



**Universidad
Europea MADRID**

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID
ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y
DISEÑO**

GRADO EN FÍSICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**MODELOS TEÓRICOS DE LA MATERIA
OSCURA: WIMPS.**

Pedro Calvo Jiménez

Dirigido por:

Luis Poderoso Labrador

CURSO 2024-2025

TÍTULO: Modelos teóricos de la materia oscura: WIMPs.

AUTOR: Pedro Calvo Jiménez

TITULACIÓN: Grado en Física

DIRECTOR DEL PROYECTO: Luis Poderoso Labrador

FECHA: MARZO de 2025

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se lleva a cabo un estudio teórico de la materia oscura, evaluando principalmente los Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs), uno de los candidatos más prometedores para explicar su extraña naturaleza. Haciendo uso del modelo cosmológico estándar y del comportamiento térmico del universo temprano, se deduce la abundancia relicta de estas partículas para estimar el orden de magnitud de su sección eficaz.

El trabajo incluye un estudio detallado de los experimentos más reconocidos en el campo de la detección directa como son Cryogenic Dark Matter Search (CDMS) y XENON, analizando los fundamentos físicos y estadísticos para poder obtener una discriminación de eventos. Sumado a lo anterior, se aporta una propuesta experimental computacional, en la que se simulan interacciones de WIMPs con distintos detectores, permitiendo visualizar tendencias cualitativas sobre espectros de energía de retroceso nuclear.

Los resultados muestran cierta coherencia entre la predicción teórica y experimental actual. El trabajo contribuye a la consolidación del nexo entre teoría y experimentación.

Palabras clave: materia oscura, WIMPs, sección eficaz, detección directa, XENON, CDMS.

ABSTRACT

In the present Bachelor's Thesis, a theoretical study of dark matter is carried out, focusing mainly on Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs), one of the most promising candidates to explain its strange nature. Using the standard cosmological model and the thermal behavior of the early universe, the relic abundance of these particles is deduced to estimate the order of magnitude of their cross section.

The work includes a detailed study of the most well-known experiments in the field of direct detection, such as Cryogenic Dark Matter Search (CDMS) and XENON, analyzing the physical and statistical foundations in order to achieve event discrimination. In addition to this, a computational experimental proposal is presented, simulating WIMP interactions with different detectors, allowing qualitative trends in nuclear recoil energy spectra to be visualized.

The results show a certain coherence between the theoretical prediction and the current experimental limits. This work contributes to the consolidation of the link between theory and experimentation.

Keywords: dark matter, WIMPs, cross section, direct detection, XENON, CDMS.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado en este camino, directa e indirectamente.

En primer lugar, a mis padres Salvador y Encarnación, por poder permitirme ser quien soy hoy en día, y por seguir fomentando la necesidad de mejorar y crecer día a día.

A mi hermana Ana, por ser mi fiel compañera de viaje desde el día cero, y por sembrar en mí la semilla de la curiosidad, el ir más allá.

A mis amigos, por saber ponerme los pies en la tierra, y también saber elevarme: Jacobo, Mario, Manolo, Tipler, Menchén, Lucas, Alex, Miguel, Jorge, Blanca, Juan y Luis.

A Curro, por también ser una constante en mi día a día.

Por último, al baloncesto, por demostrarme que las cosas banales pueden llegar a ser más importantes que las sustanciales.

Pedro Calvo Jiménez
Abril 2025

“La ausencia de evidencia no es evidencia de ausencia.”

— Carl Sagan

TABLA RESUMEN

	Datos
Nombre y Apellidos	Pedro Calvo Jiménez
Título del proyecto	Modelos teóricos de la materia oscura: WIMPs.
Directores del proyecto	Luis Poderoso Labrador
El proyecto se ha realizado en colaboración de una empresa o a petición de una empresa:	NO
El proyecto ha implementado un producto:	NO
El proyecto ha consistido en el desarrollo de una investigación o innovación:	SI
Objetivo general del proyecto:	Determinar las características de los candidatos a materia oscura

Índice

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
AGRADECIMIENTOS	5
TABLA RESUMEN	7
Índice de Figuras	9
Índice de Tablas	10
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Estado del arte	11
1.2 Contexto y justificación	11
Capítulo 2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivos generales	13
2.2 Objetivos específicos	13
2.3 Planificación del trabajo fin de grado	13
2.4 Beneficios del proyecto	15
Capítulo 3. DESARROLLO DEL TFG	16
3.1 Planteamiento del problema	16
3.2 Descripción experimental	22
3.2.1 Detección directa	22
3.2.2 Detección indirecta	26
3.3 Resultados CDMS y XENON	27
3.3.1 CDMS	28
3.3.2 XENON	32
3.4 Propuesta experimental	33
Capítulo 4. DISCUSIÓN	39
Capítulo 5. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	41
Capítulo 6. CONCLUSIONES	42
6.1 Conclusiones del trabajo	42
6.2 Conclusiones personales	42
Capítulo 7. REFERENCIAS	43
Capítulo 8. ANEXOS	45
Anexo A: Código del simulador	45
Declaración de uso de IA en la elaboración del TFG.	52

Índice de Figuras

■ Figura 1: Fondo Cósmico de Microondas	12
■ Figura 2: Cronograma del TFG	15
■ Figura 3: Montaje CDMS	23
■ Figura 4: Esquema CDMS	24
■ Figura 5: Yield vs Energía de retroceso	29
■ Figura 6: Sección eficaz vs masa CDMS	32
■ Figura 7: Sección eficaz vs masa XENON	33
■ Figura 8: Histogramas de energías de retroceso	35
■ Figura 9: Comparativa histogramas de enerías de retroceso	35
■ Figura 10: Histogramas para distintos detectores	36
■ Figura 11: Espectros para distintos umbrales	37
■ Figura 12: Espectro ideal y espectro resolución	37
■ Figura 13: Espectro puro y espectro fondo	38

Índice de Tablas

- Tabla 1: Comparativa CDMS-XENON 26
- Tabla 2: Valores de masa activa para el Ge iZIP 30

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Estado del arte

El estudio de la materia oscura es uno de los problemas sin resolver más importantes de la física actual, y es que, pese a que se conozca con exactitud su existencia gracias a evidencias observacionales cosmológicas, su composición sigue siendo una incógnita.

Durante los últimos años, varios han sido los candidatos propuestos, entre ellos destacan los WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), que pertenecen al Modelo Estándar extendido, y los axiones. Ambas partículas presentan una serie de características y propiedades que les permiten ser candidatas a materia oscura fría.

Múltiples experimentos tienen como objetivo la detección directa de materia oscura como CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) y XENON, a la par que experimentos de detección indirecta, mediante la búsqueda de productos de aniquilación como WIMPs. Sin embargo, no se han encontrado evidencias concluyentes de su existencia.

Se han avanzado en desarrollos de modelos que pueden describir la producción de WIMPs en el universo temprano, gracias al estudio del avance del universo en su etapa de Freeze-Out de materia oscura. Estos avances han permitido establecer una serie de restricciones sobre las propiedades de los candidatos, pero también han provocado nuevas preguntas sobre la escala de energías implicadas y la relación que se presentan en la cosmología actual.

Este proyecto se encuentra dentro de este contexto, siendo su objetivo inicial analizar y comparar las bases teóricas de los WIMPs como posible candidato a la materia oscura, trabajando en sus características, propiedades y predicciones cosmológicas.

1.2 Contexto y justificación

Los avances en la física han permitido conocer el contenido de energía-materia que existe en el universo. Gracias al modelo cosmológico estándar Λ CDM, es posible determinar la expansión del universo homogéneo e isótropo con radiación, energía oscura y materia (bariónica y oscura). Esta expansión viene dada por el parámetro de Hubble:

$$H(t) = \frac{\dot{a}}{a} = H_0 \sqrt{\Omega_m a^{-3} + \Omega_r a^{-4} + \Omega_\Lambda} \quad (1)$$

donde $a(t)$ simboliza el factor de escala y t el tiempo cosmológico. Ω_r , Ω_m y Ω_Λ corresponden con los parámetros de densidad de radiación, materia no relativista y energía oscura, respectivamente. Estos términos describen cómo cada componente contribuye a la expansión del universo.

Sin embargo, aunque la ecuación depende explícitamente del valor de Ω_m , este contenido de materia no relativista se puede dividir en dos tipos: materia bariónica Ω_b , que representa la materia visible, y materia oscura fría Ω_{dm} .

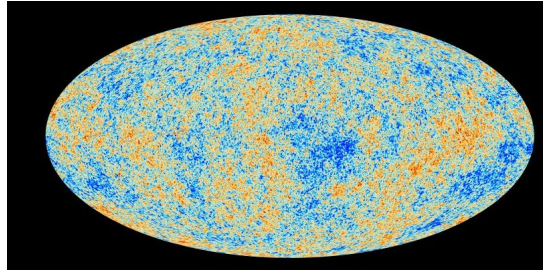


Figura 1: Fondo Cósmico de Microondas.

Evidencias experimentales como las observaciones del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) confirman que, aproximadamente, se cumplen estas relaciones [1]:

$$\Omega_m = \Omega_{dm} + \Omega_b \quad (2)$$

Donde:

$$\Omega_{dm} = 0,85\Omega_m \quad \Omega_b = 0,15\Omega_m \quad (3)$$

El hecho de que el 85 % de la materia sea invisible genera una serie de problemas para poder caracterizar el contenido del universo, ya que, pese a que la materia oscura contribuya gravitacionalmente a la expansión (presenta masa), no interactúa significativamente con la radiación ni la materia ordinaria, lo que impide que pueda ser detectada directamente. Esto plantea la principal pregunta que motiva este trabajo: ¿qué es la materia oscura?

Uno de los principales problemas reside en que el Modelo Estándar no proporciona un candidato viable para la materia oscura, cuya existencia está firmemente respaldada por evidencias cosmológicas y astrofísicas [2]. Por esta razón, se llega a la conclusión de que el Modelo Estándar está incompleto y debe extenderse con nuevas partículas o interacciones que puedan dar explicación a la materia oscura.

Se han podido estudiar una serie de propuestas para extensiones del Modelo Estándar como: Supersimetría (SUSY) que propone nuevos fermiones y bosones, los axiones y los modelos de dimensiones extra.

Para ello se plantearán los distintos candidatos y en concreto se profundizará en WIMPs. Se estudiará cómo encaja en el Modelo Estándar extendido y qué implicaciones tiene. También se profundizará en los modelos matemáticos que describen al candidato: su masa, interacciones y propiedades.

Este trabajo permitirá reforzar los fundamentos de los modelos más relevantes de los candidatos a materia oscura, determinando un marco de propiedades y condiciones cosmológicas.

Capítulo 2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos generales

El presente proyecto tiene como objetivo determinar las principales características fundamentales de uno de los candidatos a la materia oscura: WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Para lograrlo, se estudiarán sus propiedades físicas como la masa, interacciones y comportamientos.

Se hará uso del formalismo del Modelo Estándar y sus extensiones, evaluando en qué medida los candidatos expuestos pueden integrarse en el marco teórico actual. Además de analizar las distintas implicaciones en la física moderna.

Este estudio estará acompañado de cálculos que relacionen los modelos teóricos con los datos observacionales, de cara a obtener un estudio más detallado y completo.

2.2 Objetivos específicos

1. Analizar el contexto cosmológico que justifica la existencia de materia oscura en el modelo estándar del universo.
2. Estudiar las propiedades físicas fundamentales de los principales candidatos a materia oscura, con especial énfasis en WIMPs.
3. Explorar la compatibilidad teórica de estos candidatos con el Modelo Estándar y sus extensiones, como la supersimetría.
4. Desarrollar la evolución térmica de los candidatos en el universo temprano mediante el formalismo de la ecuación de Boltzmann.
5. Estimar el orden de magnitud de la sección eficaz de aniquilación en modelos termalizados.
6. Desarrollar y analizar teóricamente el funcionamiento de los principales experimentos de detección directa (CDMS y XENON), incluyendo los fundamentos físicos, metodologías experimentales y resultados recientes.
7. Estudiar la detección indirecta mediante la observación de productos de aniquilación de materia oscura en entornos astrofísicos densos.
8. Proponer un diseño experimental propio, inspirado en CDMS y XENON, basado en nuevos materiales o configuraciones, como valor añadido al trabajo.
9. Evaluar las limitaciones teóricas y experimentales de los modelos analizados y sus implicaciones para futuras investigaciones en física de partículas y cosmología.

2.3 Planificación del trabajo fin de grado

El plan de proyecto quedará dividido en semanas hasta su presentación de la siguiente forma:

- **Semanas 1–2 (inicio de febrero):** Elaboración y entrega del anteproyecto, incluyendo la definición del tema, objetivos y cronograma preliminar. Aprobación por parte del tutor.

