



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
POSGRADO EN ASTROFÍSICA

ALPs: Candidatos a Materia Oscura ligera, Límites en los parámetros M y G,
mediante observaciones de fotones de la fuente J1907+63.

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:
ALVARO YOBAÍN PRATTS MARTÍNEZ

TUTOR
DR. JOSÉ RUBÉN ALFARO MOLINA
INSTITUTO DE FÍSICA .UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, ENERO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Con amor
a mi madre*

Agradecimientos

En la culminación de un escalón más en mi preparación académica y profesional es primordial el reconocer y agradecer a quienes han sido parte de esto. A todos los profesores que me han compartido sin envidia el conocimiento y experiencias que poseen. A todos mis amigos, compañeros y camaradas que han sido parte de esta aventura inigualable. A las personas que ya no están pero dejaron su huella imborrable. Por supuesto a mi asesor el Dr. Rubén Alfaro que me abrió las puertas y aceptó guiarme para la realización del presente trabajo así como a Sergio y a José Andrés que me ofreció su ayuda para la revisión del proyecto y me corrigió (bastantes) errores. También agradezco a Magda que fue la que me acercó por primera vez a este grupo de trabajo que se terminó convirtiendo en un espacio no solo de desarrollo profesional sino personal. A mi padre que siempre me inculcó el amor por el saber y la férrea lucha por el conocimiento. Mi hermana que siempre me ha apoyado a su manera y en general a mi familia con la que siempre he contado a mi lado.

Pero, sobre todo, gracias infinitas a mi madre que me ha dado todo aunque esto signifique quedarse sin nada y que sé que siempre podré contar con su apoyo total. Sin ella, nada de esto hubiera sido posible.

A todos y a cada uno les digo sinceramente: Gracias.

Índice general

Nomenclatura	XI
1. Introducción	1
1.1. La Astrofísica y Cosmología para entender el Universo	1
1.2. El Problema de los cúmulos	4
1.3. Vera Rubin y las curvas de rotación galáctica	6
1.4. Importancia de la materia oscura	9
2. Materia Oscura	11
2.1. Evidencias de la materia oscura	12
2.1.1. Curvas de rotación galáctica	12
2.1.2. Cúmulos galácticos.	14
2.1.3. Oscilación acústica de bariones.	16
2.2. Tipos de materia oscura: clasificación de los candidatos.	22
2.3. Algunos candidatos a materia oscura.	26
2.3.1. WIMPs	27
2.3.2. Fotones Oscuros.	30
2.3.3. ALPs	31

2.4. Métodos de detección de materia oscura.	32
2.4.1. Detección directa.	33
2.4.2. Detección indirecta.	34
2.4.2.1. Detección por aceleradores.	37
3. ALPs	39
3.1. Axión en QCD	40
3.2. Axion Like Particles	42
4. Observatorio HAWC	45
4.1. Sistema de detección	47
4.2. Obtención de datos	47
4.3. Reconstrucción de datos	48
4.3.1. Núcleo	48
4.3.2. Reconstrucción del ángulo	49
4.3.3. Identificación de cascada	50
4.4. Análisis de Datos	52
5. Análisis y resultados	55
5.1. Ventaja del estudio de fuentes galácticas	55
5.2. Fuente eHWC J1907+063	58
5.3. Consideraciones para el análisis	60
5.4. Posibles anomalías en el espectro de eHWC J1907+063	62
5.4.1. Obtención de la región de exclusión	66
6. Conclusiones y trabajo a futuro	71

ÍNDICE GENERAL

VII

A. Errores sistemáticos

73

Objetivo y Estructura Del Trabajo

El principal objetivo del presente trabajo es el estudio de anomalías en el espectro de emisión de fuentes astrofísicas que se podría percibir debido a conversiones de rayos gamma ultraenergéticos a candidatos ligeros a materia oscura, en este caso partículas tipo axiones (*ALPs* por sus siglas en inglés) . Dicho efecto se podría traducir en una aparente pérdida de fotones y por consiguiente una atenuación en el flujo que podría ser medida con detectores de rayos gamma a escalas de cientos de TeVs. Consecuentemente con lo anterior se espera poder poner límites de exclusión para dos parámetros de las ALPs como son su masa y la constante de acoplamiento.

Para presentar el trabajo realizado se decidió una estructura sencilla que consiste en 5 capítulos principales y un capítulo de conclusión los cuales abordan distintos temas.

El primer capítulo es una breve introducción histórica al problema de la materia oscura el cual consiste en la hipotética existencia de un tipo materia invisible distinta a la que es posible observar con los métodos tradicionales, así como la importancia y el porqué de la necesidad de resolver el problema para tener una pieza más que nos ayude a comprender la evolución del universo.

En el segundo capítulo se trata el tema de la componente de materia oscura,

desde las primeras evidencias hasta los tipos de búsqueda y algunos candidatos a materia oscura.

El tercer capítulo es una breve introducción al tema de las partículas tipo axión (ALP) en donde se empieza por mostrar el concepto *clásico* del axión y como se puede generalizar a ALP en teoría de cuerdas.

El cuarto capítulo es centra en describir el funcionamiento de HAWC, el observatorio de rayos gamma situado en Puebla, México y cuyos datos se usaron para poder realizar el presente trabajo.

El quinto capítulo está centrado en el análisis realizado para obtener una región de exclusión en los parámetros fundamentales de la masa y a constante de acoplamiento de las ALPs así como en la metodología para la obtención de los resultados.

El trabajo cierra con las conclusiones en el capítulo 6 así como consideraciones para un trabajo a futuro.

Se incluye también un anexo en cual se hace una revisión sobre los errores sistemáticos y cómo podrían ser abordados para poder tomar en cuenta el impacto en los resultados del trabajo.

Nomenclatura

- AGN Active galactic nuclei
- ALP Axion like particle
- ALPs Axion like particles
- BAO Baryon acoustic oscillation
- CDM Cold dark matter
- CMB Cosmic microwave background
- EBL Extragalactic background light
- GUTs Grand unified theories
- LLR Log Likelihood ratio
- PMT Photomultiplier tube
- PQ Peccei-Quinn
- QCD Quantum chromodynamics
- QED Quantum electrodynamics

SED Spectral energy distribution

SNR Super nova remanent

SUSY Supersymmetry

TeV Teraelectronvolt

WIMPs Weakly interactive massive particles

Capítulo 1

Introducción

“El mayor enemigo del conocimiento no es la ignorancia, es la ilusión del conocimiento”. -Stephen Hawking

1.1. La Astrofísica y Cosmología para entender el Universo

Si hay alguna cosa en común en todas las civilizaciones de las que se tiene registro es la imperante necesidad de ver hacia el cielo, la astronomía pues, es tan antigua como la historia del ser humano. El firmamento ha fascinado a la humanidad, la cual le ha dado un rol incluso divino en su afán de poder explicar el mundo que la rodea. El estudio de los astros le ha funcionado a la humanidad como un trazador de ciclos para determinar los periodos de recolección así como para prepararse para las condiciones inhóspitas del invierno.

En la antigüedad algunas civilizaciones como la China y la Maya lograron una comprensión tan grande de los cuerpos celestes que eran capaces de describir

con exactitud los periodos de la Luna y el Sol así como de las Pléyades e incluso lograron registrar los primeros eventos de Super Nova registrados en la historia. El estudio de los astros ha ido evolucionando a la par del ser humano, pasó de simples observaciones a simple vista a usar sofisticadas herramientas que llevan al límite las capacidades tecnológicas actuales [64].

Así como la forma de estudiar ha cambiado pasando de usar la simple vista a telescopios en el espacio, las explicaciones y el significado también han ido evolucionando y adaptándose a los paradigmas que han regido en distintas épocas. Pasamos pues, de explicar los eclipses como una señal divina a poder utilizar teorías físicas y matemáticas para poder predecir con exactitud cuándo y dónde ocurrirán dichos eclipses con una exactitud asombrosa, en palabras de Laplace “*La hipótesis de Dios no ha sido necesaria*”¹ [16].

Uno de los grandes pasos en la historia de la Astronomía es el poder aplicar las teorías desarrolladas en la Física a los cuerpos celestes, convirtiéndose así en Astrofísica ². Dentro de la historia Occidental quizá el origen del uso de leyes físicas aplicadas al estudio celeste fue el cálculo que hizo Kepler sobre las órbitas (basándose en observaciones empíricas). Sin embargo, el punto de inflexión fue la aportación de Newton con su monumental obra *Principia Mathematica* y su Ley de Gravitación Universal las cuales permitieron por primera vez partir de “primeros principios” para explicar el movimiento de los astros, como lo hiciera Halley para describir la periodicidad del famoso cometa que ahora lleva su nombre

¹Se dice que Napoleón cuestionó a Laplace sobre la ausencia de Dios para explicar el movimiento celeste en su célebre libro *Tratado de Mecánica Celeste* a lo cual Laplace respondió con dicha frase.

²Aunque la Astronomía solía asociarse a la comprensión y descripción de los cuerpos celestes y la Astrofísica al uso de la física para explicar su origen, evolución y comportamiento, en la actualidad todos los astrónomos tienen una sólida formación física con lo cual los términos han pasado a usarse indistintamente.

1.1. LA ASTROFÍSICA Y COSMOLOGÍA PARA ENTENDER EL UNIVERSO 3

[74].

Así como las teorías físicas han ayudado en la comprensión y descripción de los astros éstos también han ayudado a reformular teorías físicas. En el siglo XIX existían científicos que llegaron a comentar que la física estaba completa, pues se tenía a la Mecánica Clásica desarrollada por Newton, Lagrange y Hamilton, la cual proporcionaba las bases para entender el movimiento de los cuerpos incluso los celestes. La Teoría Electromagnética que quedó resumida en el trabajo de Maxwell y que incluía a la óptica al ser la luz una onda electromagnética. También se contaba con la termodinámica y la Mecánica estadística desarrolladas por Kelvin, Carnot, Maxwell, Boltzmann, entre otros. Así pues, se tenía un marco casi completo para describir todo el mundo que nos rodeaba, incluso se llegó a mencionar que Lord Kelvin dijo la frase *“Ahora no queda nada nuevo que descubrir en la física. Todo lo que queda es la medición cada vez más precisa”*. Sin embargo a inicios del siglo XX el mundo de la física estaría por vivir dos revoluciones que obligarían a cambiar los paradigmas que se tenían en el momento [76].

Fue en la segunda mitad del siglo XIX cuando se empezaron a observar fenómenos que no podían ser descritos en el marco de las teorías de la época. Por una parte se tenían los efectos *micro* como el problema de la radiación de cuerpo negro y el efecto fotoeléctico y por otra parte los efectos *macro* como la precesión anómala de Mercurio. Los primeros fueron precursores para el desarrollo de la Mecánica Cuántica que cambiaría por completo el entendimiento del mundo microscópico, y el segundo para el desarrollo de la Relatividad General la cual revolucionaría por completo la Astrofísica y el entendimiento del universo en su conjunto [71].

De esta forma es como de la mano de la Relatividad General (y posteriormente se introduce la Mecánica Cuántica) el estudio de los Astros se extiende al universo

en su conjunto, describiendo su evolución, su composición, su posible origen y probables finales. A dichos estudios se les conoce como Cosmología.

Sin embargo, a pesar de que la Relatividad General y la Mecánica Cuántica son quizá las teorías más precisas creadas por el conocimiento humano y que nos han ayudado a entender el Universo desde lo más pequeño hasta lo más inmenso, no se debe caer en la arrogancia del siglo XIX y creer que todo está resuelto, puesto que hay muchos fenómenos que aún siguen sin una respuesta clara. Ejemplo de ello es el problema central del presente trabajo: La materia oscura.

1.2. El Problema de los cúmulos

Una de las grandes mentes del siglo XX que, injustamente, suele pasar desapercibida es el físico suizo Fritz Zwicky . Nacido en Bulgaria en el año 1898 de padres suizos, se interesó desde temprana edad en las matemáticas y la física. La mayor parte de su carrera y su obra se desarrolló en los Estados Unidos en el Instituto Tecnológico de California donde coincidió con otras grandes mentes de la época como Robert Milikan y Robert Oppenheimer.

A inicios de la década de los 30's, al estudiar las observaciones de Hubble en el cúmulo galáctico Coma, Zwicky notó un detalle que lo desconcertó por su peculiaridad. Zwicky sabía que la velocidad de las galaxias dentro del cúmulo depende de la masa total de éste debido a la atracción gravitacional entre las galaxias, con lo cual, haciendo

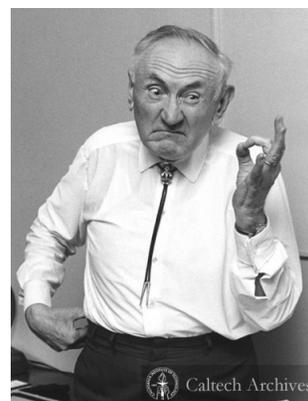


Figura 1.1: Fritz Zwicky (1898-1974).

uso del teorema del virial podría encontrar la masa total del cúmulo. La sorpresa de Zwicky llegó al calcular la masa del cúmulo mediante la luminosidad la cual encontró que era al menos 10 veces menor que la calculada mediante el teorema del virial. En su genialidad, Zwicky postuló que debía existir una gran cantidad de materia que no podía observarse y que no era parte de la masa estelar del cúmulo, a esta materia invisible la denominó *dunkle Materie* que significa materia oscura, convirtiéndose así en el acuñador del término. Publicó sus resultados en 1934 sin obtener gran respuesta dentro de los círculos de astrofísicos de la época, sin embargo esto no detuvo a Zwicky y en el año de 1937 publicó otro trabajo sobre cómo investigar esta materia invisible. Apoyándose en las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein, Zwicky sugirió que si una galaxia masiva se encuentra en nuestra línea de visión de una galaxia aún más distante, la galaxia masiva actuaría como lente gravitacional, lo cual podría magnificar, distorsionar o incluso multiplicar la imagen de la galaxia lejana, con lo cual el efecto del lente gravitacional podría usarse para *pesar* las galaxias masivas. Sin embargo una vez más dicha idea fue tomada con poco interés y no se tomó realmente en serio sino hasta 1979 (5 años después de la muerte de Zwicky) cuando se descubrió la primera de muchas lentes gravitacionales.

Otra de las grandes aportaciones de Zwicky dentro de la astrofísica se da en el campo de los rayos cósmicos que tanto fascinó a Zwicky. Hasta la década de los 30's no existía un candidato plausible para la producción de rayos cósmicos tan energéticos, pero todo cambió cuando Zwicky postuló que el origen de los rayos cósmicos era nada más y nada menos que el resultado de una explosión gigantesca producida por una estrella masiva al momento de morir, a la cual se le acuñó el término *Super nova* para distinguirla de las novae mucho menos poderosas y ya

conocidas en ese entonces. Sin embargo, la idea de la Super Nova no terminaba en postular la explosión como fuente de rayos cósmicos, sino que, también postuló que al producirse tal evento, lo único que quedaría de la estrella masiva original sería un núcleo super compacto de neutrones que sería el resultado del colapso gravitacional de protones y electrones de la estrella, a este objeto compacto se le llamó estrella de neutrones. Aunque la idea de la Super Nova fue generalmente aceptada, había un gran escepticismo sobre la idea de una estrella de neutrones, ya que apenas el año anterior había sido descubierto el neutrón en un laboratorio y no fue sino hasta décadas después que pudo comprobarse la existencia de dichas estrellas de neutrones [35].

Aunque las ideas de Zwicky fueron tomadas con poca seriedad en sus inicios debido a sus planteamientos revolucionarios para la época, las observaciones posteriores le dieron la razón demostrando que sus ideas fueron adelantadas a su tiempo y que, décadas después, se convertirían en parte importante de la astrofísica moderna.

1.3. Vera Rubin y las curvas de rotación galáctica

Dentro de la ciencia existen personajes que quedan grabados junto a una idea, un concepto, o una teoría de tal forma que al mencionarlos, dicho concepto o idea se nos viene a la mente; por ejemplo : Darwin -evolución , Einstein-Relatividad , Shrödinger - Cuántica. De esta misma forma no se puede hablar de materia oscura sin mencionar a Vera Rubin. Nacida en el año de 1928 en los Estados Unidos, Vera mostró interés temprano en la astronomía y a pesar de las dudas de su padre sobre las oportunidades de una carrera en astronomía éste siempre la apoyó ayudándole a construir su primer telescopio casero y llevándola a reuniones de

aficionados a la astronomía. Vera estudió en un prestigioso colegio para mujeres en Vassar, siendo la única con especialidad en astronomía de su generación y tras graduarse intentó entrar a la Universidad de Princeton siendo rechazada debido a que Princeton no aceptaba mujeres, práctica que perduró hasta 1975. Sin embargo, pese al machismo aberrante de la época, no cesó en conseguir su sueño de ser astrónoma y aplicó a la Universidad de Cornell, donde pudo obtener su grado de Física tomando clases con profesores de la talla de Richard Feynman y Hans Beathe, tras lo cual aplicó a la Universidad de Georgetown donde obtuvo su Ph.D. en 1954.



Figura 1.2: Vera Rubin (1928-2016)

Tras pasar algunos años impartiendo clases en Georgetown Vera obtuvo una plaza de investigadora en el Instituto Carnegie el cual tenía un modesto plan en astronomía en donde su trabajo se enfocó en estudiar la dinámica de las galaxias mediante el uso de espectrómetros. Fue a partir del estudio de la luz proveniente de diferentes regiones galácticas donde Vera notó algo extraordinario. Al calcular las velocidades de las estrellas exteriores se dio cuenta que se movían más rápido de lo que la teoría indicaba, ya que , conforme uno se mueve hacia las regiones exteriores de la galaxia las estrellas tendrían que tener una velocidad menor que las regiones más próximas al centro, cosa que no ocurría en los cálculos hechos por Vera los cuales indicaban que la velocidad no disminuía conforme uno se alejaba del centro . Vera se dio cuenta que para que las estrellas en las regiones exteriores pudieran mantener una alta velocidad tendría que existir mucha más materia de la que se

podía observar, es decir, un tipo de *materia invisible* que a partir de su influencia gravitacional contribuía a las velocidades de las estrellas de regiones alejadas al centro (ver Figura 1.3). Fue entonces cuando Vera recordó algo que vio en sus años de estudiante acerca de materia no vista descrita décadas atrás por Fritz Zwicky. Vera supo entonces que aquel trabajo de décadas atrás estaba en lo correcto, había mucha más masa que la que se puede observar [26].

