



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE

FACULTAD DE CIENCIAS

Departamento de Física

**LÍMITES PARA DETECCIÓN INDIRECTA DE
MATERIA OSCURA A TRAVÉS DE RAYOS GAMMA
Y NEUTRINOS**

Tesina para optar al grado de
Licenciado en Física con Mención en Astronomía

MARCELO RÍOS ROCHA

Profesores guía:

Dr. Roberto Lineros Rodríguez.

Dr. César Bonilla Díaz.

Antofagasta, Chile.

Julio, 2023

*Esta tesina está dedicada a todas las personas que me apoyaron a lo largo de esta
carrera.*

Agradecimientos

- Al Proyecto Fondecyt Iniciación, No. 11201240, "Nu Physics", por el apoyo económico.
- Al Departamento de Física de la UCN, por la facilitación de sus instalaciones.

Contenido

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos. | ii |
| Resumen. | v |
| Introducción. | viii |
| 1. Introducción al Modelo Estándar | 1 |
| 1.1. Fuerzas fundamentales | 2 |
| 1.1.1. Fuerza nuclear fuerte | 2 |
| 1.1.2. Fuerza nuclear débil | 3 |
| 1.1.3. Fuerza electromagnética | 4 |
| 1.1.4. Fuerza gravitatoria | 5 |
| 1.2. Partículas del modelo estándar | 5 |
| 1.2.1. Fermiones | 6 |
| 1.2.2. Bosones | 7 |
| 1.2.3. Lagrangiano del Modelo Estándar | 9 |
| 2. Más allá del Modelo Estándar | 11 |
| 2.1. Materia Oscura | 12 |
| 2.2. Candidatos a Materia Oscura | 15 |
| 2.2.1. WIMP | 15 |
| 2.3. Densidades de Materia Oscura en la Vía Láctea | 17 |
| 2.3.1. Densidades tipo <i>Cuspy</i> | 17 |
| 2.3.2. Densidades tipo <i>Cored</i> | 18 |
| 2.4. Densidades desde el punto de vista de la Tierra | 19 |
| 2.4.1. Coordenadas galácticas | 19 |

| | |
|---|-----------|
| 3. Astropartículas | 23 |
| 3.1. Lluvias de astropartículas | 23 |
| 3.1.1. Neutrinos | 25 |
| 3.1.2. Rayos Gamma | 26 |
| 3.2. Producción de Astropartículas | 26 |
| 3.2.1. Decaimiento de materia oscura | 27 |
| 3.2.2. Aniquilación de materia oscura | 28 |
| 3.3. Búsqueda experimental de Materia Oscura | 29 |
| 3.3.1. Detección directa | 29 |
| 3.3.2. Detección indirecta | 29 |
| 4. Astropartículas provenientes del Centro Galáctico | 34 |
| 4.1. Mapeando el cielo utilizando healpix | 34 |
| 4.2. Distribución de la materia oscura en la Vía Láctea | 36 |
| 4.3. Flujos para aniquilación y decaimiento de materia oscura | 37 |
| 4.4. Resultados y Discusión | 40 |
| 4.4.1. Resultados para flujos de fotones | 42 |
| 4.4.2. Resultados para flujos de neutrinos | 48 |
| 5. Conclusiones | 51 |
| Bibliografía. | 53 |

Límites para detección indirecta de *materia oscura* a través de rayos gamma y neutrinos

Marcelo Ríos Rocha

Resumen

Este trabajo se enfoca en establecer límites para la detección indirecta de materia oscura mediante estudios de flujos de *Rayos Gamma* y *Neutrinos*, a través de la observación de astropartículas producidas por fuentes cósmicas.

Para lograr este objetivo, en nuestro estudio utilizamos dos perfiles que describen la distribución de densidad de materia oscura en la Vía Láctea: Einasto y Burkert. Dichos perfiles nos permiten realizar estimaciones de los flujos de Rayos Gamma o Neutrinos producidos por materia oscura.

En particular, nos enfocamos en un área de $15^\circ \times 15^\circ$ con centro en el centro galáctico observado desde la Tierra, ya que esto nos permite comparar nuestros resultados con los datos obtenidos por los experimentos Fermi-LAT para rayos gamma e IceCube para neutrinos.

Este trabajo se basa en la hipótesis de que la materia oscura presente en nuestra galaxia corresponde a la clase de DM conocida como *Partícula Masiva Débilmente Interactuante* (WIMP, por sus siglas en inglés) la cual es capaz de aniquilarse o desintegrarse.

Como resultado de la aniquilación o desintegración, esta produce distintas partículas, las cuales viajan por el espacio hasta llegar a la Tierra, donde podemos detectarlas de diferentes maneras, pueden ser detectadas directamente fuera de la atmósfera, como en el caso del experimento Fermi-LAT, o luego de interactuar con la atmosfera mediante los estudios de lluvias de astropartículas, estudios que se realizan utilizando la *Radiación de Cherenkov*. Estudiaremos estas situaciones y calcularemos valores como, la sección eficaz de aniquilación y el tiempo de vida media de la DM

Bajo las suposiciones anteriores y concentrándonos en partículas de materia oscura

con masas en la escala de los Giga-electronvolts (GeV), capaces de aniquilarse o desintegrarse, en los canales $b\bar{b}$, W^+W^- , $\tau^+\tau^-$ y $\mu\bar{\mu}$.

Para el caso de aniquilación de DM, nuestros resultados se obtuvieron gracias a una comparación directa de una simulación de flujos de rayos gamma, con los datos observacionales del experimento Fermi-LAT, lo que nos permitió estimar valores para la sección eficaz de aniquilación ($\langle\sigma v\rangle$) para distintas masas de materia oscura. Nuestros resultados para masas del orden de los 100 [GeV] sugieren una sección eficaz del orden de $\langle\sigma v\rangle = 8 \times 10^{-26}$ [cm³/s], para el canal $\tau^+\tau^-$, mientras que para los canales $b\bar{b}$, W^+W^- y $\mu\bar{\mu}$ se obtuvo un valor aproximado a $\langle\sigma v\rangle = 2 \times 10^{-25}$ [cm³/s]. Siendo el primer valor el más cercano a la sección eficaz de la abundancia fósil de materia oscura estimado por la misión Planck, $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26}$ [cm³/s].

Por otro lado, en el caso del decaimiento, nuestros resultados sugieren que, para los canales de decaimiento estudiados, la materia oscura es una partícula estable a escalas cosmológicas de tiempo. Esto debido a que el tiempo de vida media (τ_{DM}) estimado para la materia oscura, es mayor a la edad del universo, es decir, $\tau_{DM} > 4,5 \times 10^{17}$ segundos.

Además, los resultados obtenidos de nuestro análisis para el caso de los neutrinos muestran que es interesante continuar los estudios en el rango de energías entre los 10 [GeV] hasta los 100 [GeV]. Ya que los valores máximos para los flujos de neutrinos simulados, en ese rango de energías, se acercan bastante a los datos observados por el experimento IceCube, especialmente para masas de materia oscura en el rango de 30 [GeV] a 500 [GeV].

Finalmente, nos gustaría mencionar aún se puede mejorar el análisis en estos estudios, teniendo en cuenta la presencia de fuentes adicionales de rayos gamma y neutrinos, como lo son los púlsares, supernovas, entre otros. Fuentes que pueden afectar directamente las observaciones, por lo que deberían ser excluidas del análisis.

Además, en el caso de los flujos de neutrinos, es relevante considerar que el experimento IceCube es capaz de detectar y diferenciar los distintos tipos de sabores de neutrinos presentes en el *Modelo Estándar*, mientras que en este trabajo se

consideró un flujo de neutrinos el cual no distingue a los distintos tipos de neutrinos. Lo que da como resultado que el flujo que logramos estimar es notablemente superior a los flujos observado por el experimento IceCube, lo que implicaría que la materia oscura ya debería haberse detectado, lo que sabemos que aún no ocurre, por lo que en ese caso es importante tener en cuenta dicha consideración.

Introducción

A pesar del éxito que ha tenido el Modelo Estándar de la física de partículas tanto en sus aplicaciones como en sus predicciones, como lo fue el bosón de Higgs, aún existe una partícula que ha sido uno de los enigmas más intrigantes y desafiantes de la física moderna, la *materia oscura* (DM, por sus siglas en inglés). Actualmente, existen bastantes observaciones que están a favor de la presencia de materia oscura, como por ejemplo, los estudios de la curva de rotación de las galaxias [1], la dinámica de los cúmulos globulares [2] o las fluctuaciones del Fondo Cósmico de Microondas (CMB, por sus siglas en inglés) [3], entre otras. Pero a pesar de todos los esfuerzos realizados para su detección, la materia oscura no ha podido ser detectada, por lo que su naturaleza fundamental sigue siendo desconocida.

Uno de los candidatos más prometedores que se han teorizado para explicar su existencia son las llamadas *Partículas Masivas Débilmente Interactuantes* (WIMPs, por sus siglas en inglés), las cuales son partículas con masas en los rangos de los GeV-TeV. Los WIMPs son partículas capaces de interactuar a través de la fuerza nuclear débil y también mediante la fuerza de gravedad. Son partículas estables y eléctricamente neutras, por lo que estas podrían explicar la abundancia de materia oscura estimada por la misión Planck [3], $\Omega_{DM}h^2 \simeq 0,12$.

Se espera que en zonas de alta densidad de materia oscura, esta sea capaz de interactuar con partículas de su mismo tipo mediante aniquilación. En este caso, supondremos la presencia de un halo galáctico compuesto por materia oscura, en donde esta puede aniquilarse o incluso decaer, produciendo distintos tipos de partículas conocidas en el proceso. Estas partículas podrían incluir núcleos pesados, rayos gamma o neutrinos, entre otras. Por lo que detectar estas partículas podría darnos pistas para continuar con la búsqueda de la DM.

Para poder medir estas partículas conocidas, la Radiación de Cherenkov se presenta como una herramienta prometedora para abordar este desafío, ya que podría ser utilizada para detectar flujos de rayos gamma y neutrinos asociados con posibles interacciones de la materia oscura, lo que permitiría obtener información valiosa sobre sus propiedades y características.

Observatorios de rayos gamma de energías cercanas a los TeV parecen prometedores en esta búsqueda de la materia oscura. Entre estos están experimentos como *Fermi Gamma-ray Space Telescope* ([Fermi-LAT](#)) o el futuro *Southern Wide-field Gamma-ray Observatory* ([SWGGO](#)) y *Cherenkov Telescope Array* ([CTA](#)), los cuales podrían ser capaces de detectar partículas de muy alta energía e incluso, debido a su amplio campo de visión, podrían observar emisiones provenientes del halo de la Vía Láctea. El centro galáctico se destaca como punto de interés, debido a que se espera una alta concentración de materia oscura, como lo proponen los modelos de distribución de densidad de materia oscura de Einasto [4] y de Burkert [5].

En este trabajo se consideran las observaciones hechas por Fermi-LAT para flujos de rayos gamma de energías superiores a 1 GeV [6]. En particular, nos concentraremos en un área de $15^\circ \times 15^\circ$ respecto al centro de la Vía Láctea, con la intención de estimar flujos de rayos gamma o neutrinos producidos por la aniquilación o decaimiento de materia oscura.

Capítulo 1

Introducción al Modelo Estándar

El Modelo Estándar (ME) de la física de partículas es una teoría que describe las partículas fundamentales y las fuerzas que interactúan entre ellas, en donde dichas interacciones se suelen representar a través de diagramas de Feynman¹. El ME es el marco teórico más aceptado en la física de partículas y ha sido rigurosamente probado por experimentos durante décadas. Dicha teoría postula que todas las partículas elementales pueden clasificarse en: fermiones (espín 1/2) y bosones (espín entero) [7]. Los fermiones observados se dividen en quarks y leptones, y existen tres familias de cada grupo. Estas partículas forman la materia ordinaria. Por otro lado, los bosones son responsables de las interacciones fundamentales, como la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil. El ME también predice la existencia del bosón de Higgs, cuya existencia está relacionada con la masa a todas las demás partículas [8].

A pesar de su éxito, el modelo estándar tiene limitaciones y no explica algunos fenómenos como la materia oscura [2], masa de los neutrinos [7], gravedad, entre otros. Debido a ello, es de interés actual el estudio de nuevas teorías o extensiones del modelo estándar que nos ayuden a explicar lo que el ME no puede hacer por sí mismo.

¹Es una representación gráfica utilizada en la física para describir y calcular las interacciones entre partículas elementales.

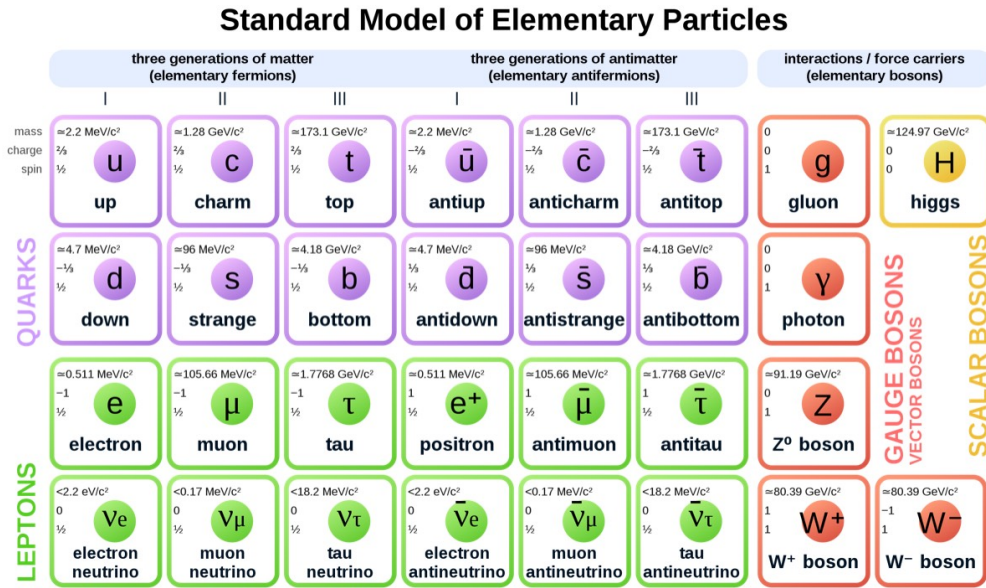


Figura 1.1: Partículas elementales que componen al modelo estándar de la física de partículas. Fuente: CPAN.

1.1. Fuerzas fundamentales

Las fuerzas fundamentales de la física de partículas son las fuerzas que actúan entre las partículas subatómicas, y son las responsables de la interacción entre ellas.

En la física se reconocen cuatro fuerzas fundamentales: la fuerza nuclear fuerte, nuclear débil, electromagnética y gravitatoria (esta última no se incluye dentro del ME).

1.1.1. Fuerza nuclear fuerte

La fuerza nuclear fuerte es la fuerza que mantiene unidos y estables los núcleos atómicos y es responsable de la cohesión de los protones y los neutrones, como se puede ver en la figura 1.2. Es la fuerza más fuerte de las cuatro, la cual es mediada por los gluones y solo actúa a distancias muy cortas, del orden de los 10^{-15} metros [7].

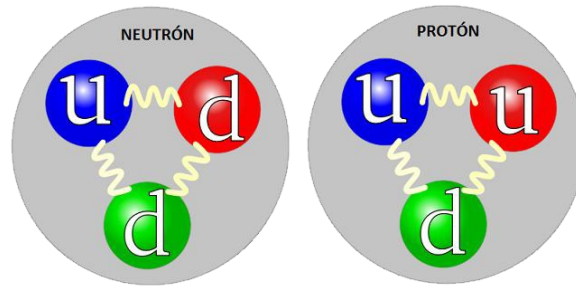


Figura 1.2: Representación de la estructura interna de los protones y neutrones. Aquí se puede apreciar su composición a partir de estas combinaciones de quarks Up (u) y Down (d). Los quarks se mantienen unidos gracias a la fuerza nuclear fuerte mediada por los gluones (línea ondulada). Fuente: [CPAN](#).

