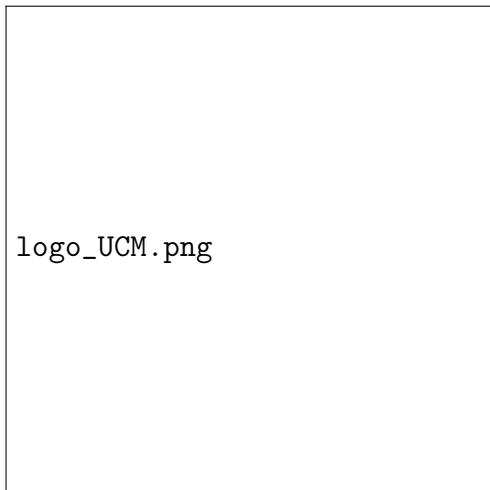


UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



PRÁCTICAS EN EMPRESA

Análisis estadístico de las anisotropías del fondo cósmico de microondas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Yago Ascasibar Sequeiros/Jesús Gallego Maestro

Álvaro Méndez Rodríguez de Tembleque

Grado en Física

Curso académico 20[24-25]

Convocatoria Ordinaria

Índice

1. Introducción	1
2. Descripción de la práctica	1
2.1. Importancia de las prácticas	2
3. Objetivo de la práctica	2
3.1. Objetivos principales	2
3.2. Tareas asignadas	2
3.3. Adaptación a la modalidad no presencial	4
4. Breve descripción de la entidad	4
5. Metodología, resultados y conclusiones	5
5.1. Metodología	5
5.2. Resultados	5
5.3. Conclusiones	8
6. Experiencia como resultado de la asignatura	8
7. Competencias adquiridas	8
7.1. Competencias no curriculares	8
7.2. Competencias propias del grado en física	9

1. Introducción

Mis prácticas se han realizado en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), en el departamento de física teórica, concretamente en el área de la cosmología.

El proceso para encontrar mis prácticas fue un poco complicado, ya que tras hablar con varios centros de investigación y o bien no tener respuesta o bien no tener plazas disponibles, finalmente escribi a un grupo de investigación en la UAM en donde me dijeron que no tenían plazas disponibles, pero que si quería podía hablar con el que finalmente fue mi tutor de prácticas, el Dr. Yago Ascasibar Sequeiros. Tras hablar con él, tanto por correo como de forma presencial, para discutir cual de los temas que el me propuso me interesaba más, decidimos el tema de mis prácticas.

Y pese a que parecía que ya había conseguido y el proceso de búsqueda había terminado, no fue así. El siguiente problema que me encontré fue que el tema resultó muy complicado dada la duración de las prácticas, por lo que nos volvimos a reunir para discutir cual sería un tema factible en el que pudiera trabajar.

Finalmente decidimos que el tema de mis prácticas sería "*El estudio de la función de fondo cósmico de microondas (CMB)*". Aún así, me faltaba una barrera más por superar, la firma del convenio de prácticas. Todo lo contado anteriormente ocurrió durante el mes de octubre, y el convenio de prácticas no se firmó hasta el mes de diciembre (antes de las vacaciones), y no se me comunicó hasta finales de enero, lo que supuso que durante esos meses no estaba seguro de si iba a poder realizar las prácticas que tanto me había costado encontrar.

Todo esto me llevo a iniciar mis prácticas el 17 de febrero de 2025, concluyendo el 10 de abril de

2025. Por lo tanto, lo que se va a comentar durante las siguientes páginas es sobre todo aquello que he aprendido y vivido durante mi estancia en la UAM.

2. Descripción de la práctica

Mis prácticas consistieron en realizar un estudio, desde otra perspectiva, sobre algunas tensiones que se han descrito durante los últimos años en relación con los datos de Planck y el modelo cosmológico *Flat Lambda Cold Dark Matter (F-ΛCDM)* (Ver (Abdalla et al. 2022) para una revisión sobre los problemas del CMB). Concretamente mis prácticas consistieron en estudiar estas discrepancias desde el punto de vista de la función de correlación angular.