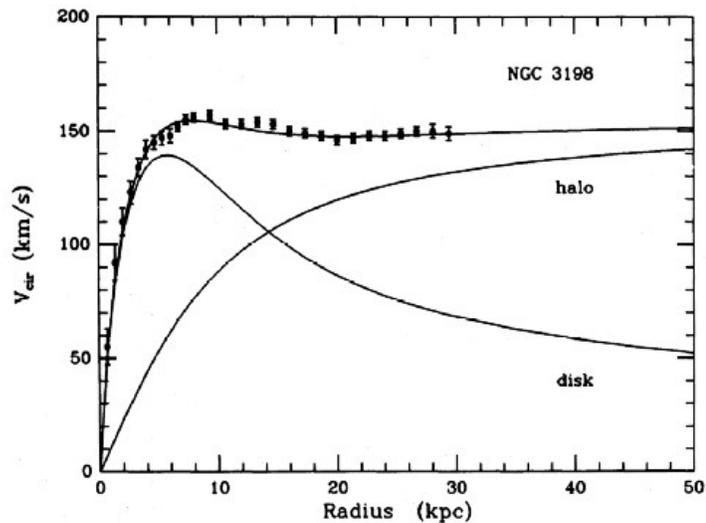


Figura 1.3: Curva de rotación de NGC3198 donde se muestra cual sería la distribución del halo de materia oscura que provocaría que la velocidad de las estrellas en las regiones exteriores se mantuviera constante.

Aunque al inicio el trabajo de Vera fue tomado con mucho escepticismo, el trabajo realizado por Vera era tan sólido que pronto obtuvo el reconocimiento de la mayoría de los científicos. Así fue como, casi 40 años después de ser descrita por primera vez, Vera encontró la evidencia más fuerte hasta ese momento de la existencia de materia oscura.

1.4. Importancia de la materia oscura

Pese a que los primeros trabajos acerca de materia oscura enfrentaron resistencias y dificultades; Fritz Zwicky enfrentando sus teorías revolucionarias para su época o Vera Rubin luchando contra el machismo de la época por el cual muchos no la tomaban en serio por el hecho de ser mujer, la evidencia científica ha sido tan fuerte que no queda lugar a dudas de que hay algo que es imposible ver con los instrumentos construidos hasta ahora, y que supone una componente muy importante para el universo.

La importancia de la materia oscura va mucho más allá de ser una simple curiosidad o discrepancia en los cálculos de la masa a gran escala del universo sino que se ha demostrado que si solo tomamos la materia que podemos observar, es imposible describir la evolución del universo hasta su estado actual. Como se mostrará más adelante, existen simulaciones de N-Cuerpos que han demostrado que la estructura a gran escala del universo (plasmada en catálogos como el Sloan) es casi imposible de explicar si no se recurre a la materia oscura. Más aún, se ha postulado que las galaxias *nacen* en cúmulos de materia oscura por lo que sin ésta, no podríamos tener siquiera estructura galáctica, Inclusive el mejor modelo cosmológico es el llamado modelo Λ CDM, donde Λ está relacionada con otro gran misterio de la física como lo es la energía oscura y CDM corresponde a la parte de materia oscura. Así pues existen varios puntos en los cuáles la componente de materia oscura resulta de suma importancia como por ejemplo:

- Cúmulos galácticos
- Curvas de rotación
- Anisotropías del CMB

- Estructura a gran escala del universo
- Lentes gravitacionales
- Estabilidad galáctica

El poder comprender la naturaleza de la materia oscura nos permitirá vislumbrar posibles respuestas acerca del *cómo* el universo ha ido adquiriendo la forma que podemos observar y quizá, qué camino tomará en su continua evolución.

Capítulo 2

Materia Oscura

La historia del estudio acerca de la materia oscura es sin duda fascinante por el hecho de que a pesar de llevar cerca de 90 años de ser descrita por primera vez, sigue siendo un completo misterio la naturaleza de la misma, llevando a la comunidad científica al desarrollo de numerosas técnicas experimentales para obtener más respuestas sobre sus propiedades. En el presente capítulo se presentan evidencias a distintas escalas del universo que dan soporte a la idea central de que hace falta masa más allá de la masa bariónica descrita por el modelo estándar; a escala galáctica se presentarán las curvas de rotación estudiadas por primera vez por Vera Rubin, a más grande escala el problema de los cúmulos descritos por Fritz Zwicky así como una parte cosmológica a través de las llamadas oscilaciones acústicas de bariones. Se describe también una clasificación de materia oscura así como algunos posibles candidatos que han surgido a través del tiempo. Así mismo se hablan de los posibles métodos experimentales para poder lograr su detección y para finalizar el capítulo se describe brevemente una alternativa que ha surgido a la materia oscura con sus posibles ventajas y desventajas y el por qué se cree que

la manera idónea de resolver las inconsistencias observacionales es precisamente la materia oscura.

2.1. Evidencias de la materia oscura

2.1.1. Curvas de rotación galáctica

Siguiendo el orden mencionado, se muestra una evidencia a escala galáctica de a existencia de materia oscura las cuáles son las llamadas curvas de rotación galácticas.

Una curva de rotación galáctica permite conocer el comportamiento de a velocidad radial de las estrellas dentro de la galaxia en función a la distancia al centro galáctico. Anteriormente se creía que las curvas de rotación galácticas tendrían que tener dos componentes principales; la componente más cercana al centro galáctico tendría que ser descrita con un comportamiento similar a un cuerpo rígido, esto debido a que en la parte central se tiene una gran concentración de estrellas y gas lo que permite hacer dicha aproximación a un cuerpo rígido y su velocidad tiene entonces una relación lineal con el radio, es decir, $V \propto R$. Una vez pasada la zona más densa del centro galáctico, se esperaría que la velocidad siguiera una tendencia *Kepleriana*, es decir, que la velocidad de las estrellas caiga conforme se aleja del centro de con una relación $V \propto R^{1/2}$, de la misma forma que en el sistema solar los planetas más alejados tienen una velocidad radial menor que los planetas cercanos (ver Fig 2.1).

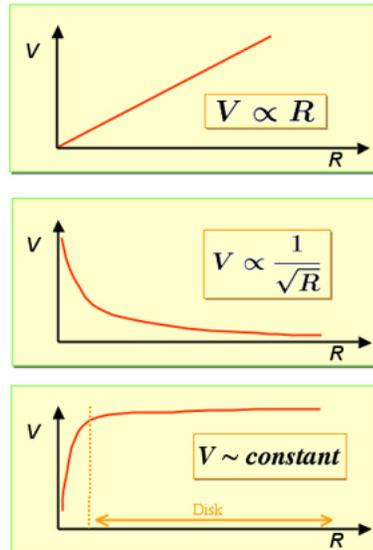


Figura 2.1: Velocidad vs Radio: cuerpo rígido (arriba), caída *Kepleriana*(en medio) y curva galáctica observada (abajo) .

Una vez medida la velocidad mediante alguna técnica como la observación de hidrógeno neutro, es posible encontrar la masa dentro un radio mediante la relación:

$$V^2 = \frac{GM}{R}, \quad (2.1)$$

en donde V es la velocidad a un radio R, M la masa contenida en R y G la constante de gravitación universal.

Sin embargo cuando se grafica la curva de rotación galáctica, la teoría queda lejos de los resultados observados ya que contrario a lo que se espera acerca de la caída *Kepleriana* que se debería observar, la curva de rotación permanece constante a lo largo del disco galáctico, por lo que al usar 2.1 con la velocidad de la parte exterior los cálculos dan como resultado una masa mucho mayor a la que se puede observar.

Estas curvas de rotación galáctica se han medido en numerosas galaxias espirales dando el mismo resultado: se necesita mucha más masa de la que se puede observar para explicar la no caída de velocidad a través del disco galáctico. Con lo cual, las curvas de rotación galáctica son una evidencia de que debe existir materia oscura en grandes proporciones que afecta gravitacionalmente el comportamiento galáctico ¹.

2.1.2. Cúmulos galácticos.

La evidencia anterior sugería que debía existir más materia en la galaxia a cual afecta gravitacionalmente a las estrellas impactando así en su velocidad radial respecto al centro galáctico. La siguiente evidencia en presentarse impacta a una escala mucho mayor, demostrando que este exceso de materia afecta no solo el movimiento de las estrellas dentro de las galaxias, sino el movimiento de las galaxias dentro de cúmulos galácticos. Dado que el tiempo que le toma a una galaxia recorrer el cúmulo es mucho menor que la edad del universo, podemos inferir que el cúmulo se encuentra en balance virial, por lo que es posible hacer uso del teorema del virial para obtener un cálculo de su masa.

El teorema nos indica que si tenemos un sistema en equilibrio (*virializado*) la relación entre su energía cinética y potencial está dada como:

$$T = -\frac{1}{2}U, \quad (2.2)$$

donde T es la energía cinética y U es la energía potencial.

¹Anque es cierto que existen teorías como MOND que sugieren no un exceso de materia sino una corrección a la ley gravitacional de Newton como se verá un poco en la parte final del capítulo.

La expresión para la energía potencial está dada como:

$$U = -\frac{GM^2}{R}, \quad (2.3)$$

con M la masa del cúmulo, G la constante de gravitación universal y R el radio del cúmulo.²

Dado que por técnicas de medición del redshift solo es posible obtener la componente paralela de la velocidad, suponemos que las velocidades están distribuidas isotrópicamente, con lo que tendremos que $\langle v^2 \rangle = 3\langle v_{\parallel}^2 \rangle$. Tomando lo anterior, la energía cinética se escribe entonces como:

$$T = \frac{3}{2}M\langle v_{\parallel}^2 \rangle. \quad (2.4)$$

Combinando 2.4 y 2.3 tenemos una expresión para la masa del cúmulo queda como:

$$M = \frac{3R\langle v_{\parallel}^2 \rangle}{G}. \quad (2.5)$$

Tomando los datos medidos para el cúmulo coma (Figura 2.2) obtenemos que :

$$M_{coma} \sim 10^{15}M_{\odot} \quad (2.6)$$

Tomando que la luminosidad total del cúmulo puede estimarse como $L_{tot} \sim 10^{13}L_{\odot}$, tendríamos una relación masa luminosidad para el clúster:

$$\frac{M_{coma}}{L_{tot}} \sim 100 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}. \quad (2.7)$$

²Suponemos simetría esférica

Si suponemos que la masa del cúmulo fueran solamente la contribución de las estrellas y gas de las galaxias, la relación masa-luminosidad del clúster tendría que ser del mismo orden que la relación solar, sin embargo 2.7 da aproximadamente 10 veces más de lo esperado, con lo que nos indica que hay mucha más masa de la que podemos observar.

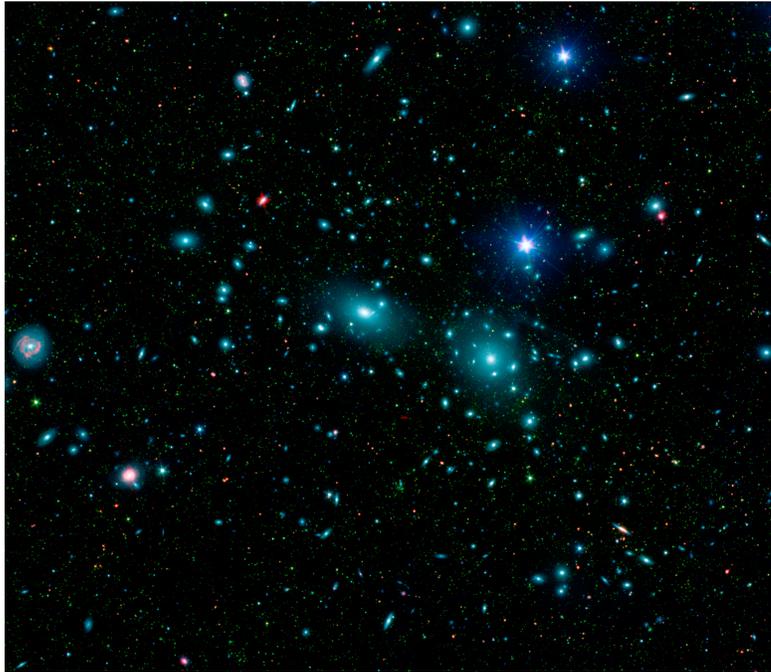


Figura 2.2: Cúmulo coma, imagen del telescopio Spitzer de la NASA .

2.1.3. Oscilación acústica de bariones.

Las evidencias presentadas anteriormente corresponden a escalas *locales*, ya sea el movimiento de estrellas en una galaxia, o el movimiento galáctico dentro de cúmulos. Sin embargo a una escala cosmológica se encuentra la siguiente evidencia que respalda la hipótesis de materia oscura la cual es la llamada oscilación

acústica de bariones (BAO por sus siglas en inglés). Durante el universo temprano la materia ordinaria (electrones y protones principalmente) y la radiación se encontraban acopladas y evolucionaban conjuntamente. Este plasma primordial era opaco debido a que la radiación no podía escapar del plasma por su interacción con los electrones libres manteniéndose confinada dentro de todo el plasma.

La materia tanto oscura como bariónica tiende a agruparse debido a gravedad, sin embargo, similarmente a como pasa en las estrellas cuando la materia bariónica empieza a colapsar se genera un gradiente de presión de radiación que contrarresta este efecto de colapso gravitacional *empujando hacia afuera* a la materia bariónica, haciendo que el gradiente de presión disminuya, por lo que de nueva cuenta la gravedad provocará que empiece a colapsar de nueva cuenta generando oscilaciones de materia bariónica, esto es a lo que llamamos oscilaciones acústicas de bariones. Sin embargo, dado que la materia oscura no se encuentra acoplada con la radiación no sufre este tipo de oscilaciones, por lo que puede generar zonas de mayor densidad provocando un pozo de potencial gravitacional en el cual la materia ordinaria tenderá a agruparse.

Dado que el universo se expandía también comenzó a enfriarse y al llegar al rededor de 3000K ocurrió la llamada época de recombinación, en la cual los protones y electrones empezaron a formar los primeros átomos de hidrógeno del universo. Como la cantidad de electrones libres disminuyó dado que pasaron a formar hidrógeno con los protones la radiación dejó de estar acoplada con la materia acabando con el plasma primordial, por lo que los fotones por fin pudieron escapar dejando una huella en todo el universo, la llamada radiación de fondo de microondas (CMB por sus siglas en inglés) . Sin embargo, debido a las oscilaciones acústicas no todos los fotones escaparon al mismo tiempo, dejando

una leve (pero medible) anisotropía en este fondo de microondas.

La anisotropía del CMB se puede estudiar entonces como una función sobre la esfera por lo cual podemos hacer uso de los armónicos esféricos $Y_{l,m}$, con lo cual:

$$\frac{T}{T_0}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{l,m} Y^{l,m}(\theta, \phi)$$

En este caso solo nos interesan los casos $l \geq 2$ ya que el caso $l = 0$ corresponde al caso monopolar y que el valor $l = 1$ está dominado por el efecto Doppler debido al movimiento del sistema solar respecto a la esfera en donde ocurre el desacople el cual no puede ser separado del dipolo cosmológico causado por las perturbaciones a gran escala.

Suponiendo que el modelo de las perturbaciones primordiales tienen una naturaleza gaussiana, tendríamos entonces que el valor promedio de los coeficientes $a_{l,m}$ es nulo. Sin embargo, dado que es de naturaleza azarosa el valor esperado del cuadrado de los coeficientes sólo dependen de los polos l , los cuales están relacionados con el tamaño angular del patrón de la anisotropía del CMB. Denotando C_l al cuadrado del valor esperado de los coeficientes, tenemos entonces que:

$$C_l = \langle |a_{l,m}|^2 \rangle = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{l,m}|^2$$

Así pues, toda la información estadística obtenida en los mapas de anisotropía de temperatura está contenida en el espectro angular de potencias determinado por los coeficientes C_l . En el espectro de potencias las oscilaciones quedan registradas en los polos l que cumplen que:

$$l = m \frac{\pi}{\theta_s} \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

donde θ_s es el ángulo generado en el cual observamos el horizonte de la última dispersión, en el tiempo del desacople. Este espectro de potencias nos sirve para constreñir parámetros en modelos cosmológicos puesto que está sumamente ligado a a cantidad de materia oscura que se esté suponiendo.

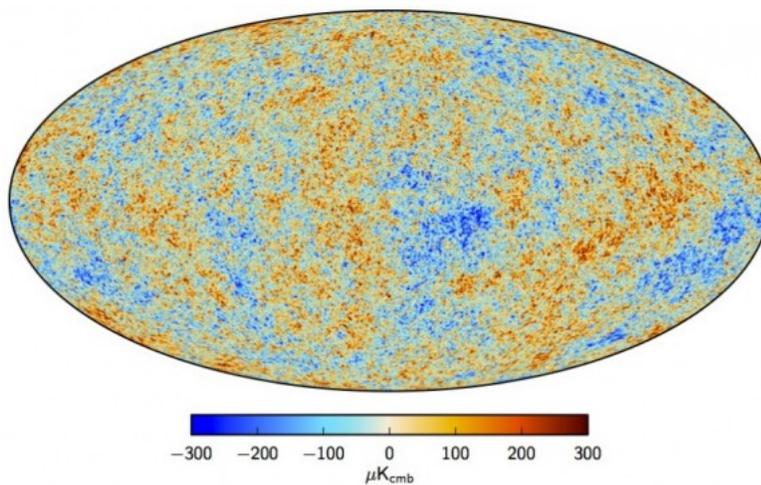


Figura 2.3: Anisotropía del fondo cósmico de microondas. Imagen del satélite Plack, 2013.

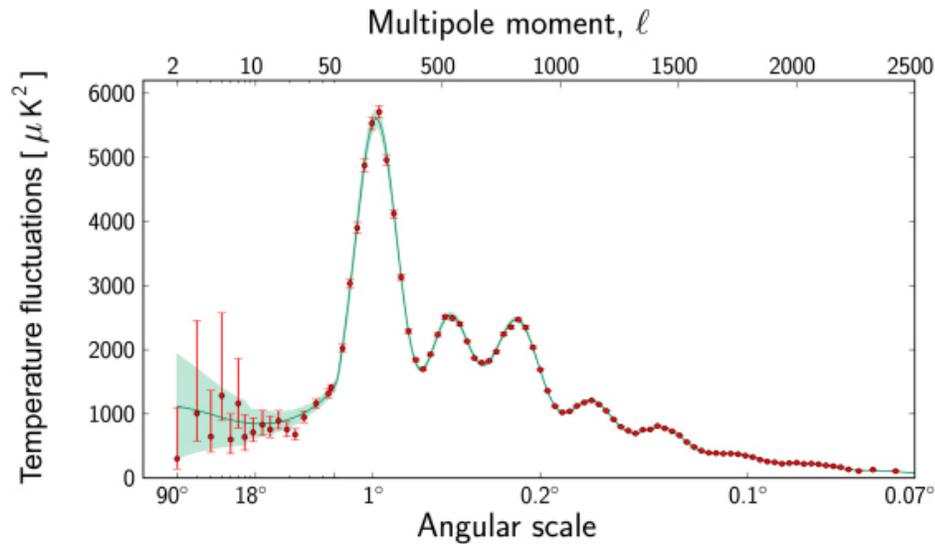


Figura 2.4: Espectro de potencia de las fluctuaciones de temperatura en el fondo cósmico de microondas. Crédito: ESA and Planck collaboration.