- **Semanas 3–4:** Inicio del trabajo teórico. Lectura de bibliografía básica sobre cosmología, materia oscura y candidato principal (WIMPs). Organización del enfoque del trabajo.
- **Semanas 5–8 (finales de febrero y marzo):** Desarrollo del marco teórico: formulación de la ecuación de Boltzmann, análisis del modelo de Freeze-Out, deducción del orden de magnitud de la sección eficaz. Redacción del Capítulo 1.
- **Semanas 9–11 (principios de abril):** Revisión bibliográfica sobre métodos de detección de materia oscura. Estudio de experimentos directos (CDMS, XENON) e indirectos. Esquema y redacción de la parte correspondiente a detección.
- **Semanas 12–13 (mediados de abril):** Redacción del Capítulo 2 (Objetivos) y avance del Capítulo 3. Incorporación de las observaciones del tutor. Revisión general del texto en LaTeX.
- **Semanas 14–15 (finales de abril y principios de mayo):** Redacción de resultados, discusión y conclusiones. Revisión global de estilo, coherencia y estructura del documento.
- **Semana 16 (segunda semana de mayo):** Entrega de la primera versión completa al tutor. Ajustes y correcciones en base a las indicaciones recibidas.
- **Semana 17 (última semana de mayo):** Entrega definitiva del TFG.
- **Semana 18 (inicio de junio):** Periodo de subsanación. Preparación de defensa oral.
- **Semana 19–20 (mediados de junio):** Defensa del TFG ante tribunal.

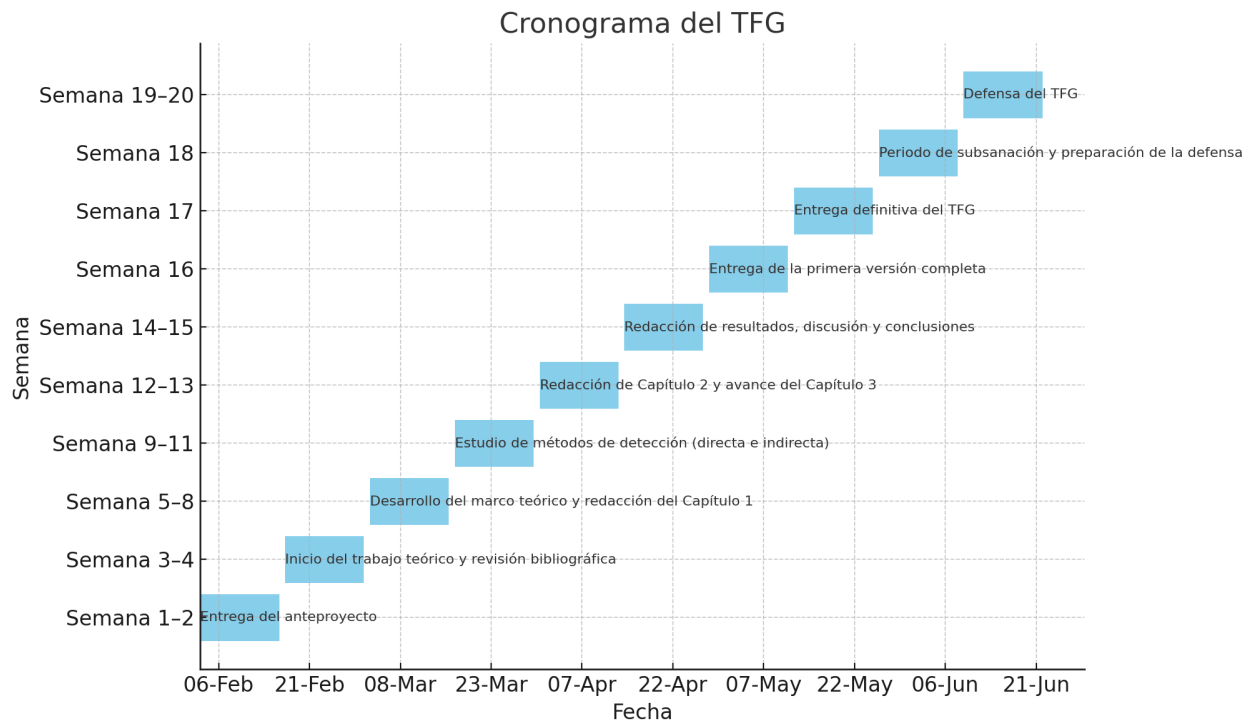


Figura 2: Cronograma del TFG.

2.4 Beneficios del proyecto

El presente trabajo añade un cierto valor al campo de la física teórica, cosmología y física de partículas, llevando a cabo una revisión rigurosa y detallada de los principales candidatos a materia oscura, en concreto los WIMPs.

El conjunto de todos los fundamentos teóricos, formalismo matemático y su conexión con los datos observacionales hacen que sea posible ofrecer una visión compacta, integrada y actualizada sobre el estado del problema.

Sumado a todo lo anterior, profundizar en el análisis de los métodos de detección directa e indirecta de materia oscura permite reforzar y comprender las implicaciones experimentales, lo que resulta útil y beneficioso tanto para el estudiante como para los futuros trabajos con la búsqueda empírica de respuestas al problema de la materia oscura.

Por último, el presente TFG facilita y fortalece el nexo entre la física de partículas, la cosmología y la investigación fundamental, tres pilares clave del conocimiento en física moderna.

Capítulo 3. DESARROLLO DEL TFG

3.1 Planteamiento del problema

Se sabe que el universo inicial o temprano era extremadamente caliente y denso; la elevada densidad de energía en un espacio reducido provocaba un gran número de interacciones y de colisiones [3].

En este punto existía un equilibrio: las reacciones que creaban partículas ocurrían a la misma velocidad que las reacciones que las aniquilaban. Por ejemplo, para el caso del fotón γ , en ese momento, la densidad del plasma era tal que la longitud libre media de un fotón, es decir, la distancia promedio que recorría antes de interactuar, era del orden del tamaño de un átomo, en contraste con los valores actuales del orden de 10^{28} [cm] [4].

A medida que el universo se expandía, su temperatura descendía y ciertas interacciones dejaban de ser eficientes, rompiéndose el equilibrio entre creación y aniquilación de partículas. La pérdida de este equilibrio se materializó en:

1. La síntesis de elementos ligeros (nucleosíntesis primordial).
2. La recombinación de electrones y protones para formar átomos de hidrógeno neutro.
3. El desacoplamiento de partículas masivas, como posibles candidatos a materia oscura.

Estos procesos pueden modelarse mediante la ecuación de Boltzmann en situaciones de no equilibrio, que describe la evolución del número de partículas bajo ciertas reacciones [3, 4].

En un proceso en el que ocurre la siguiente reacción:



La tasa de cambio del número de partículas de 1 es la diferencia entre la tasa de producción y la tasa de aniquilación cumpliendo la conservación:

$$\frac{dN_1}{dt} + \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} + \frac{dN_4}{dt} \quad (5)$$

Se va a proceder a realizar un análisis de la tasa de cambio de una especie 1 en un volumen comóvil, donde se cumple $N_1 = n_1 a^3$:

$$\begin{aligned} a^{-3} \frac{d(n_1 a^3)}{dt} &= \int \frac{d^3 p_1}{(2\pi)^3 2E_1} \int \frac{d^3 p_2}{(2\pi)^3 2E_2} \int \frac{d^3 p_3}{(2\pi)^3 2E_3} \int \frac{d^3 p_4}{(2\pi)^3 2E_4} \\ &\quad \times (2\pi)^4 \delta^3(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \delta(E_1 + E_2 - E_3 - E_4) |\mathcal{M}|^2 \\ &\quad \times [f_3 f_4 (1 \pm f_1)(1 \pm f_2) - f_1 f_2 (1 \pm f_3)(1 \pm f_4)] \end{aligned} \quad (6)$$

Existen tres términos fundamentales en la expresión del término de colisión:

- 1.

$$\int \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 2E_i}$$

Este término está relacionado con el elemento diferencial del espacio de fases relativista. Aquí, $d^3 p$ representa el volumen en el espacio de momentos, $(2\pi)^3$ es un factor de

normalización asociado a la cuantización del espacio de fases, y $2E_i$ es el factor que asegura la invarianza relativista de la medida.

2.

$$(2\pi)^4 \delta^3(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \delta(E_1 + E_2 - E_3 - E_4) |\mathcal{M}|^2$$

Este es el término que garantiza la conservación de energía y momento. La primera delta de Dirac impone la conservación del momento total, mientras que la segunda asegura la conservación de la energía en la interacción. El factor $|\mathcal{M}|^2$ es el cuadrado del elemento de matriz de la interacción cuántica, y representa la probabilidad asociada al proceso de dispersión.

3.

$$[f_3 f_4 (1 \pm f_1)(1 \pm f_2) - f_1 f_2 (1 \pm f_3)(1 \pm f_4)]$$

Este término representa el balance entre la producción de partículas 1 y 2 y la aniquilación de 3 y 4. Los f_i son los factores de ocupación de las partículas involucradas, los cuales dependen de su naturaleza estadística:

$$f_i = \frac{1}{e^{E_i/T} - 1} \quad \text{para bosones}$$

$$f_i = \frac{1}{e^{E_i/T} + 1} \quad \text{para fermiones}$$

Los signos \pm en la expresión del balance reflejan esta diferencia: se toma el signo positivo para bosones y el negativo para fermiones. Esta distinción tiene consecuencias físicas importantes. En particular, la probabilidad de producción aumenta para bosones debido al fenómeno de estimulación bosónica, mientras que se ve reducida para fermiones por el principio de exclusión de Pauli.

Por ejemplo, si la partícula 1 es un bosón, el término de balance es:

$$f_3 f_4 (1 + f_1)(1 \pm f_2) - f_1 f_2 (1 \pm f_3)(1 \pm f_4)$$

Mientras que si es un fermión:

$$f_3 f_4 (1 - f_1)(1 \pm f_2) - f_1 f_2 (1 \pm f_3)(1 \pm f_4)$$

Como $(1 + f_1) > (1 - f_1)$, se concluye que la reacción es estadísticamente más probable si la partícula 1 es un bosón.

Se va a simplificar el término de factor de ocupación para conseguir que la ecuación sea más manejable.

Asumimos que las distribuciones son:

$$f_i = \frac{1}{e^{\frac{E - \mu_i}{T}} \pm 1} \quad (7)$$

Donde μ representa el potencial químico. Además, se seguirá teniendo en cuenta el signo positivo para bosones y el negativo para fermiones.

Con esta aproximación se consigue la dependencia explícita del potencial químico.

Si existiera un equilibrio se podría afirmar:

$$\mu_1 + \mu_2 = \mu_3 + \mu_4 \quad (8)$$

Pero como no existe ese equilibrio, se debe resolver una ecuación diferencial.

Se evalúan los sistemas que cumplan $T \ll E - \mu$, ya que con esta condición no habrá una distinción notable entre fermiones y bosones, por lo que se puede hacer una aproximación a la estadística de Maxwell-Boltzmann:

$$f(E) = e^{\frac{\mu}{T}} - e^{\frac{E}{T}} \quad (9)$$

Si se sustituye esta aproximación en el término de los factores de ocupación de 6:

$$e^{-\frac{(E_1+E_2)}{T}} \left[e^{\frac{\mu_3+\mu_4}{T}} - e^{\frac{\mu_1+\mu_2}{T}} \right] \quad (10)$$

Aclarar que en la primera exponencial se aplica $E_1 + E_2 = E_3 + E_4$.

Se va a definir la densidad numérica n_i , el número de partículas por unidad de volumen:

$$n_i = g_i e^{\frac{\mu_i}{T}} \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} e^{-\frac{E_i}{T}} \quad (11)$$

Donde g_i representa la degeneración.

En equilibrio, $\mu_i = 0$, esta expresión se representa como:

$$n_i^{(0)} = g_i \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} e^{-\frac{E_i}{T}} \quad (12)$$

Como se conoce que la energía de cada partícula viene dada por la expresión:

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \quad (13)$$

Se puede determinar una expresión para cada tipo de límite:

$$n_i^{(0)} \equiv g_i \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} e^{-E_i/T} = \begin{cases} g_i \left(\frac{m_i T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{-m_i/T} & \text{si } m_i \gg T \\ \frac{g_i T^3}{\pi^2} & \text{si } m_i \ll T \end{cases} \quad (14)$$

Con esta definición, se puede escribir $e^{\frac{\mu_i}{T}}$ como $\frac{n_i}{n_i^{(0)}}$. Además, el término de factor de ocupación, se simplifica a:

$$e^{-(E_1+E_2)/T} \left\{ \frac{n_3 n_4}{n_3^{(0)} n_4^{(0)}} - \frac{n_1 n_2}{n_1^{(0)} n_2^{(0)}} \right\}$$

Para completar la expresión de la ecuación de Boltzmann simplificada se define la sección eficaz:

$$\langle \sigma v \rangle \equiv \frac{1}{n_1^{(0)} n_2^{(0)}} \int \frac{d^3 p_1}{(2\pi)^3 2E_1} \int \frac{d^3 p_2}{(2\pi)^3 2E_2} \int \frac{d^3 p_3}{(2\pi)^3 2E_3} \int \frac{d^3 p_4}{(2\pi)^3 2E_4} e^{-(E_1+E_2)/T} \\ \times (2\pi)^4 \delta^3(p_1 + p_2 - p_3 - p_4) \delta(E_1 + E_2 - E_3 - E_4) |\mathcal{M}|^2$$

Por lo que se puede definir la ecuación de Boltzmann simplificada [4]:

$$\boxed{a^{-3} \frac{d(n_1 a^3)}{dt} = n_1^{(0)} n_2^{(0)} \langle \sigma v \rangle \left\{ \frac{n_3 n_4}{n_3^{(0)} n_4^{(0)}} - \frac{n_1 n_2}{n_1^{(0)} n_2^{(0)}} \right\}} \quad (15)$$

Una vez definida esta expresión es posible enfrentarse a los distintos escenarios del universo temprano.