A continuación unas breves definiciones de los conceptos que se han utilizado durante mis prácticas:

Definition 2.1 (Espectro de potencias). El espectro de potencias es una herramienta fundamental en cosmología, ya que permite describir la distribución de la energía en el universo a diferentes escalas. En el caso del CMB, el espectro de potencias se utiliza para analizar las fluctuaciones de temperatura y polarización en el fondo cósmico de microondas. Este espectro se representa como una función de multipolo ℓ , que está relacionada con la escala angular en el cielo. En términos simples, el espectro de potencias nos dice cuánta energía hay en diferentes escalas angulares del cielo.

Definition 2.2 (Función de correlación angular). La función de correlación angular describe la correlación entre dos puntos en el cielo, en función de su separación angular. En este caso, al aplicarlo al espectro de potencias del CMB, se obtiene como de correlacionada esta la temperatura de un punto con respecto a otro separado una cierta distancia angular, es decir, indica la relación entre las fluctuaciones de temperatura en el CMB a diferentes escalas angulares.

Definition 2.3 (Cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC)). Las cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) son algoritmos que generan muestras de distribuciones de probabilidad complejas mediante un proceso de pasos aleatorios, donde cada nuevo estado depende solo del anterior. En cosmología, se utilizan para estimar parámetros del modelo cosmológico, como la densidad de materia o la constante de Hubble, ajustando modelos teóricos a datos observacionales como el fondo cósmico de microondas. Este enfoque permite explorar eficientemente espacios de parámetros de alta dimensión y obtener estimaciones precisas con intervalos de confianza, siendo fundamental en la estadística bayesiana aplicada a la cosmología.

Para llevar a cabo este estudio fue necesario realizar una serie de simulaciones, entre ellas se encuentran simulaciones de los parámetros cosmológicos empleando MCMCs, dado el coste computacional de estas simulaciones, se tomaron directamente los resultados disponibles en (Planck Collaboration 2015) cuya naturaleza se describe en (Aghanim et al. 2020).

2.1. Importancia de las prácticas

La importancia de las prácticas, en cuanto a su contenido científico, reside en el estudio de las discrepancias que presenta el modelo cosmológico estandar desde un objeto, la función de correlación angular, el cual no ha sido muy estudiado en la literatura, y en caso de serlo el objetivo de esos estudios era el de encontrar explicaciones a porque no ajusta bien a los datos y encontrar formas de corregirlo. En este caso, el objetivo es el de estudiar la función de correlación angular y ver si presenta alguna discrepancia con respecto a los datos obtenidos por el satélite Planck, indicando a si nuevas tensiones con el modelo estandar.

3. Objetivo de la práctica

3.1. Objetivos principales

Las prácticas tenían un objetivo principal, el de realizar un estudio de la función de correlación angular y analizar si presenta alguna discrepancia con respecto a los datos obtenidos por el satélite Planck. Esto se debe a que las prácticas no estaban determinadas por una serie de acciones a realizar, si no que había que informarse del estado actual de la literatura acerca de este tema y encontrar una forma de evaluar la discrepancia entre los datos obtenidos por el satélite Planck y el modelo cosmológico standar.

3.2. Tareas asignadas

Dado que el objetivo de mis prácticas era muy amplio y trabajaba de forma autónoma (se desarrollará más en esta idea más adelante), realicé numerosas tareas, aunque no todas ellas resultaron útiles para el desarrollo de mis prácticas. A continuación se enumeran las tareas que realicé durante mis prácticas (se omiten aquellas tareas que se comentarán en la sección de resultados):