La anisotropía del CMB (fig 2.3) nos permite ver las pequeñas variaciones de temperatura ocurridas por las oscilaciones acústicas de bariones. La figura 2.4 a groso modo nos indica qué tan diferente es la temperatura entre dos puntos separados por una distancia angular, pudiendo observarse oscilaciones.

Esta oscilación acústica de bariones es una prueba muy fuerte de la existencia de materia oscura, ya que si no tomamos en cuenta la existencia de materia oscura, las oscilaciones serían más tenues debido a que habría menos potencial gravitacional, que se reflejaría en una fluctuación en 2.4 menos fuerte. De la misma forma, si hubiera mucho más materia oscura las oscilaciones serían mucho más fuertes, reflejando fluctuaciones más bruscas.

Otro resultado de las oscilaciones acústicas de bariones, y por tanto evidencia que respalda a la materia oscura, se puede ver en la distribución de galaxias en el

²Aunque es cierto que trabajos recientes en gravedad modificada (MOND) han propuesto otra

universo. Como la materia oscura no está acoplada a la radiación, en el universo temprano sí podía formar zonas con mayor densidad dado que no sufría ningún gradiente de presión que lo impidiera como en el caso de la materia bariónica. Como se mencionó, estas zonas más densas crearon un potencial gravitacional en el cual la materia bariónica se comenzó a agrupar y así al llegar la recombinación y detenerse las oscilaciones acústicas de bariones, estas ondas de materia empezaron a formar las primeras galaxias al rededor de las zonas más densas de materia oscura.

El tamaño de estas ondas esféricas de bariones está determinada por la velocidad del sonido en el plasma primordial de aproximadamente 170,000 Km/s. Tomando en cuenta el viaje de la onda de materia en el plasma, y la distancia modificada por la expansión del universo, se encuentra que el tamaño actual de dichas ondas esféricas es de aproximadamente 100 Mpc.

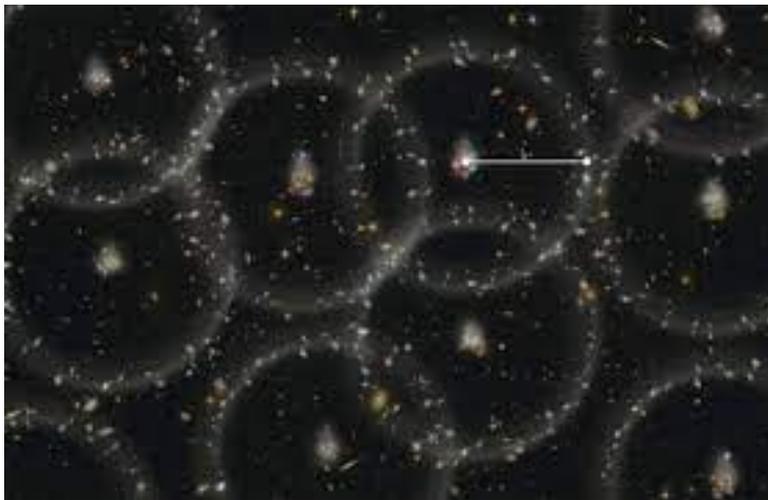


Figura 2.5: Ilustración producida por el proyecto BOSS que muestra las esferas de bariones alrededor de los grupos iniciales de materia oscura..

solución a las oscilaciones acústicas de bariones lo hacen introduciendo un campo escalar extra.

Las oscilaciones acústicas de bariones han mostrado ser una gran evidencia de la materia oscura puesto que las observaciones y estudio del CMB no se pueden explicar sin introducir la materia oscura.³

2.2. Tipos de materia oscura: clasificación de los candidatos.

Como se mencionó anteriormente, la naturaleza de la materia sigue siendo un misterio para la física, por lo cual numerosas teorías y candidatos han sido propuestos a lo largo de los años para resolver el problema, sin embargo, dado que no se ha logrado detectar directamente ninguno de ellos aún existe toda una gran variedad de candidatos propuestos para ser la materia oscura de nuestro universo.

A pesar de la inmensa cantidad de candidatos propuestos para materia oscura es posible hacer una clasificación tomando en cuenta 3 características principales de los candidatos: velocidad , masa, tipo de modelo o teoría que o predice.

³Aunque es cierto que teorías de gravedad modificada han intentado explicar las BAO sin hacer uso de materia oscura.

2.2. TIPOS DE MATERIA OSCURA: CLASIFICACIÓN DE LOS CANDIDATOS.23

Características de candidatos a materia oscura			
Velocidad		Masa	Tipo de modelo ⁴
Velocidades relativistas–HDM: Dark Matter	Hot	Candidatos pesados: Masas al rededor de GeVs hasta cientos de TeVs	Extensiones al modelo estándar
Velocidades pequeñas–CDM: Dark Matter	muy Cold	Candidatos ligeros: Masas desde eVs hasta escalas de 10^{-12} eVs	Sectores oscuros
Velocidades intermedias–WDM: Warm Dark Matter			Dimensiones extras

Tabla 2.1: Parámetros para clasificar candidatos a materia oscura.

Como ejemplo y usando el cuadro 2.1, se puede clasificar a un candidato como las WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles) las cuales serían CDM (materia oscura fría), masivos (desde GeVs hasta TeVs) y surgen de extensiones supersimétricas al modelo estándar de partículas.

Si hacemos solo una pequeña lista de los muchos candidatos propuestos hasta el momento se tiene la siguiente tabla:

⁴Se menciona solo una parte de los modelos existentes para materia oscura. También es posible ser más específicos sobre si es una extensión supersimétrica si está dentro de una teoría de cuerdas, si el sector oscuro tiene un grupo de simetría en especial, si tiene varios bosones de norma etc.

Lista de candidatos a materia oscura ⁵			
Candidato	Masa aproximada	Teoría	Tipo de Materia oscura
Axiones, ALPs, bosones de Goldstone	$10^{-22}eV - 10^5eV$	QCD, rompimiento PQ	CDM
Neutrino	$10eV - 100eV$	GUTs	HDM
Para-fotón	$20eV - 400eV$	QED	HDM
Fotones oscuros	$\leq 1MeV$	Sectores oscuros	CDM
WIMPs	$keVs - TeVs$	SUSY	CDM
Pyrgon, maximon, perry pole, newtorities	$10^{19}GeV$	Dimensiones extra	CDM
Quark nuggets	$10^{15}g$	QCD, GUTs	CDM
Agujeros negros primordiales	$10^{15-40}g$	Relatividad general	CDM

Tabla 2.2: Lista de algunos candidatos a materia oscura.

A pesar de no conocer la naturaleza de la materia oscura, gracias a modelos cosmológicos sabemos qué características básicas deberían cumplir, lo que nos da una forma extra de poder constreñir candidatos. Las simulaciones cosmológicas sobre la estructura a gran escala que mejor coinciden con los catálogos realizados de galaxias como por ejemplo Sloan 2dFGRS (ver Figura 2.6) indican que los

⁵Esta es solo una lista reducida de algunos de los candidatos más comunes de encontrar en la literatura, sin embargo existen muchos más candidatos que no alcanzaría una simple tabla para cocarlos a todos.

2.2. TIPOS DE MATERIA OSCURA: CLASIFICACIÓN DE LOS CANDIDATOS.25

candidatos más plausibles a explicar la estructura del universo son candidatos *fríos*, por encima de candidatos calientes o tibios (ver Figura 2.7). Es por esto que el modelo cosmológico más fuerte hasta el momento es el llamado modelo Λ CDM, con Λ constante cosmológica (relacionada con la energía oscura) y CDM por la materia oscura fría.

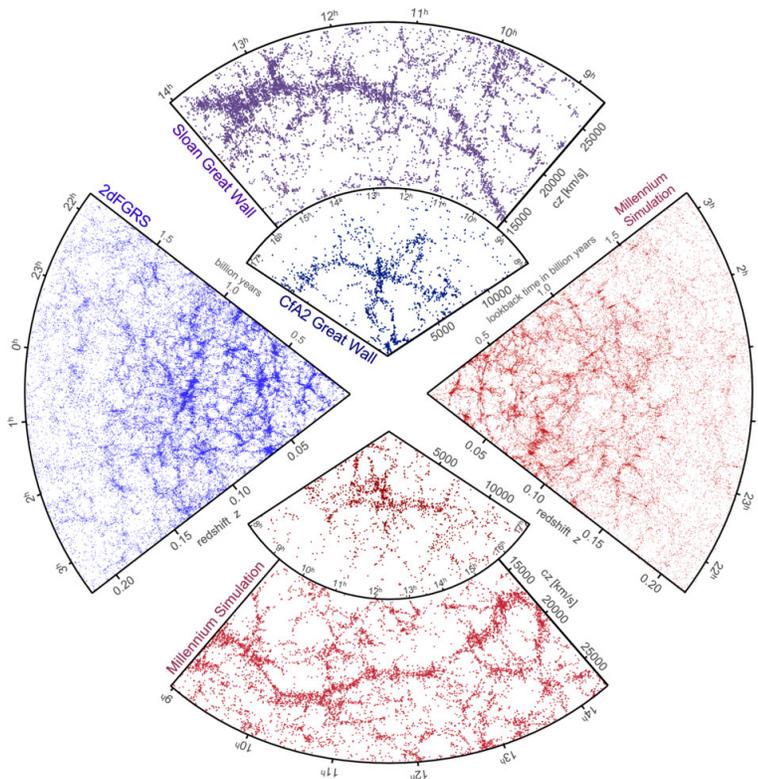
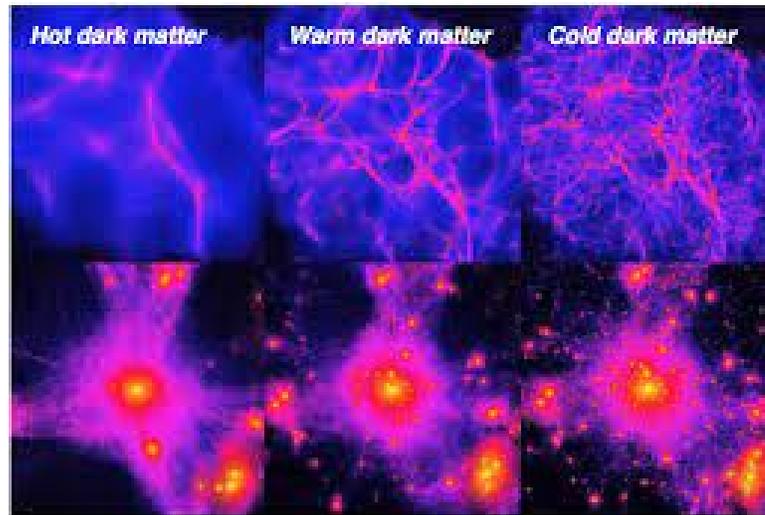


Figura 2.6: En rojo la simulación del milenio realizada a partir de considerar partículas de CDM y en azul los datos obtenidos por catálogos como Sloan y 2dFGRS. Se observa una gran similitud en la estructura filamentosa del universo.



Credit: Ben Moore <http://www.unbody.net>

Figura 2.7: Simulaciones de la estructura a gran escala del universo con materia oscura fría, tibia y caliente. Se puede ver fácilmente que la materia oscura fría reproduce de buena manera la estructura filamentosa observada en catálogos como el Sloan. Crédito: Ben Moore

2.3. Algunos candidatos a materia oscura.

Una vez hablado sobre las características en las cuáles podemos hacer una clasificación de posibles candidatos a materia oscura se introduce a continuación una breve descripción de algunos de los candidatos que se pueden encontrar en la literatura⁶.

⁶Se mencionan solo candidatos que cumplan con ser CDM dadas las evidencias que los erigen como los más plausibles.

Algunos candidatos		
Candidato	Masa	Tipo de modelo
WIMPs	$m \sim GeV - TeV$	Extensión supersimétrica al modelo estándar.
Fotones Oscuros	$m < eVs$	Sector oscuro.
ALPs	$m < eVs$	Teoría de cuerdas.

Tabla 2.3: candidates

2.3.1. WIMPs

Las WIMPs (Weakly interacting massive particles) son partículas hipotéticas que interactúan solo gravitacionalmente y probablemente con la interacción débil o alguna interacción fundamental desconocida la cual sería igual o más débil que la fuerza nuclear débil. El rango de masas posibles para las WIMPs van desde algunos GeVs hasta cientos de TeVs.⁷ Las WIMPs surgen en teorías más allá del modelo estándar, principalmente en extensiones supersimétricas del modelo estándar y también en teorías de dimensiones extra⁸ aunque las más populares son las WIMPs que surgen de SUSY⁹. Las WIMPs son, por mucho, el tipo candidato más estudiado de candidato a materia oscura debido a factores como lo son el surgir naturalmente de las teorías SUSY, ya que por mucho tiempo SUSY se consideró la forma más promisoría para lograr una extensión al modelo estándar.

La idea básica de SUSY consiste en proponer la existencia de una simetría

⁷Existe incluso algún candidato llamado WIMPZILLA que podría tener masas del orden de 10^{12} GeV, sin embargo no se considera propiamente un WIMP debido a su naturaleza no térmica.

⁸También llamadas teorías de Kaluza-Klein

⁹Abreviación más usual de supersymmetry

entre bosones y fermiones¹⁰. En SUSY cada partícula elemental tendría asociada una partícula *supercompañera* que en el caso de un bosón su supercompañera sería un fermión, y en el caso de un fermión su partícula supercompañera sería un bosón. Para los fermiones se suele denotar a la partícula supercompañera con una *s* al inicio, es decir, la supercompañera de un quark se denomina *squark*, la supercompañera del electrón sería un *selectrón*, partículas que al ser supercompañeras de un fermión serían bosones. Para el caso de los bosones sus supercompañeras suelen tener un sufijo *ino*, así pues la supercompañera de un higgs sería un *higgsino*, y en general la supercompañera de algún bosón gauge (bosón *w*, bosón *z*, gluón) se denomina *gaugino*¹¹.

Existen múltiples formas de generar un modelo SUSY, la más sencilla de todas es el conocido modelo estándar supersimétrico mínimo (MSSM por sus siglas en inglés), en el cual se encuentran el número mínimo de nuevas partículas e interacciones que sean consistentes con la fenomenología conocida en el modelo estándar. En el MSSM, la partícula más ligera supersimétrica estable (LSP por sus siglas en inglés) es el llamado neutralino, el cual se genera a partir de una mezcla entre binos, winos y higgsinos. El neutralino suele ser considerado el candidato natural dentro del MSSM a materia oscura y es una WIMP, ya que cumple con los requisitos de ser potencial CDM, es neutro, no interactúa con la fuerza fuerte además de tener masas del orden de GeVs hasta TeVs. En otras extensiones SUSY como NMSSM, USSM (Next to Minimal Supersymmetric Standard Model y U(1) extended Supersymmetric Standard Model) emergen otras posibles WIMPs que también podrían ser candidatos a materia oscura.

¹⁰Cabe aclarar que SUSY **no es una teoría** en sí misma, sino una propiedad de una teoría.

¹¹Es decir, los gauginos serían los *winos*, *zinos*, *gluinos* etc.

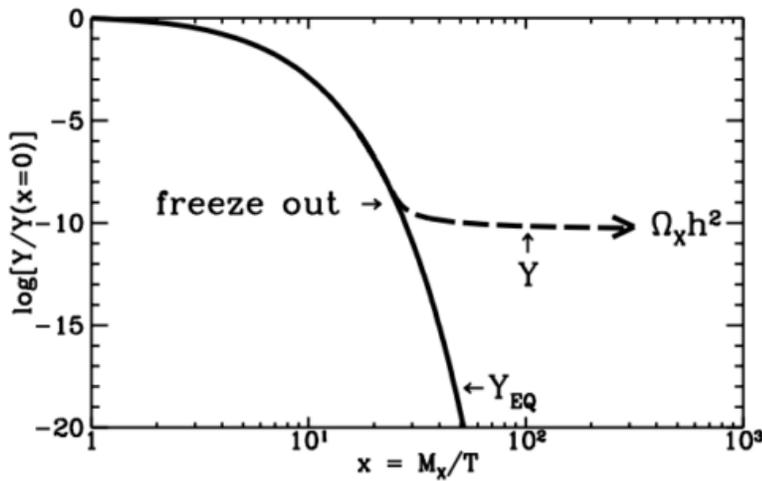


Figura 2.8: Diagrama de la historia térmica de las WIMPs, con $Y = n_x/s$ y con $s \propto T^3$, así la gráfica nos relaciona el número de partículas con la temperatura. Se observa como al disminuir la temperatura por debajo de la masa de la partícula (es decir, en $x > 1$) el número de partículas va disminuyendo gradualmente hasta llegar a un *freeze out* que *congela* el número de partículas dejando una densidad reliquia denotada como $\Omega_x h^2$.

Otra particularidad de las WIMPs es su naturaleza térmica que lleva a un fenómeno en especial que se conoce como el “milagro de las WIMPs”. Este fenómeno tendría lugar en el universo temprano en donde todas las partículas térmicas del universo (incluidas WIMPs) se encontraban en equilibrio termodinámico, es decir, con un mismo ratio de creación y aniquilación por lo que el número se mantendría estable. Sin embargo, el universo se seguía expandiendo provocando un enfriamiento, con lo cual al caer la temperatura por debajo de la masa de las WIMPs éstas dejarían de crearse y tendrían únicamente a aniquilarse hasta que no quedaran WIMPs. Sin embargo por la misma expansión del universo, la probabilidad de que WIMPs se encontraran para aniquilarse era cada vez menor, por lo que ocurre el llamado *freeze out*, que es el momento en el cual la tasa de

aniquilación se vuelve casi nula, dejando una llamada *densidad reliquia*, que son justamente las WIMPs que sobrevivieron a la aniquilación, dejando el número de partículas estable hasta nuestro tiempo (Ver Figura 2.8).

A pesar de lo plausible de la teoría de WIMPs, esta se ha comenzado a poner en duda entre otras razones porque en los aceleradores más energéticos como el LHC no se ha encontrado rastro alguno de supersimetría, lo que ha resultado en que otros modelos han empezado a ser más estudiados en la última década tales como Sectores Oscuros, ALPs y muchos más.

2.3.2. Fotones Oscuros.

Como se mencionó anteriormente, dado que aún no se han encontrado rastros de supersimetría, otras teorías se han empezado a estudiar con más detalle, entre las cuales resaltan las teorías de Sectores Oscuros¹² las cuales no buscan extender el modelo estándar de partículas, sino que proponen la existencia de un nuevo sector separado con posibles nuevas partículas e interacciones desconocidas (Ver Figura 2.9).