Nucleosíntesis primordial:

Este escenario ocurre cuando $T \approx 1[MeV]$, donde el plasma cósmico estaba compuesto por partículas relativistas en equilibrio como los fotones, electrones y positrones, también por neutrinos y por partículas no relativistas, los bariones.

La energía de enlace del deuterio, primer elemento compuesto por dos nucleones, es de $BE = 2,22[MeV]$, por lo que hasta que la temperatura no alcanzó un valor inferior no se consiguió formar elementos estables, pero éste no es único factor a analizar, ya que también es necesario tener en cuenta que para generar núcleos más compuestos, se parte de los núcleos más simples como hidrógeno, deuterio, tritio, helio...

Por lo que hasta que $T \approx 0,1[MeV]$, en $t = 20[min]$, no se crearon núcleos estables.

Materia oscura:

Es necesario volver a tener presente las relaciones 2 y 3.

Mucho antes de la nucleosíntesis primordial, ocurrió un evento relevante para este estudio, el Freeze-Out de la materia oscura en $T \approx 10 - 100[GeV]$.

Cuando $T > m_\chi$, es decir que la temperatura era mayor que la masa de la materia oscura, las partículas se creaban y se aniquilaban constantemente.

Pero, cuando $T \approx m_\chi$, las partículas dejaron de encontrarse y su densidad n_χ permaneció constante o congelada, de ahí el término de Freeze-Out [4].

Se va a determinar algunas propiedades fundamentales para poder determinar qué tipo de partícula es, en concreto se va a intentar analizar la sección eficaz de la partícula de materia oscura.

Aplicando la ecuación de Boltzmann simplificada 15:

$$a^{-3} \frac{d(n_\chi a^3)}{dt} = \langle \sigma v \rangle \left\{ (n_\chi^{(0)})^2 - n_\chi^2 \right\} \quad (16)$$

Se aplica el cambio:

$$Y = \frac{n_\chi}{T}$$

Entonces:

$$\frac{dY}{dt} = T^3 \langle \sigma v \rangle \{Y_{\text{EQ}}^2 - Y^2\} \quad (17)$$

Ahora se procede a añadir una nueva variable temporal:

$$x = \frac{m}{T}$$

Con esta nueva variable, se pueden dar varios escenarios:

$x \ll 1 : T \gg m$ Partícula relativista

$x \gg 1 : T \ll m$ Partícula no relativista

Cuando las temperaturas eran extremadamente altas $x \ll 1$, la densidad es la del equilibrio, es decir la creación y aniquilación ocurren por igual.

Para temperaturas bajas $x \gg 1$, la densidad decae exponencialmente hasta el Freeze-Out:

$$Y_\chi \approx e^{-\frac{m}{T}} = e^{-x}$$

Se va a cambiar la forma de la ecuación diferencial para que el elemento diferencial sea x :

$$dt \rightarrow dx$$

$$\frac{dx}{dt} = Hx \rightarrow H : \text{Jacobiano}$$

Por lo que, $H = \frac{H(m)}{x^2}$, además se agrupan los siguientes términos, $\lambda = \frac{m^3 \langle \sigma v \rangle}{H(m)}$:

$$\frac{dY}{dx} = -\frac{\lambda}{x^2} (Y^2 - Y_{\text{EQ}}^2) \quad (18)$$

Esta ecuación diferencial cumple con la forma de la Ec. de Riccati, que no presenta soluciones analíticas. Para resolver la ecuación se asume $x = \infty$ y $T \ll m$, además, como $Y \gg Y^{(0)}$ dado el Freeze-Out, se puede realizar la siguiente aproximación:

$$Y^2 - Y^{(0)2} \approx Y^2$$

Por lo que:

$$\frac{dY}{dx} = -\frac{\lambda Y^2}{x^2} \quad (19)$$

Resolviendo desde el Freeze-Out hasta el infinito se llega a:

$$\frac{1}{Y_\infty} - \frac{1}{Y_{FO}} = \frac{\lambda}{x_{FO}} \quad (20)$$

Como $Y_{FO} \gg Y_\infty$:

$$Y_\infty = \frac{x_{FO}}{\lambda} \quad (21)$$

Esta aproximación no es del todo correcta ya que depende de la temperatura del Freeze-Out. Se estima que, $Y_\infty = \frac{10}{\lambda} \rightarrow m = 10T$. Donde el valor de λ viene dado por la sección eficaz.

Ahora se puede determinar la densidad de la materia oscura, $\rho_\chi = m_\chi n_\chi$, donde:

$$n_\chi = Y_\chi T^3 = Y_\infty T_0^3 \left(\frac{a_1 T_1}{a_0 T_0} \right)$$

Por lo que:

$$\rho_\chi = m_\chi Y_\infty T_0^3 \left(\frac{a_1 T_1}{a_0 T_0} \right)$$

Ciertas aproximaciones permiten afirmar que $\left(\frac{a_1 T_1}{a_0 T_0} \right) = \frac{1}{30}$, por lo que:

$$\rho_\chi = \frac{m_\chi Y_\infty T_0^3}{30} \rightarrow Y_\infty = \frac{x_{FO}}{\lambda} \rightarrow \rho_\chi = \frac{m_\chi x_{FO} T_0^3}{30\lambda} \quad (22)$$

Una vez obtenida la densidad, se puede determinar el parámetro de densidad crítica:

$$\Omega_X = \frac{x_f m T_0^3}{30 \rho_{cr} \lambda} = \frac{H(m) x_f T_0^3}{30 m^2 \langle \sigma v \rangle \rho_{cr}}$$

Para obtener el parámetro de densidad crítica actual, se hace uso del parámetro de Hubble:

$$\Omega_X = \left[\frac{4\pi^3 G g_*(m)}{45} \right]^{1/2} \frac{x_f T_0^3}{30 \langle \sigma v \rangle \rho_{cr}} \quad (23)$$

Se aprecia que no depende de la masa de la partícula explícitamente, así que su abundancia va a venir dada por el valor de la sección eficaz; se va a obtener el orden de magnitud de esta sección eficaz fijando los datos que se conocen actualmente de materia oscura:

$$\Omega_\chi = \Omega_{dm} = 0,3$$

Que conjunto a una $T \approx 100[GeV]$, fija el valor de sección eficaz a:

$$\boxed{\langle \sigma v \rangle_{dm} \approx 10^{-39}[cm]}$$

El hecho de que la sección eficaz sea tan pequeña es positivo, ya que existen teorías que predicen la existencia de partículas con esta sección eficaz [4].

La supersimetría es la teoría que mejor describe esta situación, afirma que cada partícula tiene asignada otra con las características opuestas.

Los compañeros supersimétricos tienen masas muy grandes de en torno a 10-100 [GeV], esta es la razón que justifica que no exista un candidato concreto, ya que son masas muy elevadas que no se pueden estudiar en aceleradores.

Entonces, se llegan a una serie de conclusiones sobre las propiedades que debe cumplir un candidato a partícula de materia oscura tras el análisis del problema y la evolución del universo temprano. En particular, los **WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)** deben cumplir las siguientes características [5, 2, 4, 3]:

1. **Masa:** Deben tener una masa del orden de 1 a 10^3 [GeV]. Esta escala de masas es coherente con el orden de magnitud que se obtiene a partir de la abundancia relicta tras el Freeze-Out.
2. **Carga:** Deben ser eléctricamente neutras. Si tuvieran carga eléctrica, interactuarían con el campo electromagnético, emitiendo o absorbiendo fotones. Sin embargo, la materia oscura no se detecta por medios electromagnéticos, por lo que debe ser completamente transparente a la luz.
3. **Estabilidad:** Deben ser estables en escalas cosmológicas. Si se descompusieran o decayeran en partículas estándar, no existirían en cantidad apreciable en la actualidad. Las observaciones cosmológicas (como el Fondo Cósmico de Microondas y la formación de estructuras) muestran que aproximadamente el 85% de la materia del universo es oscura, lo cual implica que los WIMPs deben tener una vida media superior a la edad del universo ($\sim 13,800$ millones de años).
4. **Velocidad:** Deben ser partículas no relativistas en el momento de desacople térmico ($v \ll c$). Esto garantiza que puedan formar estructuras a gran escala mediante colapso gravitacional, algo que no ocurriría si fueran partículas calientes (relativistas).
5. **Interacción gravitatoria:** Deben interactuar gravitacionalmente, ya que esa es la única forma en la que su presencia ha sido inferida, a través de curvas de rotación de galaxias, lentes gravitacionales, y perturbaciones en la anisotropía del CMB.

Estas propiedades constituyen la base del perfil teórico de los WIMPs, y permiten desarrollar modelos de detección que tratan de acotar sus parámetros observacionales y su posible existencia en el universo [5, 2].

Una vez determinado el contexto, se va a determinar a partir de un estudio qué condiciones físicas permiten que partículas como WIMPs puedan explicar la abundancia actual de materia oscura.

3.2 Descripción experimental

Para poder determinar los posibles candidatos, o al menos, ciertas propiedades que deben cumplir, se hace uso de experimentos de detección, tanto detección directa, como detección indirecta.

3.2.1 Detección directa

En los experimentos de detección directa, se busca comparar dos señales provocadas por la interacción entre una partícula y el detector.

La idea principal se basa en distinguir eventos WIMPs o eventos no WIMPs; para ello, se deben recordar las premisas que debía cumplir un candidato a materia oscura, tal y como se definió en la subsección anterior.

Cryogenic Dark Matter Search

Cryogenic Dark Matter Search (CDMS), es uno de los principales experimentos de detección directa de WIMPs[6, 7, 8].

Consta de detectores, que pueden ser de germanio o silicio, que deben estar refrigerados a temperaturas en torno a $T \approx 50[mK]$.



Figura 3: Esquema general del montaje experimental de CDMS, mostrando los detectores de germanio/silicio, el criostato y los blindajes externos para reducir el ruido de fondo.

Se busca principalmente la interacción de una partícula (posible WIMP) con el núcleo del detector.

Cuando una partícula interactúa con los detectores, se recogen dos tipos de señales medibles:

1. Señal fonónica: Detecta el calor o energía liberada por la colisión y retroceso nuclear.
2. Señal de ionización: Se recoge la carga de la ionización.

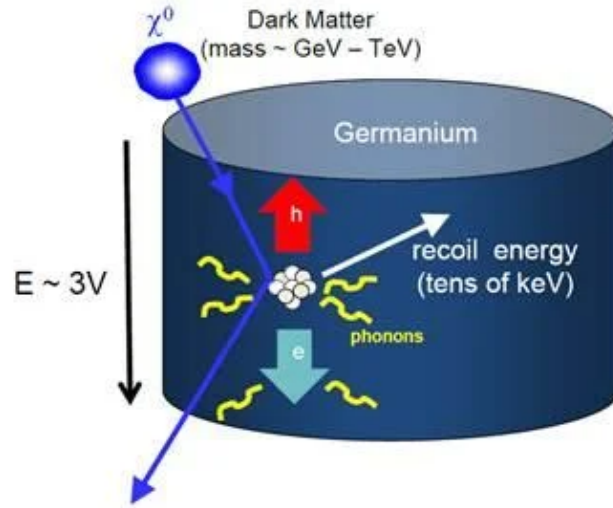


Figura 4: Esquema simplificado de la interacción de una partícula con el detector de CDMS, mostrando la generación de fonones y pares electrón-hueco en el material.

El funcionamiento clave está basado en la comparación de ambas señales, dependiendo de qué resultado se obtenga de esta comparación, se puede distinguir entre dos eventos:

1. Eventos WIMPs
2. Otros eventos como R_γ o R_β : Se trata de interacciones producidas por partículas como fotones (γ) o electrones beta (β), que interactúan principalmente con los electrones del detector. Estos eventos no corresponden a colisiones con el núcleo, por lo que no se consideran candidatos a materia oscura. Constituyen el fondo principal en este tipo de experimentos, y deben ser correctamente identificados y descartados.

Para poder distinguir entre eventos se hace uso del Yield de ionización[9]:

$$Y = \frac{E_{ion}}{E_r} \quad (24)$$

Donde E_{ion} es la energía depositada en ionización y E_r es la energía total de retroceso nuclear registrada.

La señal de retroceso E_r , se mide mediante la variación que ocurre en la resistencia de ese semiconductor, ya que se hace uso de Transition Edge Sensor (TES).

Un TES es un dispositivo superconductor que opera en el límite de transición entre estado conductor y estado superconductor, lo que lo hace extremadamente sensible a cambios de temperatura minúsculos inducidos por los fonones.

En un semiconductor, una pequeña variación de temperatura generada por la absorción de fonones altera significativamente la resistencia eléctrica, lo que permite medir con alta precisión la energía depositada en forma de calor.

