

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURA DE LA MATERIA, FÍSICA TÉRMICA Y
ELECTRÓNICA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Código de TFG: ETE15

Física de Astropartículas

Astroparticle Physics

Supervisor/es: Juan Abel Barrio Uña

Santiago Orta Blanco

Calificación: 9.1

Grado en Física

Curso académico 2024-25

Convocatoria extraordinaria

Física de Astropartículas: Búsqueda de Materia Oscura con Telescopios de Neutrinos

Resumen:

En este trabajo repasaremos de forma general el estado actual de la investigación sobre la materia oscura. Trataremos uno por uno los diferentes tipos de búsqueda y nos centramos más específicamente en las búsquedas indirectas. En concreto, haremos hincapié en la búsqueda de materia oscura por medio de la técnica de telescopios de neutrinos. Para ello, tomaremos como ejemplo principal un artículo del año 2022 de la colaboración *IceCube Neutrino Observatory* en el que se consigue utilizar por primera vez este detector para la búsqueda de partículas de materia oscura con masas $< 5\text{GeV}$, observando neutrinos de baja energía provenientes del Sol, que serían producidos por aniquilaciones de materia oscura dentro del mismo. En este artículo, no se encontró ningún flujo de neutrinos por encima del fondo en el rango de masas de materia oscura en que se hizo la búsqueda (5-100 GeV), con lo que se consiguió establecer uno de los límites más fuertes hasta ahora para la sección eficaz dependiente de espín para la interacción entre materia oscura y protones (del orden de 10^{-41}cm^2).

Abstract:

In this work we will take a general view at the current dark matter research. We will address one by one the different types of searches, and our focus will be on the indirect searches. This text will emphasize in the search of dark matter using the neutrino telescopes technique. We will take as an example an article published in 2022 by the IceCube Neutrino Observatory in which it is achieved for the first time a search for dark matter masses as low as 5 GeV with this detector. The objective of that paper was to detect low energy neutrinos who would had been produced by dark matter particles annihilations in the Sun. Such flux of neutrinos was not detected above the background of neutrinos in the selected dark matter range of mass (5-100 GeV). This lack of signal has led to one of the strongest constraints for spin-dependent dark matter-proton scattering cross section, at around 10^{-41}cm^2 .

Índice

1. Materia oscura	2
1.1. Física de partículas	3
1.2. Búsqueda de Materia Oscura	5
1.2.1. Búsquedas directas	5
1.2.2. Búsquedas indirectas	6
1.2.3. Búsquedas en aceleradores de partículas	7
2. Búsquedas indirectas	7
2.1. Rayos gamma	8
2.2. Rayos cósmicos	9
2.3. Neutrinos	9
3. Técnica de telescopios de Neutrinos	11
3.1. Técnica	11
3.2. IceCube	12
3.2.1. Instrumento	12
3.2.2. Resultados	14
4. Búsqueda de aniquilaciones de materia oscura en el Sol en el orden de GeV	14
4.1. Selección de eventos	14
4.2. Análisis	15
4.3. Incertidumbres sistemáticas	16
4.4. Resultados	17
5. Conclusión	19

1. Materia oscura

Antes de comenzar a tratar la búsqueda de materia oscura, conviene enmarcar primero la materia oscura en el contexto de la cosmología actual. También es conveniente repasar las pruebas de la existencia de la materia oscura.

Hoy en día el modelo estándar en cosmología es el modelo Λ CDM. Este modelo establece que el universo actual presenta una componente de materia de alrededor del 30%, del cual un $\sim 5\%$ corresponde a la materia bariónica, y un $\sim 25\%$ a la materia oscura. El restante $\sim 70\%$ se le atribuye a la energía oscura (representada con una Λ , de ahí el inicio del nombre del modelo), y se desprecia la contribución de las componentes de radiación y curvatura. La primera se desprecia debido a que su contribución, si bien en el pasado fue mayor, se considera que hoy es mínima. La segunda, representa una de las grandes incógnitas de la cosmología actual, que es la planitud del universo, que es compatible con un universo plano (curvatura nula). Este modelo, si bien no es perfecto y aún tiene problemas que resolver, consigue explicar de manera exitosa las abundancias primigenias de las diferentes componentes del universo, las épocas por las que ha pasado el universo desde los primeros instantes de su nacimiento, e incluso de sus estructuras a grandes escalas. Para esto último, es necesaria la introducción de la materia oscura “fría” (*Cold Dark Matter*, CDM, de ahí el nombre del modelo). Esta materia oscura fría es necesaria para explicar estas grandes estructuras ya que solo con la materia bariónica se cree que no se pueden haber formado, ya que no generaría suficiente tirón gravitatorio. Además, se dice que debe ser fría dado que debe tener una energía cinética lo suficientemente baja como para no poder escapar de los pozos gravitatorios y así aglomerarse y formar las estructuras a gran escala en las proporciones que las observamos hoy en día.

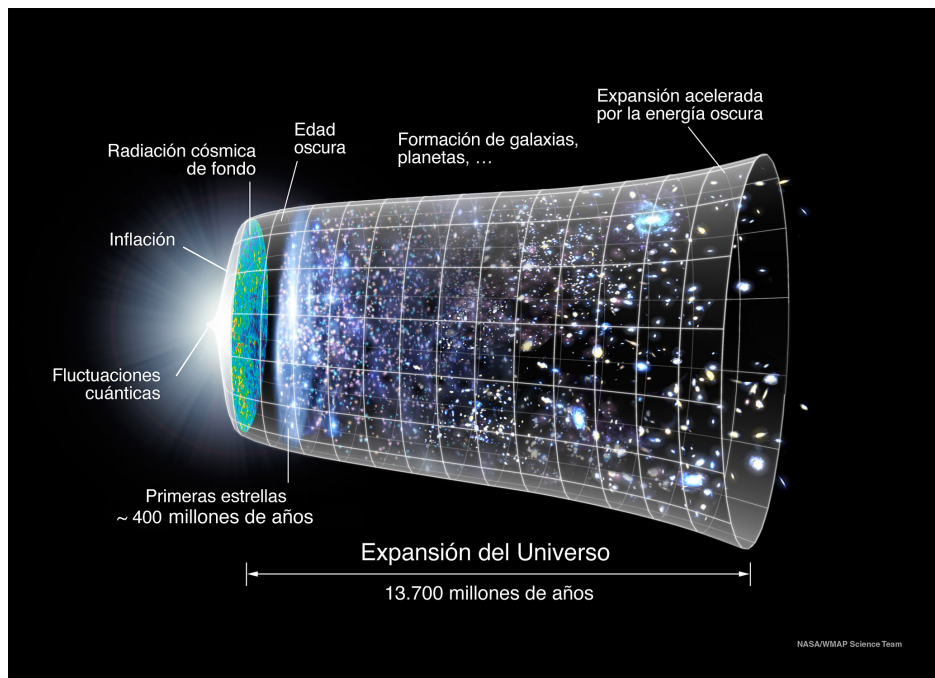


Figura 1: Historia del universo de acuerdo con Λ CDM

La materia oscura es transparente a la interacción electromagnética (de ahí su nombre) y a la interacción fuerte, y se cree que podría interactuar con la interacción débil, aunque de momento las únicas pruebas que tenemos de materia oscura han sido a través de la interacción gravitatoria. Si bien la naturaleza de la materia oscura sigue siendo incierta actualmente, su existencia no se pone

en duda. Existen numerosas y diversas pruebas en las que debido a la gravedad, se concluye que faltan componentes de masa muy apreciables, que no se pueden explicar con la materia bariónica. Ejemplos de esto son la rotación diferencial de las galaxias, la dispersión de velocidades en galaxias elípticas (lo cual se puede comprobar con el teorema del virial y relaciones de Faber-Jackson y Tully-Fisher), las lentes gravitacionales (existe una gran diferencia entre la masa cinética y lumínica, que son responsables de curvar la luz en los cúmulos y de la emisión de sus estrellas, respectivamente, por lo que se concluye que existe una fuerte componente que contribuye a la masa pero que no se encuentra en forma de masa visible) y la estructura a gran escala del universo (que se ha podido estudiar en gran parte gracias a la medición del fondo cósmico de microondas, que representa uno de los éxitos más fuertes del modelo, como se muestra en la figura 1)

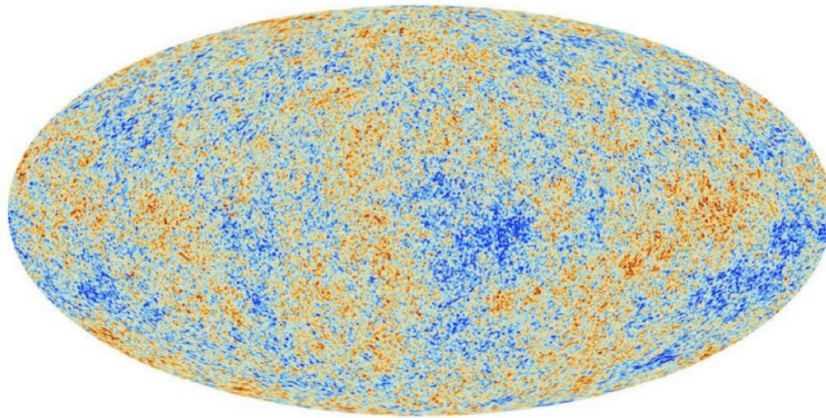


Figura 2: Fondo cósmico de microondas (CMB, *Cosmic Microwave Background*) tomado por el satélite Planck

El objetivo hoy en día, una vez aceptada la existencia de la materia oscura, es identificar de qué está compuesta. Para ello existen diferentes hipótesis: pueden ser partículas ya conocidas, partículas postuladas para resolver otros problemas que encajan como materia oscura, partículas postuladas desde cero, sectores “oscuros” compuestos de una variedad de partículas, e incluso agujeros negros, aunque esto lo estudiaremos en la siguiente sección. Uno de los pasos más importantes para poder identificar esta materia oscura será medir su masa, para lo cual se están realizando una amplia diversidad de experimentos con diferentes metodologías que buscan complementarse entre sí, y que veremos más adelante. En este trabajo nos centraremos principalmente en la búsqueda indirecta, y más concretamente en el telescopio de neutrinos *IceCube Neutrino Observatory* que se encuentra en el polo sur. Para más información se puede continuar consultando las referencias [1], [2] y [3].