1.1.2. Fuerza nuclear débil

La fuerza nuclear débil es mediada por los bosones W^\pm , los cuales están cargados eléctricamente y los bosones Z , los cuales tienen carga eléctrica nula. Esta fuerza es esencial para entender el comportamiento de la materia a nivel subatómico y para explicar algunos fenómenos radiactivos en la naturaleza como la desintegración beta. La figura 1.3 muestra dicho proceso, el cual es mediado por un bosón W^- en el que un neutrón, el cual se compone de un quark up y dos quarks down, decae en un protón, compuesto por dos quarks up y un quark down, emitiendo un electrón y un antineutrino electrónico. Este proceso es importante en la naturaleza, ya que es responsable de la descomposición de elementos radiactivos y de la producción de energía en las estrellas.

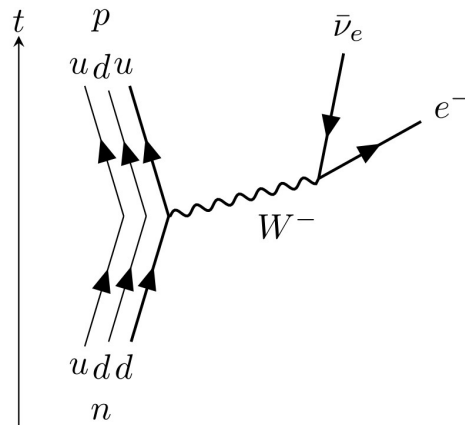


Figura 1.3: Diagrama de Feynman para la desintegración beta, en donde se muestra como un neutrón compuesto por dos quarks down y un quark up decae, mediante la interacción débil, en un protón, formado por un quark down y dos quarks up, por lo que mediante el bosón W^- se emite un anti-neutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$) y un electrón (e^-). Fuente: [tex.stackexchange](https://tex.stackexchange.com).

1.1.3. Fuerza electromagnética

La fuerza electromagnética es la responsable de la interacción entre las partículas cargadas eléctricamente, como los electrones y los protones, entre otras.

La fuerza electromagnética es una fuerza de larga distancia, que actúa entre partículas cargadas eléctricamente. La figura 1.4, muestra como dos electrones se repelen, interacción que se encuentra mediada por el intercambio de un fotón entre ambas partículas.

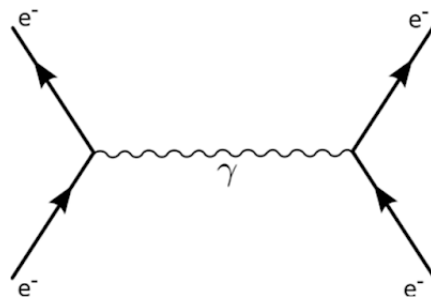


Figura 1.4: Diagrama de Feynman para la repulsión de dos electrones, en donde un electrón emite un fotón, el cual es absorbido por el otro electrón, modificando ambas trayectorias. Fuente: [Luque, Bartolo](#).

1.1.4. Fuerza gravitatoria

La fuerza gravitatoria es aquella que ejercen todos los objetos con masa, atrayéndolos entre sí. Es una fuerza muy débil en comparación con las otras tres fuerzas fundamentales. La formulación clásica para la fuerza de gravedad (F_g) entre dos cuerpos con masas m_1 y m_2 , separados por una distancia r , es mediante la ecuación 1.1, en donde G es la constante de gravitación universal, la que tiene un valor de $G = 6,67 \times 10^{-11} [Nm^2/kg^2]$ [9].

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.1)$$

La fuerza de gravedad no se encuentra descrita en el ME, pero no se descarta la hipótesis de que dicha fuerza podría estar mediada por una partícula aún no descubierta a la cual se le da el nombre de Gravitón.

1.2. Partículas del modelo estándar

En el Modelo Estándar, las partículas se clasifican en dos categorías caracterizadas según su estadística de espín [7]: fermiones, con espín semi entero, y bosones, con espín entero o nulo, como muestra la figura 1.1.

Los fermiones, como podemos ver en la figura 1.1, tienen espín semi-entero y obedecen la estadística de Fermi-Dirac, la que determina el color de los quarks, como se aprecia en la figura 1.2. Y también obedecen al principio de exclusión de Pauli, el cual establece que dos fermiones idénticos no pueden ocupar el mismo estado cuántico simultáneamente. Esto lleva a que los electrones llenen los orbitales de los átomos de manera ordenada, lo que a su vez determina las propiedades químicas de los elementos.

Por otro lado, los bosones tienen espín entero, como los fotones, gluones y los bosones W^\pm y Z , o espín nulo, como el bosón de Higgs. Obedecen la estadística de Bose-Einstein, esto significa que un número ilimitado de bosones puede ocupar el mismo estado cuántico al mismo tiempo, lo que conduce a fenómenos como la superconductividad.

1.2.1. Fermiones

Los fermiones son partículas que tienen espín semi-entero ($1/2, 3/2, \dots$), están divididos en tres familias o generaciones, cada una compuesta por partículas con características similares pero diferentes masas. Los fermiones son los bloques básicos para poder construir la materia y se dividen en dos categorías: quarks y leptones. Estos pueden interactuar mediante colisiones, aniquilación o también se puede dar el caso de que una partícula inestable decaiga en partículas más livianas, como se puede ver en la figura 1.6, en donde un muón cargado negativamente (μ^-) decae en un bosón W^- y un neutrino muónico (ν_μ).

Asimismo, es importante resaltar la existencia de las antipartículas, las cuales, como podemos ver en la figura 1.1, son partículas idénticas a su contraparte pero con carga eléctrica opuesta. Generalmente se denotan por la misma simbología que su contraparte, pero barradas, como puede ser el caso del quark anti-down (\bar{d}) presente en la figura 1.5

Quarks

Los quarks son partículas con espín $1/2$ que experimentan la fuerza nuclear fuerte y se combinan para formar hadrones, los cuales se pueden clasificar en mesones, que se componen de un par quark-antiquark y bariones, que se componen de combinaciones de tres quarks como los protones y neutrones en los núcleos atómicos. Hay seis tipos diferentes de quarks, cada uno con una carga eléctrica fraccionaria, esto debido a que los quarks no se encuentran libres, sino que en estados ligados para poder permanecer estables en el tiempo.

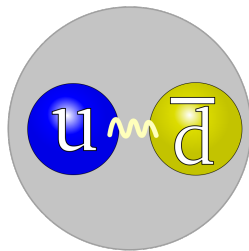


Figura 1.5: Estructura de un mesón pi cargado positivamente (π^+), el cual está compuesto por un quark up y un quark anti-down. Fuente: [Wikipedia Commons](#).

La figura 1.2 muestra un ejemplo de las interacciones entre quarks, donde podemos ver la estructura interna de los protones y los neutrones formados por la combinación de tres quarks, mientras que en la figura 1.5 podemos ver la estructura interna de un mesón pi, el cual está compuesto por un quark up y un quark anti-down.

Leptones

Los leptones son partículas con espín 1/2 que no experimentan la fuerza nuclear fuerte y son responsables de la interacción electromagnética y la fuerza nuclear débil. Hay seis tipos diferentes de leptones con sus respectivas antipartículas en donde, debido a la carga eléctrica nula de los neutrinos, actualmente se estudia la posibilidad de que sean su propia antipartícula. Algunas interacciones que implican leptones las podemos ver en la figura 1.3 y en la figura 1.6, en las que se producen bosones W^- debido al decaimiento beta y al decaimiento de un muón cargado negativamente (μ^-), respectivamente.

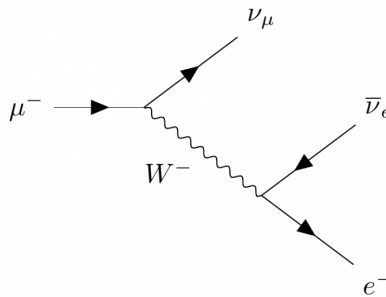


Figura 1.6: Diagrama de Feynman para el decaimiento del muón cargado negativamente μ^- a un neutrino muónico (ν_μ) y un bosón W^- el cual luego decae en un electrón (e^-) y un anti-neutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$). Fuente: [MICE](#).

1.2.2. Bosones

Los bosones son partículas que tienen espín entero (0, 1, 2, ...) y son responsables de transmitir fuerzas entre partículas. Hay cuatro bosones fundamentales en el Modelo Estándar:

Fotón

El fotón (γ) es un bosón de espín 1 el cual transmite la fuerza electromagnética y se encuentra presente en fenómenos como el *bremstrahlung* (o radiación de frenado) [10], como muestra la figura 1.7, y el efecto fotoeléctrico [11].

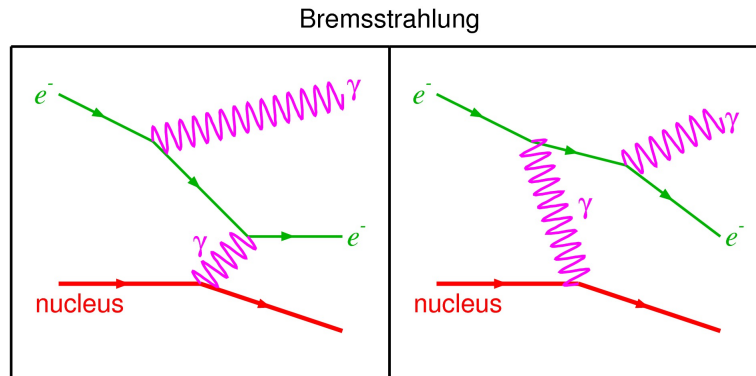


Figura 1.7: Representación gráfica de la radiación de frenado en donde un electrón es afectado por un campo electromagnético, por lo que experimenta una aceleración negativa perdiendo energía cinética y, por conservación de energía, emitiendo un fotón. Fuente: [physics.stackexchange](https://physics.stackexchange.com).

Bosones W^\pm y Z

También con espín 1, los W^\pm y Z son los bosones que transmiten la fuerza nuclear débil. La fuerza nuclear débil es responsable de la desintegración beta 1.3, donde un neutrón se convierte en un protón y emite un electrón junto con un antineutrino electrónico.

Gluón

El gluón, con espín 1, es el bosón que transmite la fuerza nuclear fuerte. Interactúa con los quarks, manteniéndolos unidos, como es en el caso los protones y neutrones dentro del núcleo, como se puede apreciar en la figura 1.2 en donde los gluones, representados por las líneas onduladas, son los responsables de la estabilidad de dichas partículas.

Higgs

El bosón de Higgs, el único del Modelo Estándar con espín 0, es responsable de conferir masa a otras partículas elementales mediante su interacción con ellas a través un proceso conocido como el mecanismo de Higgs [8]. Este proceso es el que logra explicar por qué algunas partículas son masivas, mientras que otras, como los fotones, no tienen masa.

1.2.3. Lagrangiano del Modelo Estándar

El Lagrangiano del Modelo Estándar de la física de partículas es una descripción matemática que especifica las simetrías y las interacciones de las partículas elementales antes descritas. Este es fundamental en la formulación de la teoría cuántica de campos y juega un papel crucial en la predicción de los fenómenos físicos observables.

Esta formulación contiene términos que describen las partículas fundamentales (Ψ) y las fuerzas que actúan entre ellas (G , W y B). Estos términos se agrupan según las simetrías e interacciones, como podemos ver a continuación [12];

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{dyn} + \mathcal{L}_{int} + \mathcal{L}_Y + \mathcal{L}_{Higgs} \quad (1.2)$$

En donde,

$$\mathcal{L}_{dyn} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^A G^{A\mu\nu} - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}, \quad (1.3)$$

$$\mathcal{L}_{int} = i\bar{\Psi}\gamma^\mu D_\mu\Psi, \quad (1.4)$$

$$\mathcal{L}_Y = (Y_{ij}^d\bar{Q}_i\Phi d_{Rj} + h.c.) + (Y_{ij}^\ell\bar{L}_i\Phi\ell_{Rj} + h.c.) + (Y_{ij}^u\bar{Q}_i\tilde{\Phi}u_{Rj} + h.c.), \quad (1.5)$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = (D_\mu\Phi)^\dagger D^\mu\Phi - V(\Phi), \quad (1.6)$$

con $i = 1, 2, 3$, representando a las tres familias de quarks, $\Psi = (Q_i, L_i, u_{R_i}, d_{R_i}, \ell_{R_i})$, en donde $\ell_{R_i} = (e_R, \mu_R, \tau_R)$, $u_{R_i} = (u_R, c_R, t_R)$, $d_{R_i} = (d_R, s_R, b_R)$ y $\tilde{\Phi} = i\sigma^2\Phi^*$. Y representan diferentes partes del Lagrangiano.

- \mathcal{L}_{dyn} , representa la parte dinámica producida por los bosones.
- \mathcal{L}_{int} , es la parte del Lagrangiano que nos describe las interacciones de los fermiones y bosones.

- \mathcal{L}_Y , es el conocido como sector de Yukawa o Lagrangiano de Yukawa y es el responsable de describir las interacciones entre el bosón de Higgs y las demás partículas para poder generar los términos de masa.
- \mathcal{L}_{Higgs} , también llamado el sector escalar, es el término que nos indica la física relacionada con el campo escalar relacionado con el Higgs.

La estructura matemática de este lagrangiano se basa en una renormalización de los operadores de la teoría de Yang-Mills basada en un grupo llamado *Grupo de Gauge*, representado de la siguiente manera:

$$G = SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \tag{1.7}$$

Donde cada simetría será asociada a distintas interacciones,

$SU(2)_L \otimes U(1)_Y$: asociada a las interacciones **Electrodébiles**
 $SU(3)_C$: asociada a la **Fuerza Nuclear Fuerte**

Con Y representando la hipercarga, L la componente *Left-Handed* y C el color.

En este trabajo no nos centraremos en la parte cuantitativa del modelo estándar, por lo que no utilizaremos dicho Lagrangiano para los cálculos y procedimientos realizados. Pero es importante destacar este es el que describe todas las interacciones posibles entre las partículas mencionadas en la tabla 1.1 en donde se respetan las leyes de conservación de carga, momento lineal y energía total del sistema.

Capítulo 2

Más allá del Modelo Estándar

Cómo podemos ver, el modelo estándar de la física de partículas es una teoría que describe de muy buena forma el comportamiento de las partículas y las fuerzas fundamentales que interactúan en el universo conocido. Sin embargo, esta teoría tiene limitaciones y no puede explicar ciertos fenómenos observados en el universo, como la materia oscura (DM) [2], la energía oscura [3], la asimetría materia-antimateria, la masa de los neutrinos [7], entre otros.

Por lo tanto, la física más allá del modelo estándar se enfoca en buscar nuevas teorías que expliquen y resuelvan estas limitaciones del modelo estándar, extendiéndolo, pero sin desatender a los fenómenos ya observados, mediante la inclusión de nuevas simetrías o partículas.

En este trabajo hacemos uso también del modelo estándar cosmológico Λ CDM, el cual es un modelo en concordancia con la teoría del Big Bang y la consecuente expansión del universo, como podemos ver en la figura 2.1. Este es el modelo más simple que está de acuerdo con todas las observaciones. Λ hace referencia a la constante cosmológica introducida por Albert Einstein en su teoría de la Relatividad General y CDM hace referencia a la existencia de la materia oscura fría (*Cold Dark Matter*) como consecuencia de fluctuaciones de densidad y temperatura en el universo temprano. Dicha materia oscura fue producida únicamente en etapas tempranas del universo, por lo que la materia oscura presente hoy en día la llamamos *Abundancia fósil de materia oscura* (*Thermal relic abundance*), de la cual se estima un valor de abundancia de materia oscura de $\Omega_{DM}h^2 \simeq 0,12$ [3].

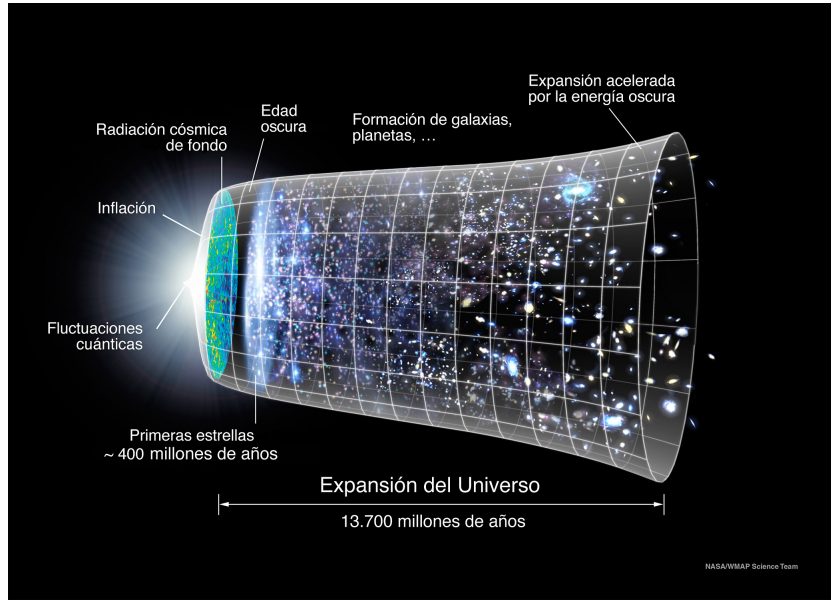


Figura 2.1: Big Bang y evolución del universo de acuerdo al modelo cosmológico Λ CDM. Fuente: [Wikipedia Commons](#).