En cuanto a la señal de ionización E_{ion} , se recoge el número de pares electrón-hueco:

$$E_{ion} = N_e \epsilon \quad (25)$$

Siendo:

- N_E : Número de pares e^- -h.
- ϵ : Energía promedio para crear un par e^- -h, que está relacionada experimentalmente con el bandgap como $\epsilon=2.8E_G$.

Una vez definidas las señales, se pueden ver matemáticamente los dos tipos de eventos:

1. $Y \approx 1$: Se trata de un evento de retroceso electrónico.
2. $Y < 1$: Se trata de un evento de retroceso nuclear, candidato a WIMP.

Para poder entender estos eventos es necesario tener presente que el candidato a materia oscura debe ser eléctricamente neutro, por lo que la señal de ionización debe ser siempre menor que la señal de retroceso nuclear.

Las interacciones electrón-detector transfieren mucha más energía mediante ionización; las interacciones entre núcleos, provocadas por hipotéticos WIMPs, depositan la mayoría de la energía en las vibraciones de la red, generando así un Yield de ionización mucho menor.

Una vez expuesta esta situación, se podría pensar en el caso del neutrón o neutrino, que también provocaría un evento similar, ya que también son eléctricamente neutros, pero en este tipo de experimentos se hace uso de una serie de blindajes que evitan la participación de este tipo de partículas.

Los detectores están instalados bajo tierra y protegidos por blindajes que permiten minimizar señales procedentes de rayos cósmicos y neutrones ambientales, que podrían imitar los eventos buscados. Como se muestra en la Figura 3, el montaje experimental de CDMS cuenta con múltiples capas de blindaje y refrigeración criogénica.

En posteriores apartados se llevará a cabo un análisis estadístico de los resultados, obtenidos tras recoger las señales registradas, lo que permitirá determinar los límites sobre la sección eficaz y la masa de las partículas candidatas a materia oscura[10].

XENON

El experimento XENON es el otro experimento principal de detección directa de materia oscura, y además comparte varias similitudes en cuanto al funcionamiento experimental con CDMS[11, 12].

El experimento consta de una cámara de proyección temporal de doble fase que contiene xenón líquido y gaseoso.

Al igual que en CDMS, la interacción de la partícula con el detector genera dos señales medibles:

1. Señal 1 (S1): Centello, detecta la luz ultravioleta emitida tras la interacción por los fotomultiplicadores.
2. Señal 2 (S2): Ionización, se recoge la carga de ionización.

La comparación de S1 y S2 permite distinguir entre dos tipos de eventos diferentes:

1. Retroceso electrónico.
2. Retroceso nuclear. Posible evento WIMP.

En cuanto al formalismo matemático, la energía de retroceso viene dada por:

$$E_r = (n_\gamma + n_e)W \quad (26)$$

Siendo:

- n_γ : Producción de fotones de centello.
- n_e : Producción de e^- libres.
- $W \approx 13,7[eV]$, energía promedio necesaria para producir un γ o e^- .

Una vez definida la energía de retroceso se pueden obtener las expresiones exactas de cada señal:

$$S1 = g_1 n_\gamma$$

$$S2 = g_2 n_e$$

Donde g_i depende de la eficiencia de detección y la calibración de los distintos detectores.

La discriminación de eventos va a venir dada por el parámetro $\frac{S2}{S1}$:

1. Si $\frac{S2}{S1}$ es alto \rightarrow Retroceso electrónico.
2. Si $\frac{S2}{S1}$ es bajo \rightarrow Retroceso nuclear (posible evento WIMP).

Como se puede apreciar, ambos experimentos están basados en una base fundamental similar y simplemente se alteran detalles. Para una mejor comprensión por parte del lector, se ha realizado una tabla comparativa entre CDMS y XENON que se muestra a continuación:

Características	CDMS	XENON
Material detector	Ge / Si	Xe (líquido y gaseoso)
T ^a de operación	$\approx [mK]$	$\approx 165[K]$
Señales medidas	Fonones e ionización	Centello e ionización
Discriminación de eventos	$Y = \frac{E_{ion}}{E_r}$	$\frac{S_2}{S_1}$

Tabla 1: Tabla comparativa entre CDMS y XENON.

En las secciones siguientes se abordará el análisis estadístico aplicado a ambos experimentos y la comparación con los modelos teóricos.

3.2.2 Detección indirecta

Aparte de los experimentos de detección directa CDMS y XENON, también existen experimentos de detección indirecta que completan los resultados obtenidos de la detección directa. Este método, en vez de buscar evidencias directas de las interacciones de las partículas candidatas con los detectores, busca productos de aniquilación en el universo[2].

El fundamento en el que la detección indirecta se basa es que, si las partículas de materia oscura se pueden aniquilar entre sí, también deben producir partículas estándar detectables como fotones, neutrinos, antiprotones o positrones; partículas que provocan señales que pueden ser observadas desde ciertas localidades del universo donde hipotéticamente existe una alta densidad de concentración de materia oscura, estas localidades son:

- El centro de la galaxia,
- Galaxias enanas satélites,
- Cúmulos de galaxias,
- Halo de materia oscura de nuestra propia galaxia.

Estos detectores son telescopios espaciales como:

- FERMI-LAT, HESS, MAGIC y VERITAS para la detección de rayos gamma[13].
- IceCube y ANTARES para la detección de neutrinos de alta energía[14].
- AMS-02, PAMELA y DAMPE para la búsqueda de exceso de positrones o antiprotones en los rayos cósmicos[15].

Teóricamente, el flujo diferencial de partículas producido por aniquilación de materia oscura se describe como:

$$\frac{d\Phi}{dE} = \frac{\langle\sigma v\rangle}{8\pi m_\chi^2} \frac{dN}{dE} \int_{l.o.s} \rho^2(l) dl \quad (27)$$

donde:

- $\langle\sigma v\rangle$ es la sección eficaz de aniquilación promedio,
- m_χ es la masa del candidato de materia oscura,
- $\frac{dN}{dE}$ es el espectro de partículas producido por aniquilación,
- $\rho(l)$ es la densidad de materia oscura a lo largo de la línea de visión.

Esta expresión permite realizar comparaciones teóricas con los datos cosmológicos observacionales, de tal forma que se pueden establecer cotas superiores o detectar evidencias de materia oscura[15].

En la detección indirecta (al igual que en CDMS y XENON), los experimentos generan curvas de exclusión, que permiten representar los límites superiores sobre la sección eficaz en función de la masa de la partícula.

Todo esto hace que la detección indirecta constituya una herramienta necesaria para acotar estos parámetros, complementando las búsquedas[2].

3.3 Resultados CDMS y XENON

Una vez aportado un contexto sobre los experimentos de detección directa CDMS y XENON, a lo largo de esta sección se va a proceder a explicar el razonamiento y análisis estadístico detrás de estos procesos[6, 7, 8].

Cabe destacar que ambos experimentos están altamente relacionados, como se especifica en la sección anterior. La diferencia en cuanto a discriminación de eventos no es tanto el razonamiento empleado, es decir, si las señales recogidas son propias de una interacción

con el detector por parte de una partícula que cumple con las condiciones impuestas o no, sino los elementos del montaje experimental que permiten recoger estas señales.

Es por ello por lo que los razonamientos y procesos estadísticos empleados son muy similares y emplean procedimientos prácticamente iguales[9].

El objetivo final de éstos es obtener una gráfica, en la que se pueda observar para cada valor de masa m_χ , cuál es el valor máximo de sección eficaz σ_n que puede existir.

3.3.1 CDMS

Como se ha explicado anteriormente, por cada interacción partícula-detector, se recogen dos señales: E_r y E_{ion} . Parámetros que serán utilizados para el Yield de ionización [6].

Previamente a la observación de los eventos, se lleva a cabo una calibración experimental, con el objetivo de obtener dos bandas Electron Recoil (ER) y Nuclear Recoil (NR) [7].

Para ello, se expone el detector a dos fuentes de emisión de fotones y de neutrones, así se logra obtener una gran muestra de eventos y graficar así dos curvas en el plano Yield vs E_r .

En esta gráfica se visualizan dos curvas:

1. Curva superior ER: Obtenida tras la regresión de los puntos obtenidos tras la detección de los eventos provocados por la fuente de fotones.
2. Curva inferior NR: Obtenida tras la regresión de los puntos obtenidos tras la detección de los eventos provocados por la fuente de neutrones.

Estas curvas se ajustan tras la obtención de en torno a 10^6 eventos.

Cabe señalar que para la obtención de estas curvas se ha empleado una serie de modelos para poder completar los datos de las fuentes.

El modelo empleado para completar depende directamente del material detector:

1. Ge: Modelo Lindhard
2. Si: Modelo Lindhard + DAMIC

Una vez obtenidas las curvas al completo, se lleva a cabo el experimento sin fuentes encendidas, con el objetivo de detectar los eventos espontáneos no provocados.

Con los datos obtenidos se grafican los datos obtenidos en la misma gráfica que las curvas, este es un ejemplo de resultado del experimento:

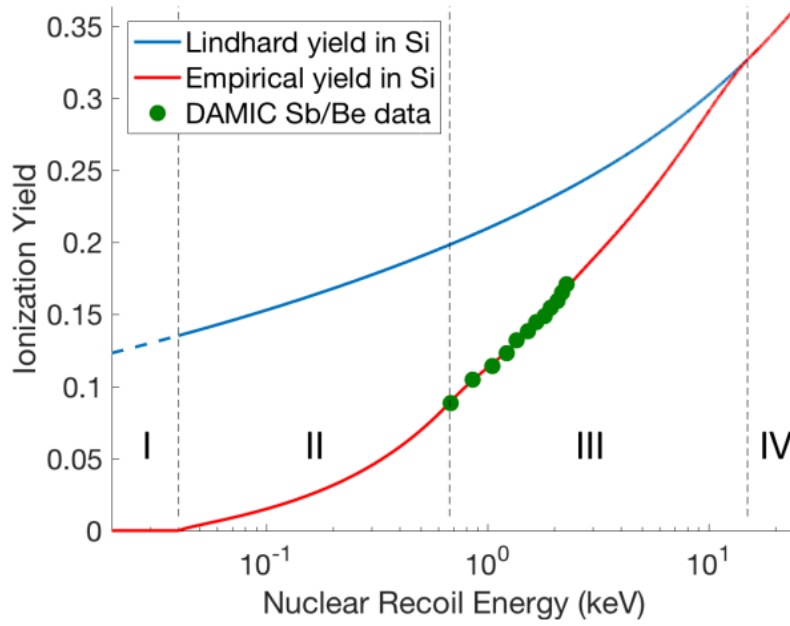


Figura 5: Gráfica Yield de ionización vs E_r .

En esta figura se pueden apreciar ambas curvas ER y NR.

Es conocido que los eventos candidatos a interacción WIMP deben ser de tipo retroceso nuclear, por lo que se determina que los puntos que se encuentren en la curva NR y en la ventana centrada en la media μ con amplitud dos veces la desviación estándar $\mu \pm 2\sigma$, son los eventos candidatos a interacción WIMP.

La ventana $\mu \pm 2\sigma$ se define en la calibración y garantiza el 95 % de aceptación de retrocesos nucleares sin comprometer la señal.

Una vez se obtienen los eventos de NR, se estudia para cada masa m_χ , la sección eficaz que se puede excluir.

Para ello es necesario conocer el número de eventos que debería producir un WIMP de masa m_χ y sección eficaz σ_n .

La siguiente expresión permite determinarlo con exactitud:

$$N_{sig}(m_\chi, \sigma_n) = \sum_{E_r} \frac{dR}{dE_r} \varepsilon(E_r) \Delta E_R \quad (28)$$

Se va a proceder a desglosar la ecuación con el objetivo de comprender cada componente.

- $\frac{dR}{dE_R}$ Este término representa la convolución del halo donde se conoce la densidad local estándar.

$$\frac{dR}{dE_r} = \frac{\rho_0}{m_\chi} \frac{\sigma_n A^2 F^2(q)}{2\mu_{\chi n}^2} \eta(v_{\min}) \quad (29)$$

Siendo $\mu_{\chi n}$ la masa reducida del WIMP-núcleo, A el número atómico, F(q) el factor de forma de Helm y $\eta(v_{\min})$ es la función halo integral.

Todas las variables a excepción de la masa y la sección eficaz están tabuladas y dependen explícitamente del material empleado.

- $\varepsilon(E_r)$ representa la eficiencia total.

$$\varepsilon(E_r) = M_j T_{live} \epsilon_j \quad (30)$$

Siendo M_j la masa activa:

$$M_j = N m_{cristal} f_{fid} \quad (31)$$

Donde N es el número de detectores en el sistema, $m_{cristal}$ es la masa del cristal del semiconductor y f_{fid} es la fracción fiducial, es la fracción de volumen que se obtiene tras los cortes radial y superficial.

Todos estos datos son conocidos y dependen de los materiales empleados y el tipo de detector, por ejemplo para el Ge iZIP:

$m_{cristal}$	1.39 [kg]
N	10
f_{fid}	0.85
M_j	11.8 [kg]

Tabla 2: Valores de masa activa para el Ge iZIP.