1.1. Física de partículas

Dadas entonces las pruebas de la existencia de la materia oscura podemos pasar a estudiar los diferentes candidatos que se han postulado como sus partículas constituyentes. Para ello nos basaremos principalmente en las referencias [4] y [5].

En primer lugar, tenemos a los famosos WIMPs, cuyas siglas provienen del inglés, *Weakly Interacting Massive Particles* (que quiere decir, partículas masivas débilmente interactuantes). Esta opción ha conseguido mucha popularidad debido al fenómeno llamado, “el milagro WIMP”. Dicho fenómeno se refiere al hecho de que existen ampliaciones supersimétricas del modelo estándar que predicen de forma independiente a las mediciones hechas en cosmología la existencia de una partícula-

la con una masa similar a la de los bosones W^\pm y Z^0 que explicaría la abundancia primigenia que esperamos que tenga la materia oscura según los datos que tenemos hoy en día. Esta abundancia primigenia se relaciona con la sección eficaz de aniquilación de pares de materia oscura mediante:

$$\Omega_{\text{cold}} h^2 \simeq 0,1 \left(\frac{x_{\text{f.o.}}}{20} \right) \left(\frac{10^{-8} \text{ GeV}^{-2}}{\sigma_{\text{DM}+\text{DM} \leftrightarrow \text{anything}}} \right), \quad (1)$$

donde $x = \frac{m_{\text{DM}}}{T}$ y que en el *freeze out*¹ es solución a la siguiente ecuación:

$$\sqrt{x} \cdot e^{-x} = (m_{\text{DM}} \cdot M_P \cdot \sigma_{\text{DM}+\text{DM} \leftrightarrow \text{anything}}), \quad (2)$$

donde $M_P \approx 2,436 \cdot 10^{18} \text{ GeV}$ es la masa de Planck reducida.

Sin embargo, cabe destacar que esto podría tratarse de una mera coincidencia y que a día de hoy no se han encontrado resultados experimentales que apunten a su confirmación, aunque la búsqueda sigue en marcha.

Pasamos entonces a los axiones y las ALPs (del inglés, *Axion Like Particles*, partículas similares a axiones). Los axiones surgen como una partícula propuesta para resolver el problema CP fuerte de la cromodinámica cuántica (QCD). Se trata de un candidato viable a materia oscura dada su baja masa, larga vida y que son poco interactuantes. Sin embargo, los resultados experimentales apuntan a que no tiene suficiente masa como para dar cuenta de toda la materia oscura, solamente de parte de ella.

Por otro lado tenemos a los llamados “fotones oscuros”, partículas del sector oscuro, en el cual actuarían como partículas portadoras, de forma análoga a los fotones convencionales. Sin embargo, estos fotones oscuros sí tendrían masa, por lo que interactuarían gravitatoriamente, razón por la cual son candidatos aptos a materia oscura. Se buscan en diversos experimentos como en NA64 en el CERN, ABRACADABRA, HAYSTAC o ADMX. Para los fotones oscuros se han postulado diferentes mecanismos de producción, como dispersión de un fotón con electrones o positrones, aniquilación con un fotón produciendo un par electrón-positrón, conversión fotón-fotón oscuro o mecanismos de desalineación parecidos a los propuestos para la producción de axiones, entre otros.

Otro de los candidatos propuestos son los neutrinos estériles. Se trata de partículas similares a los neutrinos del modelo estándar, quitando las interacciones débiles. Estos neutrinos supondrían un candidato a materia oscura “templada” (*warm*) al estar en masas del orden de los keV. Si bien el principal modo de desintegración sería a los tres neutrinos activos, a la hora de realizar observaciones, el más interesante resulta ser la desintegración en un fotón y un neutrino, que permite observar ese fotón cuasi-monocromático en una línea de emisión a la mitad de la masa del neutrino estéril. Ha habido observaciones que afirman haber detectado esta línea en 3,5keV en cúmulos de galaxias y núcleos de galaxias, sin embargo, no se ha observado en otras galaxias en las que sí se esperaba hacerlo, por lo que quedamos a la espera de que futuros experimentos con una mayor resolución en energía permitan arrojar luz a estos resultados.

Quedan varios candidatos plausibles por mencionar, como las Q-balls, las CHAMPs, la materia oscura auto-interactuante, los modelos de Little Higgs, entre otros. Pero no son de interés para este trabajo así que no los trataremos. Finalmente, cabe destacar la posibilidad de que la materia oscura interactúe siguiendo una nueva fuerza perteneciente a un sector oscuro, o escondido, el cual

¹El término *freeze out* se refiere al desacoplamiento térmico de una especie de partículas del resto de especies. Esto sucede en el momento en el que ritmo de interacción de dicha especie cae por debajo del ritmo de expansión del universo, con lo que la densidad de partículas comóvil queda congelada (i.e. abundancia primigenia) y se dice que la especie se ha congelado.

podría ser arbitrariamente rico en las partículas e interacciones que lo constituyan, al presentarse virtualmente sin restricciones. Además, si bien no es necesario, se espera que este sector interactúe con nuestro sector visible. Al considerar un sector oscuro rango de masas posibles para la materia oscura se vuelve más amplio que el de masas posibles para las WIMPs, siendo este último de entre unos pocos GeV hasta el orden de algunos TeV.

1.2. Búsqueda de Materia Oscura

En esta sección abordaremos de manera general los diferentes tipos y medios de búsquedas que se están llevando a cabo en la actualidad para intentar encontrar posibles huellas de materia oscura. Se distinguen entonces los experimentos en tres grupos principales según su modo de operar: búsquedas directas, búsquedas indirectas y búsquedas con aceleradores de partículas.

Como adelanto, podemos mencionar que no se han conseguido aún detecciones claras de interacciones de materia oscura. Sin embargo, a raíz de no haberlas observado en ciertos experimentos, se ha podido ir acotando el rango de masas posibles, con lo que se pueden descartar diversos escenarios que se han postulado con anterioridad. En estos resultados, por el momento, han conseguido mayor éxito las búsquedas directas.[4]

1.2.1. Búsquedas directas

Para las búsquedas directas lo que esperamos observar son colisiones elásticas o inelásticas de núcleos atómicos o electrones con partículas de materia oscura, ya que sabemos que nuestra Galaxia está inmersa en un halo de materia oscura que forma parte de la misma. Tomaremos como guía para esta sección la referencia [4].

Antes de comenzar a analizar las posibles señales de materia oscura resulta conveniente dar cuenta del ruido de fondo que encontraremos y de sus orígenes. En primer lugar podemos destacar, en los detectores con xenón líquido, las desintegraciones débiles de segundo orden y las desintegraciones β del ^{214}Pb del radón que se encuentra mezclado con el xenón en el detector. Otras fuentes de ruido de fondo se deben a la radioactividad de los componentes de los detectores y a las partículas secundarias inducidas tras interacciones de muones cósmicos. Estas radiaciones cósmicas y del entorno se pueden aplacar colocando los detectores en montajes profundos bajo tierra y con estructuras de blindaje. Finalmente, también encontramos ruido de fondo irreductible debido al flujo de neutrinos pp provenientes del Sol², la atmósfera y el fondo difuso de supernovas.

Podemos pasar entonces a hacer un repaso general de los diferentes tipos de detecciones directas en base al método que utilizan:

Empezamos por los **detectores criogénicos** de estado sólido ³, que están optimizados para la búsqueda de partículas de materia oscura de baja masa, pudiendo buscar masas de WIMPs hasta de unos 0,03 GeV. Como ejemplos de esta clase de montaje tenemos experimentos como CRESST (que busca en el rango de masas de 115 MeV a 500 MeV), SNOLAB (cuyo objetivo es el rango de 0.05 GeV a 5 GeV), SuperCDMS (que ha conseguido límites superiores en el rango de 0.5 MeV a 10^4 MeV, así como en el rango de 1.5 eV a 40 eV para los fotones oscuros y ha conseguido límites para

²Las cadenas de reacciones nucleares en el interior del Sol, de las cuales la que más destaca es la cadena protón-protón (pp), pueden producir neutrinos (entre otras partículas), que llegan hasta la Tierra.