1. **Lectura de artículos:** Al igual que es evidente, también es importante. Durante mis prácticas busqué, leí y analicé una gran cantidad de artículos relacionados con el tema de mis prácticas. A medida que comentaba mis descubrimientos con mi tutor se formaba en mi un pensamiento crítico acerca de lo que leía.
2. **Lectura de mapas:** Al inicio del todo intente realizar el mismo análisis que otros artículos, esto me llevó a leer los mapas de Planck, e intentar obtener mis propios espectros de potencias haciendo uso de la librería *healpy* (Zonca et al. 2019; Górski et al. 2005). Al final decidí usar los resultados de Planck directamente, pero me sirvió para comprender la física detrás de mis cálculos.
3. **Simulaciones de MCMC:** Antes de utilizar los resultados de la colaboración Planck, intente realizar mis propias simulaciones, para ello utilicé la librería *Cobaya* (Torrado y Lewis 2021), tras varios intentos decidí usar directamente los resultados.
4. **Simulaciones con CAMB:** Dado que el objetivo era simular universos diferentes, decidí utilizar la librería *CAMB* (Lewis et al. 2000; Lewis s.f.), que permite simular diferentes universos y obtener el espectro de potencias y la función de correlación angular. Con esta librería hice los cálculos que se pueden ver en la figura 2.
5. **Estudio del espacio de parámetros:** Muchos de las tensiones que se discuten, se encuentran relacionadas con los valores de los parámetros cosmológicos que ofrece Planck. Para ello, utilicé la librería *GetDist* (Lewis 2019). Esto me permitió ver las distribuciones de los parámetros cosmológicos. Finalmente, no encontré como relacionarlos con el objeto de estudio, por lo que opté por ir en otra dirección.
6. **Estadístico $S_{1/2}$:** Pese a ser un estadístico que se ha estudiado en la literatura, su cálculo me tuvo varios días inmerso en él. Este estadístico ha sufrido varias variaciones a lo largo de los años y en mi caso lo he empleado para cuantizar las discrepancias en diferentes rangos de ángulos, en

vez de usar la forma clásica. Se define como:

$$S_a^b = \int_a^b C(\theta)^2 \sin(\theta) d\theta = \int_a^b \left[\sum_l \frac{2l+1}{2l(l+1)} D_l P_l(\cos(\theta)) \right]^2 d\cos(\theta) \quad (1)$$

$$= \sum_n \sum_m \frac{2n+1}{2n(n+1)} D_n \underbrace{\frac{2m+1}{2m(m+1)} D_m \int_a^b P_n(\cos(\theta)) P_m(\cos(\theta)) d\cos(\theta)}_{T_{nm}} \quad (2)$$

El término T_{mn} fue la parte que más me costó sacar; esto fue porque en la literatura no se detalla el cálculo explícito. Conseguí sacar un cálculo analítico para esta integral el cual es reutilizable ya que solo depende del multipolo más alto, es decir, una vez calculado para un cierto valor de ℓ no es necesario volver a calcular esa integral si se quiere obtener el resultado hasta ese multipolo o uno menor. Este término lo obtuve usando ciertas relaciones de los polinomios de Legendre (Carlitz 1961) permitiéndome escribirla de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} T_{mn} &= \int_a^b P_n(\cos(\theta)) P_m(\cos(\theta)) d\cos(\theta) \quad (3) \\ &= \frac{A_r \cdot A_{m-r} \cdot A_{n-r}}{A_{m+n-r}(2m+2n-2r+1)} [(P_{m+n-2r+1}(b) - P_{m+n-2r-1}(b)) - (P_{m+n-2r+1}(a) - P_{m+n-2r-1}(a))] \\ \text{con } A_r &= \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (r-1)}{r!} \end{aligned}$$

7. Estadístico $\langle \bar{\xi} \rangle$: Este estadístico es el que he definido durante mis prácticas, y se interpreta como un valor medio de la función de correlación angular en un rango de ángulos. Esta es una nueva forma de caracterizar la función de correlación angular. Se define como:

$$\langle \bar{\xi} \rangle_a^b = \frac{\int_a^b C(\theta) \sin(\theta) d\theta}{\cos(b) - \cos(a)} = \int_a^b \sum_l \frac{2l+1}{2l(l+1)} D_l P_l(\cos(\theta)) d\cos(\theta) = \quad (4)$$

$$= \sum_l \frac{2l+1}{2l(l+1)} D_l \int_a^b P_l(\cos(\theta)) d\cos(\theta) = \sum_l \frac{D_l}{2l(l+1)} [P_{l+1}(\cos(\theta)) - P_{l-1}(\cos(\theta))]_a^b \quad (5)$$

3.3. Adaptación a la modalidad no presencial

El horario durante mis prácticas ha sido bastante libre, el convenio establecía una jornada semipresencial de 4 horas al día 5 días a la semana. Dado el horario de mi tutor yo me adapté a él, y acudía a la universidad los lunes, jueves y viernes. Los martes y miércoles solían ser en remoto. Aunque como he mencionado antes, si era necesario acudir a la universidad para tener una reunión no había ningún problema por ninguna de las partes, al igual que si mi tutor no veía necesaria mi presencia en la universidad podía quedarme en casa trabajando.