Volviendo a 31, la variable T_{live} es el tiempo efectivo del experimento, está en función de dos factores, la calidad de la medida y el factor de disponibilidad, que representa la fracción del tiempo en que el detector estaba encendido y listo para registrar eventos.

$$T_{live} = t_{total} \times f_{disp} \times f_{cal} \quad (32)$$

En CDMS SNOLAB, $T_{live} = 5[\text{años}] \times 0,85 \times 0,95 = 4[\text{años}]$.

ϵ_j es la eficiencia post-cortes que varía con la energía y también está tabulada. Se aproxima a un promedio del $\approx 75\%$ en iZIP por ejemplo.

- ΔE_r Es la anchura del Bin seleccionado, se hacen secciones de energía en las que se trabajan por separado con el objetivo de obtener una mayor precisión, cuanto más pequeño sea, mejor la aproximación; cuanto más grande, más rápido y tosco el cálculo. Por ejemplo 10 [eV] en HV o 0.5 [keV] en iZIP.

Se llega a la conclusión de que N_{sig} depende exclusivamente de la masa y la sección eficaz.

Como la masa viene implícita en variables como la distribución de velocidades o la masa reducida núcleo-WIMP, se va a proceder a reajustar la ecuación, dejando la parte de la masa incluida dentro de una función señal:

$$N_{sig}(m_\chi, \sigma_n) = \frac{\rho_0}{m_\chi} \frac{\sigma_n A^2 F^2(q)}{2\mu_{\chi n}^2} \eta(v_{\min}) \varepsilon(E_r) \Delta E_r \rightarrow \boxed{N_{sig}(m_\chi, \sigma_n) = \sigma_n S(m_\chi)} \quad (33)$$

Con el número de eventos que debería producir un WIMP de masa m_χ y sección eficaz σ_n , se procede a definir dos nuevas variables:

- N_{obs} : corresponde al número de candidatos NR vistos experimentalmente.
- N_{bkg} : corresponde al número esperado de fondo en la misma ventana, también tabulado.

Vamos a comparar N_{obs} con N_{sig} para ello se aplica la estadística de Poisson.

Para un valor de σ_n (y la masa que se barre), obtenemos la media de Poisson de eventos que el experimento debería ver:

$$\lambda(\sigma_n) = \sigma_n S(m_\chi) + N_{bkg} \quad (34)$$

La probabilidad de observar $\leq N_{obs}$ eventos con media λ es:

$$P(\leq N_{obs}; \lambda) = e^{-\lambda} \sum_{k=0}^{N_{obs}} \frac{\lambda^k}{k!} \quad (35)$$

Para cada masa se busca un único valor de σ_n que hace que la predicción sea compatible con los datos al 90 % de confianza.

Para ello se buscan los valores para que se cumpla:

$$P(\leq N_{obs}) = 0,10$$

Al imponerlo se garantiza que nueve de cada diez veces una señal más grande habría producido más sucesos de los observados, por eso la excluimos.

Para entender este razonamiento:

En CDMS λ es la media, es decir, cuántos sucesos espero ver si la materia oscura tuviera cierta sección eficaz.

También tenemos N_{obs} , número de candidatos observados experimentalmente.

Ahora se busca un límite al 90 % de confianza:

Para ello se descartan los valores de media tan grandes que dejan poca probabilidad de lograr un resultado tan bajo como el obtenido.

Se expresa como:

$$P = 10 \%$$

Esto marca un límite, todo lo que esté por arriba se descarta con un 90 % de confianza.

El razonamiento detrás de este proceso está basado en que hay muchas veces que al probar con una sección eficaz muy grande, es decir, una λ muy alta, la probabilidad obtenida es muy elevada, cuando realmente se han observado muy pocos eventos o ninguno, es por eso por lo que se fija un valor pequeño de probabilidad de un 10 %, porque realmente es improbable que ocurra ese evento.

Por eso el procedimiento busca el punto exacto donde esa probabilidad cae al 10 %.

Este tipo de análisis estadístico se realiza en casos con fenomenología extraña como en oscilaciones de neutrinos, ondas gravitacionales y experimentos como LIGO, donde se usa

el mismo criterio de “90 % C.L.” es común porque evita sobre-excluir fluctuaciones a la baja [9, 10].

Con esta información se puede graficar el resultado:

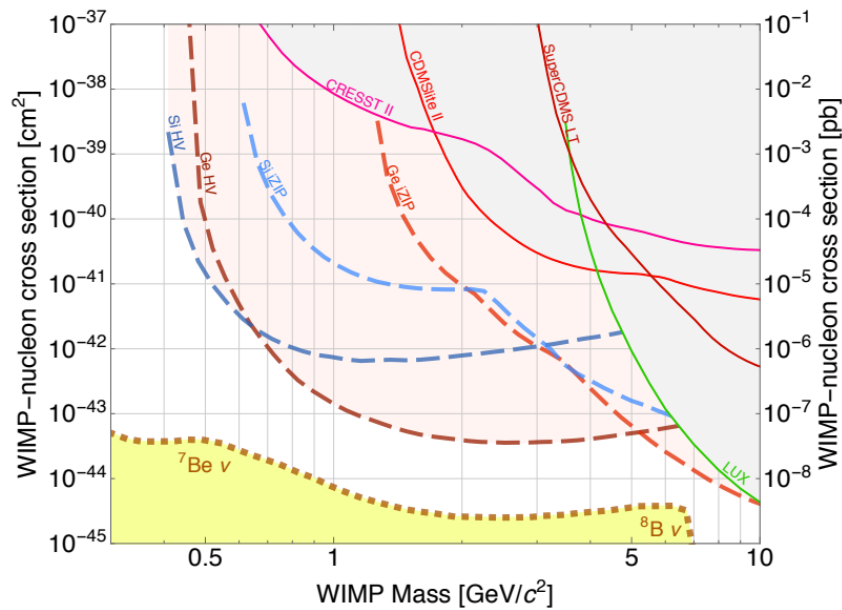


Figura 6: Gráfica σ_n vs m_χ de CDMS.

La gráfica representa la sección eficaz vs la masa, en la que los puntos que cumplen con ese valor de 90 % de confianza asociados entre masa y sección eficaz implican de tal forma que: todo punto por encima de esa curva supone una media tan grande que por eso queda excluida.

Todo punto por debajo de la curva no puede descartarse con los datos disponibles.

A modo de conclusión, la gráfica no es más que el conjunto de “pares masa-sección” que satisfacen esa misma condición de 90 % para cada masa explorada.

3.3.2 XENON

El procedimiento estadístico en la cámara de proyección temporal de xenón líquido de XENON es muy similar al procedimiento con CDMS por lo que en este apartado se abordan los procedimientos con una mayor superficialidad[11]:

a) Selección de candidatos NR.

1. Las señales primarias S1 (centelleo) y S2 (ionización) se corrigen a cS1 y cS2_b.
2. Con calibraciones ER (radón, tritio) y NR (fuentes de neutrones) se determinan las bandas ER y NR.
3. Se define una franja NR (aceptación 50 %).
4. Después de los cortes de calidad queda un número N_{obs} de candidatas NR.

b) **Cálculo del límite $\sigma_n^{90\%}(m_\chi)$.** Para ello se hará uso del mismo procedimiento empleado en CDMS, a partir de:

$$S(m_\chi) = \sum_{E_R} \frac{\rho_0}{m_\chi} \frac{A^2 F^2(q)}{2\mu_{\chi n}^2} \eta(v_{\min}) \varepsilon(E_R) M_{\text{act}} T_{\text{live}} \Delta E_R, \quad N_{\text{sig}} = \sigma_n S(m_\chi).$$

Se hace uso de la estadística de Poisson $\lambda = \sigma_n S(m_\chi) + N_{\text{bkg}}$ y se ajusta hasta que $P(N \leq N_{\text{obs}}) = 0,10$; el valor resultante de σ_n fija el límite al 90% C.L. Repitiendo el proceso para cada masa se obtiene la curva $\sigma_n^{90\%}(m_\chi)$ al igual que en CDMS[12].

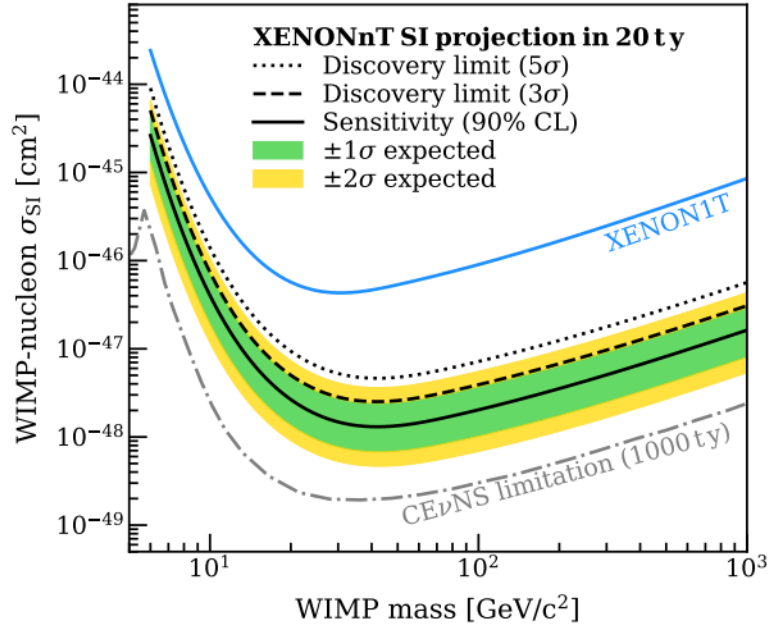


Figura 7: Gráfica σ_n vs m_χ de XENON.

Los puntos localizados por encima de la línea continua negra quedarían excluidos con los datos proyectados; los situados por debajo permanecerían compatibles con la hipótesis nula.

3.4 Propuesta experimental

A lo largo de esta subsección se presenta un script computacional, que tiene como objetivo simular, simplifcadamente, las interacciones entre WIMPs-Núcleo de distintos materiales a modo de detector.

Pese a no ser un experimento físico, este script permite llevar a cabo un análisis de parámetros, tendencias teóricas y aporta un cierto valor como herramienta didáctica.

El objetivo principal del simulador es realizar un conteo del número de eventos detectados por encima de un cierto umbral de energía de detección, además de estudiar la variación del histograma de eventos de retroceso nuclear y visualizar, al menos cualitativamente, cómo se comportarían diferentes detectores en función de los siguientes parámetros:

- La masa del WIMP m_χ
- La sección eficaz de la interacción σ_n
- El material del detector: germanio, silicio, xenón o aluminio.

La estructura del código está basada en bloques funcionales:

1. Materiales detectores

Para cada material Ge, Si, Xe y Al, se establecen y fijan las propiedades de masa atómica (A) y umbral energético [eV].

La elección de los materiales no es arbitraria, se deciden seleccionar el Ge, Xe y Si ya que son alternativas utilizadas en experimentos reales, sin embargo, el Al se encuentra actualmente en un estado de investigación por su posible régimen de superconductividad.

2. Energías de retroceso

Se calcula la energía transferida al núcleo haciendo uso de una aproximación cinemática clásica:

$$E_r \approx \frac{2\mu^2 v_\chi^2}{m_N} \quad (36)$$

Siendo:

- μ : La masa reducida WIMP-núcleo.
- m_N : La masa del núcleo.
- v_χ : velocidad de la partícula WIMP.

3. Filtro umbral

Una vez simuladas las distintas energías, aquellos eventos que no superen el umbral mínimo de detección serán descartados, de tal forma que se puede aproximar la simulación a una situación realista.

4. Generación de gráficos

Se crean histogramas de retrocesos individuales y también comparativos distinguiendo entre materiales y masas de WIMP.