³Se trata de detectores a bajas temperaturas que buscan detectar la dispersión de partículas masivas de materia oscura con núcleos objetivos. Entre los experimentos más exitosos encontramos técnicas que combinan la detección de fonones con otros canales, como energía de ionización (EDELWEISS y SuperCDMS) o centelleos de luz (CRESS) (sección 36.5 de [6]).

ALPs en el rango de 40 eV a 500 keV) o MJD, *The Majoranna Demonstrator* (que ha conseguido límites para los axiones solares con masas entre 1,2 eV y 100 eV) .

Otro tipo de montaje a destacar son los que utilizan **gases nobles en fase líquida**⁴, que toman principalmente argón líquido y xenón líquido (los detectores con helio líquido aún se encuentran en fase I+D). De entre ellos podemos mencionar, para el xenón líquido, SURF, PandaX-4T y XENONnT, que buscan partículas con masas de alrededor de 6 GeV y secciones eficaces de nucleón-materia oscura independientes de espín a 36 GeV con un valor de $9,2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$. El argón líquido permite además distinguir entre eventos provenientes de dispersión de materia tanto con electrones (ER, *electronic recoil*) como con núcleos atómicos (NR, *nuclear recoil*), pagando el precio de tener umbrales de energía mayores que con el xenón líquido. Ejemplos de ello son The DarkSide-50 TPC y DEAP-3600. Cabe resaltar también que la siguiente generación de detectores de gases nobles líquidos se encuentra en construcción o en fase I+D, con DarkSide-20k, Argo, DARWIN/XLZ y PandaX-xT, lo que podría aumentar la sensibilidad de los resultados para diferentes candidatos a materia oscura en un 1 o 2 órdenes de magnitud.

Por otro lado, tenemos los **centelleadores** a temperatura ambiente. Estos detectores esperan observar centelleos producidos por la interacción de partículas de materia oscura del halo con los núcleos de los átomos de los centelleadores, estas señales estarían moduladas por el movimiento periódico de la Tierra a través del halo (la señal debe variar ya que la densidad de materia oscura no es la misma dentro de todo el halo). De entre ellos, DAMA/LIBRA ha sido el único del campo que declaró haber obtenido en el rango de 1-4 keV una señal anual modulada, que se atribuiría a la materia oscura. Sin embargo, esto no se pudo replicar y fue descartado más tarde por los experimentos ANAIS y COSINE-100. Actualmente se encuentra en construcción COSINE-200, que estará más profundo bajo tierra y será un experimento más grande, con un fondo reducido. También se pondrá en funcionamiento SABRE, una versión mejorada de DAMA/LIBRA.

Los **detectores de líquidos supercalientes** investigan las interacciones dependientes de espín, teniendo como objetivo núcleos con momento angular irregular debido a la dispersión elástica con WIMPs de masa similar a los núcleos objetivo [7]. La mejor restricción para la sección eficaz de materia oscura con protones (dependiente de espín) se ha obtenido en SNOLAB, con el experimento PICO-60, y su valor es de $3,2 \times 10^{-41} \text{cm}^2$ para una masa de 25 GeV. Si bien nos quedan aún otras técnicas por mencionar, las omitiremos por no ser el objeto de este trabajo.

1.2.2. Búsquedas indirectas

En las búsqueda indirectas se trata de, en lugar de detectar la propia materia oscura, observar partículas producidas por la materia oscura en cantidades, energía u orígenes de los cuales no puedan dar cuenta las fuentes que ya conocemos que den lugar a dichas partículas. Se trata de buscar entonces diferentes partículas como rayos gamma, neutrinos, positrones y demás, que se hayan originado debido a aniquilaciones o desintegraciones de partículas de materia oscura. Esto nos permite entonces complementar las otras búsquedas ya que nos podemos aprovechar de tener un abanico mucho más grande de posibilidades para buscar la materia oscura, aprovechándonos de la astronomía multimensajero, aunque enfrentándonos a otros problemas como la modelización de los fondos de cada uno de estos tipos de partículas, que presentan un gran reto en muchos casos ya que no se conocen con exactitud. Veremos más en detalle este tipo de búsquedas en la siguiente sección.

⁴Estos detectores son un tipo de TPCs (*Time Projection Chamber*). En su volumen activo se producirían electrones de ionización y centelleos de fotones, que permitirían detectar la excitación e ionización de los átomos en retroceso (debido a la interacción inelástica de sus núcleos con una partícula de materia oscura), así como los fotones bremsstrahlung.[4][6]

1.2.3. Búsquedas en aceleradores de partículas

La búsqueda en aceleradores de partículas específicamente en el LHC se centra en la detección de una falta de energía y momento en las colisiones pp, al asumir que las partículas de materia oscura escapan del detector sin interactuar. Con esto en mente, se persiguen una variedad de objetivos, que son la producción de partículas invisibles mediadas por un bosón del modelo estándar, la producción de partículas invisibles por nuevas partículas mediadoras y las búsquedas específicas de modelos completos. En esta sección seguiremos la referencia [4].

Así mismo, existen varias señales posibles de materia oscura, que son: una falta en el momento transversal (que vendría dada por la detección de una partícula ya conocida del modelo estándar, y la ausencia de una partícula esperada con un momento y dirección dados, que sería la partícula que buscamos), un exceso en las distribuciones de masa invariante de pares de jets o pares de leptones, o un exceso de eventos en la distribución angular en pares de jets (que serían producidos por una partícula mediadora de materia oscura).

Existen otros posibles métodos de búsqueda que se están llevando a cabo en la actualidad, pongamos un ejemplo típico. Supongamos una partícula mediadora A' y una partícula ligera de materia oscura, denotada con χ . Entonces, los escenarios más típicos empleados son los siguientes. La búsqueda de una falta de masa en reacciones como $e^+e^- \rightarrow \gamma(A'\chi\bar{\chi})$ o $e^-p \rightarrow e^-p(A'\chi\bar{\chi})$. La búsqueda de una falta de masa o energía, por ejemplo, en reacciones de blanco fijo como $eZ \rightarrow eZ(A'\chi\bar{\chi})$. Se incluyen también haces de electrones y protones en los que la partícula de materia oscura es producida en la colisión y es detectada por dispersión en un detector posterior. Por último, podemos destacar la búsqueda directa de fotones oscuros, en escenarios en que la partícula mediadora A' no puede desintegrarse en materia oscura por ser demasiado ligera ($m_{A'} < 2m_\chi$).

Sin embargo, por el momento no se han encontrado señales de materia oscura. En su lugar, se han conseguido poner límites en las posibles masas, acoplamientos y secciones eficaces. Cabe destacar además, que solamente conseguir una señal de materia oscura en un acelerador no sería suficiente para declarar haber encontrado una partícula de materia oscura, sino que se necesita aparte una concordancia con la cosmología, de tal forma que esta partícula encajara en un modelo cosmológico que pueda dar cuenta de las medidas experimentales que observamos, como la abundancia reliquia, la masas de las galaxias, las lentes gravitacionales, y demás fenómenos que ya hemos mencionado en la sección 1.1. Por el momento, en este campo podemos resaltar principalmente los esfuerzos llevados a cabo en el LHC con las colaboraciones de CMS y ATLAS con las colisiones protón-protón (pp), así como los intentos actuales en los escenarios mencionados en el párrafo anterior por experimentos como N64 en el CERN, MiniBooNE en Fermilab o APEX HPS, entre otros. Para terminar, algunos de los futuros experimentos que están previstos son, por ejemplo, SHIP en el CERN, DarkLight y BDX en JLab, COHERENT en ORNL o SBN en Fermilab.

2. Búsquedas indirectas

Vamos ahora a adentrarnos más en profundidad en el ámbito de la búsqueda indirecta. Como ya hemos mencionado en la sección anterior, en las búsquedas indirectas se trata de detectar partículas que surgirían o bien de las aniquilaciones de las partículas de materia oscura, o bien de su desintegración, ya sean partículas producidas directamente en estos eventos o partículas secundarias.

En relación a las búsquedas directas, las búsquedas indirectas presentan la ventaja de que ofrecen un abanico de señales mucho más amplio, aunque a cambio de traer con ello la desventaja que tener que tratar con los fondos astrofísicos, que contaminan los datos y en ocasiones pueden ser muy

difíciles de modelar y descartar. Por el momento, la búsqueda indirecta es menos competitiva que la directa, por este problema del fondo y por la dificultad de la acumulación de datos. Además, si al contrario de lo que estamos suponiendo, la materia oscura ni se desintegra ni se aniquila, las búsquedas indirectas entonces fracasan.