Un factor importante acerca de la modalidad presencial fueron los compañeros de despacho que tuve la oportunidad de conocer durante mis prácticas. Afortunadamente, a mediados de mis prácticas unos investigadores doctorales ocuparon las mesas vacías del despacho permitiéndome así poder realmente disfrutar de un ambiente de investigación.

Gracias a eso pude ver como otros investigadores trabajan, pude informarme de otras áreas de investigación y experimentar lo que es tener “compañeros de trabajo”.

La modalidad no presencial de las prácticas ha sido fundamental para compaginar las prácticas con mis

estudios, no por que hubiera ningún solapamiento; si no porque me permitía evitarme el desplazamiento y poder estudiar más aquellos días que me encontraba más apurado.

4. Breve descripción de la entidad

La Universidad Autónoma de Madrid (UAM) es una institución pública destacada por su excelencia investigadora. Cuenta con más de 300 grupos de investigación y 12 centros especializados, integrando a más de 2.300 investigadores con dedicación exclusiva. Además, la UAM es una de las (pocas) universidades públicas de la comunidad de Madrid que posee un programa en física.

La universidad Autónoma de Madrid se encuentra en la localidad de Colmenar Viejo.

En la siguiente infografía puede observarse, no solo el número de empleados aproximados, que es de 4.413, si no también un resumen de su actividad, tanto docente como investigadora, si no también otra información sobre esta institución.



Figura 1: Infografía sobre la actividad, resultados y recursos institucionales de la universidad Autónoma de Madrid (Madrid 2024)

5. Metodología, resultados y conclusiones

5.1. Metodología

En mis prácticas prevaleció el trabajo autónomo, esto me permitió realmente aprender a cerca del tema y desarrollar el pensamiento crítico. Aunque tenía reuniones con mi tutor, varias a la semana

generalmente, la idea era que yo fuera capaz de obtener mis propias conclusiones y discutirlas con él. El papel de mi tutor era el de guiarme y ayudarme a encontrar la información necesaria para poder realizar mis prácticas, pero no el de darme la información ya hecha.

Esto me permitió realizar todas las tareas ya mencionadas de las cuales aprendí muchísimos conceptos, tanto de cosmología como de estadística. Además, me permitió aprender sin miedo a equivocarme, ya que si me metía en un tema que era demasiado complicado o que no era el adecuado, mi tutor me ayudaba a encontrar otro camino.

5.2. Resultados

Los resultados que he obtenido durante mis prácticas pueden resumirse en los siguientes 4 gráficos¹:

- **Gráfico 1:** En estas gráficas podemos observar los datos junto con su error, así como la desviación de un modelo cosmológico. Se puede apreciar que las simulaciones MCMC (Markov Chain Monte Carlo) son bastante estables produciendo una desviación muy pequeña (especialmente en la función de correlación), haciendo que pequeñas variaciones de los parámetros cosmológicos no afecten a la forma funcional que predice la teoría.

