verticales indican la presencia de correlaciones debidas a otras absorciones contaminantes en el bosque de Lya

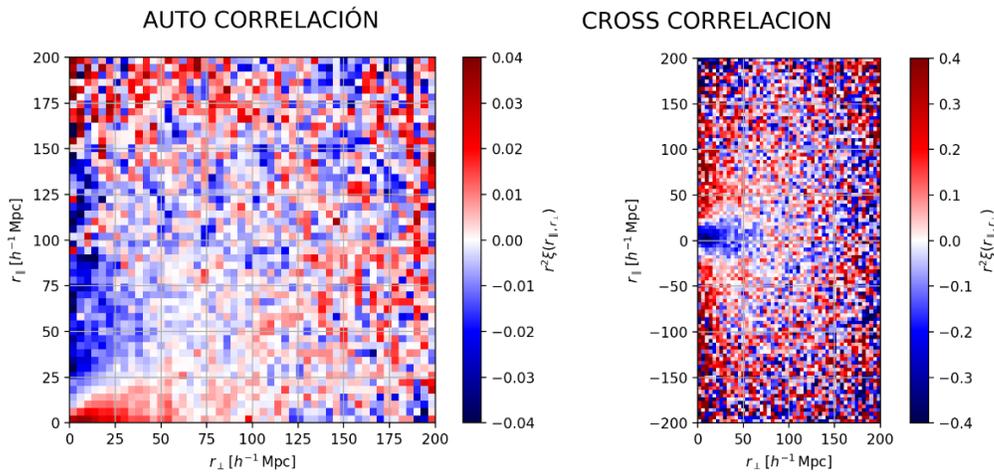


Figura 5. Función de autocorrelación (izquierda) y cross-correlación (derecha) como función de la separación, entre absorciones, paralela y perpendicular a la línea de visión

La correlación cruzada que se denominó “cross correlación” es una técnica usada para comparar los espectros de un cuásar con un bosque de Lya, se utilizaron los mismos catálogos que en la autocorrelación, la función de cross correlación, fue calculada también con el código `picca`. Posteriormente se graficó la función de correlación contra la distancia, para diferentes corrimientos al rojo.

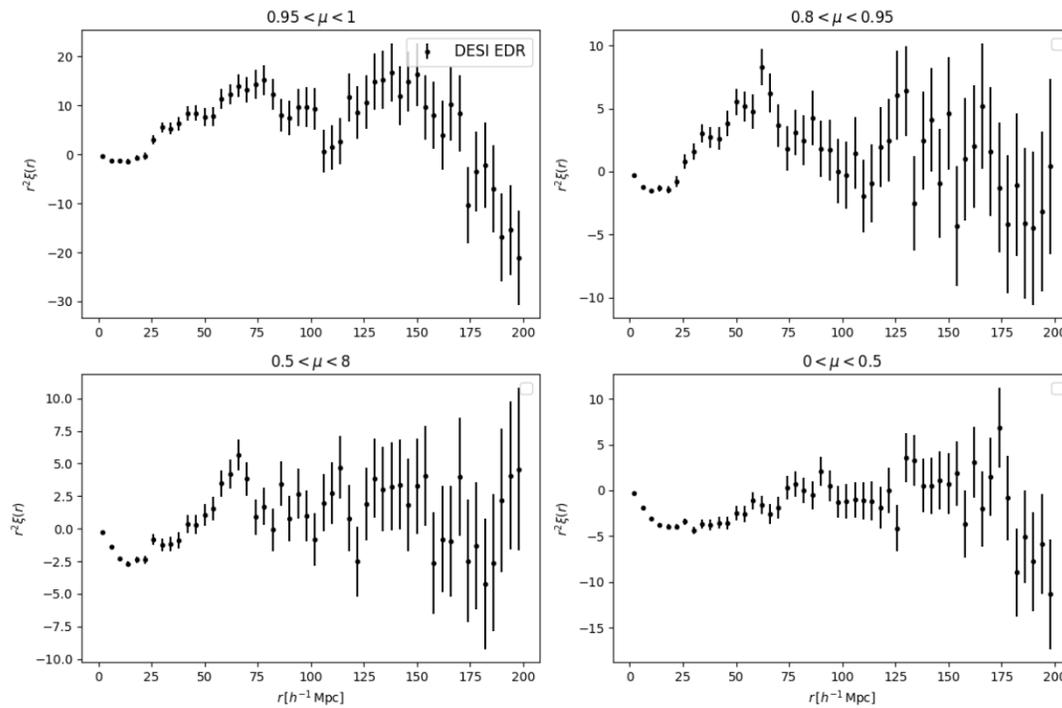


Figura 8. Gráfica de cross correlaciones

Además, se realizó una gráfica de sus barras de error, para diferentes separaciones angulares, como función de la separación entre absorciones, con diferentes elecciones del desplazamiento al rojo mínimo seleccionado en el proceso de filtraciones de cuásares, ver subsección: **Catálogo de cuásares**. Podemos apreciar como las barras de error aumentan conforme aumenta el desplazamiento al rojo mínimo, es decir conforme disminuye el numero de cuásares.