Dicho esto, en las búsquedas indirectas encontramos una variedad de posibles señales que nos permiten buscar la materia oscura mediante los eventos de desintegración y aniquilación que nos interesan. Entre ellas encontramos señales como la emisión de fotones en todo el espectro (con la emisión radiativa secundaria que observamos con mecanismos de pérdida de energía, entre los cuales destacan el efecto Compton inverso y la radiación sincrotrón). Otra posibilidad que se ha postulado son los agujeros negros primordiales o PBHs por sus siglas en inglés, que se habrían producido en el universo temprano, y no como remanentes de estrellas, ofreciéndonos así una posibilidad completamente diferente del resto de candidatos. Además, las medidas de parámetros que contrastar con nuestros modelos cosmológicos, nos ofrecen restricciones en la contribución de la materia oscura en los grados de libertad relativistas efectivos y en la energía y las anisotropías del fondo cósmico de microondas (CMB, del inglés *Cosmic Microwave Background*). Sin embargo, en este trabajo nos centraremos en los tres principales tipos de señales que podemos encontrar: rayos gamma, rayos cósmicos y neutrinos. Estudiemos cada una de ellas entonces.[4][8]

2.1. Rayos gamma

En esta sección seguiremos las referencias [4]-[9]. La emisión de rayos gamma se trata de una señal de interés dado que una vez se han emitido, estos rayos no se desvían en su camino hasta nuestros detectores, por lo que apuntan de forma directa a la fuente que los ha producido. Además, la absorción por lo general se puede despreciar dado que la sección eficaz de su dispersión con electrones y núcleos en el rango de los GeV a los TeV es muy pequeña. Otra ventaja es que, para aniquilaciones de partículas de materia oscura, la energía de los fotones producidos está limitada por la energía en reposo de las partículas de materia oscura. Por tanto, en el caso de la aniquilación en dos fotones, dado que las partículas de materia oscura tienen bajas velocidades, podemos asumir que se aniquilan esencialmente en reposo, por lo que los fotones emergen cada uno con una energía igual a la correspondiente a la masa de una partícula de materia oscura en reposo, $E_\gamma = m_\chi$.

Como es natural, para nuestras detecciones buscamos seleccionar objetivos que nos permitan maximizar la relación señal a ruido, que para el caso de los rayos gamma tenemos como ejemplos: la región interna de la Vía Láctea (cercana y potencialmente con una gran densidad de materia oscura, aunque muy brillante a casi cualquier longitud de onda, lo que hace que tenga un fondo muy complicado de tratar), posibles agrupaciones cercanas de materia oscura (a costo de que se encuentran en direcciones desconocidas) y galaxias esferoidales enanas cercanas. Estas últimas son una apuesta interesante dado que contienen una cantidad pequeña de gas y no presentan un fondo astrofísico muy significativo en frecuencias del rango de los rayos gamma y los rayos X. Además, sabemos que para la probabilidad de aniquilación:

$$\Gamma_{ann} \propto n_\chi^2 \langle \sigma_{ann}(v_{rel})v_{rel} \rangle \quad (3)$$

para las galaxias esferoidales enanas se podría compensar la disminución que viene con el cuadrado de la masa oscura (que se encuentra en el cuadrado de la densidad numérica de materia oscura $n_\chi^2 = \frac{\rho_\chi^2}{m_\chi^2}$) por el efecto llamado realce de Sommerfeld (*Sommerfeld enhancement* en inglés), aunque este efecto es solo una hipótesis, sin indicios experimentales por el momento. Este efecto resonante podría aumentar en varios órdenes de magnitud la probabilidad de aniquilación de las partículas de

materia oscura, ya que nos dice que la probabilidad de aniquilación de las partículas en interacción mediante una fuerza atractiva aumenta para velocidades bajas, por lo que la baja dispersión de velocidades de las galaxias esferoidales enanas y su fondo mínimo de rayos gamma nos ofrece un escenario ideal.

En la búsqueda de pares de rayos gamma producidos en la aniquilación de WIMPs cabe resaltar el trabajo resultante de las observaciones con *Fermi Large Area Telescope* (LAT), que ha conseguido producir una imagen del cielo en rayos gamma sin precedentes. Ha conseguido calcular algunas de las cotas más restrictivas hasta la fecha en la aniquilación de pares de partículas de materia oscura para una variedad de estados finales, observando principalmente las galaxias esferoidales enanas. Además, ha declarado haber medido un exceso de rayos gamma sobre el fondo difuso y de fuentes puntuales en la dirección del interior de la Vía Láctea, donde la señal de las aniquilaciones de materia oscura podría ser especialmente brillante. Sin embargo, este exceso ha sido algo controvertido y el debate sobre su origen no ha sido concluyente, ya que no está claro si se debería realmente a materia oscura, ya que existen otras posibilidades que podrían ser responsables, como una posible población de púlsares de milisegundos (MSPs), además de que hay grandes incertidumbres en el modelo de emisión del fondo difuso de la Vía Láctea.

En el futuro se espera poder ampliar la búsqueda de materia oscura a través de rayos gamma, especialmente con el *Cherenkov Telescope Array* (CTA).

2.2. Rayos cósmicos

En esta sección seguiremos las referencias [4]-[8]. En cuanto a la búsqueda utilizando rayos cósmicos destaca la detección de antipartículas, ya que son partículas relativamente raras, que no aparecen en grandes proporciones en el universo debido a la asimetría de bariones, además, en los modelos de materia oscura generalmente se produce la misma cantidad de partículas y antipartículas en los estados finales de su desintegración o aniquilación. Por esto, la búsqueda de antipartículas como positrones, antiprotones o antinúcleos nos permite maximizar la relación señal a ruido. Se ha reportado un exceso de positrones de alta energía sobre la producción estándar secundaria de interacciones inelásticas de rayos cósmicos, que se ha establecido firmemente por diferentes experimentos, más recientemente por AMS-02. Este exceso se ha atribuido a la aniquilación de materia oscura, aunque da lugar a modelos de materia oscura algo enrevesados. Existen otras posibles explicaciones, aunque también algo controvertidas, como los positrones primarios producidos en la magnetosfera de púlsares cercanos.

Por su parte, aún no se han reportado excesos de anti-núcleos, que podrían ser por ejemplo el anti-deuterio o el anti-helio. Sin embargo, la detección de siquiera un antinúcleo tendría una relevancia considerable como una posible señal de nueva física, dada la óptima relación señal a ruido que ofrecen. Esto se debe a que los antinúcleos producidos por la hadronización de *jets* iniciados por materia oscura presentan una energía cinética baja, mientras que la conservación del número bariónico fuerza a la energía cinética típica de los antinúcleos producidos en procesos inelásticos en rayos cósmicos a valores altos, por lo que apenas tendríamos fondo de esta señal.

2.3. Neutrinos

Por último, debemos mencionar los neutrinos, siguiendo las referencias [4]-[9]. Si bien es cierto que los neutrinos a causa de su naturaleza poco interactuante son difíciles de detectar, representan una fuente especialmente interesante dado que, al apuntar a las acumulaciones de materia oscura que esperamos observar en los cuerpos celestes en busca de aniquilaciones o desintegraciones, los neutrinos escaparían fácilmente de dicho cuerpo, al contrario que las partículas que interactúan por

medio de la fuerza fuerte o electromagnética. Debido a esto, los neutrinos nos llegarían a nosotros apuntando en la dirección del cuerpo celeste en cuestión y sin apenas tener que preocuparnos por el fondo, prácticamente solo habría que preocuparse de los rayos cósmicos.

Como hemos dicho, podría haber materia oscura acumulada en los cuerpos celestes, dependiendo de la sección eficaz de interacción de la materia oscura con los núcleos atómicos, de la masa de la materia oscura y de su flujo incidente en el cuerpo celeste en cuestión. Sin embargo, para que el flujo de neutrinos que obtenemos de dicho cuerpo sea significativo, necesitamos un cuasi-equilibrio entre la captura y la aniquilación de materia oscura, para lo cual haría falta una sección eficaz suficientemente grande de la dispersión de materia oscura con nucleones (cerca a los límites impuestos por la búsqueda directa a día de hoy). Con estas condiciones, la mejor apuesta en los experimentos para la búsqueda de materia oscura por medio de neutrinos en la actualidad es el Sol. Para el ritmo de aniquilaciones de partículas de materia oscura dentro del Sol Γ_{ann} , que será la mitad del ritmo de captura de partículas de materia oscura por el Sol C_{\odot} suponiendo equilibrio (ya que para cada aniquilación se necesitan dos partículas), tenemos que:

$$\Gamma_{ann} \simeq \frac{C_{\odot}}{2} \simeq \frac{9}{2} \times 10^{24} \text{ s}^{-1} \times \left(\frac{\sigma}{10^{-2} \text{ pb}} \right) \left(\frac{50 \text{ GeV}}{m_{DM}} \right)^2 \left(\frac{\rho_{local}}{0,3 \text{ GeV/cm}^3} \right) \left(\frac{270 \text{ km/s}}{\bar{v}_{local}} \right)^3 \quad (4)$$

donde σ es la sección eficaz de interacción entre materia oscura y nucleones, ρ_{local} es la densidad de materia oscura local y \bar{v}_{local} es la dispersión de velocidad de la materia oscura en el halo en el que estamos embebidos. Estas aniquilaciones producidas en el Sol provocarían entonces el flujo de neutrinos que esperamos medir, y cuyo espectro vendrá dado por ([10]):

$$\frac{dN_{\nu}}{d\Omega dt dE_{\nu}} = \frac{\Gamma_{ann}}{4\pi R^2} \sum_i BR_i \frac{dN_i}{dE_{\nu}}, \quad (5)$$

donde Γ_{ann} es el ritmo de aniquilación de partículas de materia oscura, R es la distancia entre la Tierra y el Sol; y el sumatorio en i permite incluir la aniquilación en varios canales, con fracciones de ramificación (*branching ratio*) BR_i y espectros $\frac{dN_i}{dE_{\nu}}$.