Las gráficas obtenidas por la simulación son:

Histogramas de energía de retroceso multidetector:

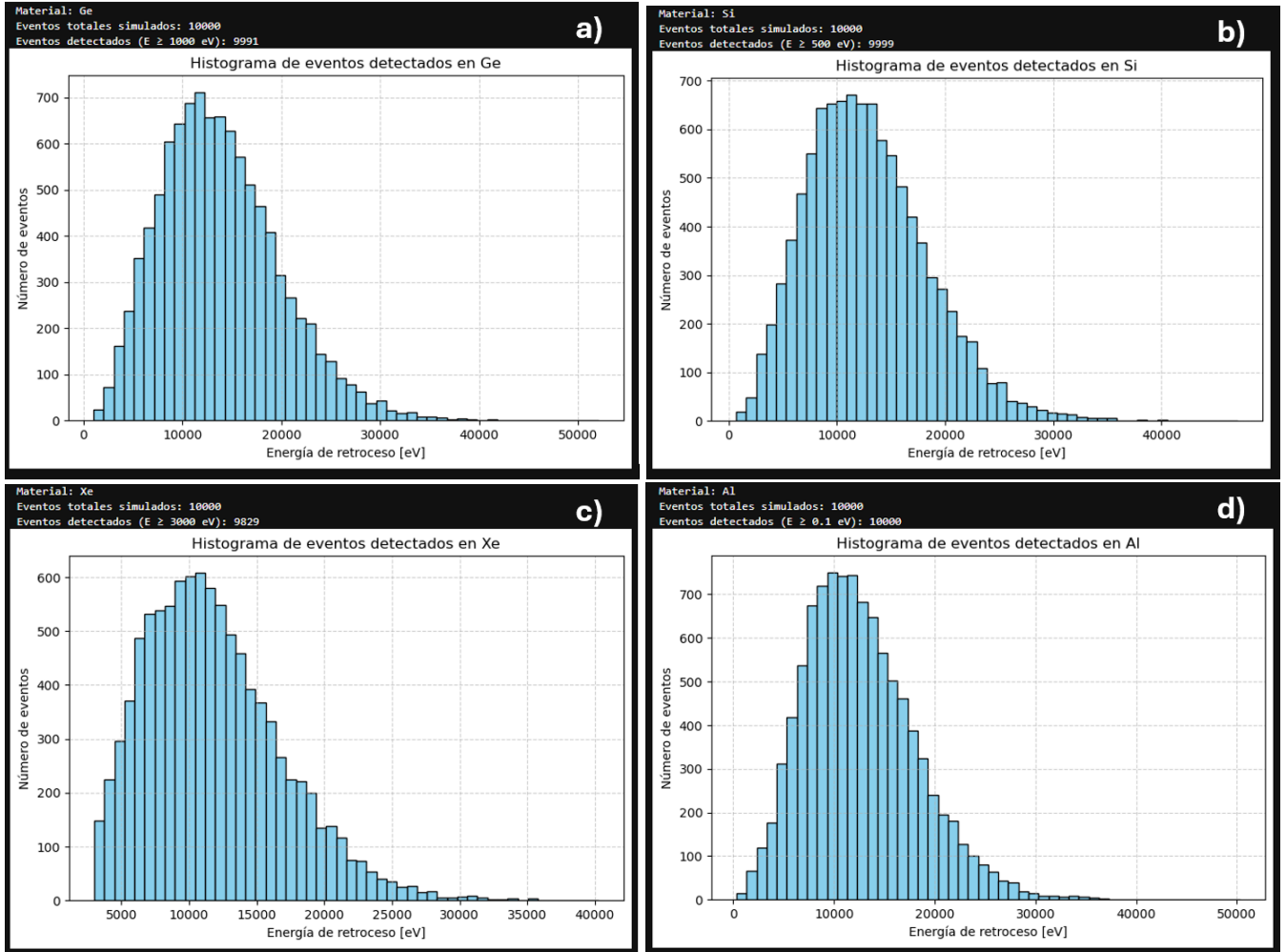


Figura 8: Histogramas de energías de retroceso para detectores Ge a), Si b), Xe c) y Al d). Para $m_\chi = 50[GeV]$ y $\sigma_n = 10^{-46}[cm^2]$.

Con su correspondiente comparativa:

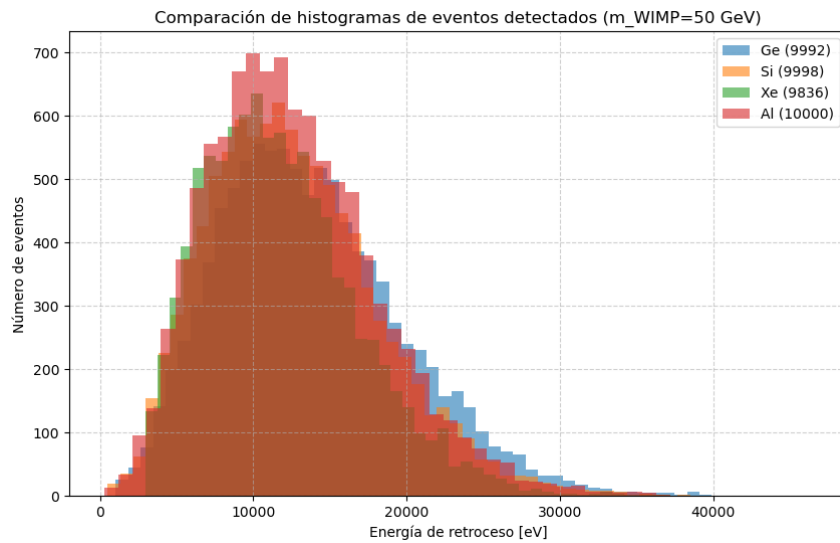


Figura 9: Comparativa de los histogramas de energías de retroceso para detectores Ge, Si, Xe y Al. Para $m_\chi = 50[GeV]$ y $\sigma_n = 10^{-46}[cm^2]$.

Histogramas de energía de retroceso multimasa:

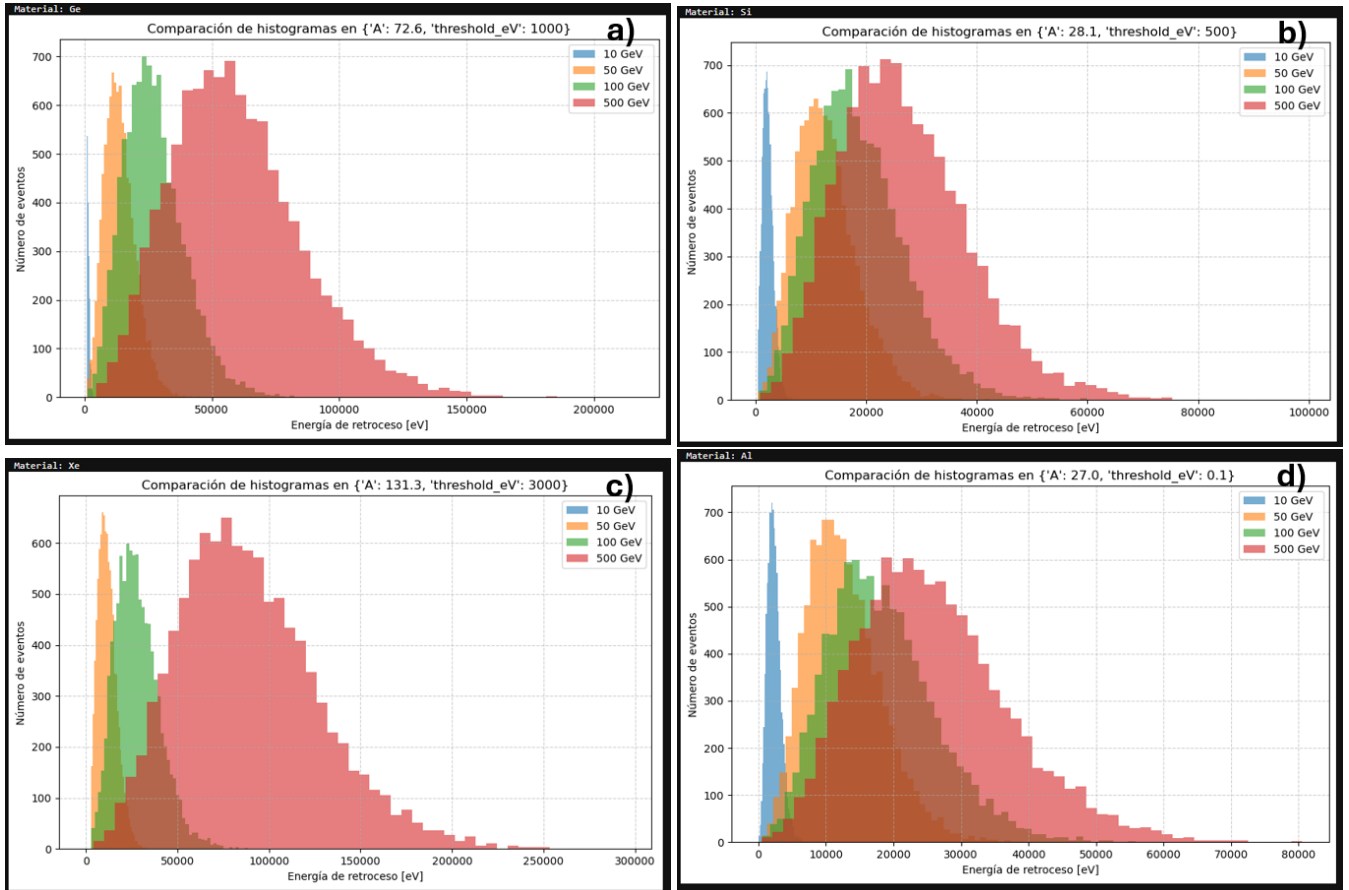


Figura 10: Histogramas de energías de retroceso para detectores Ge a), Si b), Xe c) y Al d). Variando $m_\chi = 10, 50, 100, 500[GeV]$ y $\sigma_n = 10^{-46}[cm^2]$.

Efecto del umbral energético:

Se analiza cómo cambia la forma del espectro al aplicar distintos valores de umbral de energía mínima detectable. A medida que se incrementa el umbral, se pierde una mayor proporción de eventos de baja energía, reduciendo así la sensibilidad a WIMPs más ligeros.

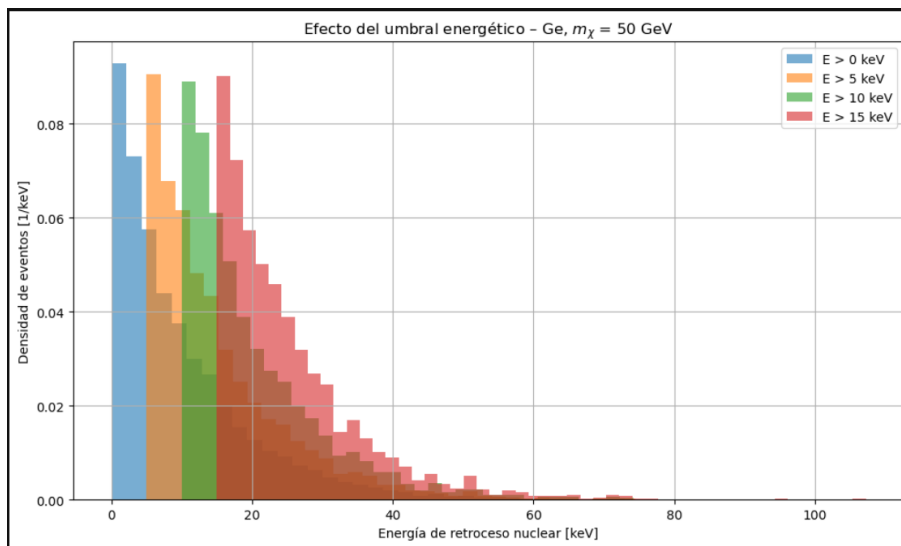


Figura 11: Espectros simulados aplicando distintos umbrales de energía: $E_{umbral} = 0, 5, 10, 15$ keV. Se observa cómo el corte de eventos afecta a la parte baja del espectro.

Efecto de la resolución del detector:

En esta simulación se añade una resolución finita al detector, modelada como un suavizado del histograma. Esto representa la incapacidad del detector para medir con precisión perfecta, lo que produce una distorsión visible del espectro original.

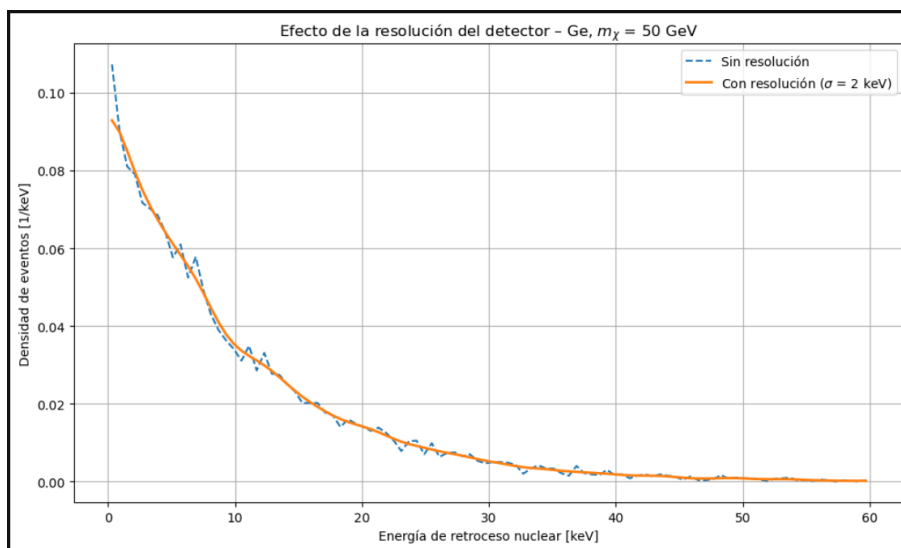


Figura 12: Comparación entre el espectro ideal y el espectro afectado por la resolución del detector ($\sigma = 2$ keV).