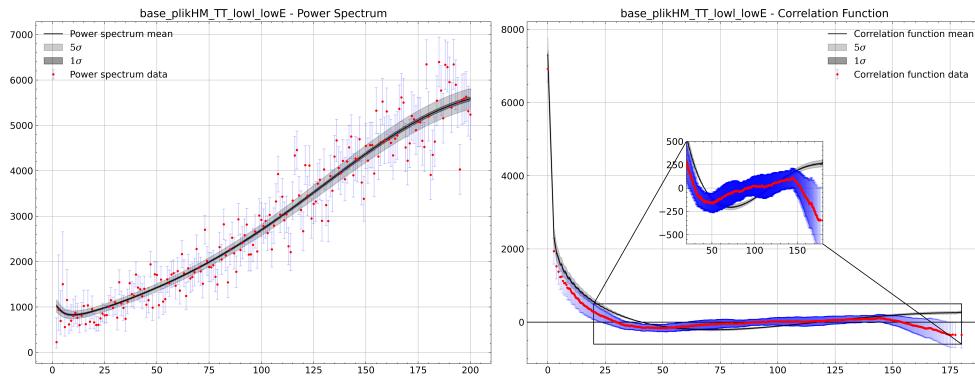


Figura 2: Gráfico de la dispersión de las simulaciones del espectro de potencias y de la función de correlación angular.

- **Gráfico 2:** En estas gráficas podemos ver como se comporta el estadístico más estudiado en la literatura de la función de correlación. Como se puede ver presenta errores mu grandes, lo que hace que no se pueda establecer una discrepancia significativa con el modelo cosmológico standar.

¹Tanto estas gráficas como los códigos que he realizado durante el periodo de prácticas pueden verse aquí

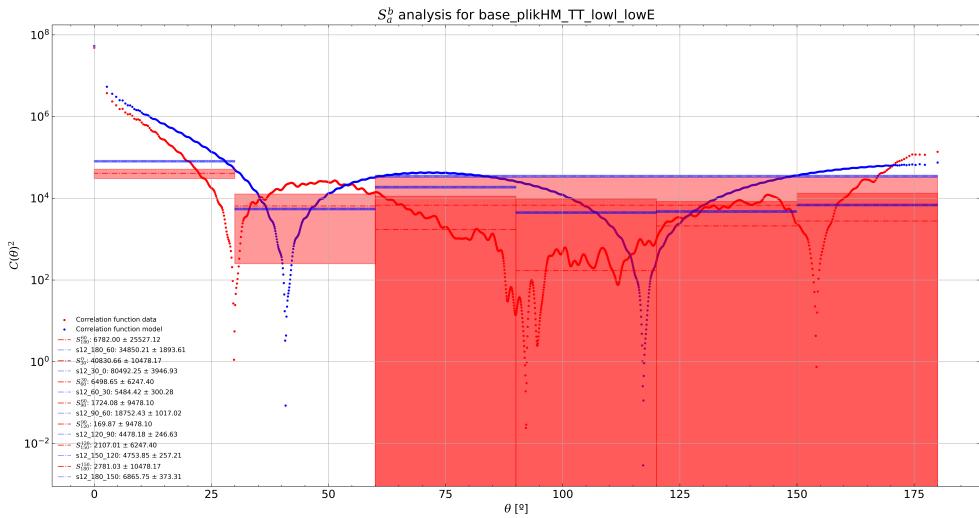


Figura 3: Gráfico del estadístico introducido por WMAP (Spergel et al. 2003).

- **Gráfico 3:** Este gráfico muestra el estadístico definido durante mis prácticas, el cual se interpreta como un valor medio de la función de correlación para un cierto rango de ángulos.