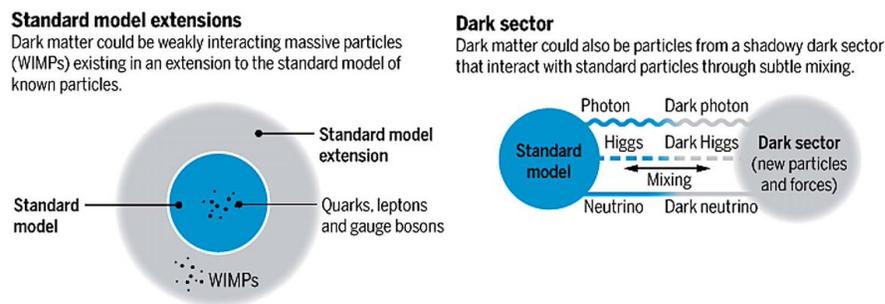


Figura 2.9: Diferencia entre una extensión al modelo estándar y un sector oscuro. Crédito: C. Bickel

¹²También llamados Sectores Ocultos

A pesar de estar de tener interacciones desconocidas, el sector oscuro podría estar conectado al modelo estándar a través de un *portal*. Un portal es un mecanismo por el cual una partícula mediadora del sector oscuro se puede acoplar con una partícula del modelo estándar. Un ejemplo de un portal es un acoplamiento entre el fotón del modelo estándar y el llamado fotón oscuro. Un fotón oscuro sería el bosón gauge de una interacción en el sector oscuro cuyo grupo de simetría sería $U(1)_D$ con la peculiaridad de poder tener masa (un esquema de un portal es la Figura 2.10).

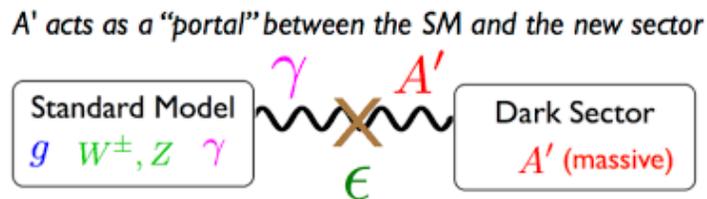


Figura 2.10: Esquema del portal entre el modelo estándar y el sector oscuro a través de un acoplamiento entre un fotón y un fotón oscuro denotado A' .

Hay casos en los que el fotón oscuro sería la única partícula con masa del sector oscuro, por lo que la materia oscura sería en su totalidad fotones oscuros masivos. Sin embargo cabe la posibilidad de que existan varias partículas masivas dentro del sector oscuro, por lo que la materia oscura sería toda una contribución de éstas ¹³.

2.3.3. ALPs

Regresando a teorías que buscan extender el modelo estándar en particular en la que es quizá la teoría más famosa de la física contemporánea, es decir teoría de

¹³partículas oscuras

cuerdas, surgen las llamadas partículas tipo axión (ALPs por sus siglas en inglés) las cuáles a diferencia de las WIMPs son partículas ligeras con masas menores a 1eV y cuya naturaleza podría no ser térmica. Las ALPs estarían acopladas con el electromagnetismo, por lo que en presencia de algún campo magnético éstas podrían sufrir una conversión a un fotón y viceversa (de manera similar a la oscilación de neutrinos). Dado las ALPs son la parte central del presente trabajo, su formalismo se presentará con mucho más detalle en el siguiente capítulo.

2.4. Métodos de detección de materia oscura.

Dada la gran cantidad de candidatos que existen para poder explicar la materia oscura se han propuesto métodos de búsqueda de materia oscura que recaen en algún evento o propiedad teórica de los candidatos que pueda servir para su detección. Dichas propiedades teóricas suelen referirse a cómo se pueden relacionar con partículas del modelo estándar dado que al fin y al cabo, nuestros detectores están contruidos con partículas del modelo estándar. Dependiendo de cómo se pueda detectar esta relación entre materia oscura y materia bariónica se pueden hablar de 3 grandes métodos de detección de materia oscura que pueden verse esquemáticamente en la figura 2.11: Directa, indirecta y por aceleradores.

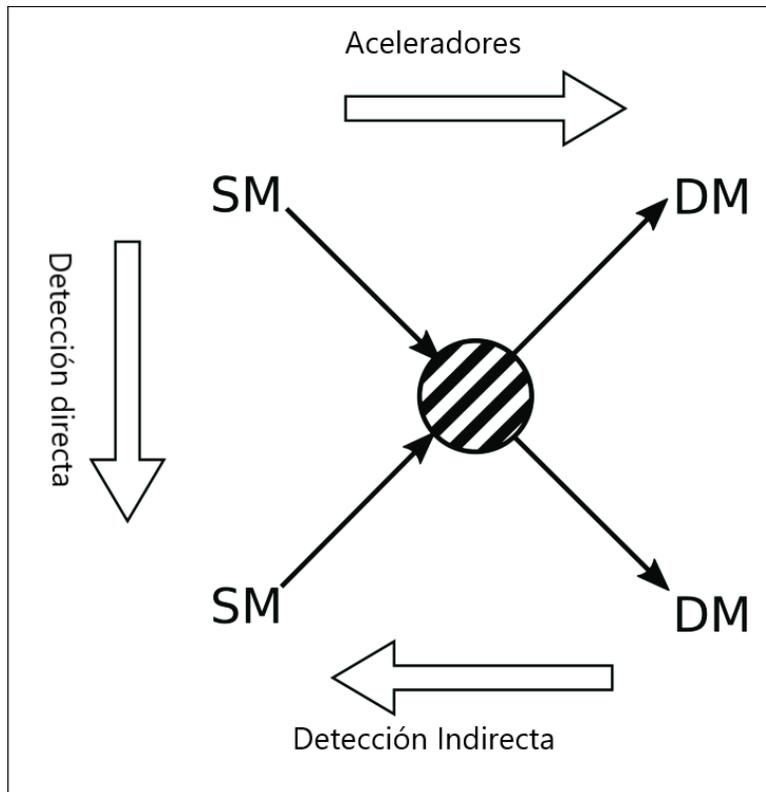


Figura 2.11: Esquema de los métodos de detección de materia oscura. Para la detección directa se tiene interacción de partículas de materia oscura con partículas del modelo estándar (de los detectores), en la detección indirecta tenemos que a partir de materia oscura podemos tener partículas del modelo estándar (por algún proceso como decaimiento o aniquilación) y en la detección por aceleradores a partir de partículas del modelo estándar podemos obtener partículas de materia oscura.

2.4.1. Detección directa.

En la detección directa se requiere, como su nombre lo indica, una interacción directa entre una partícula del modelo estándar (nuestros detectores) y una partícula de materia oscura. Este tipo de búsquedas se centran generalmente en poder medir

la energía de retroceso que podría tener algún núcleo atómico dada la interacción con un flujo de materia oscura. El principal problema de este método es la gran cantidad de ruido que existe como lo son rayos cósmicos que llegan todo el tiempo a la tierra, neutrinos, muones, decaimientos en el propio detector entre otros y que podría hacer imposible discernir de manera correcta la contribución del posible candidato a materia oscura. Es por esto que los detectores enfocados en la detección directa de materia oscura suelen ser colocados en lugares que cuenten la mayor protección contra este ruido por lo que se escogen lugares rodeados de rocas que puedan detener los rayos cósmicos y reducir significativamente el ruido. Dos de los más famosos experimentos enfocados en búsquedas directas son el experimento **PICO** [9] y el experimento **XENON100** [57]. La detección directa está enfocada principalmente en candidatos pesados debido a que la interacción con un candidato ligero sería casi imposible de poder detectar.

2.4.2. Detección indirecta.

La detección indirecta consiste en detectar algún subproducto de algún proceso que involucre materia oscura. En el esquema 2.11 se ve como en la detección indirecta se empieza con materia oscura y se termina con partículas del modelo estándar que son las que se medirán con el detector, por eso el nombre de detección indirecta, puesto que no es la interacción de materia oscura con algún detector, sino algún subproducto. Los mecanismos que lleven de materia oscura a partículas del modelo estándar son principalmente 3: aniquilación, decaimiento, y conversiones.

Los dos primeros procesos de la figura 2.12 se emplean principalmente en la búsqueda de WIMPs, ya que al ser masivas su aniquilación o decaimiento podría producir una cascada de partículas del modelo estándar entre las cuales podrían

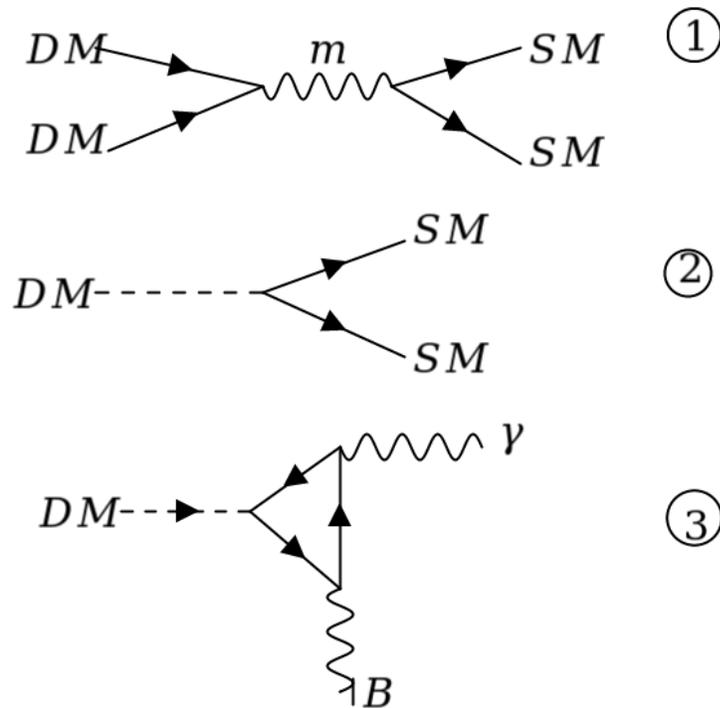


Figura 2.12: Algunos mecanismos aprovechados para detección indirecta de materia oscura. 1) Aniquilación a partículas del modelo estándar mediante un mediador m . 2) Decaimiento de materia oscura a partículas del modelo estándar. 3) Conversión de materia oscura a un fotón en presencia de un campo magnético B .

producirse fotones energéticos capaces de ser detectados en la tierra. Para que la búsqueda mediante estos dos canales sea viable, se necesita cumplir con dos requisitos indispensables: que exista una gran cantidad de materia oscura para aumentar la probabilidad de detectar alguna aniquilación o decaimiento, y que no exista casi ninguna actividad que produzca rayos energéticos ya que podrían contaminar la señal proveniente de una posible aniquilación o decaimiento. Dichas condiciones se pueden encontrar en las galaxias enanas esferoidales (dSph por su

abreviación en inglés), las cuales se especula que algunas tienen una gran cantidad de materia oscura, pero poca actividad estelar. Esta poca actividad se ve reflejada en la poca o nula emisión de fotones, particularmente a altas energías ($E > 1 \text{ TeV}$) por lo que se evita una posible contaminación ¹⁴. Si se llegara a detectar un flujo anormal de rayos gamma proveniente de alguna enana esferoidal este podría ser producto del decaimiento o aniquilación de materia oscura que tenga como subproducto rayos gamma. Actualmente hay varios observatorios de rayos gamma que se pueden usar para la búsqueda indirecta como lo son **HESS, MAGIC, MILAGRO, HAWC, LHASSO** y en un futuro se sumará **CTA** [12] [7] [5].

El tercer proceso de la figura 2.12 se emplea principalmente para la búsqueda de candidatos ligeros, ya que por conservación de energía sería casi imposible generar partículas del modelo estándar o fotones energéticos a partir de aniquilación o decaimiento. En este proceso se busca aprovechar la particularidad del acoplamiento entre materia oscura y fotones, ya que en condiciones ideales de energía y campo magnético, los fotones podrían convertirse en materia oscura generando así una *pérdida* de fotones por conversión que podría verse reflejada en posibles anomalías en el espectro de emisión de alguna fuente energética. Contrario a los procesos de aniquilación y decaimiento, en la búsqueda mediante el proceso de conversión, existe un nicho de oportunidad al estudiar fuentes de emisión ultraenergéticas que favorezcan la conversión a materia oscura (en el siguiente capítulo se explica en detalle la justificación). Uno de los candidatos que podrían encontrarse mediante este canal son justo las ALPs debido a su acoplamiento con los fotones.

Existen otros métodos de búsqueda indirecta de materia oscura a partir del uso de lentes gravitacionales las cuales aportan información sobre la estructura a gran

¹⁴De hecho las galaxias dSph son extremadamente difíciles de detectar justo a su brillo muy tenue.

escala del universo. Sin embargo en el presente trabajo se trabajará solo con las búsquedas indirectas antes mencionadas.

2.4.2.1. Detección por aceleradores.

Como su nombre lo indica esta forma de detección consiste en analizar colisiones en aceleradores en las cuales como resultado pudiera surgir como subproducto una partícula de materia oscura. Anteriormente se creía que este sería el método más promisorio, ya que como se comentó anteriormente se confiaba en confirmar SUSY en el LHC, con lo cual podrían detectarse WIMPs. A pesar de no encontrar evidencia de supersimetría, aún hay posibilidad de candidatos que podrían ser detectados en distintos aceleradores alrededor del mundo como lo son **RHIC** (Relativistic Heavy Ion Collider) y en futuros proyectos como lo son el **FCC** (Future Circular Collider) y el **CLIC** (Compact Linear Collider) [72] [67].

Capítulo 3

ALPs

Como se mencionó en el capítulo anterior, aunque las WIMPs han sido históricamente el candidato más estudiado para ser materia oscura dado que LHC aún no encuentra rastros de partículas supersimétricas como se esperaba anteriormente, otros candidatos a materia oscura han tenido un interés renovado. El presente trabajo se centrará en las partículas tipo axión (ALPs por sus sigas en inglés), las cuáles son hipotéticas partículas ligeras que surgen a partir de la generalización de concepto del axión¹, la cual es una partícula ligera que surge en QCD para intentar resolver el problema CP fuerte.

Dado que no es el principal propósito del trabajo presentar rigurosamente toda la teoría detrás de los axiones y las ALPs, ya que requeriría más de una tesis para lograrse, se presenta solo una breve introducción a los conceptos. Si el lector quiere sumergirse más a la teoría con todo el formalismo de teoría cuántica de campos y teoría de cuerdas puede consultar las referencias [50] [61] [60]

¹Aunque es cierto que el axión por definición es una ALP, la diferencia entre el axión y otras ALPs radica en que las ALPs no necesariamente resuelven el problema CP fuerte de QCD, caso que el axión sí resuelve.

3.1. Axión en QCD

El modelo estándar de partículas tiene tres interacciones; la interacción electromagnética, la interacción nuclear fuerte y la interacción nuclear débil² las cuales se encuentran descritas por la teoría electrodébil (la cual es una unificación entre la teoría de la electrodinámica cuántica y la teoría débil) y la cromodinámica cuántica (QCD por sus siglas en inglés). A su vez existen tres simetrías discretas de gran interés; Simetría C (conjugación de carga) simetría P (paridad) y simetría T (reversión temporal) y se encuentran relacionadas por el llamado teorema CPT, el cual nos indica que teoría cuántica de campos local que presente covariancia de Lorentz y venga definida por un Hamiltoniano hermítico (como la teoría electrodébil y QCD), es invariante bajo una transformación CPT. Aunque el teorema indica que CPT se conserva, es físicamente posible que se presenten violación de simetrías aisladas o combiandas mientras no sean las tres simultaneas, es decir, se puede violar la simetría C, la simetría P, la simetría T o incluso hay violaciones a la simetría combinada CP.

Aunque numerosos experimentos han logrado ver todas estas posibles violaciones de simetría en la interacción electrodébil, en la interacción fuerte (descrita por QCD) no se ha podido observar ninguna violación a la simetría CP aunque no exista impedimento físico para que pueda ocurrir. Este es el conocido como problema CP fuerte (fuerte por la interacción involucrada, no por la intensidad), el cual representa un problema abierto en la física de partículas.

En el año 1977 Robert Peccei y Helen Qinn proponen un mecanismo (llamdo mecanismo de Peccei-Quinn o simplemente mecanismo PQ) el cual consiste en introducir una nueva simetría global U(1) la cual al romperse se generan bosones

²Usualmente suelen solo denotarse como interacción débil e interacción fuerte.

pseudoescalares los cuales son los llamados axiones. Esta simetría se rompe espontáneamente, por lo que los axiones deberían tener masa nula, sin embargo, en presencia del llamado *instantón*³ en QCD, esta simetría es rota explícitamente ya que se logra una interacción con el campo gluónico, lo que dota de masa al axión. Existen dos principales modelos para lograr esta interacción con el campo gluónico, el modelo DFSZ (Dine, Fishler, Srednick, Zhitnitsky) y el modelo KSVZ (Kim, Shifman, Vainshtein, Zakharo).

Este rompimiento de simetría está mediado por un factor f_{PQ} llamado *constante de decaimiento del axión*⁴. Dado que el axión interactúa muy débilmente se tiene que la escala para el rompimiento de la simetría PQ debe ser muy alta, cumpliendo con $f_{PQ} \gg m_{weak}$.

Los axiones resultan también ser candidatos a ser materia oscura, aunque a diferencia de las WIMPs los axiones son candidatos ligeros y tienen una naturaleza no térmica. Dado que los parámetros de los axiones están relativamente constreñidos ya que deben cumplir con resolver el problema CP fuerte, se han propuesto extensiones del concepto de axión, es decir, alguna simetría U(1) que conlleve la aparición de bosones ligeros pero sin la restricción de tener que resolver el problema CP fuerte. Así es como aparecen las partículas tipo Axion *ALPs* cuya principal diferencia con el axión *clásico* es justamente no tener que resolver el problema CP fuerte necesariamente. Esta libertad expande la región de parámetros que se pueden obtener para las ALPs.

³Los instantones son campos que son soluciones de las ecuaciones euclidianas de movimiento en el vacío QCD.

⁴Es similar al término f_{π} para el decaimiento del pión

3.2. Axion Like Particles

Como se mencionó en la sección anterior, es posible generalizar el concepto que da lugar al axi3n lo que se logra haciendo un procedimiento similar a mecanismo de Peccei Quinn. Estas generalizaciones ocurren principalmente en teor3a de cuerdas. En forma general, las part3culas que nacen a partir de esta generalizaci3n cumplen con tener el lagrangiano en com3n:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu a_i \partial^\mu a_i + \frac{\alpha_s C_{g,i}}{8\pi f_i} a_i G \tilde{G} + \frac{\alpha C_{\gamma,i}}{8\pi f_i} a_i F \tilde{F} \dots \quad (3.1)$$

, en donde cada part3cula a_i tiene asociada su constante de decaimiento f_i los t3rminos $C_{g,i}$ y $C_{\gamma,i}$ son constantes entre la interacci3n de las part3culas con el sector glu3nico G y el electromagn3tico F respectivamente.