Efecto del fondo experimental:

Se incorpora un fondo constante que simula eventos no relacionados con la interacción WIMP-núcleo. Esto permite analizar cómo la señal puede verse enmascarada por ruido, afectando a la visibilidad y discriminación de eventos

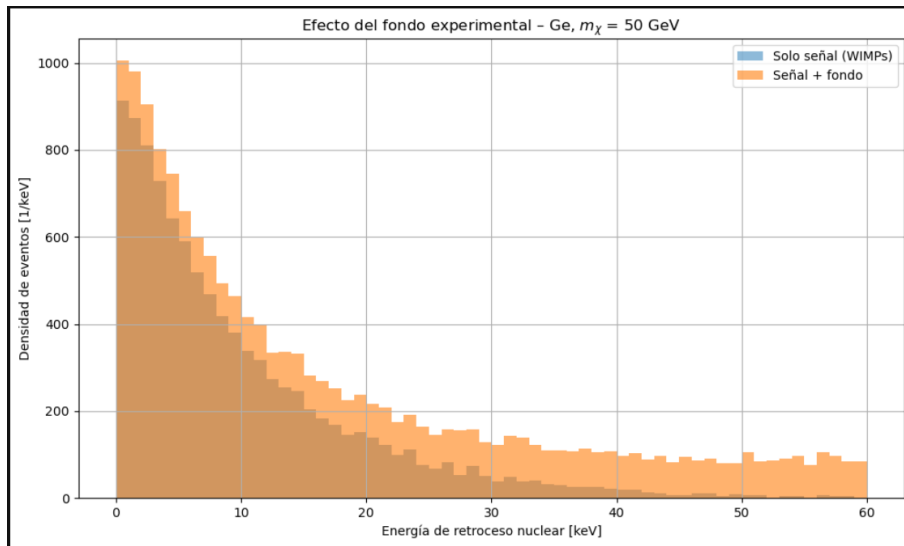


Figura 13: Comparación entre el espectro puro (solo WIMPs) y el espectro con fondo añadido. El fondo contribuye de forma casi uniforme en todo el rango energético.

Capítulo 4. DISCUSIÓN

La evolución térmica del universo temprano desarrollada en el marco teórico, permite establecer una relación directa entre las observaciones cosmológicas experimentales y las propiedades fundamentales de las partículas candidatas a materia oscura. Se ha llevado a cabo un análisis mediante la ecuación de Boltzmann[4] para determinar que la densidad relicta de materia oscura no depende explícitamente de la masa del candidato, sino de su sección eficaz de aniquilación. Este resultado muestra unas grandes consecuencias experimentales ya que, cualquier partícula que se postule como candidata a materia oscura debe presentar una sección eficaz compatible con la densidad observacional de la materia oscura:

$$\Omega_\chi \approx 0,3$$

A lo largo de este trabajo se ha llegado a establecer una estimación teórica sobre el orden de magnitud de la sección eficaz:

$$\langle\sigma v\rangle_{teórica} \approx 10^{-39}[cm^2]$$

Todo esto bajo el supuesto del fenómeno del Freeze-Out, en el rango de $T \sim 100$ [GeV] y para un valor de $x_{FO} \approx 10$ [4]. Este valor, conocido como el “milagro WIMP”[2], es realmente interesante, ya que parece concordar con las predicciones teóricas que van más allá del Modelo Estándar, como la supersimetría (SUSY)[5], que formula candidatos con masas del orden de 10–100 [GeV] y secciones eficaces de interacción débil.

El tratamiento experimental, tanto con CDMS como con XENON, ha permitido obtener una serie de resultados experimentales y establecer una serie de límites superiores sobre la sección eficaz de la interacción WIMP-núcleo en función de la masa[6, 11].

Pese a que continuamente exista una mejora considerable de estos experimentos, en cuanto a sensibilidad, no se ha llegado a observar ninguna señal concluyente de interacción, exclusivamente eventos candidatos a ella. Estas curvas muestran que, para una cierta masa de en torno a 0.5 [GeV], las secciones eficaces máximas permitidas son:

$$\sigma_{n_{CDMS}} \approx 10^{-43}[cm^2]$$

$$\sigma_{n_{XENON}} \approx 10^{-45}[cm^2]$$

Estos datos experimentales no confluyen con las estimaciones teóricas para WIMPs de masas intermedias, todo apunta que la predicción teórica obtenida quedará descartada, siempre y cuando no se tenga en cuenta el hecho de que el valor teórico obtenido corresponde a la sección eficaz determinada con la evolución termal de los datos del universo temprano. Esta diferencia entre sección eficaz cosmológica y experimental, estimadas mediante aniquilación y dispersión elástica respectivamente, justifica que los valores no coincidan[3].

El presente trabajo se ha completado con una propuesta de simulación que, aunque simplificada, permite visualizar claramente la dependencia existente entre la energía de retroceso en la interacción WIMP-Detector.

Se han generado histogramas que confirman cómo, para una sección eficaz fija, el espectro de eventos varía notablemente entre materiales como Ge, Si, Xe y Al. Este análisis refleja

la importancia de los umbrales de detección, la masa atómica y la resolución energética para poder optimizar la sensibilidad experimental.

La comparación de los histogramas variando la masa, permite observar el desplazamiento observado del espectro de retroceso, siempre hacia mayores energías a medida que se incrementa la masa del WIMP. Este comportamiento es realmente coherente con los resultados de CDMS y XENON[10, 12], además refuerza la utilidad de este tipo de simulaciones para comprender las implicaciones físicas de los parámetros teóricos.

El conjunto de resultados, obtenidos a lo largo de este trabajo, son compatibles con el marco teórico actual, además permite realizar una conexión estable entre la evolución cosmológica del universo temprano y la física de partículas más allá del Modelo Estándar.

Sin embargo, la ausencia de evidencias a la hora de determinar que estos eventos candidatos realmente son más que candidatos, obliga a cuestionar si los WIMPs realmente constituyen efectivamente la respuesta al enigma de la materia oscura, o si será necesario tener en consideración otros candidatos, o incluso un cambio de paradigma teórico[2].

Capítulo 5. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Este trabajo ha permitido explorar las bases en la búsqueda de la materia oscura, priorizando en los modelos teóricos de los candidatos más prometedores (WIMPs).

También se ha profundizado en los principales métodos de detección de materia oscura, tanto método de detección directa (CDMS y XENON) [6, 11] o indirecta[14, 13]. Sin embargo, existe una gran complejidad y variabilidad a la hora de afrontar el problema, existen numerosas líneas de investigación que pueden aportar a enriquecer, ampliar y profundizar el conocimiento actual.

Una de esas líneas fundamentales consiste en optimizar el marco experimental actual, y es que, aunque los actuales experimentos como CDMS o XENON han logrado alcanzar una alta sensibilidad en la medida y predicción, la búsqueda o creación de nuevos materiales, semiconductores, superconductores o nuevas tecnologías criogénicas, pueden dar lugar a la optimización de los experimentos[10]. Mejorando así la capacidad de detección, sobre todo con señales muy débiles. La propuesta experimental implementada en este trabajo, supone un paso hacia prototipos experimentales más avanzados y concretos.

Otra línea de investigación de gran interés es el avance de los modelos teóricos alternativos a los actuales. Aunque parezca que los candidatos están claros e identificados, existen nuevas propuestas aún por estudiar; como los dark photons, partículas ultraligeras o escenarios de materia oscura primordial no térmica[2]. El avance en estos paradigmas puede suponer no solo un refinamiento del marco teórico, sino una adaptación de los métodos experimentales por medio de nuevas estrategias observacionales.

Asimismo, la detección indirecta de materia oscura mediante la búsqueda de productos de aniquilación o decaimiento realmente abre un frente de investigación esencial. Actualmente, existen numerosas futuras campañas que, mediante telescopios terrestres y espaciales como Cherenkov Telescope Array o experimentos como IceCube[14], pueden ser un valor añadido a la solución, o bien con conclusiones propias mediante sus evidencias observacionales, o bien aportando información de calidad y contrastada a los experimentos de detección directa, generando así una sinergia entre observación y experimentación directa.

En el plano computacional, la aplicación de inteligencia artificial, machine learning, redes neuronales, etc. puede suponer una línea emergente para el análisis de los datos experimentales, dada la alta capacidad que esta tecnología presenta para analizar y comparar grandes volúmenes de datos, lo que podría permitir optimizar la identificación de los eventos en experimentos como CDMS o XENON, algo realmente valioso dado el raro carácter de las interacciones entre materia oscura y materia bariónica.

Además, las implicaciones cosmológicas y filosóficas no deben ser ignoradas; el hallazgo o ausencia de señales de materia oscura tiene consecuencias directas, como el replanteamiento de teorías actuales o incluso reconsiderar alternativas como las teorías de gravedad modificada[2] que cuestionan el concepto de materia oscura.

El conjunto de estas líneas no solo fortalece y diversifica la búsqueda de la materia oscura, sino que también abre paso a nuevos caminos, nuevas formas de pensar sobre fundamentos teóricos más profundos en el marco de la física actual. Abordar estos caminos de manera colectiva, interdisciplinar y transparente será esencial para poder avanzar hasta la resolución de uno de los mayores enigmas cosmológicos.

Capítulo 6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones del trabajo

El principal objetivo del trabajo era analizar las características y propiedades fundamentales de los candidatos a materia oscura, habiendo realizado un especial énfasis en los WIMPs, llevando a cabo una serie de predicciones teóricas y evidencias experimentales en experimentos de detección directa e indirecta.

En concreto, se han hecho una serie de deducciones teóricas como, por ejemplo, la estimación de la sección eficaz necesaria para justificar la abundancia actual de materia oscura. Esta sección eficaz ha sido sensibilizada mediante el uso de los datos aportados por los experimentos CDMS y XENON.

Además, se ha llevado a cabo un análisis de los fundamentos físicos, metodologías estadísticas y resultados experimentales de los principales detectores. Completando con una propuesta experimental materializada en una simulación, que permite determinar cualitativamente la dependencia entre las propiedades del detector y la masa del WIMP.

En definitiva, el trabajo cumple con los objetivos propuestos, estableciendo un puente entre teoría y experimentación, ofreciendo una visión estructurada sobre los desafíos y avances en la búsqueda de materia oscura.

6.2 Conclusiones personales

El presente Trabajo Fin de Grado ha supuesto una experiencia altamente enriquecedora, tanto en el plano académico como en el plano personal. Además, a nivel intelectual me ha permitido sumergirme en algunos de los pilares de la física moderna como son la cosmología, la física de partículas y el desarrollo teórico de modelos.

A nivel personal, este trabajo no sólo me confirma que la física teórica es un área que me interesa, sino que me motiva, y que deseo seguir profundizando en ella. En concreto con el tema abordado, la materia oscura impone una cierta humildad sobre la raza humana ya que, claramente aún estamos lejos de comprender plenamente la composición del universo, y ese misterio precisamente es lo que lo hace tan fascinante.

Capítulo 7. REFERENCIAS

Referencias

- [1] Planck Collaboration et al. “*Planck* 2018 results: VI. Cosmological parameters”. En: *Astronomy & Astrophysics* 641 (sep. de 2020), A6. ISSN: 0004-6361, 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910. URL: <https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201833910> (visitado 21-05-2025).
- [2] Gianfranco Bertone, ed. *Particle dark matter: observations, models and searches*. OCLC: ocn351325484. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN: 978-0-521-76368-4.
- [3] Edward Kolb y Michael S. Turner. *The Early Universe*. eng. Boulder: Chapman y Hall/CRC, 2018. ISBN: 978-0-201-62674-2 978-0-429-97249-2.
- [4] Scott Dodelson y Fabian Schmidt. *Modern cosmology*. eng. Second edition. London San Diego, CA Cambridge, MA Oxford: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2021. ISBN: 978-0-12-815948-4.
- [5] Gerard Jungman, Marc Kamionkowski y Kim Griest. “Supersymmetric dark matter”. en. En: *Physics Reports* 267.5-6 (mar. de 1996), págs. 195-373. ISSN: 03701573. DOI: 10.1016/0370-1573(95)00058-5. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0370157395000585> (visitado 21-05-2025).
- [6] The CDMS II Collaboration. “Dark Matter Search Results from the CDMS II Experiment”. en. En: *Science* 327.5973 (mar. de 2010), págs. 1619-1621. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1186112. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1186112> (visitado 21-05-2025).
- [7] R. Abusaidi et al. “Exclusion Limits on the WIMP-Nucleon Cross Section from the Cryogenic Dark Matter Search”. en. En: *Physical Review Letters* 84.25 (jun. de 2000), págs. 5699-5703. ISSN: 0031-9007, 1079-7114. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.5699. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.5699> (visitado 21-05-2025).
- [8] D. S. Akerib et al. “Exclusion limits on the WIMP-nucleon cross section from the first run of the Cryogenic Dark Matter Search in the Soudan Underground Laboratory”. en. En: *Physical Review D* 72.5 (sep. de 2005), pág. 052009. ISSN: 1550-7998, 1550-2368. DOI: 10.1103/PhysRevD.72.052009. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.72.052009> (visitado 21-05-2025).
- [9] S. Yellin. “Finding an upper limit in the presence of an unknown background”. en. En: *Physical Review D* 66.3 (ago. de 2002), pág. 032005. ISSN: 0556-2821, 1089-4918. DOI: 10.1103/PhysRevD.66.032005. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.66.032005> (visitado 21-05-2025).
- [10] R. Agnese et al. “Projected Sensitivity of the SuperCDMS SNOLAB experiment”. En: *Physical Review D* 95.8 (abr. de 2017). arXiv:1610.00006 [physics], pág. 082002. ISSN: 2470-0010, 2470-0029. DOI: 10.1103/PhysRevD.95.082002. URL: <http://arxiv.org/abs/1610.00006> (visitado 21-05-2025).
- [11] E. Aprile et al. “Dark Matter Search Results from a One Tonne \times Year Exposure of XENON1T”. En: *Physical Review Letters* 121.11 (sep. de 2018). arXiv:1805.12562 [astro-ph], pág. 111302. ISSN: 0031-9007, 1079-7114. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.111302. URL: <http://arxiv.org/abs/1805.12562> (visitado 21-05-2025).
- [12] The XENON collaboration et al. “Projected WIMP Sensitivity of the XENONnT Dark Matter Experiment”. En: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2020.11 (nov. de 2020). arXiv:2007.08796 [physics], págs. 031-031. ISSN: 1475-7516.