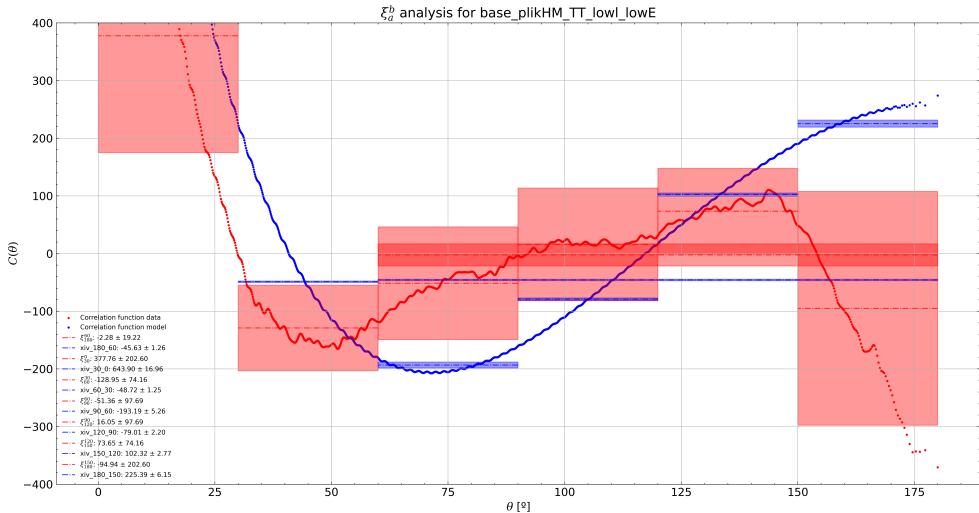


Figura 4: Gráfico del estadístico definido durante mis prácticas.

- **Gráfico 4:** En este histograma se puede ver de forma resumida los estadísticos definidos durante mis prácticas y su discrepancia con el modelo cosmológico estandar. Se puede observar que aunque en algunos tramos si aparece una cierta tensión, en líneas generales la discrepancia no es significativa.

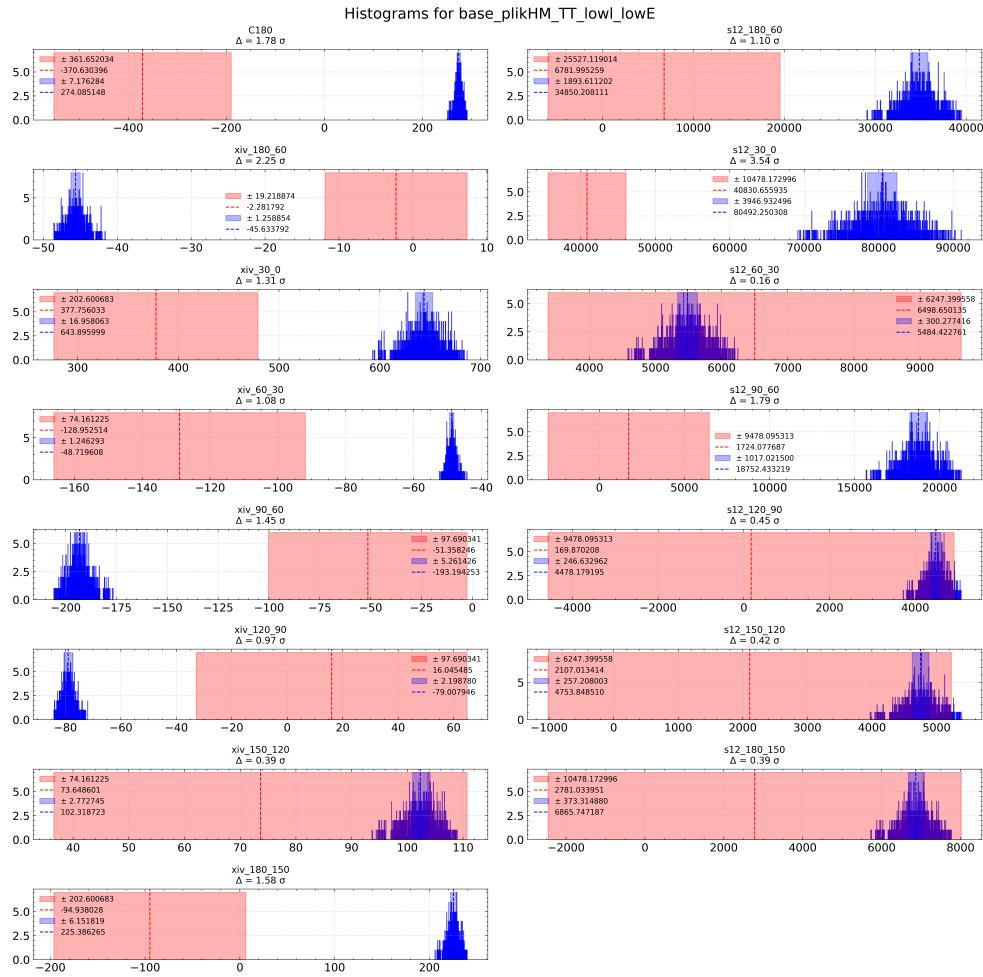


Figura 5: Histograma de los estadísticos definidos durante las prácticas y su discrepancias con el modelo.