La combinaci3n de campos:

$$\frac{a_{QCD}}{f_a} = \sum_i \frac{C_{g,i}}{f_i} a_i, \quad (3.2)$$

cumple con resolver el problema CP fuerte, regresando al concepto de axi3n en QCD tratado en la secci3n anterior.

Sin embargo los campos que sean ortogonales no se acoplar3n al sector fuerte pero s3 al electromagn3tico , as3 pues estas son las llamadas ALP que tienen el lagrangiano:

$$\mathcal{L}_{ALP} = \frac{1}{2} (\partial_\mu a \partial^\mu a - m_a^2 a^2) + \frac{1}{4f_a} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}. \quad (3.3)$$

As3 pues, la parte encargada del acoplamiento entre una ALP y un fot3n est3 dada por:

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{1}{4f_a} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = ag_{a\gamma\gamma} \vec{E} \cdot \vec{B}, \quad (3.4)$$

donde a es el campo de la ALP, el parámetro $g_{a\gamma\gamma}$ la constante de acoplamiento, y \vec{E}, \vec{B} el campo eléctrico y magnético.

Gracias a este acoplamiento ocurre que en presencia de un campo magnético externo y altas energías sea posible la conversión fotón-ALP, dicha probabilidad de conversión se puede estimar como⁵:

$$P_{\gamma \rightarrow a}(E_\gamma) = \left(1 + \frac{E_c^2}{E_\gamma^2}\right)^{-1} \sin^2 \left(\frac{g_{a\gamma\gamma} B_T L}{2} \sqrt{1 + \frac{E_c^2}{E_\gamma^2}} \right), \quad (3.5)$$

endonde B_T es el campo magnético transversal a la dirección de movimiento del fotón, L es la distancia recorrida dentro del campo magnético y E_c es la llamada energía crítica definida como:

$$E_c = \frac{|m_a^2 - \omega_{pl}^2|}{2g_{a\gamma\gamma} B_T}, \quad (3.6)$$

donde $\omega_{pl}^2 = 4\pi\alpha n_e/m_e$ es la frecuencia de plasma del medio siendo n_e la densidad electrónica.

En el límite cuando $E_\gamma \gg E_c$ la probabilidad de conversión se satura, por lo cual es ideal tener una energía de los fotones muy alta justo para maximizar la probabilidad y así poder llegar a detectar algunas anomalías en el espectro de alguna fuente que emita fotones de alta energía [54] dando así una forma de poder realizar una búsqueda indirecta de ALPs a partir de la conversión de fotones.

⁵Aunque formalmente se tendrían que resolver las matrices de mezcla para obtener la probabilidad de supervivencia, se aproximar la solución para la probabilidad de forma analítica, véase referencia [54]

Sin embargo aunque pareciera sencillo, hay que tomar en cuenta que la fuente a estudiar debe de cumplir, que además de emitir en muy altas energías debe de tener ciertas características, lo que limita las posibles fuentes disponibles. Esta discusión se ampliará en el capítulo 5,

Capítulo 4

Observatorio HAWC

En el capítulo anterior se mencionó que una parte importante para la búsqueda de ALP's es lograr observar objetos ultraenergéticos que puedan emitir a decenas e incluso centenas de TeVs. A lo largo del tiempo se han construido observatorios dedicados al estudio de altas energías entre los que destacan los mencionados en el capítulo 2 que son HESS, MAGIC, MILAGRO. Sin embargo, aunque las energías detectadas por los experimentos mencionados eran altas ($> 1\text{TeV}$) respecto a lo detectado previamente ¹ se necesita mucha más energía para poder maximizar la probabilidad de conversión de una ALP a un fotón, por lo que se requiere un observatorio capaz incluso de superar la barrera de los 100 TeV. Uno de los únicos observatorios en el mundo capaces de poder ver estas energías es el observatorio HAWC (*High Altitude Water Cherenkov* por sus siglas en inglés) por lo cual los datos publicados por HAWC son los elegidos para realizar el presente trabajo²

¹La fuente más energética detectada por HESS está en el rango de los 70-80 TeV ver [2]

²En el presente año LHASSO reportó haber observado energías tan altas como 1.4 PeV, sin embargo aún se espera mucha más información que pueda servir en un futuro para ampliar el presente trabajo.

El observatorio (Figura 4.1) se encuentra situado entre el Volcán Sierra Negra y el Pico de Orizaba a una altura de 4100 m.s.n³ en el estado de Puebla, México .



Figura 4.1: Observatorio HAWC

El observatorio se encuentra diseñado para estudiar tanto rayos cósmicos como rayos gamma ultraenergéticos con un rango aproximado desde 300 GeV hasta aproximadamente 200 TeV. El observatorio HAWC utiliza la técnica de cascadas atmosféricas extensas que son detectadas a través detectores Cherenkov en agua, los WCD (*Water Cherenkov Detector*). Una ventaja que tiene HAWC es que cubre una gran porción del cielo, 8.4 sr, (esterorradianes) lo que representa aproximadamente 2/3 de todo el cielo. Otra ventaja de HAWC es que puede estar en funcionamiento las 24 horas del día por lo que el ciclo de funcionamiento (duty cycle en inglés) es mayor al 98 % .

³A un costado, pero más abajo, de otro importante observatorio como lo es el GTM (Gran Telescopio Milimétrico).

4.1. Sistema de detección

El observatorio HAWC cuenta con un arreglo de 300 WCD en un área de $20,000m^2$. Los WCD son cilindros de acero corrugado de 4.5m de altura y 7.3m de diámetro, con su interior cubierto con revestimiento plástico. Los WCD contienen 188,000 litros de agua ultra purificada y en el fondo 4 tubos fotomultiplicadores denominados PMT(por sus siglas en inglés) dando un total de 1200 PMTs en los WCD. Dado que los rayos gamma de más alta energía pueden alcanzar un área de $100,000 m^2$ su núcleo suele encontrarse fuera del arreglo principal de HAWC lo que da como resultado que las cascadas estén parcialmente reconstruidas. Por esta razón se realizó una mejora al observatorio agregando 350 WCD de menor diámetro denominados *outriggers* lo cual aumenta el área de detección.

4.2. Obtención de datos

Como en su nombre lo indica el observatorio HAWC se basa en detectar la radiación Cherenkov en el agua dentro de los WCD producida por partículas relativistas (rayos gamma o partículas cósmicas muy energéticas). Dicha radiación es detectada como señales a través de los PMTs las cuales son leídas y digitalizadas. Una vez digitalizadas las señales pasan a un dispositivo conocido como TCD (Time to Digital Converter), el cual es el encargado de medir los tiempos de las señales en los PMTs que hayan pasado un umbral o condición de disparo. Esta condición de disparo es que existan coincidencias entre por lo menos 28 PMTs en una ventana de tiempo de 150 ns. Mediante el uso de la técnica ToT (Time Over Threshold) se obtiene la carga depositada en cada uno de los PMT por evento, ya que la duración de la señal sobre un ToT umbral es proporcional al logaritmo de la

carga generada en el PMT. En el observatorio HAWC se consideran dos umbrales, el llamado High ToT y un Low ToT para poder obtener la carga depositada en los PMTs. A partir de esta información se puede reconstruir la dirección y naturaleza (electromagnética o hadrónica) de la cascada, así como la energía de la partícula primaria.

4.3. Reconstrucción de datos

Como se mencionó anteriormente existen dos umbrales a partir de los cuales se toman en cuenta los eventos para poder pasar al proceso reconstrucción. La reconstrucción de un evento se basa esencialmente en 3 procesos; la reconstrucción de la posición en el arreglo del núcleo de la cascada, la reconstrucción angular y también la separación gamma-hadrón.

4.3.1. Núcleo

El núcleo de una cascada se entiende como la posición de la partícula primaria si ésta no hubiera interactuado con la atmósfera creando la cascada final. Para la reconstrucción de la posición del núcleo se emplea la distribución de carga recolectada en los PMTs que registraron el evento. Como primera aproximación se calcula el centro de masa a partir de la media ponderada de las cargas depositadas Q_i registradas por el i -ésimo PMT en la posición dada por (x_i, y_i) con lo cual :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{i=1} \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^N Q_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_{i=1} \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^N Q_i}.$$

Luego se obtiene a anchura a partir de la varianza ponderada

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}(\overline{x^2} - \bar{x}^2 + \overline{y^2} - \bar{y}^2)}$$

Y al final se obtiene la amplitud de la cascada de las umas de las cargas

$$A = 2\pi \sum_{i=1}^N Q_i$$

Los valores obtenidos sirven como parámetros iniciales para realizar un ajuste gaussiano a partir de la minimización de la función chi cuadrada, con lo que se analiza la verosimilitud de de un ajuste gaussiano a la distribución latera de la cascada. La función de distribución lateral describe la densidad de partículas cargadas como función del radio al eje de la cascada

$$\chi^2 = \sum \frac{(Q - Q')^2}{\sigma'^2},$$

donde Q es la carga medida en los PMTs y Q' la carga esperada según nuestro modelo gaussiano con $\sigma' = \sqrt{Q'}$ suponiendo una distribución de Poisson.

4.3.2. Reconstrucción del ángulo

La reconstrucción del ángulo de la cascada nos da la información sobre el ángulo azimutal y cenital es decir, el eje de la cascada. En una primera aproximación para a reconstrucción se supone que el frente de la cascada es plano con lo cual tomando la distribución de tiempos de disparo de los PMTs se puede obtener el ángulo de la cascada respecto al detector y conociendo la posición del núcleo (a partir del método descrito previamente) se puede obtener el eje de la cascada (ver

Figura 4.2).

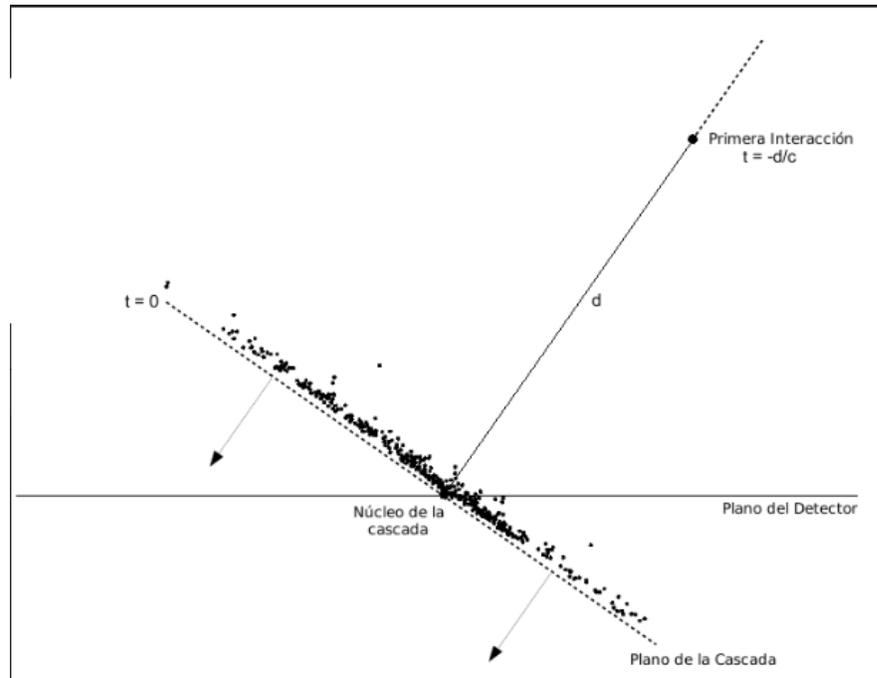


Figura 4.2: Diagrama del frente de una cascada atmosférica. Como primera aproximación se considera un frente plano aunque realmente se presenta una curvatura en el frente.

4.3.3. Identificación de cascada

Para poder identificar a qué tipo de evento pertenece una cascada (hadrónico o electromagnético) se aprovecha las particularidades de cada uno. En el caso de una cascada hadrónica el componente que se distingue es el muónico, el cual se caracteriza por ser muy energético debido a que a pérdida de energía por parte de los muones conforme atraviesan la atmósfera es mínima. Para el caso de una cascada electromagnética ésta se distingue por presentar una distribución de energía uniforme al rededor del núcleo de la cascada.

Con lo anterior, se puede realizar una identificación a primera instancia a partir de observar la distribución de carga en cada PMT que haya registrado el evento. En las Figuras 4.3 y 4.4 se presentan dos eventos reconstruidos, uno electromagnético y otro hadrónico respectivamente. Los colores representan el tiempo de disparo de incidencia en los PMTs siendo los azules los primeros en dispararse y el tamaño de los círculo representa la carga depositada en los PMTs y la estrella representa la posición del núcleo.

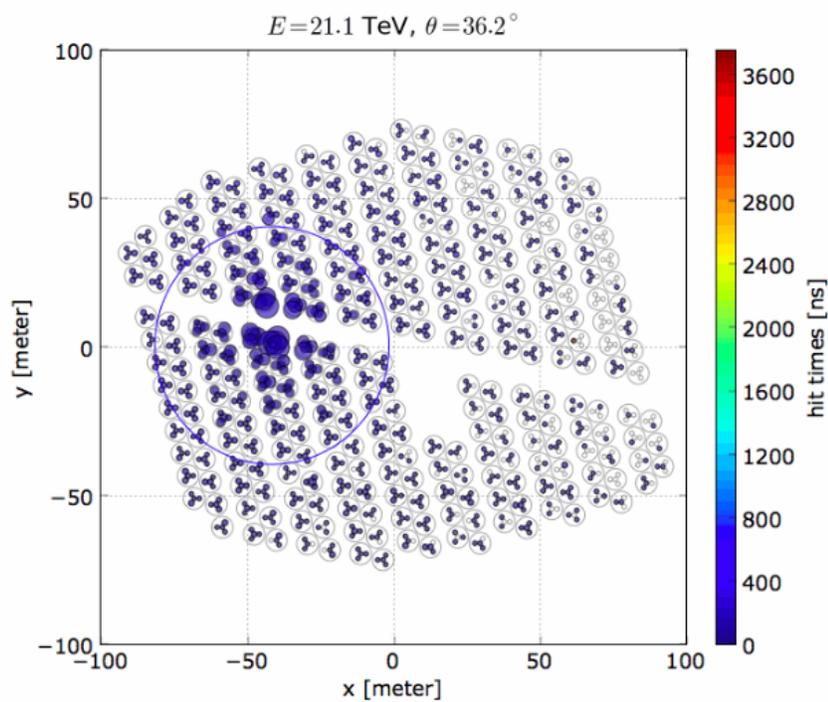


Figura 4.3: Reconstrucción de un evento electromagnético.

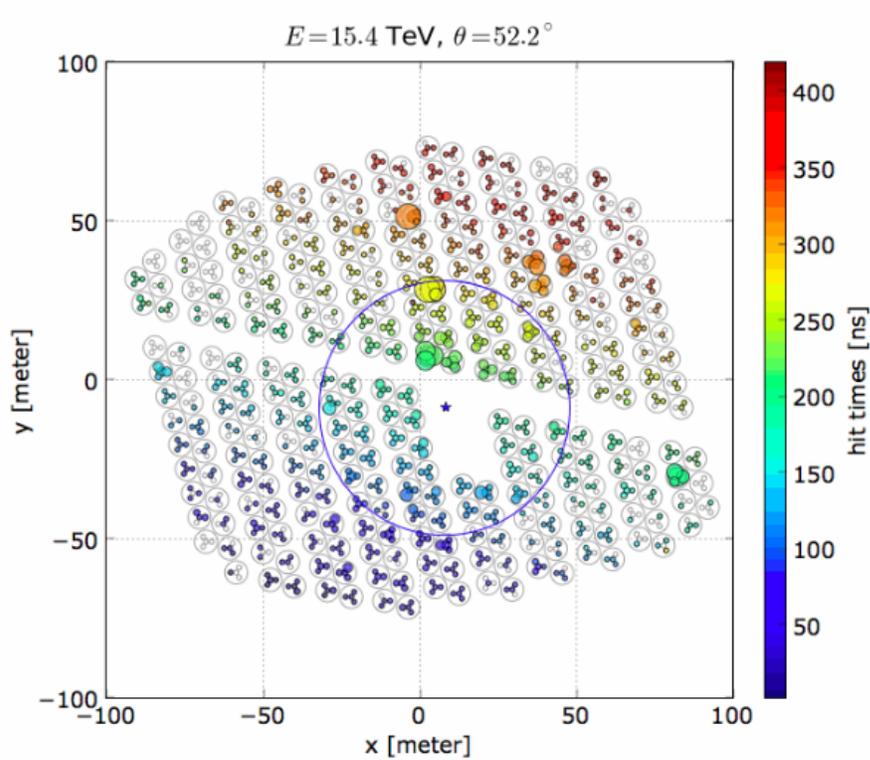


Figura 4.4: Reconstrucción de un evento hadrónico.

4.4. Análisis de Datos

Uno de los principales objetivos de HAWC es poder identificar fuentes de rayos gamma ultraenergéticos, por lo que es esencial el poder estimar de buena manera el fondo en la vecindad de una fuente, principalmente por cascadas hadrónicas. Para poder realizar dicha estimación del fondo, se define un pequeño bin angular alrededor de la posición de la fuente determinando la cantidad de eventos de fondo y su incertidumbre estadística, y midiendo el número de eventos arriba de dicho fondo dentro de este pequeño bin angular. El fondo se puede estimar mediante el

método de Integración Directa ⁴.

Para optimizar el análisis se separan los datos en 10 bins (Ver tabla 4.1, los cuales se definen a partir de la razón del número de PMTs que registraron la señal entre el número de PMTs disponibles durante un evento. A pesar de que estos bins están correlacionados con la energía no son el mejor estimador de ésta. Mientras que la cantidad de eventos de baja energía es mayor en los bins bajos, las distribuciones de éstos respecto a la energía son bastante amplias tal que se intersectan entre ellas. Esto implica que eventos de baja energía pueden caer en un bin alto y eventos de muy alta energía en un bin bajo, lo que hace justamente que no sean el mejor estimador de la energía.

Bin	f_{hit} [%]
0	2.3 - 6.7
1	6.7 - 10.5
2	10.5 - 16.2
3	16.2 - 24.7
4	24.7 - 35.6
5	35.6 - 48.5
6	48.5 - 61.8
7	61.8 - 74
8	74.0 - 84
9	84.0 - 100

Tabla 4.1: Definición de los bins fraccionales en los cuales se agrupan los datos de HAWC.