- DOI: 10.1088/1475-7516/2020/11/031. URL: <http://arxiv.org/abs/2007.08796> (visitado 21-05-2025).
- [13] Fermi-LAT Collaboration. “Searching for Dark Matter Annihilation from Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies with Six Years of Fermi-LAT Data”. En: *Physical Review Letters* 115.23 (nov. de 2015). arXiv:1503.02641 [astro-ph], pág. 231301. ISSN: 0031-9007, 1079-7114. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.231301. URL: <http://arxiv.org/abs/1503.02641> (visitado 21-05-2025).
- [14] IceCube Collaboration et al. “Search for annihilating dark matter in the Sun with 3 years of IceCube data”. En: *The European Physical Journal C* 77.3 (mar. de 2017). arXiv:1612.05949 [astro-ph], pág. 146. ISSN: 1434-6044, 1434-6052. DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4689-9. URL: <http://arxiv.org/abs/1612.05949> (visitado 21-05-2025).
- [15] Marco Cirelli et al. “PPPC 4 DM ID: A Poor Particle Physicist Cookbook for Dark Matter Indirect Detection”. En: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2011.03 (mar. de 2011). arXiv:1012.4515 [hep-ph], págs. 051-051. ISSN: 1475-7516. DOI: 10.1088/1475-7516/2011/03/051. URL: <http://arxiv.org/abs/1012.4515> (visitado 21-05-2025).

Capítulo 8. ANEXOS

Anexo A: Código del simulador

-*- coding: utf-8 -*-

”

El programa es un simulador de detección directa de WIMPs, genera retrocesos nucleares por interacciones WIMP-Núcleo para distintos materiales.

Permite analizar el número de eventos que quedan por encima del umbral de detección y cómo cambia el espectro de retrocesos cuando se varía: la masa del WIMP, la sección eficaz y el material del detector.

@author: Pedro CJ

”

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from math import log
```

```
import pandas as pd
```

```
import seaborn as sns
```

```
from scipy.ndimage import gaussianfilter1d
```

se definen las propiedades de masa atómica y umbral de energía [eV] para cada material.

```
materiales =
```

```
'Ge': 'A': 72.6, 'thresholdeV' : 1000,
```

```
'Si': 'A': 28.1, 'thresholdeV' : 500,
```

```
'Xe': 'A': 131.3, 'thresholdeV' : 3000,
```

```
'Al': 'A': 27.0, 'thresholdeV' : 0,1
```

```
def simulacioneVentos(material, mwimpGeV, sigmacm2, nevents = 10000) :
```

”

Simula energías de retroceso para interacciones WIMP-núcleo.

Parámetros:

material: dict con 'A' y 'threshold_{eV}'

m_wimp_{GeV} : *masa del WIMP [GeV]*

sigma_cm₂ : *sección eficaz [cm²]*

n_events : *número de eventos a simular*

Return:

np.array de energías de retroceso [eV]

```
”  
A = material['A']  
m_nucleoGeV = A * 0,9315masanucleoen[GeV]  
mu = (m_wimpGeV * m_nucleoGeV)/(m_wimpGeV +  
m_nucleoGeV)masareducida  
Velocidades WIMP: media 220 km/s, dispersión 270  
[km/s]  
v_wimp = np.random.normal(220e3, 50e3, n_events)en[m/s]  
Energía máxima transferida (simplificada)  $2^2 v^2$   
/ m_nucleo  
E_rJ = 2 * (mu * 1,783e - 27) * *2 * v_wimp * *2/  
(m_nucleoGeV * 1,783e - 27)  
E_reV = E_rJ/1,602e - 19JBeV  
return E_reV  
def filtrar_por_umbral(energias, umbral_eV) :  
”  
Filtra los eventos por encima del umbral de energía.  
Esta función añade realismo a la simulación ya que, en la realidad,  
los detectores no pueden medir eventos que ocurran por  
debajo de cierto umbral energético.  
Parámetros:  
energias: np.array de energías de retroceso [eV]  
umbral_eV : umbraldeenergía[eV]  
Return:  
np.array de energías detectadas [eV]  
”  
eventos_detectados = energias[energias >= umbral_eV]  
return eventos_detectados  
def graficar_histograma(energias, material_nombre, bins = 50) :  
”  
Grafica el histograma de energías de retroceso.  
Parámetros:  
energias: np.array de energías [eV]  
material_nombre : nombredelmaterial(str)
```

bins: número de bins del histograma

”

```
plt.figure(figsize=(8, 5))
```

```
plt.hist(energias, bins=bins, color='skyblue',  
edgecolor='black')
```

```
plt.xlabel('Energía de retroceso [eV]')
```

```
plt.ylabel('Número de eventos')
```

```
plt.title(f'Histograma de eventos detectados en material_{nombre}')
```

```
plt.grid(True, linestyle='-', alpha=0.6)
```

```
plt.show()
```

```
def graficar_comparacion_materiales(materiales, m_wimp_GeV, sigma_cm2, n_eventos = 10000, bins =  
50) :
```

”

Grafica los histogramas de energía de retroceso de varios materiales en una sola gráfica.

Parámetros:

materiales: dict con las propiedades de los materiales

m_wimp_{GeV} : *masa de la WIMP [GeV]*

σ_{cm^2} : *sección eficaz [cm^2]*

$n_{eventos}$: *número de eventos a simular*

bins: número de bins del histograma

”

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
```

```
for nombre, material in materiales.items():
```

```
energias = simulacion_eventos(material, m_wimp_GeV, sigma_cm2, n_eventos)
```

```
detectados = filtrar_por_umbral(energias, material['threshold_eV'])
```

```
plt.hist(detectados, bins=bins, alpha=0.6, label=f'{nombre} (len={len(detectados)})',  
histtype='stepfilled')
```

```
plt.xlabel('Energía de retroceso [eV]')
```

```
plt.ylabel('Número de eventos')
```

```
plt.title(f'Comparación de histogramas de eventos detectados ( $m_{WIMP} = m_wimp_{GeV}$ )')
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True, linestyle='-', alpha=0.6)
```

```
plt.show()
```

```
def graficar_comparacion_masas(material, nombre_material, masas_wimp, sigma_cm2, n_eventos =
10000, bins = 50) :
```

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
```

```
”
```

Grafica histogramas para distintas masas de WIMP en un solo material.

Parámetros:

material: dict con propiedades del material

masas_wimp : listademasasdeWIMP[GeV]

sigma_cm2 : sección eficaz[cm²]

n_eventos : número de eventos

bins: número de bins del histograma

```
”
```

```
for m_wimp in masas_wimp :
```

```
energias = simulacion_eventos(material, m_wimp, sigma_cm2, n_eventos)
```

```
detectados = filtrar_por_umbral(energias, material['threshold_eV'])
```

```
plt.hist(detectados, bins=bins, alpha=0.6, label=f'm_wimp GeV', histtype = 'stepfilled')
```

```
plt.xlabel('Energía de retroceso [eV]')
```

```
plt.ylabel('Número de eventos')
```

```
plt.title(f'Comparación de histogramas en nombre_material')
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True, linestyle='-', alpha=0.6)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

```
m_wimp_GeV = 50
```

```
sigma_cm2 = 1e-
```

```
n_eventos = 10000
```

```
exposicion_kg_dia = 1000 * 3651 toneladas durante 1 año
```

```
for nombre, material in materiales.items():
```

```
energias = simulacion_eventos(material, m_wimp_GeV, sigma_cm2, n_eventos)
```

```
detectados = filtrar_por_umbral(energias, material['threshold_eV'])
```

```
Escalado de eventos detectados a exposición real eventos_esperados = (len(detectados)/n_eventos)*
exposicion_kg_dia
```

```
print(f': nombre')
```

```
print(f'Eventos simulados detectados: len(detectados) de n_eventos')
```

```
print(f'Eventos esperados en 1 tonelada/año: eventoseesperados : ,2f')
```

```
graficarhhistograma(detectados, nombre)
```

```
graficarccomparacionmultimaterial(materiales, mwimpGeV = 50, sigmacm2 = 1e-46, neventos = 10000)
```

```
masas = [10, 50, 100, 500]
```

```
sigmacm2 = 1e - 46
```

```
neventos = 10000
```

```
exposicionkgadia = 1000 * 3651toneladadurante1año
```

```
for nombre, material in materiales.items():
```

```
print(f': nombre')
```

```
for mwimpinmasas :
```

```
energias = simulacioneventos(material, mwimp, sigmacm2, neventos)
```

```
detectados = filtrarporumbral(energias, material['thresholdeV'])
```

```
eventoseesperados = (len(detectados)/neventos) * exposicionkgadia
```

```
print(f' mwIMP = mwimpGeV & detectados = len(detectados) & esperadoseventoseesperados : ,2f')
```

Gráfico conjunto de histogramas para las masas en este material

```
graficarccomparacionmmasas(material, nombre, masas, sigmacm2, neventos)
```

parámetros

```
neventos = 10000
```

```
masawIMPGeV = 50MasafijadelWIMP
```

```
material = "Ge" Material fijo
```

Simulación de espectro de energía de retroceso (ejemplo cualitativo)

```
energias = np.random.exponential(scale=10, size=neventos)
```

Umbrales energéticos que se quieren aplicar umbrales = [0, 5, 10, 15]

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
```

```
for umbral in umbrales:
```

```
energiasfiltradas = energias[energias > umbral]
```

```
plt.hist(energiasfiltradas, bins = 50, alpha = 0,6, label = f"E > umbralkeV", density = True, histtype = 'stepfilled')
```

```
plt.xlabel('.Energía de retroceso nuclear [keV]')
```

```
plt.ylabel("Densidad de eventos [1/keV]")
```

```
plt.title(rf'.Efecto del umbral energético - material, mχ = masawIMPGeVGeV')
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

Simulación cualitativa de energías de retroceso

```
energias = np.random.exponential(scale=10, size=n_ventos)
```

Histograma original (sin resolución)

```
hist, bins = np.histogram(energias, bins=100, range=(0, 60), density=True)
```

```
centros = 0.5 * (bins[1:] + bins[:-1])
```

Aplicar resolución del detector (suavizado tipo gaussiano)

```
sigma_detector = 2ResoluciondeldetoreнкеV
```

```
hist_suavizado = gaussian_filter1d(hist, sigma = 2)
```

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
```

```
plt.plot(centros, hist, label="Sin resolución", linestyle='--')
```

```
plt.plot(centros, hist_suavizado, label = r"Con resolución ( $\sigma = 2$  keV)", linewidth=2)
```

```
plt.xlabel("Energía de retroceso nuclear [keV]")
```

```
plt.ylabel("Densidad de eventos [1/keV]")
```

```
plt.title(rf"Efecto de la resolución del detector – material,  $m_\chi = \text{masa}_W \text{IMP}_{GeV} \text{GeV}$ ")
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

Simulación de señal de WIMPs (espectro decreciente) `energias_senal = np.random.exponential(scale = 10, size = n_ventos)`

Simulación de fondo constante (ruido experimental)

```
n_fondo = int(n_ventos * 0,5)50%deltotalcomofondo
```

```
energias_fondo = np.random.uniform(low = 0, high = 60, size = n_fondo)
```

Combinación total señal + fondo

```
energias_totales = np.concatenate([energias_senal, energias_fondo])
```

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
```

```
plt.hist(energias_senal, bins = 60, range = (0, 60), density = False, alpha = 0,5, label = "Solo señal (WIMPs)")
```

```
plt.hist(energias_totales, bins = 60, range = (0, 60), density = False, alpha = 0,6, label = "Señal + fondo")
```

```
plt.xlabel("Energía de retroceso nuclear [keV]")
```

```
plt.ylabel("Densidad de eventos [1/keV]")
```

```
plt.title(rf"Efecto del fondo experimental – material,  $m_\chi = \text{masa}_W \text{IMP}_{GeV} \text{GeV}$ ")
```

```
plt.legend()  
plt.grid(True)  
plt.tight_layout()  
plt.show()
```

Declaración de uso de IA en la elaboración del TFG.

En la elaboración de este TFG, se ha recurrido a herramientas de IA para optimizar el proceso de redacción y citación. Estas herramientas han sido fundamentales para garantizar la calidad y precisión en la presentación de la información. A continuación, se describen las herramientas empleadas:

■ Redacción académica:

- Herramienta: Chat GPT 4o y Chat GPT o3.
- Funciones: organización de bibliografía, dudas con el uso de LaTeX y mejoras en la redacción y presentación del documento.

■ Gestión de referencias:

- Herramienta: ZoteroBib
- Funciones: gestión y organización de las referencias bibliográficas, asegurando que todas las citas cumplan con la normativa Vancouver. Esta herramienta facilitó la recopilación de fuentes relevantes y su adecuado formateo, lo que contribuyó a una presentación más profesional del trabajo.