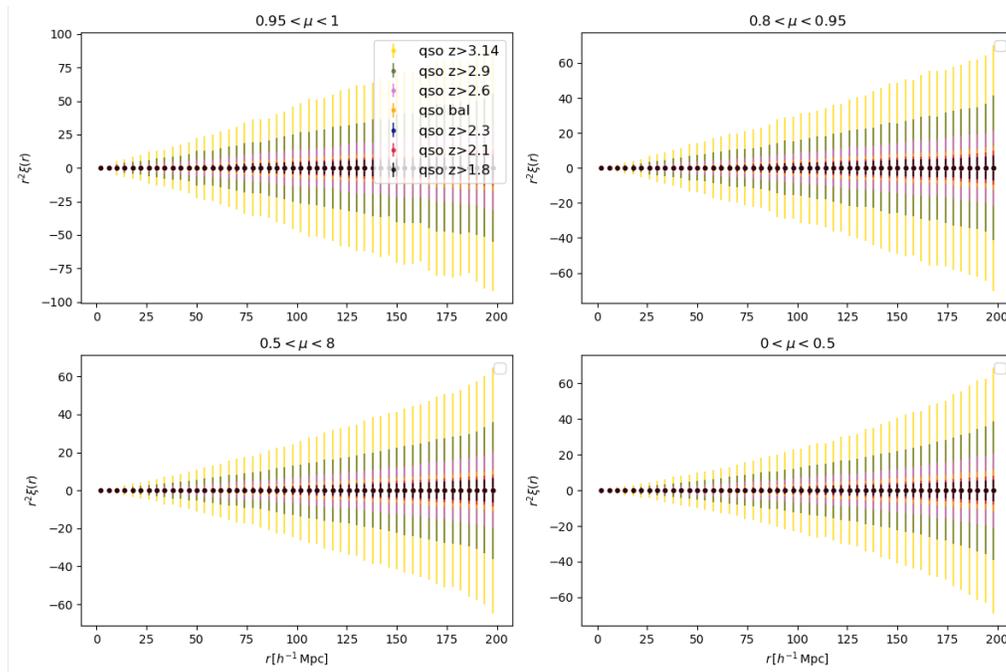


Figura 9. Barras de error en la función de cross-correlación

Medición del espectro de potencias 1D

Se realizó una gráfica en donde se pueden observar distintos espectros de potencias, esto para ser capaces de visualizar cómo el cambió en el redshift se refleja claramente los resultados.

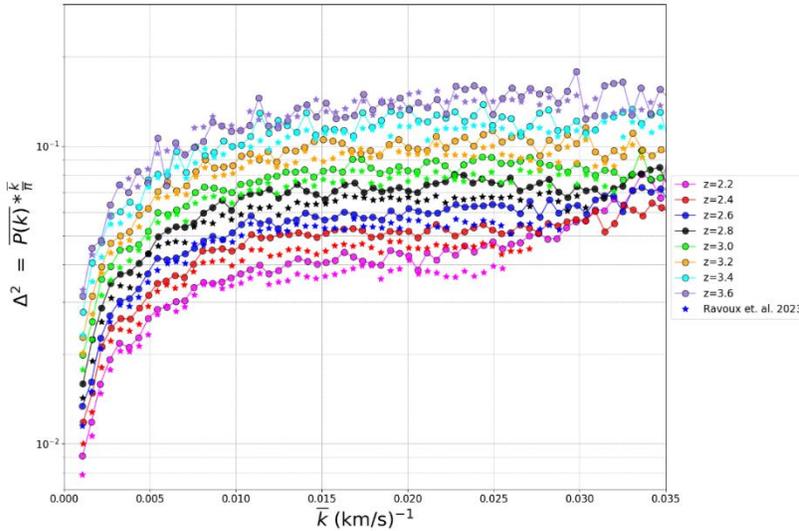


Figura 10. Gráfica

Posteriormente fueron añadidos cálculos con diferentes SNR (Signal-to-Noise Ratio), una relación alta es indicativo de que la señal es más fuerte en comparación con el ruido, en la gráfica es posible observar las ligeras diferencias entre los distintos valores seleccionados.