Para realizar la separación entre un evento asociado a un rayo gamma y un evento relacionado con un hadrón se usa el hecho de que las cascadas electromagnéticas tienen núcleos compactos cuya densidad de energía decae uniformemente como

⁴El método fue implementado en el precursor de HAWC, el experimento Milagro, para detalles del método vea [13]

función de la distancia al núcleo, en contraste con las cascadas hadrónicas que presentan grandes deposiciones de energía lejanas al núcleo debido principalmente a la componente muónica de la cascada (ver Figura 4.5).

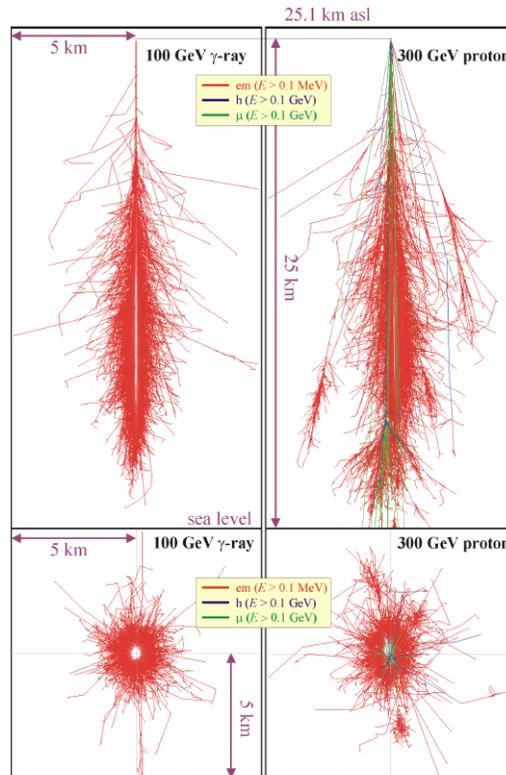


Figura 4.5: Simulaciones Monte Carlo para una cascada electromagnética provocada por un rayo gamma de 100 GeV de energía y para una cascada provocada por un protón de 300 GeV energía. Se pueden apreciar las diferencias entre las distribuciones, lo que permite la separación gamma/hadrón. Crédito: Daniel Ávila

Capítulo 5

Análisis y resultados

Llegados a este punto es posible entrar de lleno al objetivo central del trabajo el cual se mencionó en el preludio del texto y consiste en estudiar las posibles anomalías que puedan presentarse en el espectro de una fuente que emita a muy altas energías debido a conversiones fotón-ALP descritas en el capítulo 3 y que nos permitan establecer regiones de exclusión en un espacio de parámetros m y g (masa de la ALP y constante de acoplamiento respectivamente). Dicho estudio se hizo a partir de la comparación del espectro de una fuente ultraenergética detectada por el observatorio HAWC y un hipotético espectro modificado debido a las conversiones fotón-ALP.

5.1. Ventaja del estudio de fuentes galácticas

Como se mencionó en el capítulo 3 una posible forma de realizar búsquedas indirectas de ALP's es aprovechar su acoplamiento con el electromagnetismo el cual provocaría que se realizaran conversiones de fotones a ALPs y viceversa.

La ec 3.5 muestra que una condición para saturar la probabilidad de conversión es tener una E_γ mucho más grande que una determinada energía crítica la cual en términos prácticos nos sirve como parámetro para saber cuan intensa será la probabilidad de conversión de un fotón dependiendo su energía, es decir, entre más alta la energía del fotón que la energía crítica la probabilidad será mucho mayor y si es mucho menor que la energía crítica ésta se vera muy disminuida. Por esta razón es pertinente buscar fuentes con una emisión muy alta (del orden de decenas y centenas de TeV) para poder maximizar la probabilidad de conversión e hipotéticamente poder encontrar anomalías en su espectro debido a las conversiones. Sin embargo, dado que anteriormente no existían experimentos capaces de detectar más allá de unos cuantos TeV se optaba por maximizar el parámetro de la distancia en la ecuación 3.5 recurriendo a fuentes extragalácticas para poder incrementar la probabilidad de conversión. Esta forma trae consigo dos problemas sistemáticos muy importantes los cuales se encuentran en el modelo del campo magnético y el problema del EBL.

En el caso del campo magnético al estudiar fuentes extragalácticas se tiene que tomar en cuenta al menos tres regiones importantes para el campo magnético:

- Campo magnético Galáctico
- Campo magnético Intergaláctico
- Campo magnético Intercúmulo

Lo cual trae consigo el aumento en los errores sistemáticos ya que hay que modelar estas tres regiones, sin embargo, si consideramos una fuente galáctica el problema del campo magnético se reduce *solo* a tener que modelar el campo magnético Galáctico lo cual representa una ventaja respecto al caso extragaláctico.

El segundo problema mencionado es el tener que lidiar con el CMB y el EBL (extragalactic background light), el cual es un fondo de radiación acumulada debido a formación estelar y AGNs el cual *opaca* prácticamente toda la emisión arriba de 1 TeV debido a la creación de pares en la interacción fotón(fuente)-fotón(EBL) lo cual limita bastante la capacidad de análisis para el estudio de posibles conversiones. Es por esto que el estudio de fuentes galácticas representa una ventaja (al menos en los posibles errores sistemáticos) respecto al estudio de fuentes galácticas ya que solo tenemos que modelar un campo magnético en vez de 3 y podemos evitar la atenuación por interacción con EBL. El *precio* a pagar por estudiar fuentes galácticas es, como se mencionó, tener que maximizar no la distancia sino la energía por lo cual es necesario poder detectar energías muy altas.

Afortunadamente en la actualidad existen experimentos capaces de medir energías por arriba de los 100 TeV como lo es el experimento HAWC presentado en la sección anterior, el cual nos brinda la oportunidad de estudiar fuentes ultraenergéticas sin tener que salir de la Vía Láctea, y por lo tanto minimizar o eliminar los efectos producidos por interacciones con el EBL.

En resumen, lo ideal sería tener una fuente, que emita en muy alta energía (>50 TeV), que su espectro este lo mejor caracterizado, de tal manera que las fluctuaciones en su emisión sean bien entendidas y que se encuentre a suficientemente cerca (algunos Kpc) para despreciar los posibles efectos debidos a la interacción con el EBL. Afortunadamente HAWC ha detectado fuentes que emiten por arriba de 90 TeV (ver Fig 5.1) siendo una de ellas en la que me enfocaré en el resto de este trabajo, dicha fuente es eHWC J1907+063 detectada por el observatorio HAWC y cuya emisión de rayos gamma supera los 170 TeV y la cual fue elegida dado que su espectro está bien caracterizado además de ser *duro* lo cual nos permite inferir

que se puede seguir extendiendo a más altas energías.

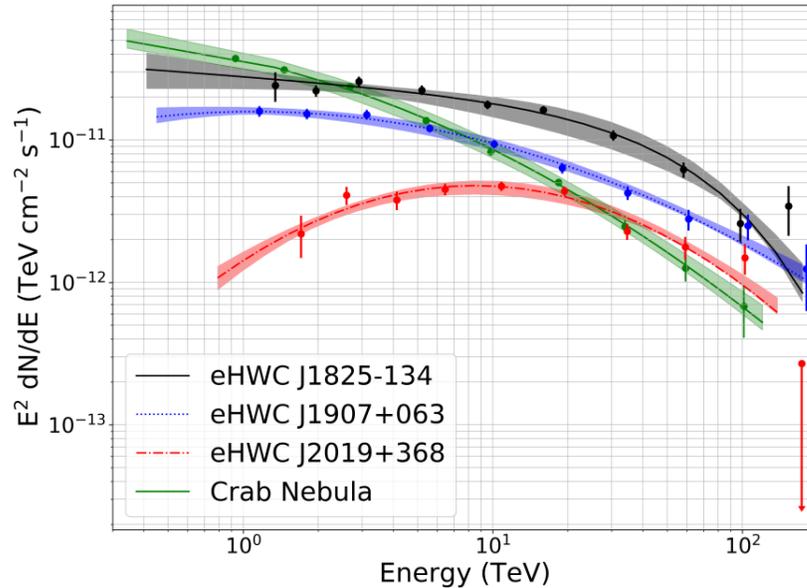


Figura 5.1: SED de cuatro de las fuentes más energéticas detectadas por HAWC. Se puede observar como para eHWC J1907+063 las incertidumbres estimadas son menores que otras fuentes, además de no mostrar un corte en altas energías por lo que en el futuro se podrá extender el SED para esta fuente.

5.2. Fuente eHWC J1907+063

La región fue detectada originalmente por el experimento Milagro con emisiones por arriba de los 20 TeV y posteriormente ha sido detectada por otros experimentos dedicados a altas energías como lo son HESS, VERITAS, LHASSO y también el observatorio HAWC. Recientemente tanto HAWC como LHASSO han reportado emisiones por arriba de los 100 TeV. En la región existen algunos objetos que pueden servir como contraparte a la emisión en TeV incluyendo una remanente

de supernova (SNR) así como algunos pulsares entre los cuales destaca el pulsar PSR J1909+0602 detectado por el telescopio Fermi-Lat.

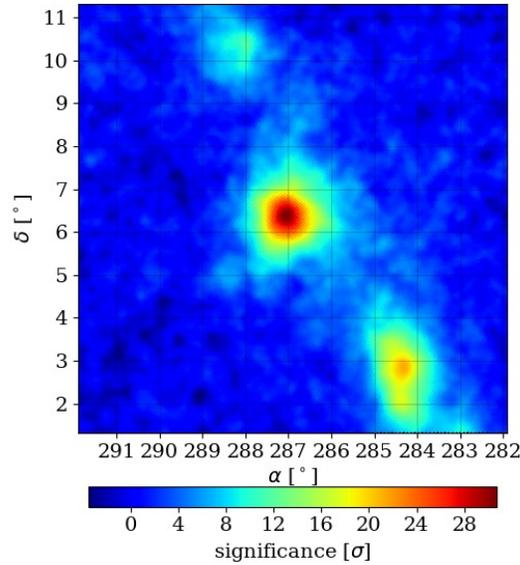


Figura 5.2: Mapa de significancia de la fuente eHWC J1907+063. (Imagen propia)

La región se encuentra a una distancia de 2.37 Kpc de la tierra, con coordenadas RA= $286,91 \pm 0,10$ y Dec= $6,32 \pm 0,09$ (Ver Figura 5.2).

Como se mencionó anteriormente las razones para escoger esta fuente son: una de las fuentes mas energéticas detectadas por HAWC, tiene una *buena* caracterización espectral , es decir, el ajuste espectral (en este caso un ajuste Log Parabola) ajusta muy bien con los fotones detectados por HAWC.

El mejor ajuste para la fuente es una Log Parabola, cuya forma está dada por:

$$\frac{dN}{dE} = \phi_0 \left(\frac{E}{10\text{TeV}} \right)^{-\alpha - \beta \ln(E/10\text{TeV})} \quad (5.1)$$

Los mejores parámetros encontrados por HAWC están representados a tabla 5.1. Para confirmar que eran los parámetros correctos, se corroboró haciendo el ajuste correspondiente a la SED. Esto es crucial, porque la calidad de este ajuste resulta de suma importancia en el análisis para evaluar posibles perturbaciones a este ajuste.

eHWC J1907+063			
Extensión(°)	$\phi_0(10^{-13}TeVcm^2s)^{-1}$	α	β
0.67 ± 0.03	0.95 ± 0.05	2.46 ± 0.03	0.11 ± 0.02

Tabla 5.1: Parámetros para eHWC J1907+063

5.3. Consideraciones para el análisis

Una vez elegida la fuente a estudiar el siguiente paso es estimar de qué forma se podrían presentar las anomalías debidas a conversiones de los fotones de la fuente a ALP's. Ya que para que existan conversiones también es necesario estar dentro de un campo magnético, es necesario establecer qué valor de campo magnético se incluirá en el análisis. Dentro de la Vía Láctea se pueden modelar dos principales componentes del campo magnético, las cuales son una componente aleatoria con pequeñas oscilaciones de campo magnético a escalas pequeñas, y una componente regular de gran escala. El impacto de la primera es subdominante debido a una aleatoriedad de corta duración que conduce principalmente a auto-cancelación de los efectos de oscilación, por lo que solo se está considerando la componente regular del campo magnético cuya intensidad a lo largo de los 2.37 Kpc desde la tierra hasta eHWCJ1907+063 se puede estimar como $1\mu G$. Otro aspecto a

considerar es la densidad de electrones libres en la galaxia, la cual fue estimada en $0,1\text{cm}^{-3}$ (ver [19]).

Tomando en cuenta lo anterior, es posible reescribir la escala de energía crítica de la ecuación 3.6 dándonos una aproximación para nuestra fuente de:

$$E_c \approx 100\text{TeV} \left(\frac{m_a}{\mu\text{eV}} \right)^2 \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-10}\text{GeV}^{-1}} \right)^{-1} \quad (5.2)$$

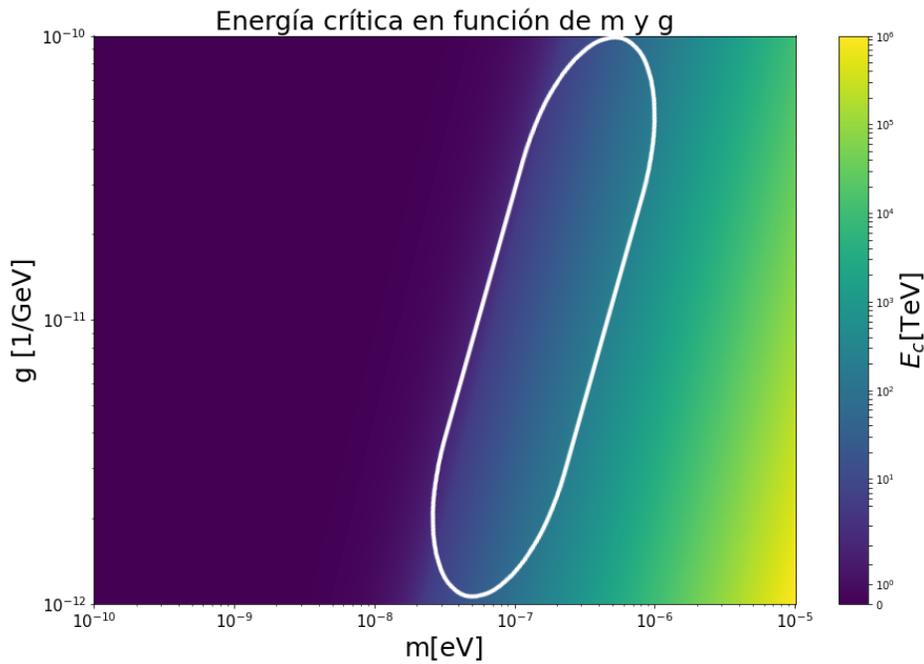


Figura 5.3: Energía crítica en función de la masa y la constante de acoplamiento. Como se puede observar, una región importante de esta superficie podría ser explorada con una energía crítica mayor a 50 TeV (región dentro del contorno blanco)

Como se puede observar en la Figura 5.3 existe una amplia zona con energía crítica mayor a 50 TeV que sería la región de más interés para analizar.

Si incluimos el efecto de conversiones de fotones a ALPs el flujo observado de rayos gamma está dado por:

$$\frac{d\phi}{dE_\gamma} = (1 - P_{\gamma \rightarrow a}) \cdot f_{att} \cdot \frac{d\phi}{dE_\gamma} \Big|_{fuente}, \quad (5.3)$$

Donde $\frac{d\phi}{dE_\gamma} \Big|_{fuente}$ es el flujo intrínseco de la fuente sin contar con el efecto de conversión y el factor f_{att} denota la atenuación del flujo astrofísico debido a la dispersión de rayos gamma debido al polvo y el campo de radiación galáctico. Sin embargo ya que la fuente se encuentra relativamente cerca (2.37 kpc) los efectos de dispersión en rayos gamma de $\mathcal{O}(10^2)$ TeV son marginales, por lo que se puede usar un valor de $f_{att}=1$.

Una consideración importante para el trabajo es que se está suponiendo que el flujo intrínseco $\frac{d\phi}{dE_\gamma} \Big|_{fuente}$ es el mejor ajuste Log Parabola reportada por HAWC. Esto debido a que los posibles efectos de conversión dependen de la energía de emisión, por lo que a energías *bajas* ($< 10\text{TeV}$) la probabilidad de conversión es muy baja (casi 0) por lo que la ec 5.3 resulta una igualdad entre el flujo observado y el flujo intrínseco.

5.4. Posibles anomalías en el espectro de eHWC J1907+063

El trabajo consistió en hacer una comparación entre el espectro reportado por HAWC y un espectro hipotético que contenga posibles anomalías.

5.4. POSIBLES ANOMALÍAS EN EL ESPECTRO DE EHWC J1907+063 63

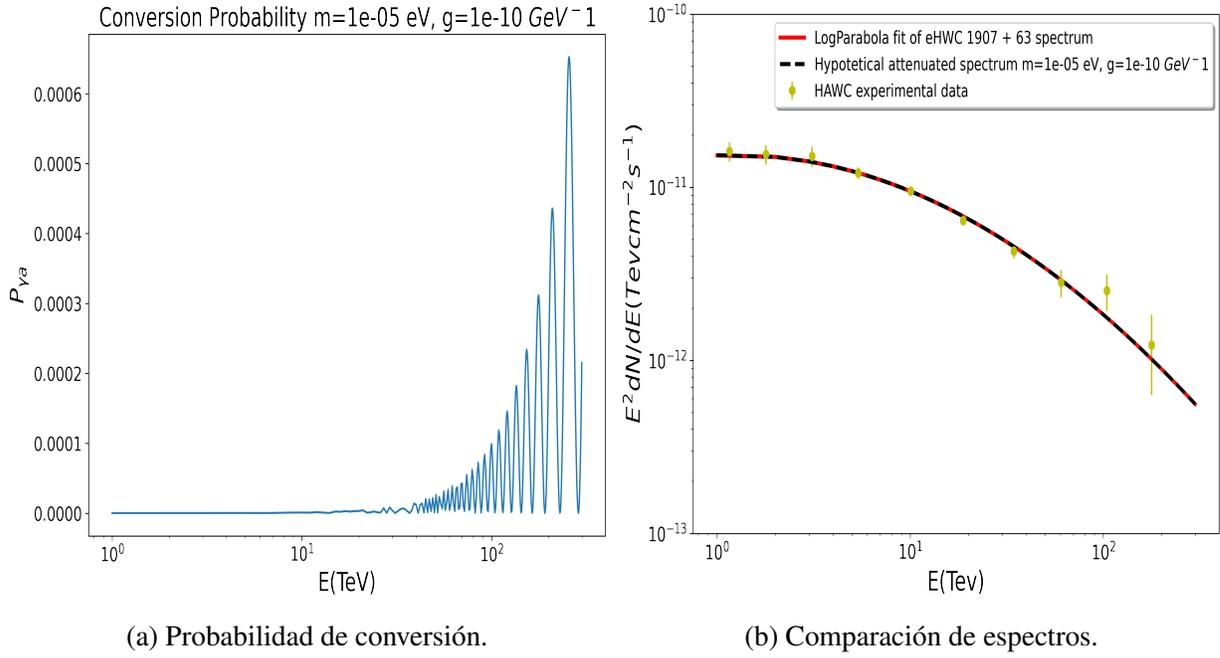


Figura 5.4: Probabilidad de conversión y posible efecto en el espectro para los parámetros $m = 10^{-5} \text{ eV}$ y $g = 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$.