Como podemos ver en la figura 1.1, aún no hay una partícula en el ME que cumpla con las condiciones de la materia oscura, por lo que se plantea la posibilidad de que la DM sea una partícula elemental aún no descubierta, lo que implicaría un cambio en el lagrangiano del modelo estándar, el cual se vería de la siguiente forma:

$$\mathcal{L}_{BSM} = \mathcal{L}_{SM} + \mathcal{L}_{MO}, \quad (2.1)$$

donde \mathcal{L}_{BSM} es nuestro nuevo lagrangiano, \mathcal{L}_{SM} es lo que ya conocemos de la ecuación 1.2 y \mathcal{L}_{MO} sería una nueva componente la cual describiría la dinámica e interacciones de la materia oscura.

Para este trabajo no es necesaria la estructura de la extensión al modelo estándar, pero suponemos su existencia y estableceremos restricciones experimentales según canales de aniquilación y decaimiento.

2.1. Materia Oscura

La materia oscura, en contraste con la materia que se describe en el Modelo Estándar, no puede ser percibida visualmente, ya que no emite ni refleja luz.

Además, se caracteriza por ser eléctricamente neutra, lo que implica que no interactúa mediante fuerzas electromagnéticas. Esta propiedad hace que su detección sea aún más complicada utilizando los instrumentos actuales. Los neutrinos, por su parte, son uno de los posibles candidatos para constituir la materia oscura, debido a que también son partículas neutras y apenas interactúan con la materia ordinaria, pero su presencia no basta para poder explicar toda la materia oscura presente en el universo.

Gracias a observaciones cosmológicas, sabemos que la materia oscura existe y se ha observado que la cantidad de materia presente en el universo no es suficiente para explicar la estructura y evolución observadas del universo. La materia oscura interactúa mediante la gravedad con la materia ordinaria y, de hecho, se cree que es la fuerza gravitatoria de la materia oscura la que mantiene unidas las galaxias y los cúmulos de galaxias. Algunas observaciones que confirman la existencia de materia oscura son el fenómeno de microlentes gravitatorias en objetos distantes [3], las anisotropías presentes en el fondo cósmico de microondas y los estudios de la curva de rotación de la galaxia [1]. La figura 2.2 muestra un gráfico de velocidad de rotación en función de la distancia al centro galáctico. Se muestran dos curvas principales, la de color azul nos indica los valores esperados para la rotación de la galaxia, considerando solamente las velocidades del bulbo y disco galáctico, mientras que la curva de color verde nos muestra los datos observacionales [1]. Se ve claramente que la curva observada es mayor a lo esperado, por lo que gracias a eso se infiere la existencia de DM presente en nuestra galaxia.

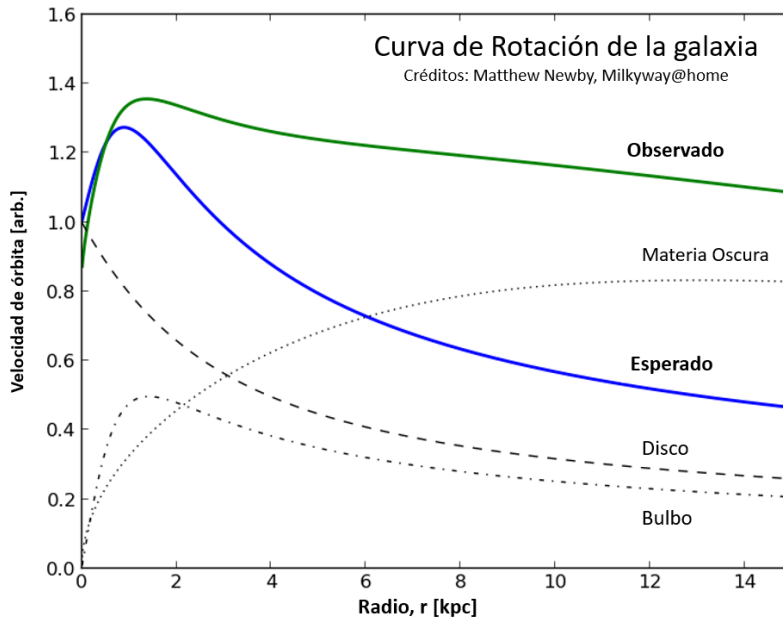


Figura 2.2: Gráfico en el que se representan distintas curvas que describen la velocidad de rotación de las distintas partes de la Vía Láctea en función de su distancia al centro galáctico. La línea azul (Esperado) describe la curva de rotación total de la galaxia esperada, considerando solamente la rotación del bulbo y del disco, sin considerar efectos de la DM. Mientras que la línea verde (Observado), corresponde a la curva de rotación de la galaxia observada, en donde se considera el efecto de la DM [1]. Fuente: [Professor Newby's](#).

Para poder plantear la materia oscura como partícula, esta tiene que cumplir obligatoriamente con algunas propiedades, las cuales se han establecido gracias a estudios realizados en diferentes experimentos, como pueden ser los ubicados en el Gran Colisionador de Hadrones (es inglés LHC), CMS y ATLAS, o el Telescopio Espacial Hubble, entre otros.

Dichas propiedades son:

1. Estable a escalas muy grandes de tiempo

La estabilidad de la materia oscura se refiere a la capacidad de las partículas para mantener su existencia durante largos períodos de tiempo sin desintegrarse o decaer en otras partículas, ya que esto modificaría la abundancia de DM en las galaxias y estructuras.

Esta propiedad es importante porque la materia oscura es esencial para

la formación de estructuras a gran escala en el universo, como galaxias y cúmulos de galaxias. Si las partículas de materia oscura se desintegraran rápidamente, no serían capaces de formar estructuras tan grandes, lo que afectaría significativamente nuestra comprensión del universo.

Por ende, esperamos que la materia oscura tenga un tiempo de vida media mayor a la edad del universo, la cual es del orden de $4,5 \times 10^{17}$ segundos [13].

2. Debe ser fría

Esto quiere decir que la velocidad a la que se mueve la materia oscura es no relativista, es decir, son partículas que se desplazaron muy lentamente luego del Big Bang y que actualmente continúan moviéndose a velocidades bajas. Esta idea es consistente con la forma en que se han formado las estructuras en el universo a gran escala, como las galaxias y los cúmulos de galaxias.

3. Eléctricamente neutra

Para que la materia oscura no interactúe electro-magnéticamente es necesario que estemos hablando de una partícula con carga neta nula, lo que sería compatible con las observaciones y experimentos que están en búsqueda de nuevas partículas. Esto implica que la materia oscura es transparente a la radiación electromagnética.

Observando la figura 1.1, nos podemos dar cuenta de que las únicas partículas que cumplen con dichas propiedades son los neutrinos, los cuales conforman una parte de la materia oscura, pero no toda.

2.2. Candidatos a Materia Oscura

Existen varias clases de partículas hipotéticas que se consideran candidatos a materia oscura debido a que cumplen en gran parte con las propiedades antes mencionadas. Los principales candidatos a DM los podemos encontrar en la figura 2.3, de las cuales nos centraremos únicamente en las partículas tipo WIMP las cuales se encuentran en el rango de masas de los GeV hasta los TeV.

2.2.1. WIMP

WIMP es el acrónimo de "Weakly Interacting Massive Particle" (Partícula Masiva Débilmente Interactuante). Se trata de una clase de partículas hipotéticas pro-

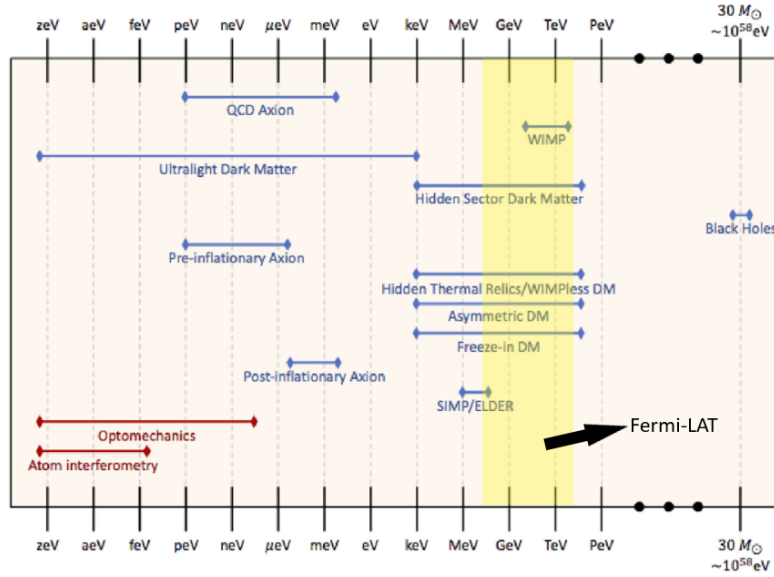


Figura 2.3: Candidatos a materia oscura clasificados por rango de masas, en donde el área destacada indica aproximadamente el rango de energías que son observables con el experimento Fermi-LAT. Fuente: [Quantum physics in space \[14\]](#).

puestas como candidatos de materia oscura, ya que cumplen con las propiedades antes descritas.

En conjunto con lo anterior, estas partículas cumplen las condiciones necesarias para ser detectados indirectamente, ya sea mediante interacciones relacionadas con la fuerza débil o mediante su interacción gravitatoria con la materia ordinaria. Se postula que estas partículas podrían ser producidas en el universo temprano y estar distribuidas de manera homogénea e isotrópica en el universo a escalas cosmológicas, lo que explicaría su presencia en la actualidad y su influencia en la estructura del universo a gran escala.

Para esta tesina utilizaremos datos de las observaciones del experimento Fermi-LAT, datos que se encuentran en un rango de energías muy cercanas a los WIMP como podemos ver en la figura 2.3, en donde podemos ver que el rango de energías para estas partículas se encuentra entre los GeV y los TeV. Dichas observaciones se realizan para rayos gamma provenientes de toda la esfera celeste, pero en nuestro caso nos importan únicamente los rayos provenientes del centro galáctico, por lo que necesitamos considerar la distribución de la materia oscura en la Vía Láctea.

2.3. Densidades de Materia Oscura en la Vía Láctea

La principal teoría que tendremos en cuenta es la que nos dice que la materia oscura forma una especie de halo esférico alrededor de nuestra galaxia. Se estima que la densidad de materia oscura en el halo de la Vía Láctea disminuye a medida que nos alejamos del centro galáctico.

Las observaciones y mediciones astronómicas de las curvas de rotación en conjunto con el efecto de lentes gravitacionales en galaxias indican que la densidad de materia oscura en el centro de la galaxia es relativamente alta, lo que significa que hay una mayor concentración de partículas de materia oscura en esa región. A medida que nos movemos hacia las regiones exteriores de la galaxia, la densidad de materia oscura disminuye gradualmente.

De acuerdo a lo anterior, se proponen dos tipos de densidades para la materia oscura presente en la galaxia, las densidades tipo *Cuspy* y *Cored*.

2.3.1. Densidades tipo *Cuspy*

La denominación *cuspy* o cónica se refiere a una distribución de materia oscura que muestra un aumento pronunciado en su densidad hacia el centro galáctico. Según algunos modelos teóricos, se espera una concentración alta de materia oscura en el núcleo de las galaxias. Se proponen distintos tipos de densidades de este tipo, entre las cuales destacamos la densidad de Navarro-Frenk-White (NFW) [15] y la densidad de Einasto (ρ_E) [4].

Para las densidades tipo cónicas solo consideraremos la densidad de Einasto, la cual se puede calcular utilizando la fórmula

$$\rho_E(r) = \rho_0 \exp \left\{ \frac{-2}{\alpha} \left[\left(\frac{r}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right] \right\}, \quad (2.2)$$

en este caso r_s representa el radio de escala, α representa una pendiente de densidad y ρ_0 es una densidad normalizada respecto a la distancia del sol al centro galáctico (r_\odot) de la siguiente manera

$$\rho_0 = \rho_{\odot} \exp \left\{ \frac{2}{\alpha} \left[\left(\frac{r_{\odot}}{r_s} \right)^{\alpha} - 1 \right] \right\}, \quad (2.3)$$

donde la densidad de materia oscura (ρ_{\odot}) es $0,39[\text{GeV}/\text{cm}^3]$ [3] y r_{\odot} será considerado con el valor de $8,33[\text{kpc}]$ [16].

2.3.2. Densidades tipo *Cored*

Debido a que las observaciones y mediciones de la dinámica estelar de la vía láctea no han proporcionado evidencia concluyente sobre las densidades de la materia oscura, también se proponen distribuciones de materia oscura que sugieren que esta podría ser más suave o menos densa en el centro de la galaxia en comparación a las densidades tipo *cuspy*. En donde cabe destacar que ambos modelos de densidades son compatibles con la dinámica galáctica. Se proponen distintos tipos de densidades de este tipo, entre las cuales destacamos la densidad isotérmica (ISO) [15] y la densidad de Burkert (ρ_B) [5].

En este caso solo consideraremos la densidad de Burkert, la cual se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho_B(r) = \frac{\rho_c r_c^3}{(r + r_c)(r^2 + r_c^2)}, \quad (2.4)$$

similar a la ecuación 2.2, r_c representa un radio de escala, en este caso llamado radio central, y ρ_c es una densidad normalizada a la distancia del sol respecto al centro galáctico, la cual se puede expresar de la siguiente forma:

$$\rho_c = \frac{\rho_{\odot}(r_{\odot} + r_c)(r_{\odot}^2 + r_c^2)}{r_c^3}, \quad (2.5)$$

en donde al igual que en el caso anterior, consideraremos los valores de $\rho_{\odot} = 0,39[\text{GeV}/\text{cm}^3]$ y $r_{\odot} = 8,33[\text{kpc}]$.

En la figura 2.4 se representa la densidad de materia oscura en función a la distancia al centro galáctico. Las curvas de color azul y verde corresponden a densidades tipo *Cuspy*, mientras que en las curvas de color naranja y rojo representan densidades de tipo *Cored*. En ambos casos se observa una mayor presencia de DM en el interior de la Vía Láctea respecto a la DM presente en el Sistema Solar (línea punteada), en el caso de las densidades de tipo *Cuspy* se observa una pendiente más pronunciada,

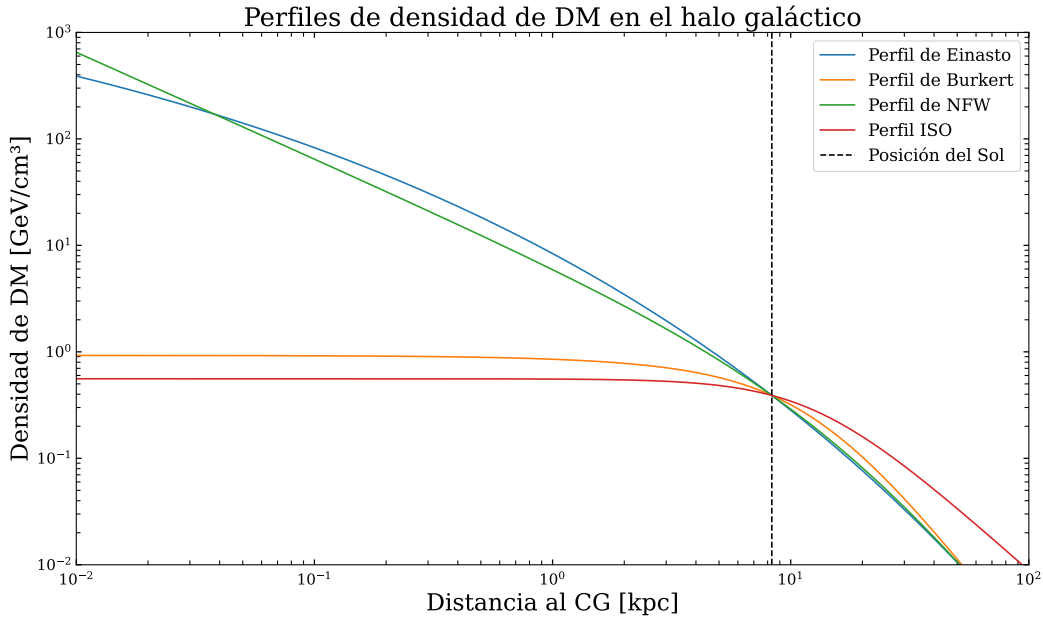


Figura 2.4: Perfiles de densidad de materia oscura presente en la Vía Láctea, en donde la línea punteada representa la posición del sol respecto al centro galáctico.

lo que implica que estas densidades predicen una mayor presencia de DM en el centro galáctico.