En este tipo de detecciones, para poder detectar este flujo de neutrinos creados por materia oscura, debemos estimar el flujo esperado de neutrinos y contrastarlo con el medido, con el objetivo de buscar un exceso de dicho flujo, del cual no puedan dar cuenta los procesos de producción que ya conocemos al margen de nuestra posible materia oscura. Como hemos dicho, la emisión de neutrinos está virtualmente libre de fondo, de hecho, tan solo se conocen dos fuentes astrofísicas de neutrinos: el Sol y la Supernova 1987A. Además, los neutrinos que obtenemos de la aniquilación de materia oscura típicamente exceden la energía de los neutrinos provenientes del Sol. Por tanto, solo deberemos preocuparnos de los neutrinos provenientes de rayos cósmicos.

El umbral de sensibilidad de flujo que se quiere alcanzar típicamente para una señal es de alrededor de los cientos de neutrinos por kilómetro cuadrado por año, y los umbrales de energía típicos son del orden de 100 GeV para IceCube, que se ha mejorado hasta 10 GeV para DeepCore y que podría bajar al orden del GeV para PINGU.

Por el momento no se han conseguido detectar señales en IceCube o ANTARES, lo cual se puede interpretar como límites superiores en las interacciones entre materia oscura y nucleones.

3. Técnica de telescopios de Neutrinos

3.1. Técnica

Como sabemos, los neutrinos apenas interactúan con la materia, por lo que conseguir una buena estadística con un número suficiente de eventos representa un reto para los telescopios de neutrinos. Debido a esto, los detectores que utilizan esta técnica consisten en grandes conjuntos de fotomultiplicadores (PMT, por sus siglas en inglés, *Photo Multiplier Tube*) desplegados en grandes volúmenes dentro de un medio dado. La intención es entonces medir la radiación Cherenkov producida por las partículas en dicho medio. Además, estos telescopios de neutrinos se construyen a grandes profundidades para deshacerse de la mayor cantidad de fondo posible, proveniente principalmente por los muones producidos en la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre. Además, también se pueden descartar los muones provenientes de rayos cósmicos por su dirección, ya que solo nos interesarán los muones “ascendentes”, y no los “descendentes”, ya que al descartar estos últimos nos aseguramos de no estar tomando un evento de origen atmosférico. Esto se ejemplifica en la figura 3.

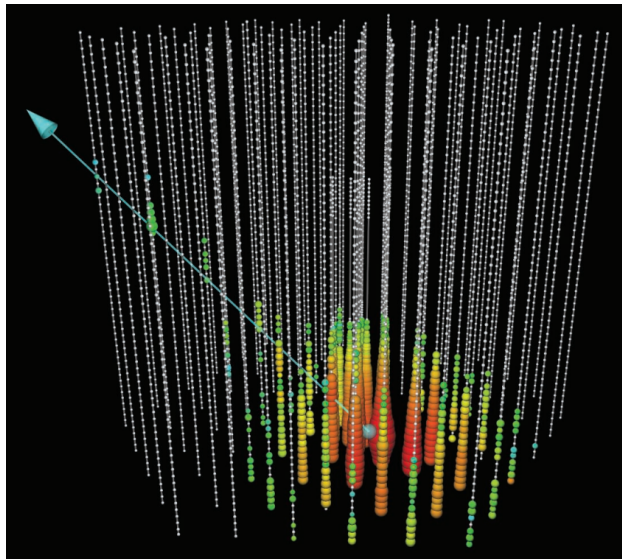


Figura 3: Ejemplo de evento tipo cascada (*cascade-like*) ascendente. El muon producido (flecha azul) por la cascada originada por el neutrino dentro del detector indica la dirección de la que procede el neutrino. De ser descendente se descartaría el evento dado que se tomaría como un evento de origen atmosférico en el análisis.

Ejemplos de estos detectores son ANTARES (inactivo desde 2022, situado en el Mar Mediterráneo en la costa de Tolón, Francia, a 2,5 km de profundidad, con 900 PMTs cubriendo $0,1\text{km}^2$ [11]), Super-Kamiokande (a un 1 km de profundidad en la mina de Kamioka, Japón, con un 11000PMTs dentro de un tanque de agua ultrapura en un tanque cilíndrico de 40m de diámetro y de alto con 50000 toneladas de agua, utilizando típicamente un volumen de 22500 toneladas para tomar las medidas [12][13]), o IceCube, el cual veremos en detalle en la siguiente sección.

La radiación Cherenkov es producida por partículas que llegan al detector y se propagan en el medio en cuestión con una velocidad mayor a la de la luz en ese medio. Estas partículas serán típicamente los muones producidos por la interacción de los neutrinos muónicos con la materia que encuentran en la Tierra antes de llegar al detector (estos muones presentan largas trayectorias del orden de kilómetros que se observan como un trazado recto dentro del detector) o los neutrinos

electrónicos, cuyos electrones interactúan con la materia del detector produciendo una cascada de partículas.

Con estos detectores podemos entonces obtener para cada evento la energía de las partículas involucradas, su topología y su dirección, y con ello distinguir el origen de cada evento, principalmente entre atmosférico y cósmico, con lo que se podrá entonces determinar el flujo de cada uno, siendo el de mayor interés el segundo, pues es el que nos permitirá establecer cotas para las magnitudes físicas de interés para este trabajo.

Al detectar un evento, podemos clasificarlo en algunos de los dos siguientes tipos: *track-like* y *cascade-like*. Las interacciones de neutrinos muónicos ν_μ producirán los eventos tipo *track-like* (además de una cascada de partículas), que aparecerán en los detectores como un trazo alargado, mientras que las interacciones de neutrinos electrónicos producirán electrones que darán lugar a cascadas de partículas dentro del detector, que aparecerán como una fuente más bien esférica [14], como se puede ver en la figura 4.

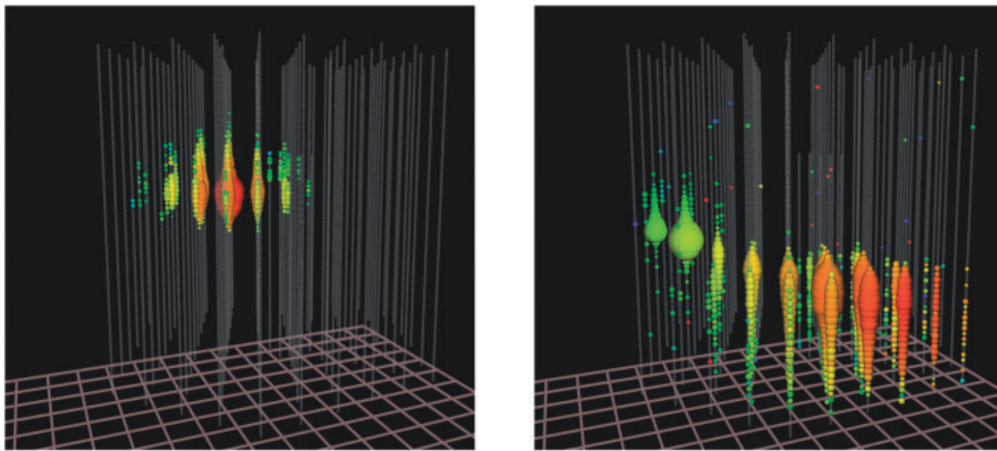


Figura 4: Eventos tipo *cascade-like*(izquierda) y *track-like*(derecha). [15]

3.2. IceCube

3.2.1. Instrumento

Veamos entonces las características de IceCube, el telescopio de neutrinos cuyos resultados veremos más adelante. IceCube es un telescopio de neutrinos construido en el hielo del Polo Sur, siendo el sucesor de AMANDA. Se encuentra bajo el hielo antártico a una profundidad que abarca desde los 1450m a 2450m por debajo de la superficie, ocupando un volumen de 1km^3 . Este volumen está instrumentado con 5160 módulos ópticos digitales o DOMs (*Digital Optical Modules*) con una resolución en el tiempo del orden de los nanosegundos, colocados en 86 cadenas dispuestas en una forma hexagonal en una malla trianglar. La estructura principal del detector cuenta con 78 de estos cables, en los que se encuentran 60 DOMs, con una separación vertical de 17m y una separación horizontal de 125m[15]. La estructura del detector al completo se puede ver en la figura 5.

Cada uno de estos DOMs está dividido en dos mitades que están cubiertas por una gruesa esfera de vidrio (para soportar las altas presiones) y una malla de mu-metal (para apantallar el campo magnético terrestre). Una mitad alberga un PMT de 10 pulgadas orientado hacia la parte inferior del detector, y la mitad superior que cuenta con una placa principal (*mainboard*) con la electrónica encargada de digitalizar las señales y una placa con LEDs (*flasherboard*) que se utiliza para calibrar los detectores, al comunicar los diferentes DOMs permitiendo así estudiar las propiedades del hielo.