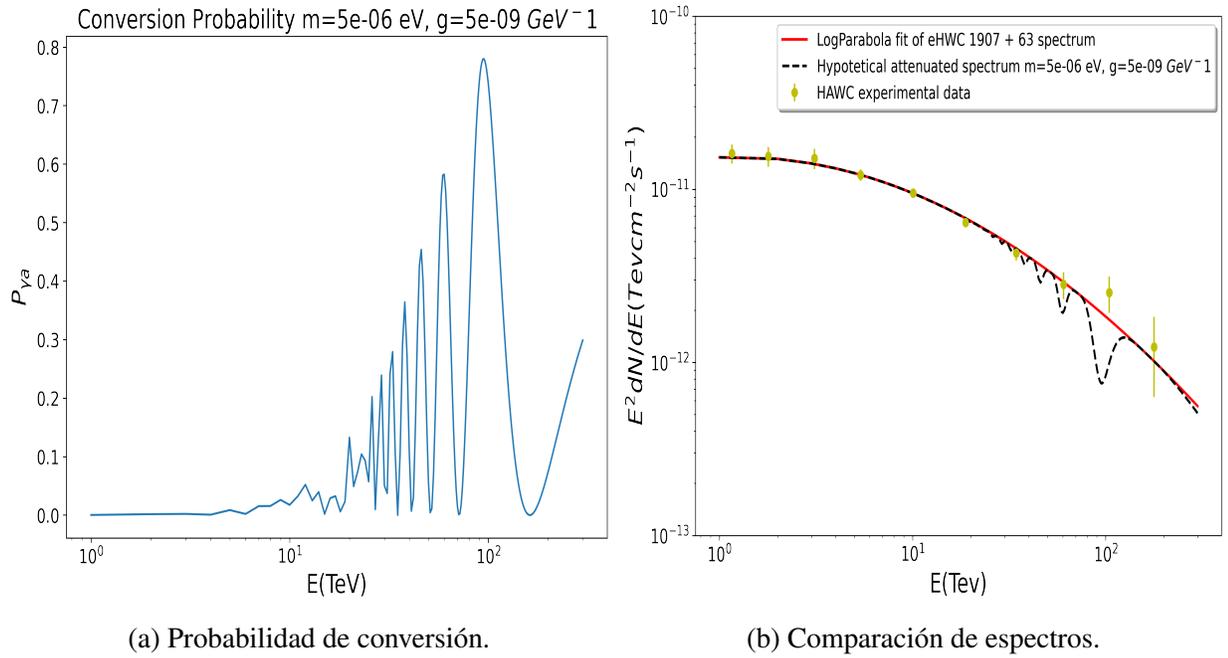


Figura 5.5: Probabilidad de conversión y posible efecto en el espectro para los parámetros $m = 5 \times 10^{-6} \text{ eV}$ y $g = 5 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$.

5.4. POSIBLES ANOMALÍAS EN EL ESPECTRO DE EHWC J1907+063 65

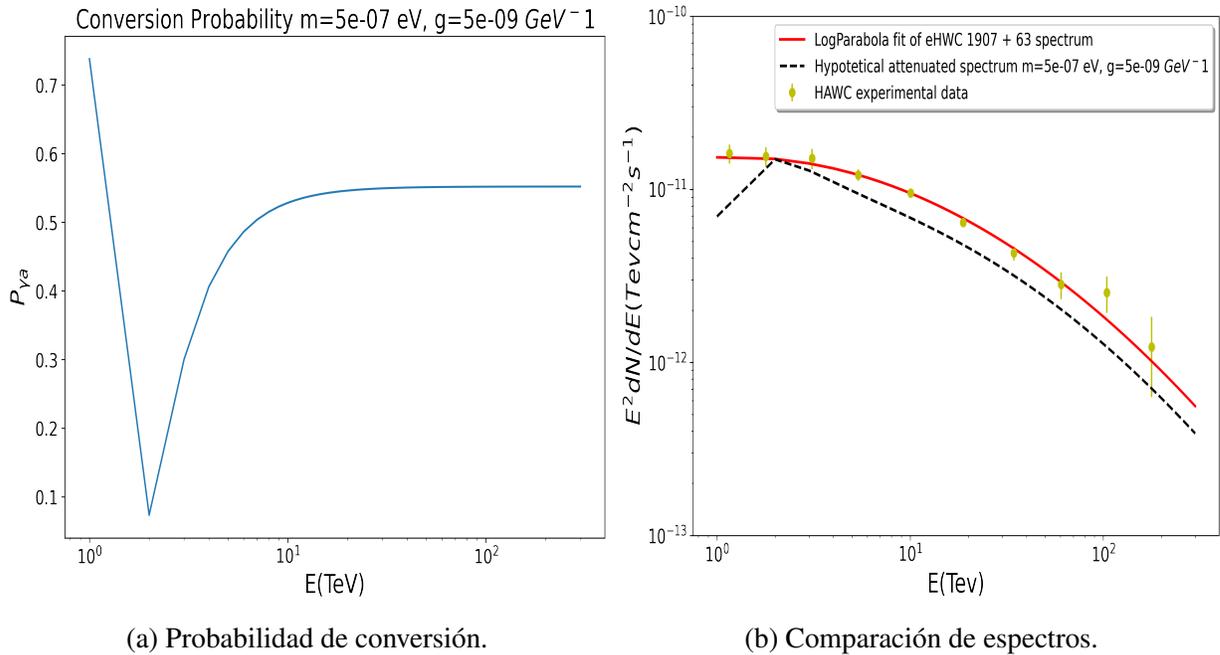


Figura 5.6: Probabilidad de conversión y posible efecto en el espectro para los parámetros $m = 5 \times 10^{-7} eV$ y $g = 5 \times 10^{-9} GeV^{-1}$.

En las gráficas anteriores se puede observar el comportamiento de la probabilidad de conversión y su hipotético efecto en el espectro de la fuente. En la figura 5.4 se observa que la probabilidad de conversión para los parámetros de m y g escogidos es muy baja llevando a que las alteraciones en el espectro sean prácticamente indetectables. En la figura 5.5 la probabilidad empieza a tomar importancia, lo que se observa en la región de alta energía del espectro como una posible atenuación. Un caso más extremo se presenta en la figura 5.6 cuyo par m y g presentan una alteración muy grande en el espectro, en particular este par m y g podría ser excluidos dado que no se observa ninguna alteración similar en el espectro medido por HAWC.

5.4.1. Obtención de la región de exclusión

Para obtener un criterio de exclusión se recurrió a emplear el método de LLR (Log Likelihood Ratio), el cual es un test que nos permite comparar la probabilidad de que dos modelos expliquen un conjunto de mediciones (ver [30]). El Log Likelihood Ratio está definido como:

$$LLR = -2 (\ln \mathcal{L}(\theta_0; m, g = 0) - \ln \mathcal{L}(\hat{\theta}_{m,g})) , \quad (5.4)$$

donde $\ln \mathcal{L}(\theta_0; m, g=0)$ es el Log Likelihood del modelo Log Parabola sin ALPs y el término $\ln \mathcal{L}(\hat{\theta}_{m,g})$ es el Log Likelihood del modelo con ALPs con parámetros dados m y g.

Como se puede observar si tanto el Likelihood del modelo sin ALPs como el modelo con ALPs son indistinguibles entonces el LLR será casi 0, lo cual indica que no se puede distinguir el modelo con ALP y el modelo sin ALP (como ejemplo se puede volver a observar a Figura 5.4a en la cual la pareja dada no presenta prácticamente desviación respecto al espectro sin ALP) por lo que dicha pareja m y g no podrá ser excluida. Sin embargo, si el Log Likelihood del modelo con ALP es mucho menor (es decir es un peor ajuste que el modelo sin ALP) el LLR entonces será cada vez menor lo que nos permitiría entonces poder excluir la pareja m y g dada (un ejemplo sería la Figura 5.6b en la cual se observa la gran discrepancia entre el modelo con y sin ALP).

Una parte importante para poder usar el LLR es los modelos a comparar deben ser anidados, es decir, el modelo más complejo puede ser transformado en el modelo más simple imponiendo alguna restricción. El ejemplo más sencillo es un modelo Log Parabola y un modelo Power Law, ya que es posible convertir

5.4. POSIBLES ANOMALÍAS EN EL ESPECTRO DE EHWC J1907+063 67

entre el modelo Log Parabola a una Power Law usando la restricción $\beta = 0$. En este caso es obvio que el modelo Log Parabola reportado por HAWC es anidado de la Log Parabola con ALPs puesto que en la ecuación 5.3 basta con hacer la probabilidad 0 para poder regresar al modelo original.

El LLR fue obtenido haciendo uso del software *ZEBRA* de HAWC (ZENith Band Response Analysis), el cual es un software que usa una simulación para caracterizar la respuesta del instrumento como función del cenit, que luego convolucionada con la información de exposición para estimar los recuentos observados de una fuente durante un período de tiempo arbitrario. Una vez que tenemos la respuesta de una fuente en función de la posición y el espectro, podemos comenzar a ajustar estos parámetros. Esto se realiza con una técnica de máximo Likelihood por parte de los minimizadores [42].

El programa fue modificado para que pueda mostrar el Log Likelihood de algún modelo espectral que se haya ingresado respecto a lo observado por HAWC. Para el presente trabajo se eligió crear una malla 50×50 en los parámetros m y g , con valores que abarquen parte de la región de energía crítica de interés para HAWC (ver figura 5.3). A partir de esta malla se generaron un total de 2500 espectros modificados por ALPs en función de m y g como en las figuras 5.4-5.6, obteniendo con *ZEBRA* su Log Likelihood para compararlo con el mejor ajuste hecho con HAWC (la Log Parabola), lo cual se logró haciendo uso de la ecuación 5.4 para obtener la superficie de LLR en función de dichos parámetros m y g (Figura 5.7).

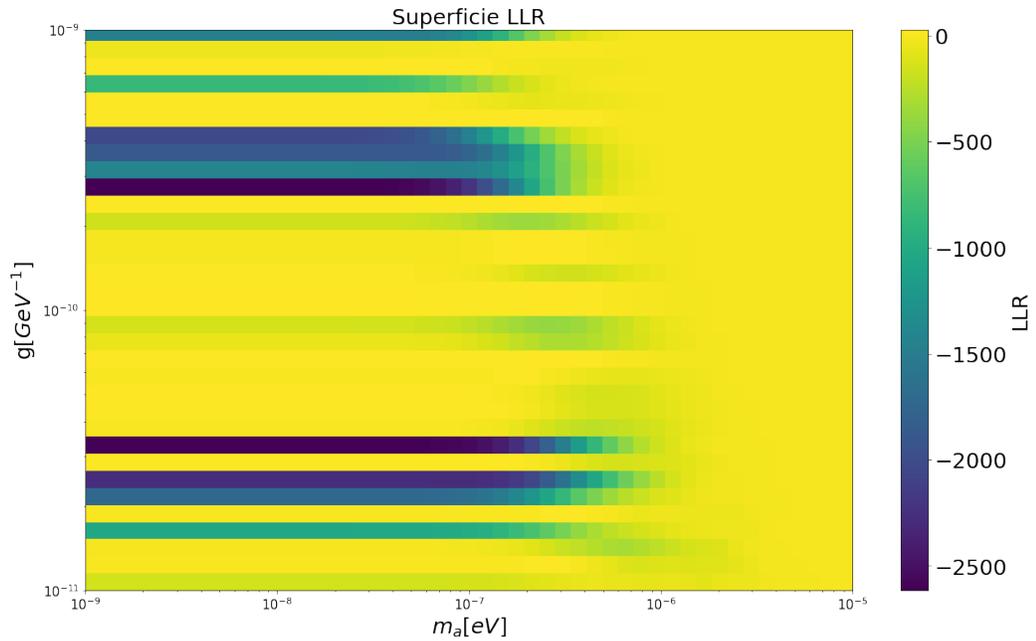


Figura 5.7: Superficie LLR. En este caso los valores negativos significan que dicho espectro asociado a la pareja m y g correspondiente son peores ajustes para explicar las observaciones comparado con el mejor ajuste de HAWC.

Para obtener un proxy del límite de exclusión se tomaron los valores LLR cuya diferencia respecto al máximo sea mayores o iguales a 5.99 lo que nos otorga un CL del 95% . Es decir, son los valores que se podrían excluir con un nivel de confianza del 95%.

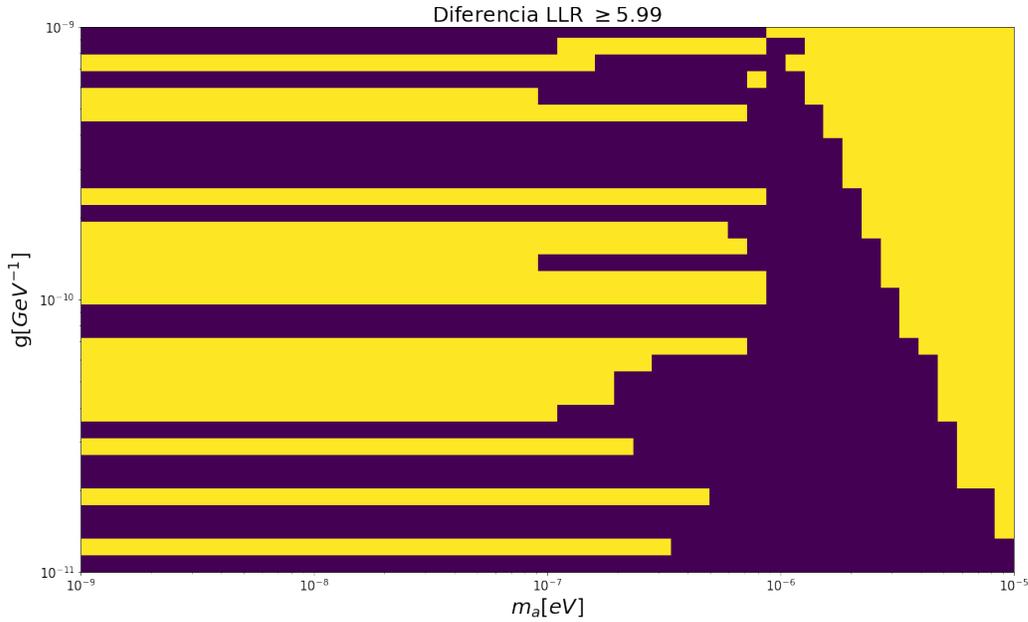


Figura 5.8: Región (color morado) con diferencia en LLR mayor que 5.99

Si se compara la región obtenida en el presente trabajo (Figura 5.8) con regiones de exclusión obtenidas por otros experimentos (Figura 5.9) como HESS, Fermi-LAT, CAST y con lo proyectado con experimentos futuros tales como IAXO¹ y ALPSII² se muestra que se amplía la región de exclusión medida por experimentos anteriores gracias a que los valores escogidos para generar la malla de m y g se encuentran justo en la región de mayor interés para altas energías (es decir, energías mayores a 50 TeV). Se observan también bandas de regiones excluidas con g constante, esto puede deberse a factores como: el tamaño de la malla (baja resolución) y la dependencia directa de la probabilidad de conversión con el parámetro g^3 .

¹Se espera que una versión de prueba de IAXO llamada *BabyIAXO* se empiece a construir a finales del 2021 y pueda funcionar en 2024, y dependiendo de los resultados puede ser que la versión final de IAXO empiece a operar en 2028.

²Se espera que ALPSII empiece a funcionar en el año 2022.

³Algo similar a las regiones excluidas por CAST las cual pone una región de exclusión a g

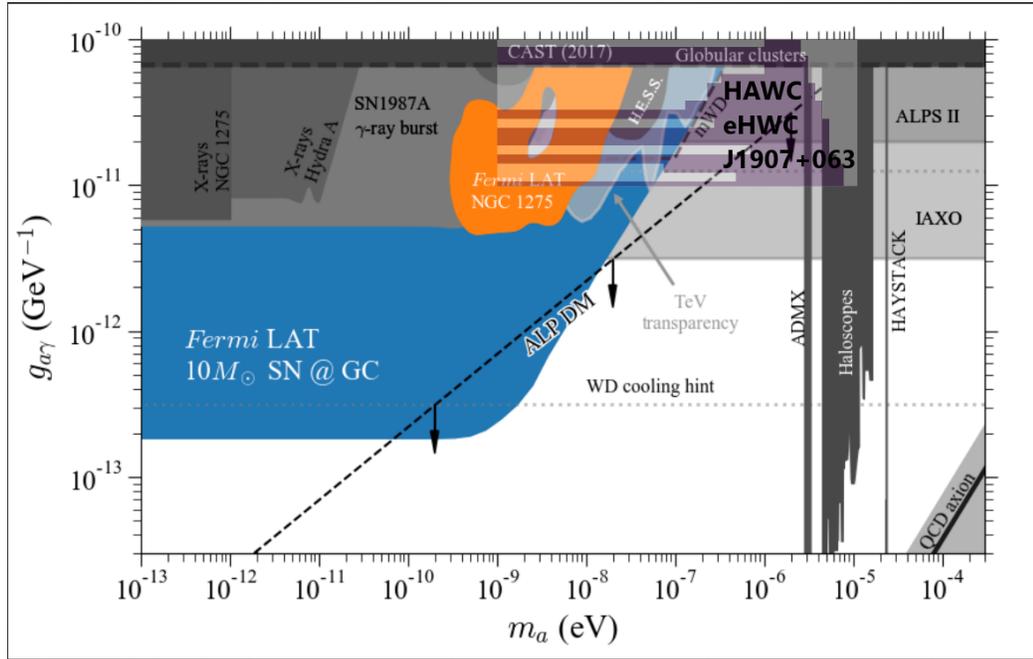


Figura 5.9: Región de exclusión obtenida por HAWC comparada con otros experimentos. (Imagen original: Manue Meyer.

constante del orden de 10^{-10}GeV^{-1} .