5.3. Conclusiones

Las conclusiones acerca del trabajo que he tenido tiempo de realizar durante mis prácticas son las siguientes:

1. Pese a haber encontrado cierta discrepancia, especialmente con el modelo $F - \Lambda CDM$, no es posible establecer una discrepancia significativa que permita afirmar que haya una nueva tensión con el modelo cosmológico estandar.
2. Pese a que si hay literatura que estudia la función de correlación, no hay mucho a cerca de que implica que los datos no se ajusten bien y se centran más en intentar corregir la función de correlación para que se ajuste mejor a los datos, o bien en intentar encontrar una explicación a porque no se ajusta bien.

6. Experiencia como resultado de la asignatura

Las experiencias que he tenido durante mis prácticas han sido muy enriquecedoras tanto a nivel personal como profesional. He podido ver como se trabaja en un departamento de investigación, como se discuten ideas y como se desarrollan nuevos conceptos. Esencialmente por esto opté por estas prácticas, quería experimentar de primera mano una salida profesional sobre la que se nos habla durante la carrera, pero sobre la que realmente uno no tiene mucha idea de lo que es realmente.

Durante la carrera se nos habla continuamente sobre los experimentos que llevaron a la aparición de nueva

física, o sobre un marco teórico que parece caído del cielo, sin embargo, es complicado experimentar lo que es realmente la investigación. En este caso, he tenido la oportunidad de ver como se investiga, he podido ver como se desarrollan ideas nuevas, como se discuten y, lo más complicado, dejar a tiempo las ideas que no funcionan y tanto tiempo han costado de desarrollar.

He podido experimentar todo el proceso que hay detrás de cada artículo, cada figura, cada tabla. Pese a que en muchas ocasiones intentaba reproducir los resultados de otros artículos con el fin de tener una forma de obtener resultados propios y poder analizarlos, me he dado cuenta de que no es tan sencillo como parece. Realizar un cálculo, programarlo y luego volver a empezar de nuevo porque no se obtiene el resultado esperado y tener que encontrar el fallo era una tarea que tenía que afrontar todos los días. Y aunque en muchas ocasiones me frustraba, al final era muy satisfactorio ver que había conseguido realizar un cálculo que no sabía si iba a ser capaz de realizar.

7. Competencias adquiridas

7.1. Competencias no curriculares

Las competencias no curriculares se encuentran relacionadas con lo que es la investigación en sí, y no tanto en contenidos específicos. A continuación se enumeran las competencias no curriculares que he adquirido durante mis prácticas:

1. **Trabajo autónomo:** He tenido que trabajar de forma autónoma, fortaleciendo el pensamiento crítico y la capacidad de análisis. A medida que iba leyendo artículos.
2. **Cosmología:** He profundizado más en la cosmología del universo primitivo, y como diferentes experimentos han ido aportando información sobre el mismo.
3. **Trabajo en equipo:** A medida que iba leyendo artículos encontraba otros autores que habían trabajado en un tema parecido, y en una ocasión me puse en contacto con uno de ellos para pedirles los resultados de su trabajo (Forconi y Di Valentino 2025), concretamente las cadenas de Markov. El motivo fue ampliar los datos para eliminar sesgos y así contar con los datos de unos autores que cuestionan el valor de los parámetros cosmológicos derivados por Planck.

Aunque podría seguir con una lista de competencias no curriculares, la verdad es que no se como expresar el increíble impacto que han tenido estas prácticas en mi formación. Siento que todo lo que he aprendido y vivido durante este periodo ha sido una experiencia increíble, y que me ha permitido crecer tanto a nivel personal como profesional.

No solo el trabajar con mi tutor, que ha sido una experiencia increíble, si no también aprender como se hacen, y como no se hacen las cosas. Siento que mi formación no habría estado completa si no hubiera tenido la oportunidad de realizar estas prácticas, y que me han permitido ver lo que es realmente la investigación.