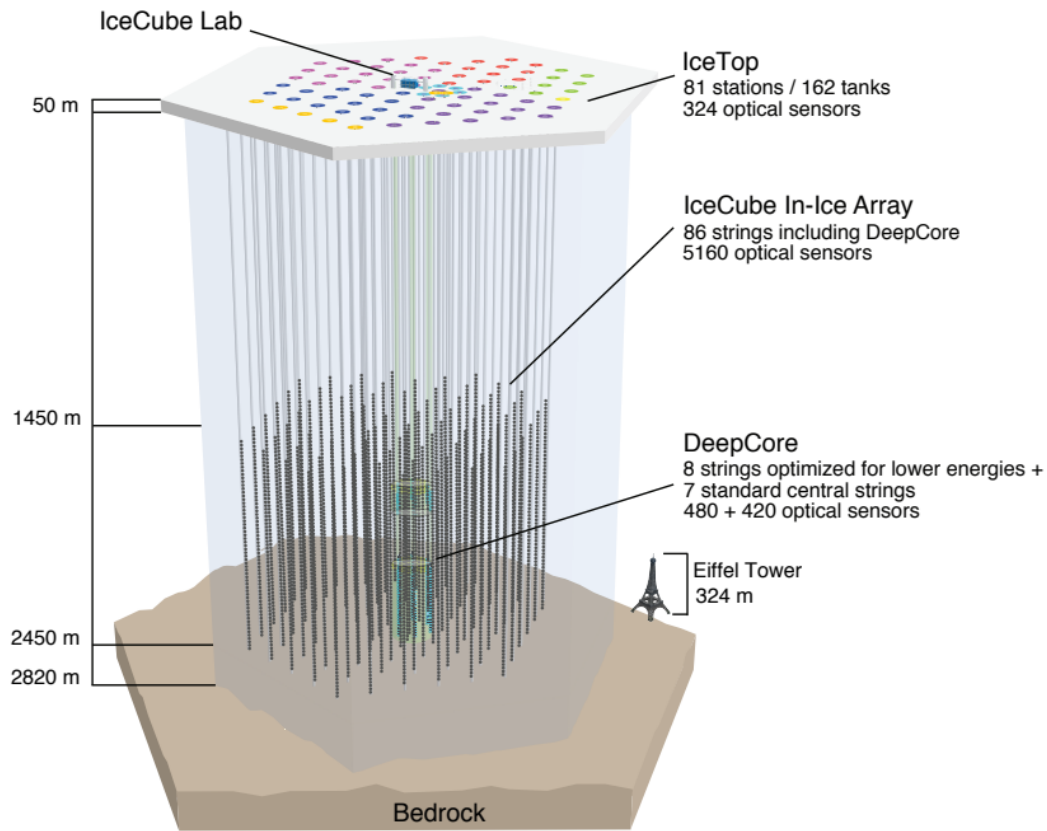


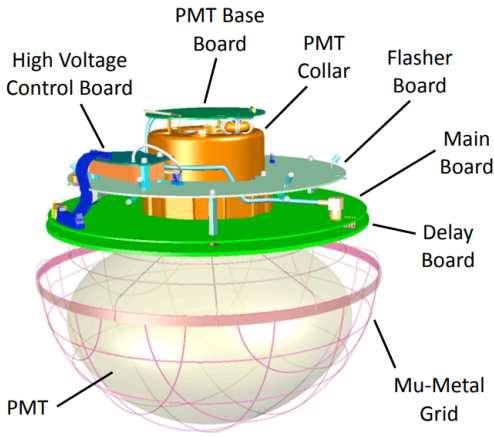
Figura 5: Representación esquemática de la estructura de IceCube

Esta estructura de los DOMs se puede observar en la figura 6a. Este hielo se divide en dos tipos, *bulk ice* y *hole ice* (que hacen referencia al hielo que se encuentra entre los detectores y al hielo de las inmediaciones de los detectores, respectivamente). Esto se debe a que para la construcción del detector se hicieron hoyos verticales en los que se introdujeron las cadenas utilizando taladros de agua caliente que permitieron perforar el hielo, el cual más tarde se volvió a congelar dentro de esos hoyos, pero ahora con otras propiedades diferentes, debido, por ejemplo, al aire que quedó atrapado [16].

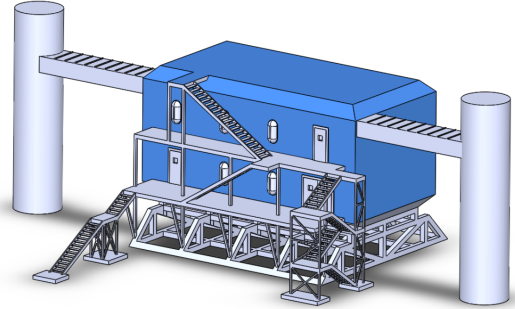
Las 8 cadenas restantes pertenecen a una sección del detector llamada DeepCore. Esta se caracteriza por tener una mayor densidad de DOMs con una eficiencia mejorada, y por tanto, una menor energía umbral, de 10 GeV, en comparación a los 100 GeV que presenta el resto de IceCube. DeepCore comienza a los 1750m de profundidad y tiene una separación entre DOMs que varía desde los 41m a los 105m, teniendo una separación media de 72m.

Además, en la superficie del hielo se encuentra otro conjunto de detectores en 81 estaciones con PMTs, que están distribuidas de forma similar a las cadenas de IceCube, lo cual será de utilidad para medir rayos cósmicos.

Por último, en la superficie se encuentra el ICL (*IceCube Laboratory*), el centro de operaciones del experimento al que se conectan todos los cables procedentes de las cadenas por medio de dos torres (figura 6b), comunicando así los DOMs con los servidores y los ordenadores encargados de realizar el tratado de los datos recogidos [15][17].



(a) Digital Optical Module (DOM)



(b) IceCube Laboratory (ICL)

Figura 6: Representación esquemática de un DOM y del ICL.[17]

3.2.2. Resultados

Uno de los resultados más destacables obtenidos con IceCube lo podemos encontrar en este artículo [18] publicado en 2015. En este artículo se muestra que efectivamente IceCube es capaz de discernir neutrinos de origen atmosférico y neutrinos de origen astrofísico, siendo este la primera evidencia fuerte de un flujo de neutrinos muónicos astrofísicos en el hemisferio norte. Se detectó un exceso claro de neutrinos por encima del fondo de neutrinos esperado a altas energías, es decir, con eventos cuyas energías eran inconsistentes con una explicación de origen puramente terrestre. Las fuentes responsables de la producción de este flujo de neutrinos aún son desconocidas. Existen algunos candidatos propuestos, como flujos provocados por AGNs, galaxias *starbusts* o GRBs (*Gamma Ray Bursts*, aunque ninguna de estas hipótesis ha conseguido dar una respuesta satisfactoria. Las observaciones sugieren que el flujo tiene gran componente isotrópica dominada por una población de fuentes extragalácticas.

4. Búsqueda de aniquilaciones de materia oscura en el Sol en el orden de GeV

En este artículo [14] publicado en marzo de 2022 se tuvo como objetivo buscar neutrinos consistentes con la aniquilación de WIMPs en el Sol, así como conseguir medir la sección eficaz dependiente de espín para la interacción entre materia oscura con protones. Para ello se utilizó la técnica de telescopio de neutrinos explicada en la sección anterior. Más concretamente, se utilizó el detector DeepCore que se encuentra en IceCube, dado que es capaz de llegar a los umbrales de energía más bajos disponibles. De hecho, este es el primer trabajo en el que se consigue buscar materia oscura de masas tan bajas como 5 GeV con IceCube.

4.1. Selección de eventos

Las características del detector ya han sido detalladas en la sección 3.2.1. Por su parte, para la selección de eventos se tomaron datos recopilados con IceCube y Deepcore durante 6,75 años. Se tomaron los DOMs de IceCube, que se encuentran rodeando los de DeepCore, como un veto o

barrera para los muones atmosféricos, ya que con ellos se pudieron descartar eventos en los cuales se observaba al menos un número mínimo dado de fotones Cherenkov antes de que el evento fuera detectado en DeepCore, es decir, no eran “*starting events*”⁵.

Los eventos se clasifican en función de su topología, y pueden ser de dos tipos: *track-like* o *cascade-like*, como ya hemos visto. En este artículo se tomaron en cuenta ambos tipos de eventos de forma simultánea, algo que no se había hecho hasta ahora. Esto nos permite acumular muchos más eventos que si solo utilizásemos uno, de hecho, a estas escalas de energías bajas, la resolución angular que nos proporcionan son muy similares, por lo que se ignoran sus diferencias y se puede entonces trabajar con ambos a la vez. Esta resolución angular es de $\sim 35^\circ$ a 10 GeV, y mejora a $\leq 5^\circ$ por encima de 200 GeV. Con esto se estudia una región del cielo de 200° por 180° centrada en las coordenadas del Sol.