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo a futuro

En el presente trabajo fue posible determinar una región de exclusión (Figura 5.9) para los parámetros $g_{a\gamma}$ y m analizando el espectro de la fuente eHWC J 1907+063 reportada por HAWC. La importancia del trabajo es que se muestra que el estudio de fuentes galácticas muy energéticas (que emitan más allá de 50 TeV) puede utilizarse para establecer regiones de exclusión para las ALPs teniendo como ventaja respecto a otros estudios previos que utilizan fuentes extragalácticas el no tener que incluir a EBL en el análisis así como tener que tomar en cuenta solo el campo magnético galáctico.

Como continuación al presente trabajo ,primeramente se pueden estudiar mucho más fuentes que emitan a muy altas energías lo que permitiría hacer un análisis combinado que mejoraría el resultado obtenido con solo una fuente, así como también utilizar una malla de parámetros mucho más grande que permita mejorar la resolución del espacio de parámetros y posiblemente ampliar la región de exclusión.

Otro paso importante consiste en relajar las condiciones en las cuales se basó el trabajo como lo puede ser el obtener la probabilidad de conversión a partir de una

derivación de las matrices de mezcla y no la aproximación analítica utilizada para el presente trabajo¹ así como utilizar distintos valores para el campo magnético (ya que se usó solo un valor considerado *conservador* de $1\mu G$) y para la densidad de electrones lo que permitiría obtener una región de exclusión mayor. Otro paso importante para mejorar el análisis es el hecho de no usar el método de bins fraccionales de HAWC implementado en el software ZEBRA sino que utilizar el método de bins de energía más reciente que permite una mejor reconstrucción de la energía de las fuentes a escalas de muy alta energía lo que permitiría mejorar los resultados (gracias a una menor incertidumbre) justo a energías mayores de 200 TeVs que han logrado ser detectadas por HAWC.

En un futuro cercano el análisis puede ser llevado acabo con datos obtenidos por telescopios que tengan mejor resolución así como mayor rango de energía como lo es el futuro telescopio CTA (Cherenkov Telescope Array) en las islas canarias, el cual podría llegar a detectar energías de 300 TeVs con mucha mejor resolución angular que HAWC. En la actualidad el experimento LHASSO en China ha observado eventos que superan incluso 1 PeV (aunque aún falta mucha más estadística) lo que abre la puerta a nuevos estudios a escalas energéticas que antes eran imposibles de detectar.

¹Esto no indica que la aproximación esté mal sino que se puede ser más general

Apéndice A

Errores sistemáticos

Si bien es cierto que los errores sistemáticos disminuyen respecto a los presentados en el caso extragaláctico estos aún están presentes. Podemos enumerar como punto de partida tres errores sistemáticos importantes a tratar: Campo magnético, ajuste a la SED de la fuente y la distancia.

En el caso del campo magnético se ha mostrado que el campo magnético galáctico (en su componente uniforme) puede tener rangos de valores de $1\mu G - 7\mu G$ [15] con lo cual sería posible realizar simulaciones sobre el impacto del valor de campo magnético en la probabilidad de conversión ya que ésta depende directamente del campo magnético. Es por eso que en el presente trabajo se optó por elegir el valor más conservador de campo magnético, para así poder reducir el impacto en la región de exclusión (puesto que al considerar un campo magnético menor también se reduce la probabilidad de conversión). Caso similar es el de la distancia en la cual hay que tomar en cuenta la incertidumbre en la medición de la distancia, por lo que se podrían hacer simulaciones en los rangos de valores reportados para medir su incidencia en la probabilidad de conversión.

El caso quizá más importante para el estudio de los errores sistemáticos es el caso del espectro, puesto que una suposición muy fuerte para el presente trabajo es que el espectro reportado por HAWC es el espectro *real* de la fuente, es decir, estamos suponiendo que la emisión de la fuente es exactamente la reportada por HAWC. Como primera aproximación a hacer un estudio en el rango de error de los parámetros de la Log Parabola que son α, β y ϕ lo que nos daría un primer vistazo sobre la incidencia del modelo del espectro usado. Posteriormente y como se mencionó en las conclusiones un análisis combinado con datos de otros experimentos ayudaría significativamente a reducir los errores sistemáticos en el espectro, pues tendríamos mucha más estadística sobre la cual realizar el análisis.

Bibliografía

- [1] H. Abdalla, A. Abramowski, F. Aharonian, F. Ait Benkhali, E. O. Angüner, M. Arakawa, M. Arrieta, P. Aubert, M. Backes, and et al. The h.e.s.s. galactic plane survey. *Astronomy and Astrophysics*, 612:A1, Apr 2018.

- [2] H. Abdalla, F. Aharonian, F. Ait Benkhali, E. O. Angüner, M. Arakawa, C. Arcaro, C. Armand, M. Arrieta, M. Backes, and et al. Particle transport within the pulsar wind nebula hess j1825–137. *Astronomy and Astrophysics*, 621:A116, Jan 2019.

- [3] A. U. Abeysekara, A. Albert, R. Alfaro, C. Alvarez, J. D. Álvarez, R. Arceo, J. C. Arteaga-Velázquez, H. A. Ayala Solares, A. S. Barber, B. Baughman, and et al. The 2hwc hawc observatory gamma-ray catalog. *The Astrophysical Journal*, 843(1):40, Jun 2017.

- [4] A.U. Abeysekara, A. Albert, R. Alfaro, J.R. Angeles Camacho, J.C. Arteaga-Velázquez, K.P. Arunbabu, D. Avila Rojas, H. A. Ayala Solares, V. Baghmanyán, E. Belmont-Moreno, and et al. Multiple galactic sources with emission above 56 tev detected by hawc. *Physical Review Letters*, 124(2), Jan 2020.

- [5] A. Acharyya, R. Adam, C. Adams, I. Agudo, A. Aguirre-Santaella, R. Alfaro, J. Alfaro, C. Alispach, R. Aloisio, R. Alves Batista, and et al. Sensitivity of the cherenkov telescope array to a dark matter signal from the galactic centre. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021(01):057–057, Jan 2021.
- [6] P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, R. B. Barreiro, J. G. Bartlett, and et al. Planck2015 results. *Astronomy and Astrophysics*, 594:A13, Sep 2016.
- [7] A. Albert, R. Alfaro, C. Alvarez, J. C. Arteaga-Velázquez, K. P. Arunbabu, D. Avila Rojas, H. A. Ayala Solares, E. Belmont-Moreno, S. Y. BenZvi, C. Brisbois, and et al. Search for gamma-ray spectral lines from dark matter annihilation in dwarf galaxies with the high-altitude water cherenkov observatory. *Physical Review D*, 101(10), May 2020.
- [8] A. Albert, R. Alfaro, C. Alvarez, J. D. Álvarez, J. R. Angeles Camacho, J. C. Arteaga-Velázquez, K. P. Arunbabu, D. Avila Rojas, H. A. Ayala Solares, V. Baghmany, and et al. Evidence that ultra-high-energy gamma rays are a universal feature near powerful pulsars. *The Astrophysical Journal Letters*, 911(2):L27, Apr 2021.
- [9] C. Amole, M. Ardid, I. J. Arnquist, D. M. Asner, D. Baxter, E. Behnke, M. Bressler, B. Broerman, G. Cao, C. J. Chen, and et al. Dark matter search results from the complete exposure of the pico-60 c3f8 bubble chamber. *Physical Review D*, 100(2), Jul 2019.

- [10] Heinz Andernach and Fritz Zwicky. English and spanish translation of zwicky's (1933) the redshift of extragalactic nebulae, 2017.
- [11] A. Arbey and F. Mahmoudi. Dark matter and the early universe: A review. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 119:103865, Jul 2021.
- [12] Celine Armand, Eric Charles, Mattia di Mauro, Chiara Giuri, J. Patrick Harding, Daniel Kerszberg, Tjark Miener, Emmanuel Moulin, Louise Oakes, Vincent Poireau, Elisa Pueschel, Javier Rico, Lucia Rinchiuso, Daniel Salazar-Gallegos, Kirsten Tollefson, and Benjamin Zitzer. Combined dark matter searches towards dwarf spheroidal galaxies with fermi-lat, hawc, h.e.s.s., magic, and veritas, 2021.
- [13] R. Atkins, W. Benbow, D. Berley, E. Blaufuss, J. Bussons, D. G. Coyne, R. S. Delay, T. DeYoung, B. L. Dingus, D. E. Dorfan, and et al. Observation of tev gamma rays from the crab nebula with milagro using a new background rejection technique. *The Astrophysical Journal*, 595(2):803–811, Oct 2003.
- [14] Martin Bauer. *Yet Another Introduction to Dark Matter [E-Book] : The Particle Physics Approach*. Lecture Notes in Physics ;. Springer, Cham, 1st edition 2019. edition, 2019. English.
- [15] Rainer Beck and Richard Wielebinski. Magnetic fields in galaxies. *Planets, Stars and Stellar Systems*, page 641–723, 2013.
- [16] Javier Bergasa. Laplace: Laplace, el matemático de los cielos. Nivola, 2003.
- [17] Gianfranco Bertone and Dan Hooper. History of dark matter. *Reviews of Modern Physics*, 90(4), Oct 2018.

- [18] GIANFRANCO BERTONE and DAVID MERRITT. Dark matter dynamics and indirect detection. *Modern Physics Letters A*, 20(14):1021–1036, May 2005.
- [19] Xiaojun Bi, Yu Gao, Junguang Guo, Nick Houston, Tianjun Li, Fangzhou Xu, and Xin Zhang. Axion and dark photon limits from crab nebula high-energy gamma rays. *Physical Review D*, 103(4), Feb 2021.
- [20] Nikita Blinov, Matthew J. Dolan, Patrick Draper, and Jonathan Kozaczuk. Dark matter targets for axionlike particle searches. *Physical Review D*, 100(1), Jul 2019.
- [21] Quentin Bonnefoy. Topics beyond the Standard Model : axions, supersymmetry, string theory. *Université Paris-Saclay*, 2019.
- [22] Zhen Cao and F.A Aharonian. Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources. *Nature*, 594(7861):33–36, January 2021.
- [23] G. Carosi, A. Friedland, M. Giannotti, M. J. Pivovarov, J. Ruz, and J. K. Vogel. Probing the axion-photon coupling: phenomenological and experimental perspectives. a snowmass white paper, 2013.
- [24] C. A. Chacón-Cardona and R. A. Casas-Miranda. Millennium simulation dark matter haloes: multifractal and lacunarity analysis and the transition to homogeneity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(3):2613–2624, Nov 2012.
- [25] Wei Cheng, Ligong Bian, and Yu-Feng Zhou. Axion-like particle inflation and dark matter, 2021.

- [26] Tim Childers. Vera rubin: The astronomer who brought dark matter to light. <https://www.space.com/vera-rubin.html>.
- [27] Kiwoon Choi, Sang Hui Im, and Chang Sub Shin. Recent progress in the physics of axions and axion-like particles. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 71(1), Jun 2021.
- [28] Sergio Colafrancesco. Dark matter in modern cosmology. ., 2010.
- [29] J. J. Condon and A. M. Matthews. λ cdm cosmology for astronomers. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130(989):073001, Jun 2018.
- [30] Jan Conrad. Statistical issues in astrophysical searches for particle dark matter. *Astroparticle Physics*, 62:165–177, Mar 2015.
- [31] Nathaniel Craig. The state of supersymmetry after run i of the lhc, 2014.
- [32] Francis-Yan Cyr-Racine, Roland de Putter, Alvis Raccanelli, and Kris Sigurdson. Constraints on large-scale dark acoustic oscillations from cosmology. *Physical Review D*, 89(6), Mar 2014.
- [33] Jonathan H. Davis. The past and future of light dark matter direct detection. *International Journal of Modern Physics A*, 30(15):1530038, May 2015.
- [34] J. G. de Swart, G. Bertone, and J. van Dongen. How dark matter came to matter. *Nature Astronomy*, 1(3), Mar 2017.
- [35] Jaco de Swart. Deciphering dark matter: the remarkable life of fritz zwicky. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02603-7>.

- [36] Scott Dodelson. *Modern cosmology*. Academic Press, San Diego, CA, 2003.
- [37] Leanne D Duffy and Karl van Bibber. Axions as dark matter particles. *New Journal of Physics*, 11(10):105008, Oct 2009.
- [38] Christos Eleftheriadis. Results on axion physics from the cast experiment at cern, 2007.
- [39] V. V. Flambaum and I. B. Samsonov. Ultralight dark photon as a model for early universe dark matter. *Physical Review D*, 100(6), Sep 2019.
- [40] Nicolao Fornengo. Status and perspectives of indirect and direct dark matter searches. *Advances in Space Research*, 41(12):2010–2018, Jan 2008.
- [41] Alberto Franceschini and Giulia Rodighiero. The extragalactic background light revisited and the cosmic photon-photon opacity. *Astronomy and Astrophysics*, 603:A34, Jul 2017.
- [42] J. A. García-González, M. M. González, and N. Fraija. Gamma-ray light curves for the bl lac mrk 421 using hawc data derived with a new approach, 2019.
- [43] Jun-Guang Guo, Hai-Jun Li, Xiao-Jun Bi, Su-Jie Lin, and Peng-Fei Yin. Implications of axion-like particles from the fermi-lat and h.e.s.s. observations of pg 1553+113 and pks 2155-304. *Chinese Physics C*, 45(2):025105, Feb 2021.
- [44] Sergio Hernández. Búsquedas indirectas de materia oscura en el cúmulo de galaxias virgo con el observatorio hawc. *Tesis de Maestría*, 2018.

- [45] Stéphane Ilić, Michael Kopp, Constantinos Skordis, and Daniel B. Thomas. Dark matter properties through cosmic history. *Physical Review D*, 104(4), Aug 2021.
- [46] Satoshi Iso, Kiyoharu Kawana, and Kengo Shimada. Qcd axions and cmb anisotropy. *Physical Review D*, 102(10), Nov 2020.
- [47] Gerard Jungman, Marc Kamionkowski, and Kim Griest. Supersymmetric dark matter. *Physics Reports*, 267(5-6):195–373, Mar 1996.
- [48] Xin Li, Li Tang, and Hai-Nan Lin. Comparing dark matter models, modified newtonian dynamics and modified gravity in accounting for galaxy rotation curves. *Chinese Physics C*, 41(5):055101, May 2017.
- [49] Valerio Marra and Eddy G Chirinos Isidro. A first model-independent radial bao constraint from the final boss sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487(3):3419–3426, Jun 2019.
- [50] David J. E. Marsh. Axions and alps: a very short introduction, 2017.
- [51] Mattia Di Mauro, Silvia Manconi, Michela Negro, and Fiorenza Donato. Investigating γ -ray halos around three hawc bright sources in fermi-lat data, 2020.
- [52] Samuel D. McDermott and Samuel J. Witte. Cosmological evolution of light dark photon dark matter. *Physical Review D*, 101(6), Mar 2020.
- [53] Mordehai Milgrom. Mond vs. dark matter in light of historical parallels. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 71:170–195, Aug 2020.

- [54] Alessandro Mirizzi and Daniele Montanino. Stochastic conversions of tev photons into axion-like particles in extragalactic magnetic fields. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2009(12):004–004, Jan 2017.
- [55] Tobias Mistele. Cherenkov radiation from stars constrains hybrid mond-dark-matter models, 2021.
- [56] Viviana Niro. Detecting the brightest hawc sources with icecube in the upcoming years. *Physical Review D*, 103(10), May 2021.
- [57] S.E.A. Orrigo. Direct dark matter search with xenon100. *EPJ Web of Conferences*, 121:06006, 2016.
- [58] Roberto D. Peccei. The strong cp problem and axions. *Axions*, page 3–17, 2008.
- [59] Leandros Perivolaropoulos and Foteini Skara. Challenges for λ cdm: An update, 2021.
- [60] Andrew Powell. The cosmology and astrophysics of axion-like particles, 2016.
- [61] John Preskill, Mark B. Wise, and Frank Wilczek. Cosmology of the invisible axion. *Physics Letters B*, 120(1-3):127–132, January 1983.
- [62] A. Ringwald. Axions and axion-like particles, 2014.
- [63] M. C. RODRIGUEZ. History of supersymmetric extensions of the standard model. *International Journal of Modern Physics A*, 25(06):1091–1121, Mar 2010.

- [64] Alexandra Rodriguez Romero. La astronomía maya. <https://web.archive.org/web/20151003025929/http://www.danielmarin.es/hdc/astronomiamaya.htm>.
- [65] Ashley J Ross, Julian Bautista, Rita Tojeiro, Shadab Alam, Stephen Bailey, Etienne Burtin, Johan Comparat, Kyle S Dawson, Arnaud de Mattia, Hélión du Mas des Bourboux, and et al. The completed sdss-iv extended baryon oscillation spectroscopic survey: Large-scale structure catalogues for cosmological analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498(2):2354–2371, Sep 2020.
- [66] Leszek Roszkowski, Enrico Maria Sessolo, and Sebastian Trojanowski. Wimp dark matter candidates and searches—current status and future prospects. *Reports on Progress in Physics*, 81(6):066201, May 2018.
- [67] Masahiko Saito, Ryu Sawada, Koji Terashi, and Shoji Asai. Discovery reach for wino and higgsino dark matter with a disappearing track signature at a 100 tev pp collider. *The European Physical Journal C*, 79(6), Jun 2019.
- [68] Robert H. Sanders and Stacy S. McGaugh. Modified newtonian dynamics as an alternative to dark matter. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 40(1):263–317, Sep 2002.
- [69] Andres Sandoval. HAWC Upgrade with a Sparse Outrigger Array. *PoS, ICRC2015:977*, 2016.
- [70] Yoshiaki Sofue and Vera Rubin. Rotation curves of spiral galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 39(1):137–174, Sep 2001.

- [71] Daniel Styer. A brief history of quantum mechanics. <https://www2.oberlin.edu/physics/dstyler/StrangeQM/history.html>.
- [72] Thomas A. Trainor. A critical review of rhic experimental results. *International Journal of Modern Physics E*, 23(08):1430011, Aug 2014.
- [73] LUCA VISINELLI. Axion-electromagnetic waves. *Modern Physics Letters A*, 28(35):1350162, Oct 2013.
- [74] Bryan Walter. A history of astronomy. <https://web.archive.org/web/20151003025929/http://www.danielmarin.es/hdc/astronomiamaya.htm>.
- [75] David H. Weinberg, James S. Bullock, Fabio Governato, Rachel Kuzio de Naray, and Annika H. G. Peter. Cold dark matter: Controversies on small scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(40):12249–12255, Feb 2015.
- [76] Javier Yanes. Lord kelvin y el fin de la física que nunca predijo. <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/lord-kelvin-y-el-fin-de-la-fisica-que-nunca-predijo>.
- [77] V. ZACEK. Dark matter. *Fundamental Interactions*, Dec 2007.
- [78] Daniel Ávila. Búsqueda de emisión de alta energía (> 1 tev) en las radio galaxias m87, ngc1275, 3c 264, pks 0625 35. *Tesis de Maestría*, 2018.