2.4. Densidades desde el punto de vista de la Tierra

Es importante considerar que al momento de realizar nuestras observaciones lo estamos haciendo desde el punto de vista de la Tierra, por lo que es necesario utilizar coordenadas galácticas para poder realizar los cálculos correctamente.

2.4.1. Coordenadas galácticas

Las coordenadas galácticas son un sistema de referencia utilizado para ubicar objetos y posiciones dentro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Se utilizan para describir la posición de cuerpos como estrellas, nebulosas y cúmulos estelares, en relación con el centro de la galaxia y otros puntos de referencia.

La figura 2.5 muestra una representación gráfica de las coordenadas galácticas,

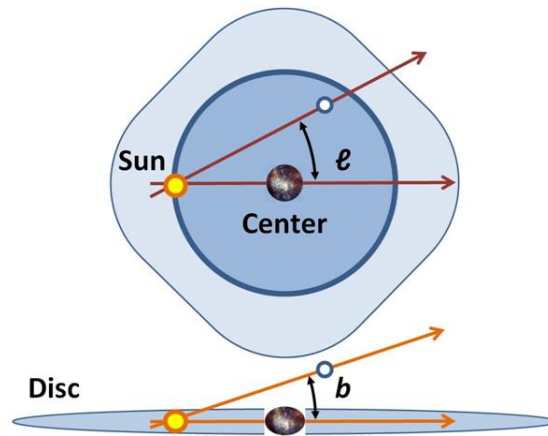


Figura 2.5: Representación gráfica de las coordenadas galácticas desde el punto de vista de la Tierra. Fuente: [Wikipedia Commons](#).

en donde el punto amarillo representa al Sol, la esfera central oscura representa al centro galáctico y el punto blanco representa al objeto de observación, el cual se encuentra a una longitud galáctica (ℓ) y una latitud galáctica (b) respecto al centro galáctico.

El sistema de coordenadas galácticas se basa en tres componentes principales:

- Longitud galáctica (ℓ): Es el ángulo medido en el plano galáctico desde una línea de referencia llamada *línea del nodo ascendente galáctico* hacia el este. Se mide en grados, y su rango va de 0° a 360° , formando un círculo completo alrededor del centro galáctico, en donde 0° corresponde al centro galáctico (GC).
- Latitud galáctica (b): Es el ángulo medido perpendicularmente al plano galáctico, la latitud galáctica varía de -90° a $+90^\circ$, donde 0° representa el plano galáctico y la constelación Sculptor representa al Polo Sur Galáctico (-90°).
- Distancia galáctica (r): Representa la distancia en kilopársecs medida a lo largo de la línea de visión desde la Tierra hacia el objeto de estudio.

Es importante tener en cuenta que las coordenadas galácticas son específicas de nuestra galaxia y pueden diferir de otros sistemas de coordenadas utilizados para mapear objetos en el espacio, como las coordenadas ecuatoriales utilizadas para ubicar objetos en el cielo en general.

Para tener una mejor visión de los perfiles de densidad de Burkert y Einasto en nuestra galaxia podemos utilizar los mapas presentes en la las figuras 2.6 y 2.7, donde se representan simulaciones para los perfiles de densidad de materia oscura de Einasto y de Burkert para los casos de aniquilación y decaimiento de DM. Los colores rojizos (externos) representan una baja densidad de materia oscura y los colores azulados (centrales) representan una alta presencia de materia oscura. Esto nos permite hacer una comparación entre las densidades tipo *cuspy*, en donde podemos apreciar una alta presencia de DM en el centro de la galaxia, la cual decae rápidamente al momento de considerar puntos lejanos de dicho centro, mientras que en las densidades tipo *cored* también podemos apreciar una alta presencia de DM en el centro de la galaxia, pero la presencia de esta decae suavemente al alejarnos del centro.

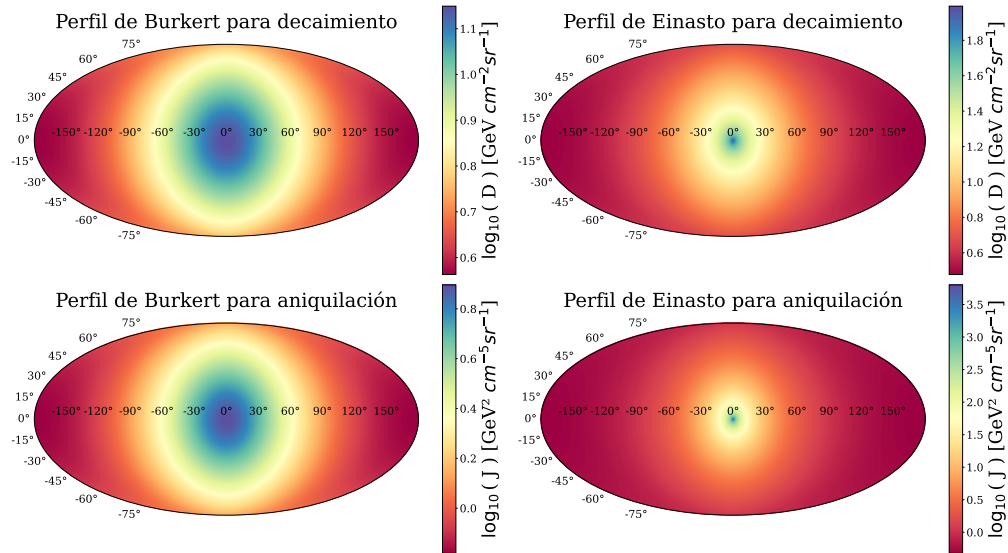


Figura 2.6: Simulación centrada en el GC para la presencia de DM presente en la Vía Láctea desde el punto de vista terrestre para el perfil de Burkert (izquierda) y el perfil de Einasto (derecha) tanto para decaimiento (arriba) y aniquilación (abajo) de partículas de DM, en donde los colores violetas indican una alta densidad de DM y los colores más rojos nos indican una baja presencia de DM.

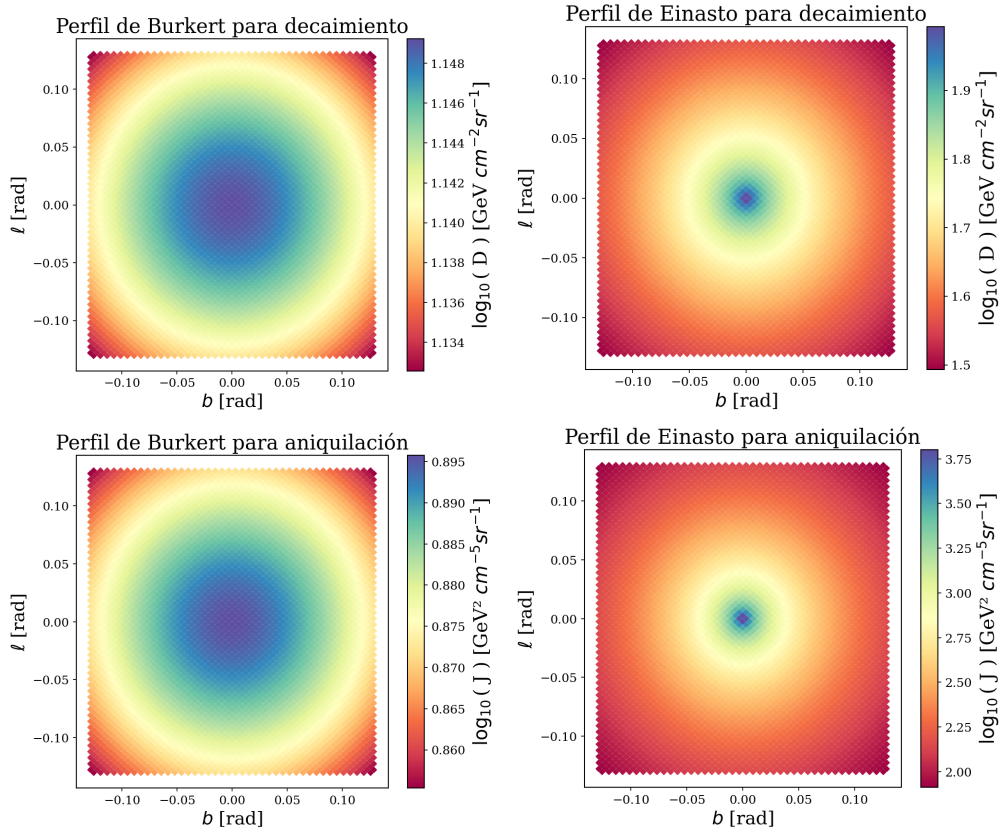


Figura 2.7: Simulación para un área de $15^\circ \times 15^\circ$ centrada en el GC para la presencia de DM presente en la Vía Láctea desde el punto de vista terrestre, para el perfil de Burkert (izquierda) y el perfil de Einasto (derecha) tanto para decaimiento (arriba) y aniquilación (abajo) de partículas de DM, en donde los colores violetas indican una alta densidad de DM y los colores más rojos nos indican una baja presencia de DM.

Para este trabajo consideraremos una región de interés (ROI) de $15^\circ \times 15^\circ$ centrada en el GC como podemos apreciar en la figura 2.7, esto debido a que queremos comparar nuestros resultados con los datos experimentales obtenidos por Fermi-LAT [6], experimento en el que se realizaron observaciones de rayos gamma en dicha ROI.

Capítulo 3

Astropartículas

Las astropartículas son partículas subatómicas que se encuentran en el universo y están relacionadas con fenómenos astrofísicos de alta energía. Estas partículas incluyen fotones, neutrinos y partículas cargadas, como electrones, protones y núcleos atómicos.

Son de particular interés para la astrofísica y la física de altas energías, ya que proporcionan información valiosa sobre los procesos y las condiciones extremas que ocurren en el universo. Estas partículas se generan en eventos cósmicos violentos y de muy alta energía, como explosiones de supernovas, colisiones de estrellas de neutrones, agujeros negros supermasivos o interacciones de partículas de alta energía en la atmósfera terrestre.

3.1. Lluvias de astropartículas

Las lluvias de astropartículas en la atmósfera de la Tierra se refieren al fenómeno en el cual partículas subatómicas de origen cósmico, como los rayos cósmicos, interactúan con la atmósfera terrestre y producen una cascada de partículas secundarias. Estas partículas secundarias pueden incluir electrones, muones, neutrinos y otros tipos de partículas como mesones π^- , π^0 , π^+ , entre otros.

La mayoría de las astropartículas que llegan a la Tierra son fotones, neutrinos y núcleos atómicos de alta energía que se originan fuera de nuestro sistema solar, como puede ser en explosiones de supernovas o en agujeros negros supermasivos.

Cuando estas astropartículas que viajan a velocidades relativistas ingresan a la atmósfera, interactúan con los átomos y moléculas presentes en ella. Estas interacciones pueden provocar la ionización de los átomos, la producción de partículas secundarias y la emisión de radiación electromagnética. A medida que estas partículas secundarias continúan su camino a través de la atmósfera, colisionan con otras partículas y generan una cascada de partículas cada vez más numerosas, pero de menor energía, como podemos ver en la figura 3.1.

Esta cascada de partículas se conoce como una *lluvia de astropartículas* y puede extenderse desde la parte superior de la atmósfera hasta la superficie de la Tierra. En algunos casos, estas partículas secundarias pueden ser detectadas por instrumentos sensibles en la superficie terrestre o en instalaciones subterráneas especiales diseñadas para estudiar las propiedades de las astropartículas y comprender su origen y naturaleza.

Para este trabajo nos centraremos principalmente en la detección de neutrinos y rayos gamma como productos finales de las interacciones de las astropartículas con la atmósfera terrestre, como podemos ver en la figura 3.1 en donde se muestra como un rayo gamma (γ) interactúa inicialmente con un núcleo atómico presente en la atmósfera, el cual libera un par electrón positrón los cuales continúan interactuando y por ende produciendo más electrones, positrones y fotones, entre otras partículas.

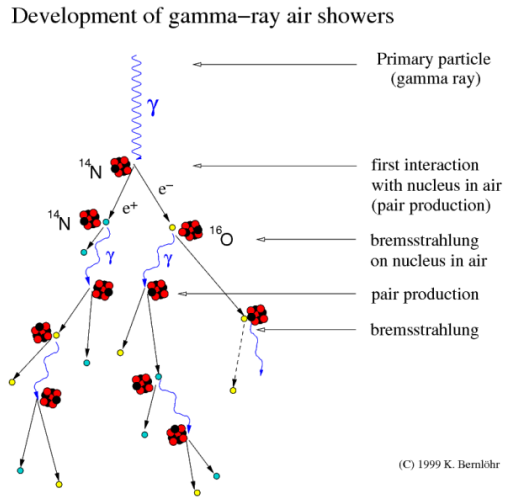


Figura 3.1: Ejemplo de lluvia de astropartículas producida por un rayo gamma que interactúa con la atmosfera terrestre. Fuente: [Cosmic-ray air showers](#), hecha por [Konrad Bernlöhr](#).

3.1.1. Neutrinos

Los neutrinos son partículas sin carga eléctrica y con masa muy pequeña, incluso en comparación con la del electrón, forman parte de los leptones, por lo que interactúan mediante la fuerza débil. Fueron postulados para explicar la energía perdida en la desintegración beta de los núcleos atómicos. Inicialmente, se pensaba que no poseían masa, pero estudios actuales indican que deberían poseer una masa cercana a 0,5 eV [7].

Fuentes de Neutrinos

Los neutrinos se generan en diversas fuentes, como el Sol, las estrellas, las explosiones de supernovas y los reactores nucleares, entre otros. También se producen en eventos de alta energía, como las colisiones de rayos cósmicos o rayos gamma con el gas presente en el medio interestelar o con la atmosfera terrestre. Otra manera de producir neutrinos es a través del decaimiento o aniquilación de partículas, como puede ser el decaimiento de los mesones π^+ y π^- como se muestra a continuación:

$$\pi^{+(-)} \rightarrow l^{+(-)} + \nu_l(\bar{\nu}_l) \quad (3.1)$$

donde $l = (e, \mu)$, es importante considerar que la vida media del muón es del orden de los microsegundos (10^{-6} s) [7] por lo que este puede decaer en electrones y neutrinos, como muestra la figura 1.6

Debido a su débil interacción con la materia, los neutrinos y los rayos gamma pueden atravesar grandes distancias y pasar a través de la materia sin interactuar casi en absoluto, incluso con espesores y densidades mayores a las del cuerpo humano o incluso muros metálicos con espesores del orden de varios centímetros.

3.1.2. Rayos Gamma

Los rayos gamma son fotones de alta energía (30 [MeV] - 300 [GeV]) y frecuencia en el espectro electromagnético desde los 10^{16} [Hz] hasta los 10^{29} [Hz] [17]. Son partículas sin masa que viajan a la velocidad de la luz y se generan en diversos procesos naturales y artificiales.

Fuentes de Rayos Gamma

Los Rayos Gamma pueden ser producidos por fuentes cósmicas como estrellas, supernovas, pulsares o agujeros negros y también pueden originarse a partir de la desintegración o aniquilación de partículas de muy alta energía, como puede ser en el caso del decaimiento del pion neutro (π^0) a dos fotones ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$). Los rayos gamma también pueden ser producidos artificialmente mediante técnicas como la radioterapia o la fisión nuclear en reactores nucleares.

3.2. Producción de Astropartículas

Actualmente, no se ha observado directamente la materia oscura y la desintegración o aniquilación de esta, pero existen varias teorías que sugieren que estas interacciones pueden dar lugar a la producción de partículas conocidas. Los productos de la desintegración o aniquilación de DM dependen de la naturaleza específica de dicha partícula y de las interacciones que pueda tener.