Para poder descartar los muones atmosféricos se utiliza una técnica de aprendizaje automático basado en conjuntos de árboles de decisión, en particular en un BDT (*Boosted Decision Tree*, que quiere decir árbol de decisión potenciado) de 11 variables. Además, este artículo utiliza el mismo método para la reconstrucción y el análisis de eventos que otro artículo anterior en el cual se medían las oscilaciones de neutrinos atmosféricos [20]. Sin embargo, en este análisis encontramos dos diferencias clave, siendo la primera de ellas que en este caso no necesitamos que el vértice de interacción del muon reconstruido se encuentre dentro de DeepCore, y la segunda que el BDT se ha relajado con el objetivo de permitir que se incluyan más partículas en el análisis. Esto último resulta en un incremento del 13% de contaminación del fondo, pero a cambio de una mejora significativa en el número de neutrinos totales que son detectados, resultando en una muestra de 192212 eventos en total.

4.2. Análisis

Para el análisis de los resultados se ha utilizado una función de verosimilitud o *likelihood* de una dimensión, que viene dada por:

$$\mathcal{L}(n_s) = \prod_i^N \left(\frac{n_s}{N} S(\Psi_i) + \left(1 - \frac{n_s}{N}\right) B(\Psi_i) \right), \quad (6)$$

donde n_s es el número de eventos de neutrinos identificados como señal, N es el número total de eventos, $S(\Psi_i)$ es la función de distribución de probabilidad (PDF por sus siglas en inglés) de cada evento detectado como señal y $B(\Psi_i)$ la de los eventos detectados como fondo, siendo Ψ_i la separación angular entre la dirección del Sol y la dirección del evento reconstruido. Cada término será entonces el “peso” que tiene cada tipo de evento (señal y fondo) en los datos registrados.

También se ha calculado el estadístico de contraste (*test statistic*, TS) de la siguiente forma:

$$\text{TS} = 2 \log \frac{\mathcal{L}(\hat{n}_s)}{\mathcal{L}(n_s = 0)}, \quad (7)$$

donde \hat{n}_s es el valor del mejor ajuste del número de eventos señal, y $n_s = 0$ representa el caso en el que no hay señal, es decir, solo teniendo en cuenta el fondo.

⁵Estos eventos se descartan dado que los neutrinos atmosféricos vienen acompañados de muones producidos en la misma cascada de partículas de rayos cósmicos. Estos muones producen entonces fotones Cherenkov que se observan en el detector acompañando al evento del neutrino en cuestión. Por esta razón este tipo de eventos se descartan, deshaciéndonos así de gran parte de los eventos de origen atmosférico.[19]

Para estimar dicho fondo, su PDF se ha parametrizado como una función de la separación angular al Sol. Para cada evento se crea un vector de posiciones con 30 posiciones de soles falsos, utilizando el acimut real del Sol y 30 acimuts aleatorios creados con una distribución uniforme. Después se utiliza el ángulo entre el neutrino reconstruido y el Sol falso para crear la PDF del fondo, con lo que nos aseguramos de eliminar del fondo cualquier fuente posible que tenga relación directa con la dirección con el Sol, distribuyendo los eventos del fondo de forma uniforme en todas direcciones, ya que asumimos que el fondo de neutrinos es isótropo.

Por otro lado, para la PDF de la señal, al considerar masas de materia oscura mayores que 5 GeV se puede ignorar la evaporación (como vimos antes). Con esto, sin tener en cuenta interacciones consigo misma, tenemos que el número de partículas de materia oscura en el Sol sigue la siguiente relación:

$$\frac{dN_\chi}{dt} = \Gamma_{\text{cap}} - K_{\text{ann}} N_\chi^2, \quad (8)$$

donde $N_\chi(t)$ es el número de partículas de materia oscura en el Sol (consideramos WIMPs en este caso), Γ_{cap} es el ritmo de captura de partículas de materia oscura (que es función de la sección eficaz de materia oscura con protones), y el segundo término representa ritmo de aniquilación de materia oscura en términos del factor K_{ann} , que da cuenta de la densidad de partículas de materia oscura y de su promedio de velocidad y sección eficaz de aniquilación. Sabemos además que dado que para cada aniquilación se necesitan dos partículas de materia oscura, y suponiendo que se ha llegado al equilibrio entre captura y aniquilación:

$$\Gamma_{\text{cap}} = 2\Gamma_{\text{ann}} \quad (9)$$

Por otra parte, el flujo que nos llega a la Tierra de neutrinos y anti-neutrinos (que no se distinguen en este experimento) debidos a la aniquilación de materia oscura en el Sol viene dado por:

$$\frac{d\phi_\nu}{dt} = \frac{\Gamma_{\text{ann}}}{4\pi D^2} \frac{dN_\nu}{dE}, \quad (10)$$

donde $\frac{dN_\nu}{dE}$ es la distribución espectral de energía de los neutrinos y anti-neutrinos finales producidos y D es la distancia entre la Tierra y el Sol. Con esto podemos medir el flujo de neutrinos con nuestro detector y con ello estimar el ritmo de aniquilación, para obtener el de captura, y con ello limitar la sección eficaz entre materia oscura y protones (siguiendo la sección 9.4 de [21]).

Para cada evento entonces se calculan sus pesos dada su energía y ángulo de separación respecto al Sol, lo cual contribuirá a la función de verosimilitud. Estos pesos para las señales se calculan a través de simulaciones con algoritmos basados en métodos de Montecarlo, que son WimpSim y Genie, que simulan respectivamente el espectro de aniquilación de las WIMPs y las interacciones de los neutrinos de todos los sabores. Por su parte, los pesos para el fondo se calculan por medio del espectro de los neutrinos atmosféricos.

4.3. Incertidumbres sistemáticas

Las incertidumbres debidas a efectos del detector se propagan a los resultados experimentales. Para estudiar dichos efectos se repiten las simulaciones variando diferentes parámetros del detector dentro de un rango razonable. Se compara entonces con un cociente el valor del límite superior resultante con el valor que se obtuvo anteriormente (con los datos originales). Los parámetros escogidos son

la eficiencia del DOM, la absorción del hielo y la dispersión debido al hielo. Se presentan estos cocientes en la siguiente tabla:

Masa de WIMP (GeV)	10	20	35	50	100
Eficiencia del DOM -6%	1.17	1.13	1.10	1.09	1.03
Eficiencia del DOM $+6\%$	0.85	0.90	0.96	0.95	0.97
Absorción $+10\%$	1.06	1.05	1.03	1.02	0.97
Dispersión $+10\%$	1.02	1.06	1.08	1.09	1.06

Tabla 1: Tabla de variaciones de la sensibilidad debidas a los parámetros del detector.

Se puede apreciar que para masas bajas las mayores variaciones (de hasta un 17%) se deben a la eficiencia del DOM, mientras que para masas más altas, de 100 GeV, la incertidumbre sistemática está dominada por las propiedades del hielo que rodea el detector, llegando a un 6%. Cabe destacar que, como ya hemos mencionado, existe un fondo irreductible de neutrinos solares provenientes de cadenas de reacciones nucleares en el interior del Sol (principalmente los neutrinos pp de la cadena protón-protón). Sin embargo, IceCube aún no es capaz de detectar este fondo [22], de hecho, las sensibilidades obtenidas en este análisis son alrededor de dos órdenes de magnitud superiores a la necesaria para observar estos neutrinos pp. [14]

4.4. Resultados

Se han realizado entonces medidas para tres canales de aniquilación ($\nu\bar{\nu}$, $b\bar{b}$ y $\tau\bar{\tau}$)⁶ en un rango de masas de 5 GeV a 100 GeV (se toma este rango para poder comparar sus resultados, pero se ha llegado hasta 300 GeV y 500 GeV para los canales de $\tau\bar{\tau}$ y $b\bar{b}$, respectivamente). Los eventos registrados con su separación angular y su PDFs se presentan en la figura 7 para el canal $\nu\bar{\nu}$ (para el resto de canales el resultado es similar).

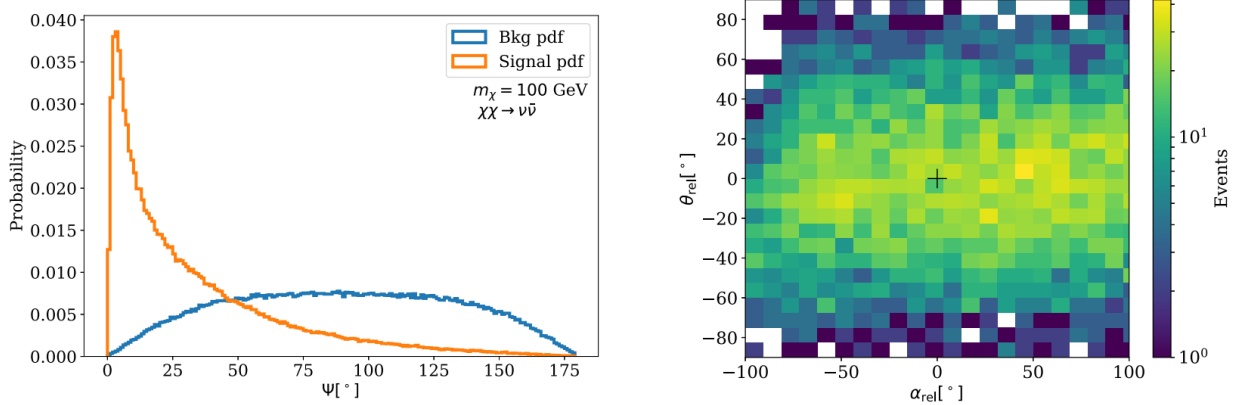


Figura 7: PDFs (izquierda) de señal (signal) y fondo (bkg) y mapa eventos registrados (derecha) con su separación angular respecto al Sol (representado con una cruz negra en el centro) para el canal $\nu\bar{\nu}$.