7.2. Competencias propias del grado en física

Aunque muchos de los conocimientos que he adquirido durante años de carrera han sido de vital importancia, los más relevantes para el desarrollo de mis prácticas han sido aquellos obtenidos a base de leer artículos específicos sobre el tema de mis prácticas.

Los conocimientos adquiridos durante la carrera que han sido más relevantes para el desarrollo de mis prácticas han sido los siguientes:

1. **Programación en Python (Física Computacional 3^{er} Curso):** He tenido que programar en Python para poder realizar los cálculos necesarios para el desarrollo de mis prácticas.

Esto ha sido de vital importancia, ya que me habría sido imposible realizar estas prácticas sin unos conocimientos previos de programación. He tenido que programar tanto para realizar los cálculos necesarios para el desarrollo de mis prácticas, como para poder realizar los gráficos que se han presentado en la sección anterior. Y para poder realizar esos gráficos he realizado otros muchos que no han sido útiles, pero si no hubiera podido tomar tantos caminos equivocados no habría podido llegar a aquellos que si lo han sido.

2. **Estadística (Estadística):** He tenido que realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos en la práctica.

Durante la carrera los conocimientos de estadísticas los he ido obteniendo de forma muy dispersa, ya que no he cursado la asignatura de estadística, esencialmente a través de los laboratorios de física, donde he tenido que realizar análisis estadísticos de los datos obtenidos en los experimentos. Aunque no han sido determinantes para el desarrollo de mis prácticas, si que han sido de gran ayuda a la hora de realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos en la práctica.

3. **Cosmología (Cosmología 4^{to} Curso):** He tenido que leer, interpretar y entender una gran cantidad de artículos científicos relacionados con esta asignatura.

Aunque no ha resultado de vital importancia, ya que la he cursado a medida que relaizaba mis prácticas, si que ha facilitado la lectura de artículos y la comprensión de los conceptos gracias a que ya los había visto en clase. No han sido indispensables, ya que mis prácticas son muy específicas y en un tema que no se ve de forma extensa en la carrera, pero sin esta asignatura me habría costado mucho más entender los conceptos, tener un pensamiento crítico acerca de lo que leía y poder discutirlo con mi tutor.

Referencias

- Abdalla, E. et al. (2022). “Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies”. En: *Journal of High Energy Astrophysics* 34, págs. 49-211.
- Aghanim, N. et al. (sep. de 2020). “Planck2018 results: V. CMB power spectra and likelihoods”. En: *Astronomy and Astrophysics* 641, A5.
- Carlitz, L. (1961). “Some integrals containing products of Legendre polynomials”. En: *Archiv der Mathematik* 12.1, págs. 334-340.
- Forconi, M. y E. Di Valentino (mayo de 2025). “One extension to explain them all, one scale-invariant spectrum to test them all, and in one model bind them”. En: *Physics of the Dark Universe* 48, pág. 101904.
- Górski, K. M. et al. (abr. de 2005). “HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere”. En: 622, págs. 759-771.
- Lewis, A. (s.f.). *CAMB: Code for Anisotropies in the Microwave Background*. <https://github.com/cmbant/CAMB>. Accessed: 2025-02-26.
- (2019). “GetDist: a Python package for analysing Monte Carlo samples”. En.

- Lewis, A., A. Challinor y A. Lasenby (2000). “Efficient computation of CMB anisotropies in closed FRW models”. En: *Astrophys. J.* 538, págs. 473-476.
- Madrid, U. A. de (2024). ‘UAM en Cifras 2022/2023’, la Universidad Autónoma de Madrid en 168 páginas.
- Planck Collaboration (2015). *Planck Legacy Archive*. <https://pla.esac.esa.int/>. Accedido el 25 de febrero de 2025.
- Spergel, D. N. et al. (sep. de 2003). “First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters”. En: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148.1, 175–194.
- Torrado, J. y A. Lewis (mayo de 2021). “Cobaya: code for Bayesian analysis of hierarchical physical models”. En: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2021.05, pág. 057.
- Zonca, A. et al. (mar. de 2019). “healpy: equal area pixelization and spherical harmonics transforms for data on the sphere in Python”. En: *Journal of Open Source Software* 4.35, pág. 1298.