En este caso estudiaremos los modelos que nos dicen que la materia oscura podría producir tanto Rayos Gamma como Neutrinos debido a su desintegración o aniquilación.

3.2.1. Decaimiento de materia oscura

El decaimiento de la materia oscura es una posible interacción en la cual las partículas de materia oscura podrían transformarse en otras partículas del ME. La posibilidad de que la DM pueda decaer significaría que las partículas de materia oscura tienen una vida media finita y eventualmente se descomponen en otras partículas. El proceso de decaimiento puede ocurrir de diferentes maneras dependiendo de la naturaleza específica de la materia oscura.

Por lo que para describir el decaimiento de partículas de materia oscura provenientes de una región del espacio, es necesario utilizar el factor astronómico D , ecuación 3.2, el cual es un parámetro utilizado en la física de partículas y la cosmología. Este factor se utiliza para calcular la cantidad de radiación detectable producida por el decaimiento de partículas de materia oscura en diferentes objetos astronómicos, como galaxias, cúmulos de galaxias o el halo galáctico. El cálculo de dicho factor depende principalmente de la distribución de la materia oscura respecto al centro del objeto de estudio, como se describe en la siguiente expresión,

$$D(\Delta\Omega) = \int_{\Delta\Omega} \int_{\text{l.d.v.}} d\Omega ds \rho_{DM} [r(s, \Omega)], \quad (3.2)$$

donde ρ_{DM} es la densidad de materia oscura, medida en (GeV/cm^3) , Ω es el ángulo sólido, en estereorradianes (sr), considerado para la observación y la línea de vista (l.d.v.), medida en kilopársec (kpc), es la recta que une al observador y al objeto a estudiar.

En nuestro caso, consideraremos dicho factor para el cálculo del flujo de rayos gamma o neutrinos obtenidos por la desintegración de partículas de materia oscura (Φ_{Dec}) respecto a la energía de la interacción de la siguiente forma,

$$\frac{d\Phi_{Dec}(\Delta\Omega, E_\gamma)}{dE_\gamma} = \left(\frac{1}{4\pi} \frac{1}{\tau_{DM} M_{DM}} \frac{dN}{dE_\gamma} \right) \times (D(\Delta\Omega)), \quad (3.3)$$

en donde τ_{DM} es el tiempo de vida media en segundos de la materia oscura, M_{DM} es la masa de nuestra partícula y $\frac{dN}{dE_\gamma}$ es un espectro que nos indica el número de partículas presentes por unidad de energía (1/GeV), ya sea de fotones (γ) o de neutrinos (ν), dichos espectros se construyen a través de un software llamado `pythia` [18] donde se genera un histograma de la distribución de fotones o neutrinos por energía.

Es importante tener en cuenta que, hasta ahora, no se ha detectado directamente el decaimiento de la materia oscura ni se ha confirmado que las partículas de materia oscura puedan decaer, por lo que esperamos obtener valores de tiempo de vida media mayores a la edad del universo observable.

3.2.2. Aniquilación de materia oscura

La aniquilación de la materia oscura es una suposición teórica que plantea que las partículas de materia oscura pueden interactuar y destruirse entre sí, produciendo partículas del ME como resultado de esa interacción.

La tasa de aniquilación de partículas de materia oscura provenientes de una región del espacio, es necesario utilizar el factor astronómico J , ecuación 3.4. Este factor se utiliza para calcular la cantidad de radiación detectable producida por la aniquilación de partículas de materia oscura en diferentes objetos astronómicos. Al igual que el factor astronómico D utilizado para el decaimiento de partículas de materia oscura, el factor astronómico J depende de la distribución espacial de la materia oscura en el objeto astronómico en consideración. Está relacionado con la densidad de materia oscura en función de la distancia al centro del objeto, como se describe en la siguiente expresión,

$$J(\Delta\Omega) = \int_{\Delta\Omega} \int_{l.d.v.} d\Omega ds \rho_{DM}^2 [r(s, \Omega)], \quad (3.4)$$

donde ρ_{DM} es la densidad de materia oscura, medida en (GeV/cm^3) , Ω es el ángulo sólido, en estereorradianes (sr), considerado para la observación y *l.d.v.* hace referencia a la línea de vista medida en kilopársec (kpc), la cual es la recta que une al observador y al objeto a estudiar.

En nuestro caso, consideraremos dicho factor para el cálculo del flujo de rayos gamma o neutrinos obtenidos por la aniquilación de partículas de materia oscura respecto a la energía de la interacción de la siguiente forma,

$$\frac{d\Phi_{Ann}(\Delta\Omega, E_\gamma)}{dE_\gamma} = \left(\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi} \frac{\langle\sigma v\rangle}{M_{DM}^2} \frac{dN}{dE_\gamma} \right) \times (J(\Delta\Omega)), \quad (3.5)$$

donde $\langle\sigma v\rangle$ es la sección eficaz en (cm^3/s) de la aniquilación de materia oscura, M_{DM} es la masa en (GeV) de nuestra partícula y $\frac{dN}{dE_\gamma}$ es un espectro que, al igual

que en el caso anterior, nos indica el número de partículas presentes por unidad de energía ($1/\text{GeV}$), ya sea de fotones (γ) o de neutrinos (ν). Dichos espectros se construyen a través de un software llamado `pythia` [18] donde se genera un histograma de la distribución de fotones o neutrinos por energía.

3.3. Búsqueda experimental de Materia Oscura

En esta sección, hablaremos de los experimentos dedicados a la búsqueda de DM, ya sea de manera directa o indirecta. Desde detectores subterráneos hasta observatorios de rayos gamma y neutrinos, analizaremos los enfoques utilizados para comprender y analizar el comportamiento de la Materia Oscura.

3.3.1. Detección directa

La detección directa de materia oscura se enfoca en capturar y medir interacciones directas entre partículas de materia oscura y la materia ordinaria. Se utilizan detectores sensibles ubicados en laboratorios subterráneos para buscar señales de partículas de materia oscura que atraviesan la Tierra.

Algunos ejemplos de detección directa son [XENONnT](#), [LUX-ZEPLIN](#) y [DarkSide-50](#). Los cuales tienen en común que utilizan detectores subterráneos ubicados en lugares como minas profundas para reducir el ruido de fondo y buscar interacciones entre partículas de materia oscura y la materia ordinaria. Se basan en la detección de pequeños destellos de luz o liberación de energía que podrían ser producidos por la interacción de partículas de materia oscura con los átomos del detector.

3.3.2. Detección indirecta

La detección indirecta busca evidencia de la presencia de materia oscura mediante la detección de las partículas del ME que se producen como resultado de las interacciones de aniquilación o desintegración de la materia oscura. Para buscar indicios de estas señales provenientes de regiones donde se cree que hay una concentración significativa de materia oscura se utilizan observatorios de rayos gamma, neutrinos o rayos cósmicos

En este caso nos interesan principalmente los experimentos centrados en la detección indirecta de materia oscura, como lo son:

- Fermi Gamma-ray Space Telescope ([Fermi-LAT](#)): Es un telescopio espacial de la NASA que detecta rayos gamma en un rango de energías desde el rango de los MeV hasta más de 300 GeV. Fermi-LAT ha realizado estudios de rayos gamma de alta precisión con la capacidad de identificar y mapear cuerpos celestes en el espacio.

La figura 3.2 nos muestra un mapeo donde se representan de color azul las zonas sin emisión de rayos gamma, de colores rojizos las zonas de baja emisión rayos gamma, como el disco de la vía láctea y cuerpos celestes como púlsares, entre otros, y de color amarillo zonas con alta emisión de rayos gamma, como lo puede ser el centro galáctico.

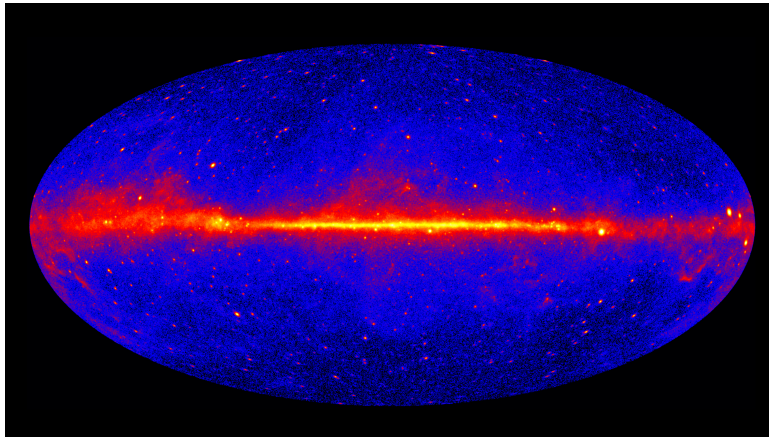


Figura 3.2: Imagen de datos de rayos gamma mayores a 1 GeV obtenida por observaciones de Fermi LAT en 60 meses. Fuente: [NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration](#).

- High Energy Stereoscopic System ([HESS](#)): Es un observatorio ubicado en Namibia que utiliza una matriz de cinco telescopios para detectar rayos gamma de alta energía. Utiliza una red de telescopios de imágenes Cherenkov para detectar y estudiar partículas de alta energía provenientes del espacio, proporcionando información sobre fuentes astrofísicas como agujeros negros, púlsares y explosiones de rayos gamma.
- High Altitude Water Cherenkov ([HAWC](#)): Es un detector de rayos gamma de amplio campo de visión ubicado en México a una gran altitud de aproximadamente 4.100 metros sobre nivel del mar. Busca señales de rayos gamma provenientes de la aniquilación o desintegración de partículas de materia

oscura a través de fotosensores capaces de detectar y medir la radiación de Cherenkov.

- Cherenkov Telescope Array (**CTA**): Es un proyecto en desarrollo que será el observatorio de rayos gamma más grande y sensible del mundo. CTA contará con una gran cantidad de telescopios distribuidos en varios sitios y mejorará significativamente la sensibilidad y la capacidad de detección de rayos gamma de los experimentos actuales. Se espera que pueda proporcionar información valiosa sobre la naturaleza de la materia oscura.
- Large High Altitude Air Shower Observatory (**LHAASO**): Ubicado en la provincia de Sichuan, en China, a una altitud de aproximadamente 4400 metros sobre el nivel del mar. Es un experimento que tiene como propósito estudiar los rayos cósmicos de ultraalta energía. Posee distintos tipos de detectores, como pueden ser los tanques de agua capaces de medir la radiación de Cherenkov, detectores de muones, etc.
- IceCube (**IC**): es un observatorio de neutrinos subterráneo ubicado en la Antártida, diseñado para detectar y estudiar neutrinos cósmicos de alta energía gracias a más de 5.000 detectores ópticos distribuidos en un volumen de un kilómetro cúbico. IceCube nos ayuda a comprender mejor los eventos astrofísicos más violentos y nos permite explorar los límites actuales de la física de partículas y la astrofísica.
- También hay experimentos en desarrollo, como lo son Southern Wide-field Gamma-ray Observatory (**SWG**O), Compact Network of Detectors with Orbital Range (**CONDOR**) y CTA Sur (**CTAs**). Los cuales podrían suponer una mejora a las observaciones hechas hasta ahora, ya que al ser propuestos para el hemisferio sur, estos van a tener una mejor resolución para el centro galáctico, el que es uno de los principales objetivos para el estudio de la Materia Oscura.

Los experimentos antes mencionados son utilizados para detectar las lluvias de astropartículas mediante la radiación de Cherenkov tanto en la atmosfera, como CTAs, o en la superficie terrestre, como SWGO y su estudio se realiza con la intención de medir la energía de las partículas que participaron en las interacciones previas a la fragmentación ocurrida debido a la atmosfera terrestre. En la figura 3.3 se representa mediante una línea blanca en la parte superior un rayo

gamma primario proveniente de una fuente astrofísica, el cual interactúa con la atmósfera terrestre produciendo una extensa lluvia de partículas, representada de color rojo, las cuales luego son detectadas por tanques de agua capaces de observar la radiación de Cherenkov y con ello reconstruir y estudiar la dinámica del rayo gamma primario.

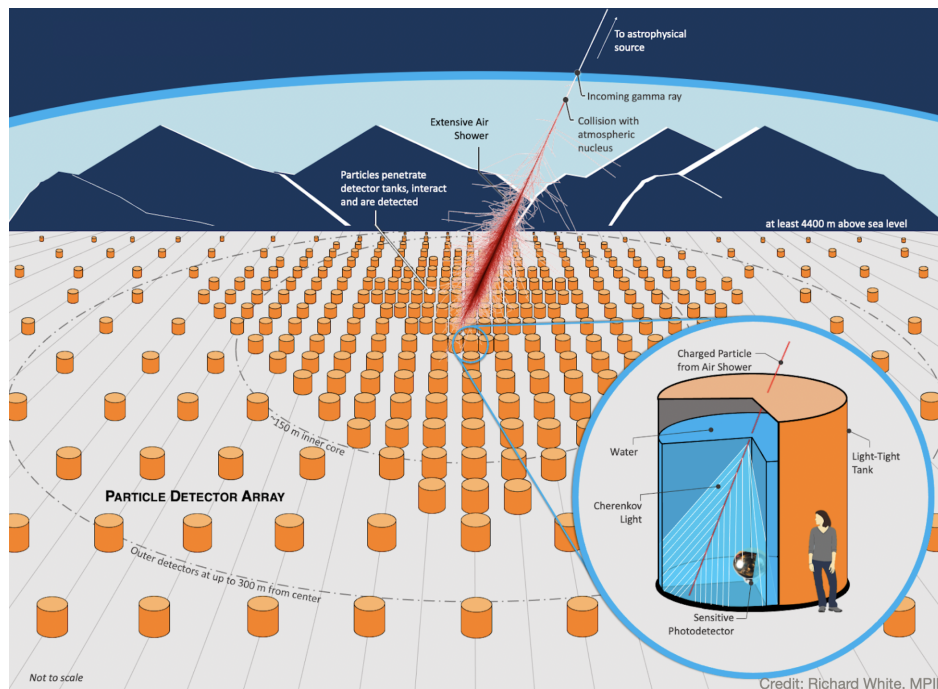


Figura 3.3: Representación no a escala del futuro experimento SWGO. Fuente: [SWGO](#).

Radiación de Cherenkov

La radiación Cherenkov [19] es la emisión de fotones por parte de una partícula cargada que se mueve a través de un medio dieléctrico¹ a una velocidad mayor que la velocidad de la luz en ese medio.

La figura 3.4 muestra una partícula cargada (β) la cual, al viajar más rápido que la luz en un medio distinto al vacío, produce un cono de luz (líneas y flechas azules) el cual tiene un ángulo llamado ángulo de Cherenkov (θ), que depende de la velocidad de la partícula y del índice de refracción del medio, como podemos ver en la siguiente ecuación [20]:

¹Medio de baja conductividad eléctrica.

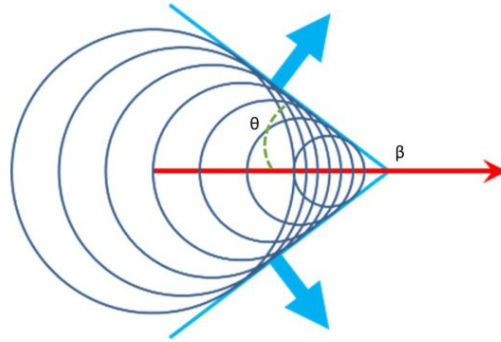


Figura 3.4: Representación del frente de onda producido por una partícula β cargada que viaja más rápido que la luz en el medio y por ende produce una emisión en forma de cono llamada *Radiación de Cherenkov*. Fuente: [Resonance Science](#).

$$\sin(\theta) = \frac{c}{n \times v_{\beta}}$$

donde θ es el ángulo de Cherenkov, c es la velocidad de la luz en el vacío, n es el índice de refracción del medio y v_{β} es la velocidad de la partícula β en el medio. La radiación de Cherenkov tiene aplicaciones importantes en la detección de partículas de alta energía y en la investigación científica, ya que bastantes experimentos tienen como base teórica dicha radiación para la detección de neutrinos o rayos gamma, como lo son los experimentos CTA, SWGO e IceCube.