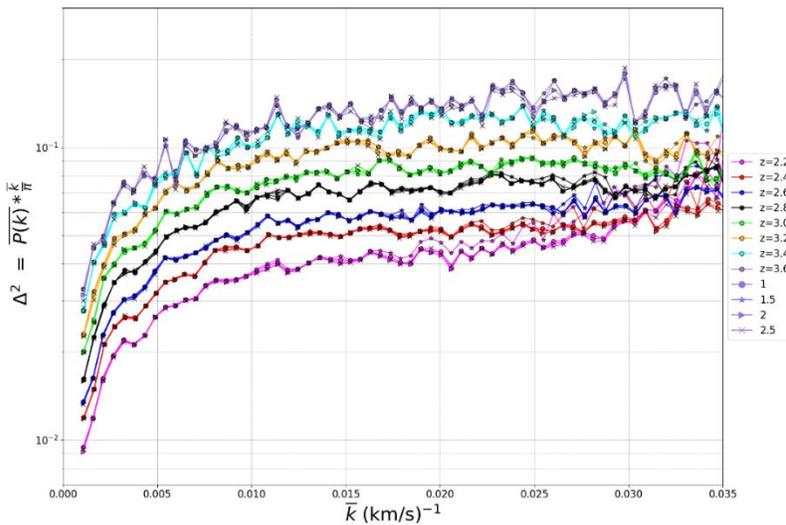


Figura 11. Gráfica

Conclusiones

Finalmente, aunque no son los únicos trazadores, los bosques de Lya son herramientas muy poderosas y valiosas al ser un fenómeno lo suficientemente recurrente debido a que se produce en el elemento más abundante del Universo, brindan información sustancial para poder calcular correlaciones y posteriormente obtener información tanto cosmológica de estructuras a gran escala como de los efectos de la energía oscura, además de las restricciones mencionadas. Se llegó hasta las mediciones, pero no a las interpretaciones puesto que no estaba en los objetivos, dado que se requiere mayor observación y análisis.

Por tanto, no se realizaron conclusiones sobre el tipo de estructuras que producen las observables de las funciones de correlaciones, aunque se realizó un primer acercamiento analizando las gráficas que muestran la existencia de regiones de mayor densidad de materia, específicamente la *Ilustración 5* donde se muestran las correspondientes a la auto correlación, en las que se ve más fácilmente dichas regiones alrededor de los $100 h^{-1} Mpc$. Esta medición nos da un acercamiento a la medida de la escala de BAO, la detección y el estudio de su pico proporciona información acerca de la expansión del Universo y la distribución de materia durante este evento.

Es importante enfatizar que para un resultado más concluyente sería necesario trabajar con mayor cantidad de espectros de cuásares, como los que se obtendrán en las siguientes etapas de DESI.

La diferencia de analizar una base de datos mayor se observa en la *Ilustración 10* que muestra una gráfica de comparación de nuestros espectros de potencias 1D con los espectros de potencias del artículo "The Dark Energy Spectroscopic Instrument: One-dimensional power spectrum from first Lyman- α forest samples with Fast Fourier Transform" (Ravoux, C. *et al.*, 2023) en el que se realizó el análisis con más datos, así como en la ilustración 10 que demuestra la diferencia de las barras de error para cada análisis con diferente cantidad de espectros.

Agradecimientos

Se agradece al laboratorio de datos UG (<http://fisica.ugto.mx/~datalab/>) y al Departamento de Física de la División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato por permitir realizar los cálculos para este proyecto en el servidor de cómputo COUGHS2.

Bibliografía/Referencias

- Croft, R. A. C., Weinberg, D. H., Katz, N., & Hernquist, L. (1997). *The power spectrum of the Lyman-alpha Forest*. *The Astrophysical Journal*, 488(2), 532-551.
- De Grasse Tyson, N. (2017). *Astrophysics for people in a hurry*.
- Eisenstein, D.J. & Hu, W. (1998). *Baryonic Feature in the Matter Transfer Function* *the Astrophysical Journal*, 496(2), 605-614.
- Karaçaylı, N. G., Martini, P., Guy, J., Ravoux, C., Karim, M. L. A., Armengaud, E., ... & Zhou, Z. (2023). *Optimal 1D Lya Forest Power Spectrum Estimation--III. DESI early data*. *arXiv preprint arXiv:2306.06316*.
- Levi, M. E., Allen, L. E., Raichoor, A., Baltay, C., BenZvi, S., Beutler, F., ... & Zu, Y. (2019). *The dark energy spectroscopic instrument (DESI)*. *arXiv preprint arXiv:1907.10688*.
- Liddle, A. (2015). *An introduction to Modern Cosmology*. John Wiley & Sons.
- Ravoux, C., Karim, M. L. A., Armengaud, E., Walther, M., Karaçaylı, N. G., Martini, P., ... & Zhou, Z. (2023). *The Dark Energy Spectroscopic Instrument: One-dimensional power spectrum from first Lyman-alpha Forest samples with Fast Fourier Transform*. *arXiv preprint arXiv:2306.06311*.