Capítulo 4

Astropartículas provenientes del Centro Galáctico

4.1. Mapeando el cielo utilizando healpix

En este trabajo nos concentraremos en una región de interés (ROI) de $7,5^\circ$ alrededor del centro de la vía láctea, lo que resulta en una región aproximada de $15^\circ \times 15^\circ$, la cual está compuesta por regiones internas las cuales a partir de ahora llamaremos píxeles. Dichas regiones fueron calculadas mediante el uso de `astropy.healpix` [21] [22], el cual es un módulo de `python` [23] que nos permite crear un mapa de distribución uniforme de puntos para la esfera celeste.

El Módulo `healpix` nos permite generar una distribución casi homogénea y optimizada para poder mapear la esfera celeste, como podemos ver en la figura 4.1, en donde la escala de colores representa la cantidad de píxeles utilizados para realizar los distintos mapas.

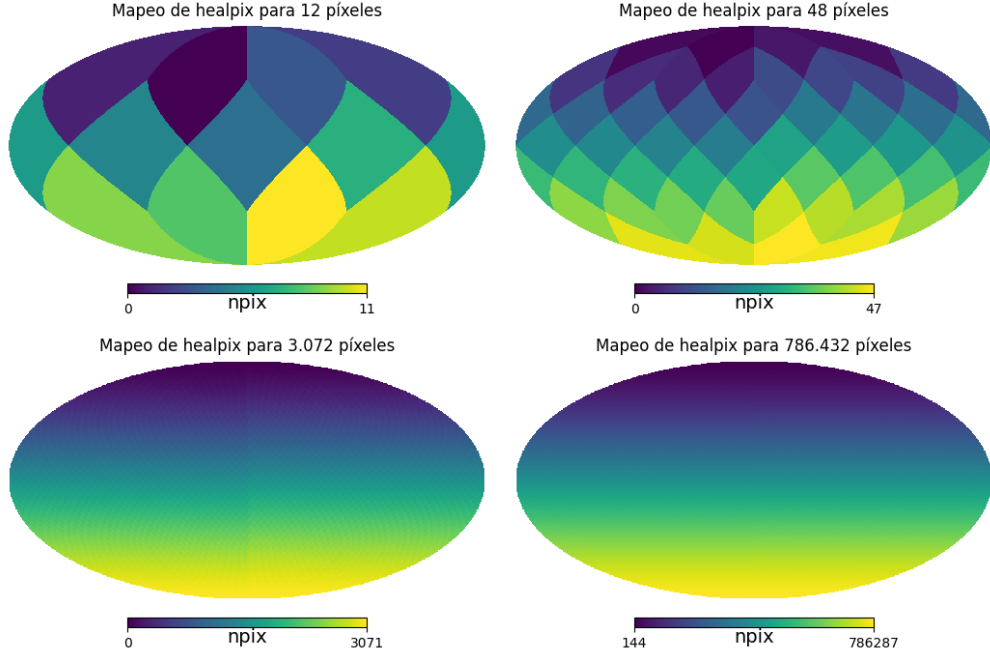


Figura 4.1: Distintos mapeos generados utilizando el módulo `healpix` para diferentes resoluciones, donde $npix$ nos indica el número de píxeles que componen el mapa.

En donde cada rombo representa lo que nosotros llamamos píxeles, para nuestro caso utilizamos 786432 píxeles los cuales se encuentran espaciados en promedio por 0,2290 grados y poseen un área de ángulo sólido de $1,5978967 \times 10^{-05}$, lo que nos permite tener un mapa de alta resolución en toda la esfera celeste.

Con dicho mapeo del espacio observable podemos filtrar de manera óptima los flujos de rayos gamma o de neutrinos provenientes de la ROI antes mencionada. Para eso debemos considerar tanto los flujos de rayos gamma por unidad de energía producidos por la aniquilación de partículas de materia oscura ($d\Phi_{Ann}/dE$), como los producidos por el decaimiento ($d\Phi_{Dec}/dE$) de esta, los cuales se miden en () y están descritos en las ecuaciones 3.5 y 3.3, respectivamente

$$\frac{d\Phi_{Ann}(\Delta\Omega, E_\gamma)}{dE_\gamma} = \left(\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi} \frac{\langle\sigma v\rangle}{M_{DM}^2} \frac{dN}{dE_\gamma} \right) \times (J(\Delta\Omega)),$$

$$\frac{d\Phi_{Dec}(\Delta\Omega, E_\gamma)}{dE_\gamma} = \left(\frac{1}{4\pi} \frac{1}{\tau_{DM} M_{DM}} \frac{dN}{dE_\gamma} \right) \times (D(\Delta\Omega)),$$

donde $\langle\sigma v\rangle$ es la sección eficaz de aniquilación y τ_{DM} es el tiempo de vida media de la materia oscura.

También podemos ver que la principal diferencia está presente en el efecto que tiene la masa de la materia oscura en el flujo, ya sea de aniquilación, en donde consideramos M_{DM}^2 , debido a que la aniquilación se produce debido a la interacción de dos partículas, o en el caso del decaimiento, en donde consideramos solamente M_{DM} debido a que hablamos del decaimiento de solo una partícula de DM. Mientras que los factores astronómicos J para aniquilación y D para decaimiento son integrados para una ROI de un ángulo sólido $\Delta\Omega$ que describe un cono con vértice en el observador y base circular con un radio de $7,5^\circ$ respecto al centro galáctico, y una línea de vista (l.d.v.) la que teóricamente es infinita, pero para este caso es considerada entre 0 y 50 kpc, ya que la contribución proveniente de la densidad de DM para distancias mayores a 50 kpc de la Tierra no modifica el valor del factor astronómico. Como podemos ver en la figura 2.4. Dichos factores están descritos en las ecuaciones 3.2 y 3.4 de la siguiente manera,

$$D(\Delta\Omega) = \int_{\Delta\Omega} \int_{\text{l.d.v.}} d\Omega ds \rho_{DM} [r(s, \Omega)],$$

$$J(\Delta\Omega) = \int_{\Delta\Omega} \int_{\text{l.d.v.}} d\Omega ds \rho_{DM}^2 [r(s, \Omega)],$$

donde ρ_{DM} es la distribución de densidad de materia oscura. Como se menciona anteriormente, en este trabajo consideraremos un área circular con su centro en el centro galáctico y con un radio de $7,5^\circ$, lo que nos resulta en un total de 3,368 píxeles para nuestra región de interés, considerando un total de 786,432 píxeles para el total de la esfera celeste simulada.

4.2. Distribución de la materia oscura en la Vía Láctea

Para estimar los flujos producidos por aniquilación o decaimiento de DM en el GC es necesario conocer su distribución en la Vía Láctea, en este caso consideraremos las densidades propuestas por Einasto (ρ_E), ecuación 2.2, la cual es del tipo *Cuspy*,

$$\rho_E(r) = \rho_0 \exp \left\{ \frac{-2}{\alpha} \left[\left(\frac{r}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right] \right\},$$

donde consideraremos r_s y ρ_0 como el radio y la densidad para los cuales la pendiente logarítmica de la densidad es igual a -2 [24], α es el parámetro que describe el grado de curvatura del perfil. Y la densidad de Burkert (ρ_B), ecuación 2.4, que forma parte del tipo *Cored*,

$$\rho_B(r) = \frac{\rho_c r_c^3}{(r + r_c)(r^2 + r_c^2)},$$

donde ρ_c es la densidad central y r_c es el radio del núcleo galáctico. Donde $r_s = 20[\text{kpc}]$, $\alpha = 0,17$ [4] y $r_c = 12,67[\text{kpc}]$ [25].

Para obtener los valores de ρ_0 y ρ_c primero debemos normalizar las ecuaciones respecto a las medidas locales de Materia Oscura, como se muestra en las ecuaciones 2.3 y 2.5,

$$\rho_0 = \rho_\odot \exp \left\{ \frac{2}{\alpha} \left[\left(\frac{r_\odot}{r_s} \right)^\alpha - 1 \right] \right\}$$

y

$$\rho_c = \frac{\rho_\odot (r_\odot + r_c) (r_\odot^2 + r_c^2)}{r_c^3}$$

respectivamente, donde $\rho_{DM}(r_\odot) = 0,39[\text{GeV}/\text{cm}^3]$ [3], y $r_\odot = 8,33\text{kpc}$ [16] es la distancia del Sol al centro galáctico.

4.3. Flujos para aniquilación y decaimiento de materia oscura

Es importante mencionar que los flujos serán considerados para distintos canales de aniquilación (ecuación 4.1) o decaimiento (ecuación 4.2) de partículas de materia oscura. Dichos canales nos indican como fue la primera interacción que tuvo la materia oscura. En este caso utilizaremos los siguientes canales:

$$\chi + \chi \rightarrow f + \bar{f} \tag{4.1}$$

$$\chi \rightarrow f + \bar{f} \tag{4.2}$$

En donde χ representa a la partícula de materia oscura y $(f + \bar{f})$ representando los canales $(b + \bar{b})$, $(\mu + \bar{\mu})$, $(W^+ + W^-)$ y $(\tau^+ + \tau^-)$ producidos en primera instancia por el decaimiento o aniquilación de las partículas de materia oscura, las cuales son capaces de interactuar produciendo fotones y neutrinos, los cuales son nuestros objetivos a observar, como se representa en la figura 3.1.

Por otra parte, para simular las lluvias de astropartículas se utilizan los espectros dN/dE , los cuales describen los canales utilizados tanto para fotones como para neutrinos. Los valores de dichos espectros fueron generados con el uso de `pythia` [18], software que nos permite generar, mediante una simulación de Monte-Carlo, un histograma de la distribución de fotones o neutrinos por energía, considerando todas las maneras de desintegración o aniquilación posibles para las partículas generadas. Esto se realizó para distintos valores de masa de DM, como muestra la tabla 4.1, en donde se muestran todos los datos utilizados, ya sea para el caso de aniquilación o decaimiento para los distintos canales $b + \bar{b}$, $\mu + \bar{\mu}$, $W^+ + W^-$ y $\tau^+ + \tau^-$, donde γ y ν indican la presencia de datos simulados para rayos gamma o neutrinos, respectivamente.

| Lista de datos para los distintos canales en función de M_{DM} | | | | | |
|--|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| M_{DM} [GeV] para aniquilación | M_{DM} [GeV] para decaimiento | $b\bar{b}$ | $\tau^+\tau^-$ | $\mu\bar{\mu}$ | W^+W^- |
| 6.57E+00 | 1.31E+01 | γ | γ | γ | NA |
| 1.33E+01 | 2.65E+01 | γ, ν | γ | γ | NA |
| 3.38E+01 | 6.77E+01 | γ, ν | γ | γ | NA |
| 6.83E+01 | 1.37E+02 | γ, ν | γ | γ | NA |
| 8.63E+01 | 1.73E+02 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 1.09E+02 | 2.18E+02 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 2.20E+02 | 4.41E+02 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 2.78E+02 | 5.57E+02 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 5.62E+02 | 1.12E+03 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 2.90E+03 | 5.79E+03 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 4.62E+03 | 9.25E+03 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 7.39E+03 | 1.48E+04 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 4.81E+04 | 9.62E+04 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |
| 1.55E+05 | 3.10E+05 | γ, ν | γ | γ | γ, ν |

Tabla 4.1: Tabla en la que se muestran los datos utilizados para los cálculos, donde γ representa los datos considerados para rayos gamma y ν representa los datos considerados para neutrinos

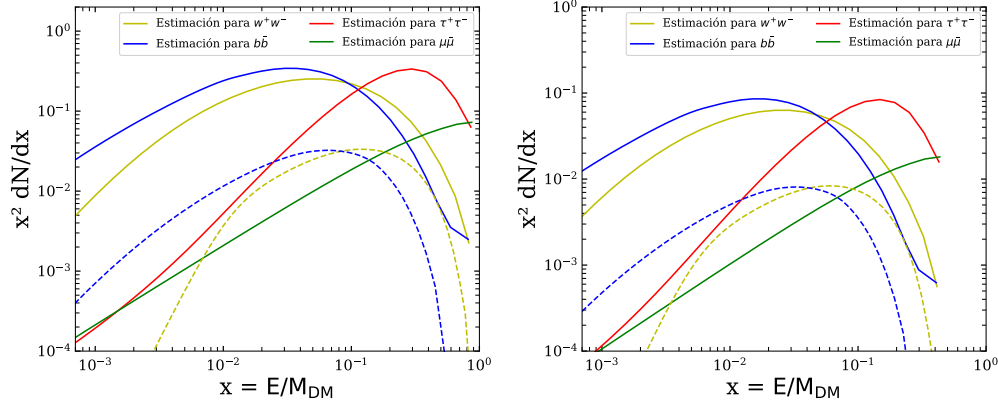


Figura 4.2: Comparación de las curvas dN/dx correspondientes a cada canal en función de $x = E/M_{DM}$, ya sea para fotones (líneas continuas) o neutrinos (líneas punteadas), considerando, para aniquilación (izquierda), dos partículas de materia oscura de masa $M_{DM} = 2,9$ [TeV] y, para decaimiento (derecha), una partícula de masa $M_{DM} = 5,8$ [TeV].

En la figura 4.2 se muestran gráficos de $x^2 dN/dx$ en función de $x = E/M_{DM}$, en donde podemos ver una comparación entre la distribución de densidades de energía para distintos canales de aniquilación y decaimiento. En ambos casos la curva amarilla representa las estimaciones para el canal $W^+ + W^-$, la curva azul las correspondientes al canal $b + \bar{b}$, la roja corresponde al canal $\tau^+ + \tau^-$ y la verde al canal $\mu + \bar{\mu}$. Es importante notar que para el caso de aniquilación estamos considerando dos partículas de materia oscura de masa $M_{DM} = 2,9$ [TeV], por lo que para poder comparar directamente los resultados con el caso de decaimiento, debemos considerar una partícula de materia oscura con masa $M_{DM} = 5,8$ [TeV], lo que nos permite mantener la misma energía total del sistema. Ambas masas para ambos casos se encuentran dentro del rango de masas de los WIMP.

4.4. Resultados y Discusión

Para poder comparar nuestros resultados con datos actuales consideraremos el experimento Fermi-LAT, el cual realiza mediciones de rayos gamma para toda la esfera celeste, como muestra la figura 4.3, en donde para una mejor interpretación de la observación se destacan los planos del ecuador galáctico, ecuador celeste y la eclíptica.

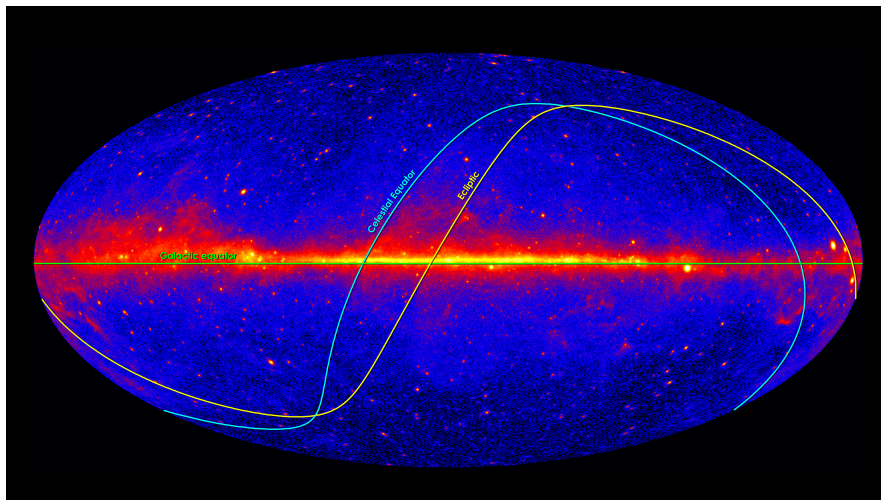


Figura 4.3: Imagen de los rayos gamma detectados por Fermi-LAT en donde también se representan los planos del ecuador galáctico (verde), ecuador celeste (cian) y la eclíptica (amarillo). Fuente: [NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration](#).

Al momento de realizar la comparación con nuestros datos utilizaremos dos sets de datos distintos obtenidos por Fermi-LAT, uno el cual considera el total de rayos gamma observados y otro que remueve los rayos gamma producidos por Púlsares. En la figura 4.4 se muestran distintos Púlsares que Fermi-LAT es capaz de diferenciar gracias a su alta precisión.

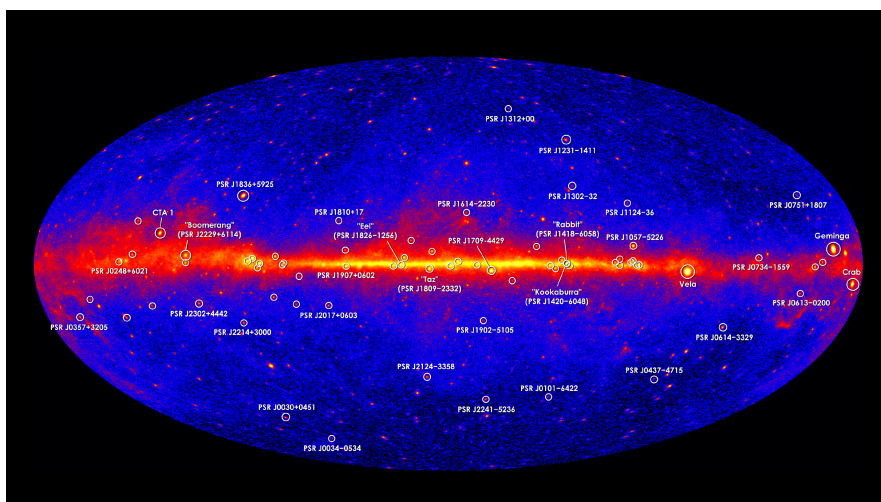


Figura 4.4: Imagen de los rayos gamma observados por Fermi-LAT en donde se destacan los púlsares detectados por el experimento. Fuente: [NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration](#).

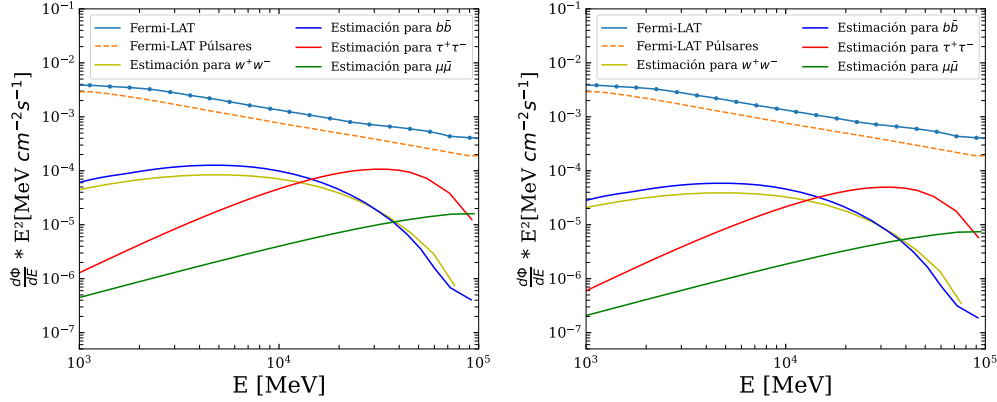


Figura 4.5: Gráficos de flujos por unidad de energía por energía al cuadrado ($d\Phi/dE \times E^2$) en función de la energía de rayos gamma (E), donde se representan los flujos obtenidos para diferentes canales de aniquilación (izquierda) de dos partículas de materia oscura de masa $M_{DM} = 109$ [GeV], y decaimiento (derecha) de una partícula de materia oscura de masa $M_{DM} = 218$ [GeV], $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26}$ y $\tau = 1 \times 10^{27}$ [s].

4.4.1. Resultados para flujos de fotones

Considerando ambos flujos obtenidos por Fermi-LAT y comparándolos directamente con nuestros flujos estimados, obtenemos los gráficos de la figura 4.5 para los flujos de fotones, considerando materia oscura de tipo WIMP con una sección eficaz $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26}$ [cm^3/s] y un tiempo de vida media de $\tau = 1 \times 10^{27}$ segundos.

Es importante destacar que se comparan casos del mismo nivel energético para partículas que se aniquilan y partículas que decaen, por lo que hay que tener presente que la masa de la partícula que decae (en este caso $M_{DM} = 218$ GeV) es el doble de la masa de las partículas que se aniquilan (en este caso $M_{DM} = 109$ GeV).

En la figura 4.5 podemos observar que nuestros flujos estimados para los diferentes canales, representados por las líneas de color azul ($b\bar{b}$), amarillo (W^+W^-), rojo ($\tau^+\tau^-$) y verde ($\mu\bar{\mu}$), están muy por debajo de los datos observados por Fermi-LAT, representados por la línea celeste (flujo total de rayos gamma) y la línea naranja punteada (flujo producido por Púlsares). Lo que significa que, como es de esperar, la partícula de materia oscura propuesta aún no se puede detectar con dicho experimento, por lo que con eso en mente podemos hacer variar tanto la sección

eficaz como el tiempo de vida media de nuestra partícula para poder establecer un límite para el valor máximo que podemos esperar que tenga la materia oscura.

Para poder calcular dichos límites lo que hacemos es reescalar nuestros datos con la condición de que el máximo valor del flujo sea igual o menor al de los datos obtenidos por Fermi-LAT, por lo que nuestras curvas se ven modificadas como muestra la figura 4.6, en donde se pueden ver en las líneas rojas punteadas los valores que tenían las curvas antes de ser reescaladas y en las líneas rojas continuas los valores luego del reescalamiento.

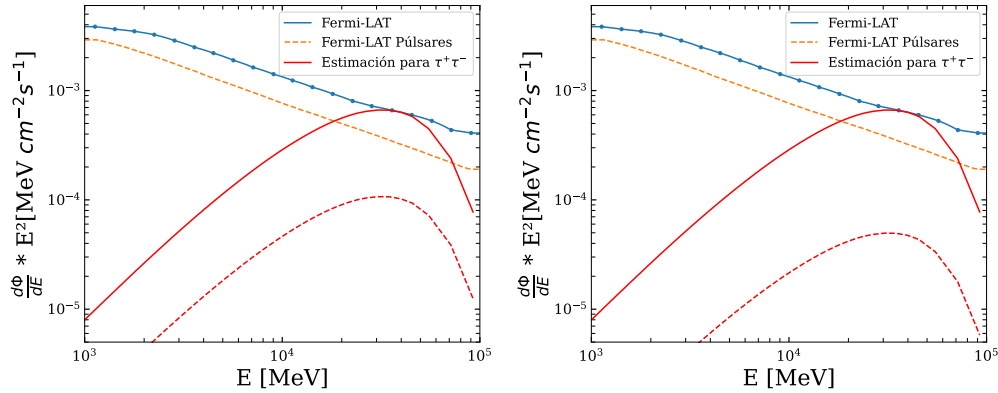


Figura 4.6: Gráficos de flujos por unidad de energía por energía al cuadrado ($d\Phi/dE \times E^2$) en función de la energía de rayos gamma (E), donde se representan los flujos de fotones para el canal $\tau\bar{\tau}$ considerando $M_{DM} = 109$ [GeV] para aniquilación (izquierda) y $M_{DM} = 218$ [GeV] para decaimiento (derecha). Antes del reescalado (línea punteada) y luego del reescalado (línea continua) cumpliendo con la condición de que el valor máximo de la curva de flujo no sobrepase los valores observados por Fermi-LAT. Sin considerar el flujo de fotones producido por pulsares.

El reescalado realizado en la figura 4.6 tiene como propósito conocer el factor que nos permite maximizar nuestros flujos, lo que nos permite establecer un límite máximo tanto para la sección eficaz como para el tiempo de vida media de la materia oscura. Dicho factor se calcula matemáticamente mediante el uso de la ecuación 4.3, donde se considera solamente el valor máximo del flujo simulado y los datos observados por Fermi-LAT.

$$\text{Factor} = \frac{\text{Datos observados por Fermi-LAT}}{\text{Valor máximo de la curva simulada}} \quad (4.3)$$

Para lograr mejorar la precisión de nuestros resultados debemos tener en cuenta que la materia oscura que estamos considerando representa a todas las fuentes de materia oscura presentes en nuestra área de interés. Por lo que en este caso consideraremos los rayos gamma producidos por púlsares y los restaremos al flujo total de rayos gamma obtenidos por Fermi-LAT.

Lo que modifica nuestro reescalamiento como muestra la figura 4.7, en donde se puede ver, al igual que en el caso anterior, en las líneas rojas punteadas los valores que tenían las curvas antes de ser reescaladas y en las líneas rojas continuas los valores luego del nuevo reescalamiento, mientras que la línea negra punteada representa la suma del flujo de fotones producidos por Púlsares y el nuevo flujo estimado, con la intención de demostrar que el máximo valor estimado no supera a los datos observados por Fermi-LAT.

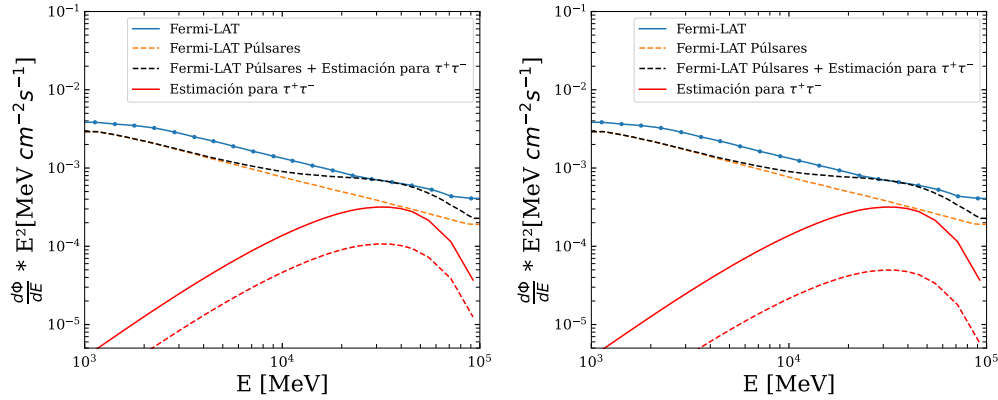


Figura 4.7: Gráficos de flujos por unidad de energía por energía al cuadrado ($d\Phi/dE \times E^2$) en función de la energía de rayos gamma (E), donde se representan los flujos de fotones para el canal $\tau\bar{\tau}$ considerando $M_{DM} = 109$ [GeV] para aniquilación (izquierda) y $M_{DM} = 218$ [GeV] para decaimiento (derecha). Antes del reescalado (línea punteada) y luego del reescalado (línea continua) cumpliendo con la condición de que el valor máximo de la curva de flujo no sobrepase los valores observados por Fermi-LAT.

Comparando los flujos estimados en las figuras 4.6 y 4.7, podemos ver que el factor que nos permite maximizar nuestro flujo es diferente en ambos casos (sin considerar los rayos gamma producidos por púlsares y considerándolos), lo que

nos permite poder comparar directamente ambos casos.

Dicho factor de reescalamiento afecta directamente a la sección eficaz de aniquilación, al igual que al tiempo de vida media de la partícula de DM que estamos considerando. Por lo que si realizamos el mismo procedimiento, pero esta vez para todos los canales antes mencionados en las ecuaciones 4.1 y 4.2, y lo realizamos para masas de DM en el rango de masas de los WIMP, es decir, desde los GeV hasta los TeV, podemos realizar estimaciones para la sección eficaz de la materia oscura dependiendo de la masa de dicha partícula, como muestra la figura 4.8, en donde se representan las curvas de sección eficaz ($\langle\sigma v\rangle$) en función de la masa de las partículas de DM (M_{DM}), en donde se representan mediante líneas punteadas los resultados para el flujo total observado por Fermi-LAT y en líneas continuas los resultados considerando la presencia de Púlsares como fuentes de rayos gamma.

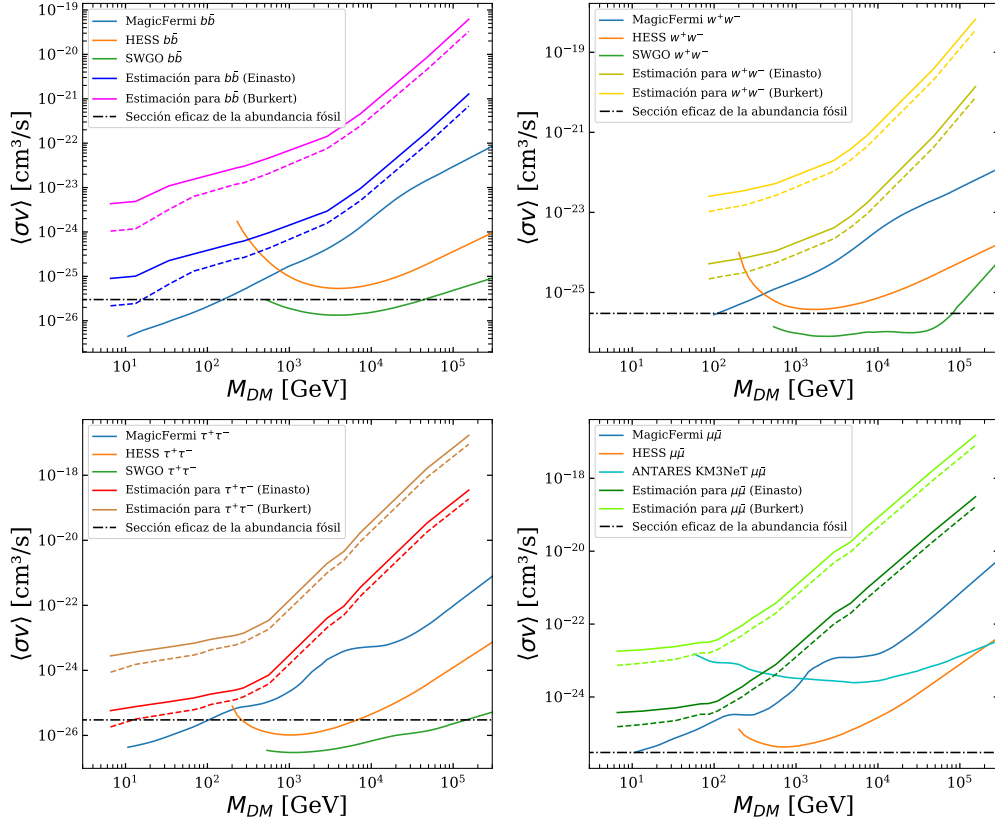


Figura 4.8: Gráficos de tiempo de vida media (τ) en función de la masa de la materia oscura (M_{DM}), donde se representan las curvas obtenidas para la sección eficaz para los diferentes canales de aniquilación de la materia oscura ($b\bar{b}$, W^+W^- , $\tau^+\tau^-$ y $\mu\bar{\mu}$), para las distribuciones de densidad de Einasto y Burkert. Considerando el flujo producido por pulsares (líneas continuas) y sin considerar el efecto de los pulsares (líneas punteadas), en donde la sección eficaz estimada para la abundancia fósil de materia oscura estimada es de $3 \times 10^{-26} [cm^3/s]$ [26] (línea semi punteada negra). En comparación a los resultados observacionales de distintos experimentos para los respectivos canales, como son MagicFermi [27], HESS [28], KM3NeT [29] y predicciones para SWGO [24].

La figura 4.8 nos permite observar que las curvas que obtenemos para la sección eficaz de aniquilación de la materia oscura tiende a bajar luego de aplicarle correcciones como la de considerar la presencia de rayos gamma producidos por pulsares. Por lo que podemos esperar que si seguimos aplicando correcciones similares, podríamos lograr que dicha curva logre que masas cercanas al orden de cientos de GeV estén por debajo de la sección eficaz de la abundancia fósil de

materia oscura, sección eficaz de aniquilación que aún no ha podido ser explorada por experimentos, pero se espera que pronto HESS y SWGO nos presenten nuevos datos ya sea para confirmar o no la existencia de dicha sección eficaz de aniquilación de la abundancia fósil de materia oscura.

Junto con ello también podemos realizar los cálculos para las curvas de tiempo de vida media de la materia oscura para un rango de masas de materia oscura, lo que nos permite saber si la materia oscura es estable o no a escalas cósmicas, recordando que la edad del universo es aproximadamente $4,5 \times 10^{17}$ segundos [7].

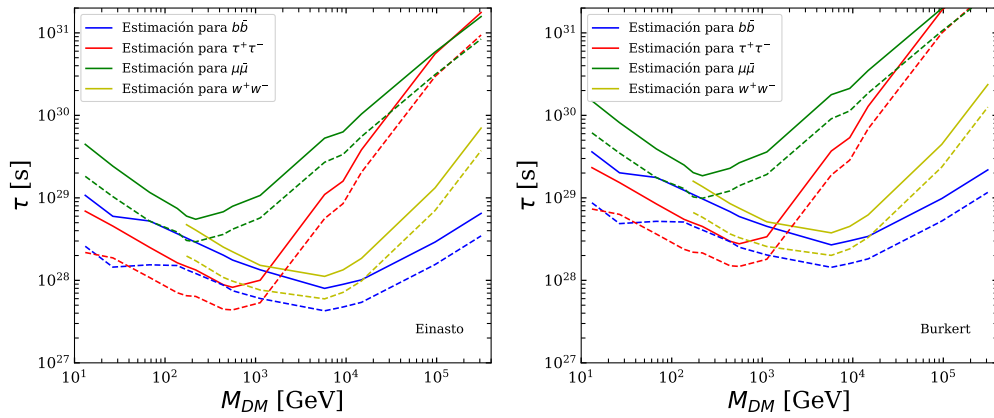


Figura 4.9: Gráficos de tiempo de vida media (τ) en función de la masa de la materia oscura (M_{DM}), donde se representan las curvas obtenidas para el tiempo de vida media de la materia oscura, considerando los diferentes canales de decaimiento ($b\bar{b}$, W^+W^- , $\tau^+\tau^-$ y $\mu\bar{\mu}$) para las distintas distribuciones de densidad de Einasto (Izquierda) y de Burkert (Derecha), considerando el flujo producido por púlsares (líneas continuas) y sin considerar el efecto de los púlsares (líneas punteadas).

Donde la figura 4.9, en donde se representan mediante líneas punteadas las estimaciones para el flujo total obtenido por Fermi-LAT y mediante líneas continuas las estimaciones considerando la presencia de Púlsares, nos permite ver claramente que el tiempo de vida media de la materia oscura tipo WIMP que estamos considerando es mayor a la edad del universo, por ende la podemos considerar como una partícula estable a escalas cósmicas.

4.4.2. Resultados para flujos de neutrinos

Los resultados antes mencionados pueden ser complementados mediante estudios en flujos de neutrinos, en donde considerando los flujos de neutrinos de la figura 4.2, los cuales están representados por líneas punteadas para los canales de $b\bar{b}$ (azul) y W^+W^- (amarillo). Y utilizando los factores calculados en la figura 4.7 para diferentes valores de materia oscura, podemos realizar una estimación del flujo total de neutrinos provenientes del centro galáctico.

En este caso consideraremos los flujos detectados por el experimento IceCube [30], flujos que se encuentran representados en el gráfico de $d\Phi/dE \times E^2$ en función de la energía E de la figura 4.10 por líneas rojas para neutrinos electrónicos y por líneas verdes para neutrinos muónicos. Junto con ellos también se representan mediante líneas punteadas los flujos totales observados por Fermi-LAT y mediante líneas continuas los flujos considerando la presencia de Púlsares.

Es importante destacar que los datos observacionales del experimento IceCube [30] fueron realizadas para un área de $16^\circ \times 16^\circ$ al rededor del centro galáctico. Por lo que para este caso necesitamos integrarlos angularmente para poder comparar nuestros resultados con los obtenidos por Fermi-LAT para el área de interés de $15^\circ \times 15^\circ$.

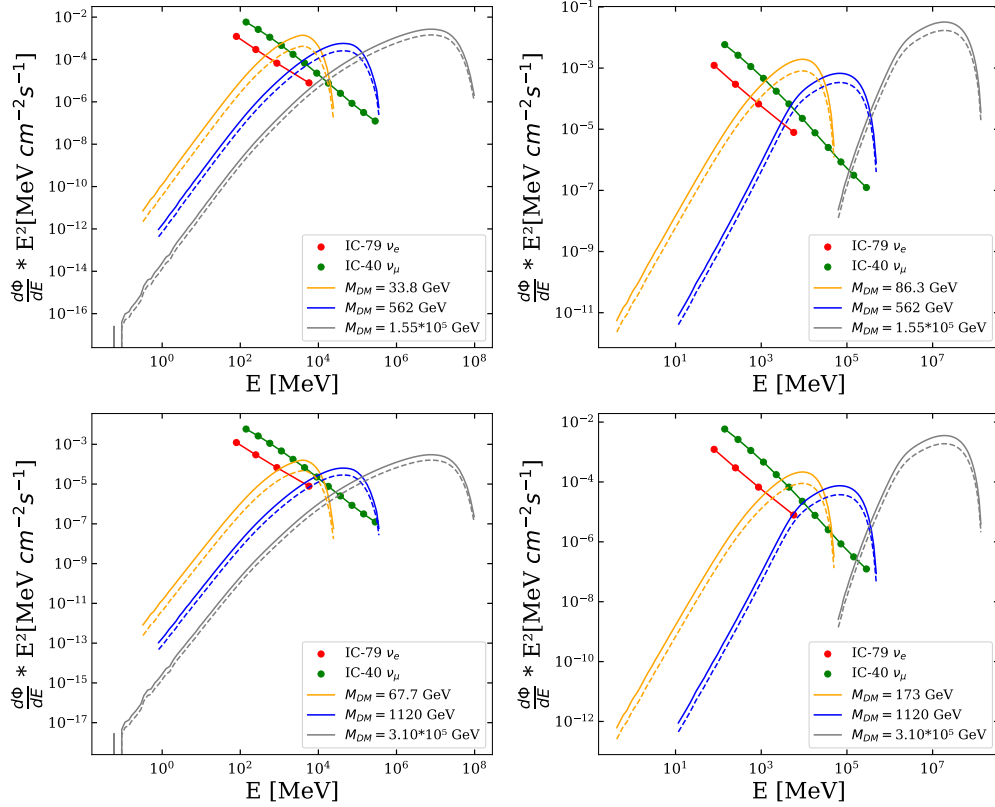


Figura 4.10: Gráficos de flujos por unidad de energía por energía al cuadrado ($d\Phi/dE \times E^2$) en función de la energía de los neutrinos (E), donde se representan los flujos obtenidos para aniquilación (arriba) y decaimiento (abajo) de neutrinos para los canales $b\bar{b}$ (izquierda) y W^+W^- (derecha), considerando los flujos producidos por pulsares (líneas continuas) y sin considerar los flujos producidos por pulsares (líneas punteadas) comparados directamente con los datos obtenidos para distintos valores de M_{DM} junto con los datos obtenidos por el experimento IceCube en sus distintas configuraciones [30].

En donde, gracias a la figura 4.10 podemos observar que los flujos obtenidos por el experimento IceCube están muy cercanos al límite superior de nuestros flujos estimados para los neutrinos. En donde debemos considerar que el experimento IceCube nos proporciona información sobre neutrinos clasificados para distintos sabores, en cambio, nosotros estamos estimando un flujo total de neutrinos, es decir, la contribución total de los tres sabores conocidos (ν_e, ν_μ, ν_τ), lo que explicaría por qué aún no se detectan dichos flujos producidos por materia oscura.

El hecho de que los flujos que aún no han sido descubiertos, nos permite establecer límites para la búsqueda de materia oscura a través de detección indirecta, pero como podemos ver, a los datos de nuestra simulación le podríamos seguir aplicando correcciones y con ello, podríamos obtener mejores aproximaciones de lo que se espera para la materia oscura tipo WIMP y con ello poder plantear nuevos rangos de energía interesantes para las investigaciones y experimentos relacionados con la materia oscura.

Algunas futuras correcciones que se podrían considerar son:

- Considerar más y distintas fuentes de rayos gamma para seleccionar solamente los rayos gamma producidos por la materia oscura presente en el centro galáctico, sin interferencia de otras fuentes astronómicas.
- Tomar en cuenta correcciones en las interacciones que puede tener la materia oscura con el resto de partículas del modelo estándar, lo que afectaría directamente al tipo de partícula de materia oscura considerada.

Con todo lo anterior, también podemos esperar que futuras mejoras en los experimentos o incluso, nuevos experimentos, como SWGO, puedan darnos más claridad sobre los límites para la detección de la materia oscura y con ello, brindarnos más información sobre la dinámica y el comportamiento de dicha partícula.

Capítulo 5

Conclusiones

Nuestros resultados se enfocan en una región de $15^\circ \times 15^\circ$ al rededor del centro galáctico observado desde la Tierra, para búsqueda de materia oscura mediante estudios de rayos gamma y neutrinos.

Las estimaciones realizadas para rayos gamma, en el caso de la aniquilación de DM, muestran una aproximación a los valores estimados para la sección eficaz de la abundancia fósil de DM en forma de WIMP. Esto se puede apreciar de mejor manera en los valores de masa de materia oscura cercanos a $M_{DM} \simeq 100$ GeV, donde la sección eficaz para el canal $\tau^+\tau^-$ se aproxima a $\langle\sigma v\rangle = 8 \times 10^{-26}$ [cm³/s], valor que se aproxima bastante a los valores estimados por la misión Planck de $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26}$ [cm³/s]. A diferencia de los demás canales $b\bar{b}$, W^+W^- y $\mu\bar{\mu}$, en donde se estima una sección eficaz de aniquilación de $\langle\sigma v\rangle = 2 \times 10^{-25}$ [cm³/s].

A esto se suma que, gracias a las simulaciones realizadas, logramos demostrar que, para los rangos de masas y canales de decaimiento utilizados, la materia oscura presenta un tiempo de vida media superior a la edad del universo, por lo que en estos casos la podemos considerar como una partícula estable a escalas cosmológicas de tiempo.

Por otro lado, en cuanto a los estudios de neutrinos, se identifica la necesidad de continuar con un análisis detallado de los canales de decaimiento o aniquilación de partículas de materia oscura, con el objetivo de considerar el flujo esperado de manera individual para los distintos tipos de neutrinos (ν_e , ν_μ y ν_τ). Esto nos permitirá obtener límites más precisos y específicos para comparación de nuestros

resultados con las mediciones actuales proporcionadas por experimentos como IceCube.

Los resultados obtenidos para los rayos gamma, tanto para aniquilación como decaimiento de DM, plantean una perspectiva prometedora para los futuros avances experimentales, específicamente para el rango de masas de materia oscura superiores a los 100 [GeV]. Tener una mayor sensibilidad experimental nos da el potencial de obtener nueva información sobre el comportamiento y las propiedades de la materia oscura, permitiendo una comprensión más profunda de este fenómeno, fundamental para la estructura y formación del universo.

Bibliografía

- [1] Y. Sofue and V. Rubin, *Rotation curves of spiral galaxies*, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.* 39 (2001) 137-174 **39** (sep, 2000) 137–174, [[astro-ph/0010594](#)].
- [2] D. Clowe, M. Bradac, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones et al., *A direct empirical proof of the existence of dark matter*, *Astrophys.J.* 648:L109-L113,2006 **648** (aug, 2006) L109–L113, [[astro-ph/0608407](#)].
- [3] Planck Collaboration, N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi et al., *Planck 2018 results. vi. cosmological parameters*, *A A* 641, A6 (2020) **641** (sep, 2018) A6, [[1807.06209](#)].
- [4] L. Pieri, J. Lavalle, G. Bertone and E. Branchini, *Implications of high-resolution simulations on indirect dark matter searches*, *Phys.Rev.D* 83:023518,2011 **83** (jan, 2009) 023518, [[0908.0195](#)].
- [5] A. Burkert, *The structure of dark matter haloes in dwarf galaxies*, *IAU Symp.* 171:175,1996; *Astrophys.J.* 447:l25,1995 **447** (jul, 1995) , [[astro-ph/9504041](#)].
- [6] LAT Collaboration, *Fermi-lat observations of high-energy gamma-ray emission toward the galactic center*, *The Astrophysical Journal* **819** (feb, 2015) 44, [[1511.02938](#)].
- [7] PARTICLE DATA GROUP collaboration, R. L. Workman and Others, *Review of Particle Physics*, *PTEP* **2022** (2022) 083C01.
- [8] ATLAS collaboration, G. Aad et al., *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, *Phys. Lett. B* **716** (2012) 1–29, [[1207.7214](#)].

- [9] G. Rosi, F. Sorrentino, L. Cacciapuoti, M. Prevedelli and G. M. Tino, *Precision measurement of the newtonian gravitational constant using cold atoms*, *Nature*, Vol 510, p. 518, 26 June 2014 **510** (jun, 2014) 518–521, [[1412.7954](https://doi.org/10.1038/510518a)].
- [10] E. Haug and W. Nakel, *The elementary process of bremsstrahlung*. 2004.
- [11] A. Einstein, *Über einen die erzeugung und verwandlung des lichtes betreffenden heuristischen gesichtspunkt*, *Annalen der Physik* **322** (1905) 132–148, [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/andp.19053220607>].
- [12] M. P. Alessandro De Angelis, *Introduction to Particle and Astroparticle Physics*. Springer, second edition ed., 2018.
- [13] WMAP collaboration, D. N. Spergel et al., *First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters*, *Astrophys. J. Suppl.* **148** (2003) 175–194, [[astro-ph/0302209](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302209)].
- [14] A. Belenchia, M. Carlesso, Ömer Bayraktar, D. Dequal, I. Derkach, G. Gasbarri et al., *Quantum physics in space*, *Physics Reports* **951** (2022) 1–70.
- [15] J. S. Bullock, T. S. Kolatt, Y. Sigad, R. S. Somerville, A. V. Kravtsov, A. A. Klypin et al., *Profiles of dark haloes. Evolution, scatter, and environment*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **321** (2001) 559–575, [[astro-ph/9908159](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9908159)].
- [16] R. Catena and P. Ullio, *A novel determination of the local dark matter density*, *JCAP* **1008:004,2010** **2010** (aug, 2009) 004–004, [[0907.0018](https://arxiv.org/abs/0907.0018)].
- [17] M. M. Villard, *Sur la reflexion et la refraction des rayons cathodiques et des rayons deviabiles du radium*, *C. R. Acad. Sci. Paris* **130** (1900) 1010.
- [18] T. Sjostrand, S. Mrenna and P. Skands, *Pythia 6.4 physics and manual*, *JHEP* **0605:026,2006** **2006** (may, 2006) 026–026, [[hep-ph/0603175](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0603175)].
- [19] P. A. Cerenkov, *Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light*, *Phys. Rev.* **52** (1937) 378–379.

- [20] I. Tamm, *General Characteristics of Radiation Emitted by Systems Moving with Superlight Velocities with Some Applications to Plasma Physics*, pp. 55–67. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1991.
- [21] A. Zonca, L. Singer, D. Lenz, M. Reinecke, C. Rosset, E. Hivon et al., *healpy: equal area pixelization and spherical harmonics transforms for data on the sphere in python*, *Journal of Open Source Software* **4** (Mar., 2019) 1298.
- [22] K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke et al., *HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere*, *Astrophys. J.* **622** (Apr., 2005) 759–771, [[arXiv:astro-ph/0409513](#)].
- [23] G. Van Rossum and F. L. Drake Jr, *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.
- [24] A. Viana, H. Schoorlemmer, A. Albert, V. de Souza, J. P. Harding and J. Hinton, *Searching for dark matter in the galactic halo with a wide field of view tev gamma-ray observatory in the southern hemisphere*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2019** (dec, 2019) 061–061, [[1906.03353](#)].
- [25] M. Cirelli, G. Corcella, A. Hektor, G. Hütsi, M. Kadastik, P. Panci et al., *Pppc 4 dm id: A poor particle physicist cookbook for dark matter indirect detection*, *JCAP* *1103:051,2011* **2011** (mar, 2010) 051–051, [[1012.4515](#)].
- [26] M. Kamionkowski, *Wimp and axion dark matter*, 1997.
- [27] *Limits to dark matter annihilation cross-section from a combined analysis of MAGIC and fermi-LAT observations of dwarf satellite galaxies*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2016** (feb, 2016) 039–039.
- [28] H. Abdalla, F. Aharonian, F. A. Benkhali, E. Angüner, C. Armand, H. Ashkar et al., *Search for dark matter annihilation signals in the h.e.s.s. inner galaxy survey*, *Physical Review Letters* **129** (sep, 2022) .
- [29] S. R. Gozzini, *Search for Dark Matter Signatures with ANTARES and KM3NeT*, *LHEP* **2023** (2023) 350.

- [30] V. Gammaldi, J. A. R. Cembranos, A. de la Cruz-Dombriz, R. A. Lineros and A. L. Maroto, *Gamma-ray and neutrino fluxes from heavy dark matter in the galactic center*, [1404.2067](#).