Se obtiene entonces para cada evento un valor final de n_s resultante de maximizar la función de verosimilitud, lo cual ha dado como resultado que no se ha observado ninguna señal sobre el fondo

⁶IceCube solo detecta neutrinos, luego lo que detectamos con los canales $b\bar{b}$ y $\tau\bar{\tau}$ son neutrinos secundarios producidos en desintegraciones.

esperado. Esto nos permite estimar una cota superior para lo intensa que podría ser como máximo la señal procedente de las aniquilaciones antes de que DeepCore las detectara, lo que se traduce en límites a la sección eficaz dependiente de espín para la interacción entre materia oscura con protones. Se presentan entonces los resultados experimentales en la siguiente tabla:

Mass (GeV)	$b\bar{b}$			$\tau\bar{\tau}$			$\nu\bar{\nu}$		
	σ_{SI} $\times 10^{-41}$	σ_{SD} $\times 10^{-39}$	$\sigma_{\text{SD}}^{\text{Exp}}$ $\times 10^{-39}$	σ_{SI} $\times 10^{-41}$	σ_{SD} $\times 10^{-39}$	$\sigma_{\text{SD}}^{\text{Exp}}$ $\times 10^{-39}$	σ_{SI} $\times 10^{-41}$	σ_{SD} $\times 10^{-39}$	$\sigma_{\text{SD}}^{\text{Exp}}$ $\times 10^{-39}$
5	5.34	1.33	1.38	0.38	0.092	0.23
10	16.6	8.39	10.8	0.29	0.15	0.21	0.04	0.029	0.057
20	1.54	1.57	2.53	0.05	0.05	0.08	0.02	0.014	0.027
35	0.54	0.93	1.50	0.02	0.03	0.05	0.01	0.012	0.022
50	0.34	0.80	1.29	0.009	0.02	0.04	0.004	0.011	0.020
100	0.29	1.12	1.23	0.008	0.03	0.04	0.005	0.022	0.024

Tabla 2: Resultados experimentales de las secciones eficaces de interacción de materia oscura con protones independiente y dependiente de espín para cada canal de aniquilación. Las columnas σ^{Exp} muestran la sección eficaz esperada en cada canal si se tuviesen observaciones solo con fondo. Se ha tomado un 90% de nivel de confianza.

Comparándolos con los resultados de experimentos anteriores de Super-Kamiokande, PICO-60 y ANTARES se obtiene la gráfica de la figura 8 para los límites superiores para las secciones eficaces dependientes de espín de materia oscura con nucleones en función de la masa de la partícula de materia oscura.

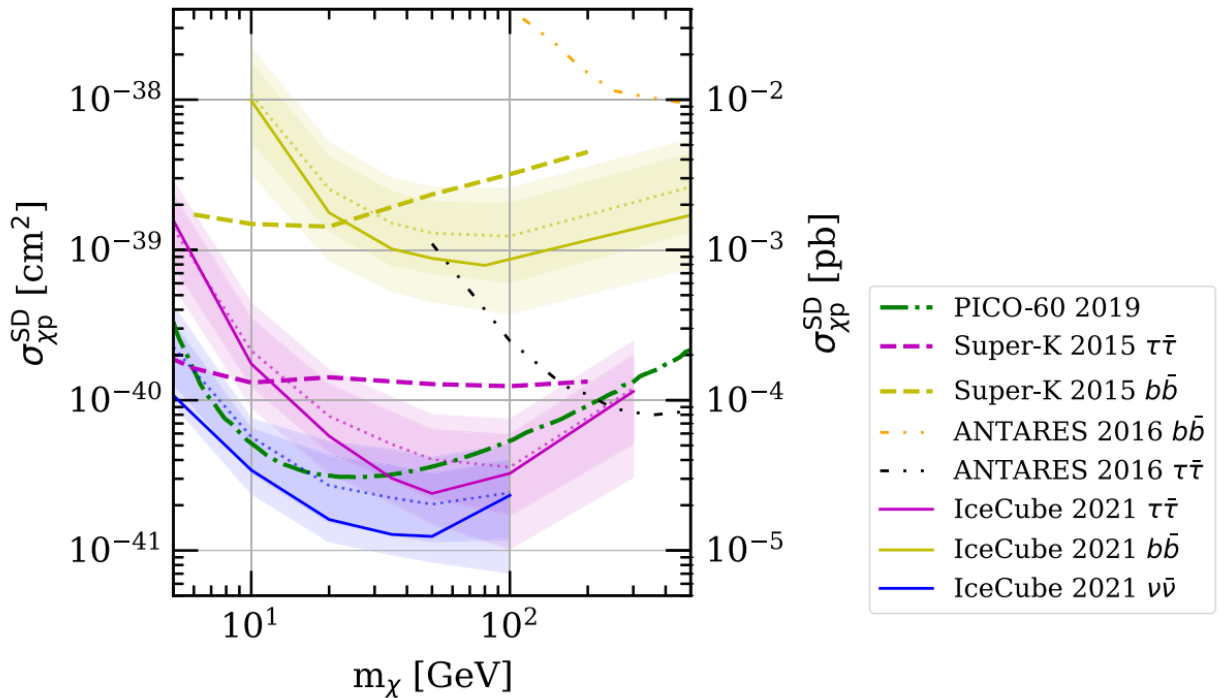


Figura 8: Secciones eficaces dependiente de espín obtenidas con IceCube (DeepCore), Super-Kamiokande, PICO-60 y ANTARES. Las líneas sólidas muestran los valores de IceCube con un 90% de nivel de confianza, las líneas de puntos muestran su valor esperado, y las bandas claras y oscuras representan los límites esperados a 95% y 68% del valor central, respectivamente.

Se puede apreciar entonces que los resultados obtenidos con este trabajo de DeepCore mejoran los obtenidos por otros experimentos anteriores. De hecho, los límites obtenidos para la sección eficaz dependiente de espín para cada canal son líderes mundiales, y más específicamente, dado que IceCube es especialmente sensible a la aniquilación directa en neutrinos, los límites obtenidos para este canal son más fuertes que los obtenidos por medio de la búsqueda directa[14].

5. Conclusión

En definitiva, la búsqueda de materia oscura es un campo que, si bien representa un gran reto tanto experimentalmente como teóricamente, a la hora de conseguir medir sus interacciones y de encajarla en modelos compatibles con las observaciones, se encuentra en gran actividad en la actualidad con una considerable cantidad de experimentos que permiten abarcar una variedad de frentes de búsqueda que atacan el problema desde diferentes puntos.

Dentro de este marco, IceCube representa un proyecto puntero dentro de la búsqueda indirecta, superando los resultados obtenidos por otras colaboraciones anteriormente, como ANTARES o Super-Kamiokande. Sin embargo, con estos resultados de DeepCore, IceCube deja claro que, si bien durante años ha obtenido cotas menos fuertes que la búsqueda directa, la búsqueda indirecta es capaz de proporcionar resultados que no solo son competitivos, sino que son necesarios ya que son también complementarios al resto de búsquedas. Además, en estos rangos de entre 10 GeV y 100 GeV, IceCube presenta una sensibilidad prometedora, principalmente para los canales de desintegración en $\tau^- \tau^+$ [10].

Sin embargo, los resultados de IceCube, que se seguirán produciendo dado que sigue en activo, podrían incluso mejorarse, ya que sería posible aumentar en un orden de magnitud el tamaño del volumen sensible del detector, a 10km^3 , aumentando el espaciado entre las cadenas de DOMs de 125m a 250m sin empeorar el desempeño del detector. Esto sería posible de realizar manteniendo el mismo número de cadenas, por lo que el costo del proyecto sería viable, similar al del IceCube actual. Con esta mejora se conseguiría aumentar el número de eventos detectados, en una toma de datos del orden de años, de los cientos actuales al orden de miles[15].

Referencias

- [1] Peter Schneider. *Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction*, volume 146. Springer, 2006.
- [2] Barbara Ryden. *Introduction to cosmology*. Cambridge University Press, 2016.
- [3] Mario Livio and Joe Silk. Physics: Broaden the search for dark matter. *Nature*, 507(7490):29–31, 2014.
- [4] Laura Baudis and Stefano Profumo. Dark matter. *M. Tanabashi et al.(Particle Data Group), Phys. Rev. D*, 98:030001, 2018.
- [5] Lars Bergström. Dark matter evidence, particle physics candidates and detection methods, 2012.
- [6] S. Navas et al. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 110(3):030001, 2024.
- [7] Chanpreet Amole, M Ardid, IJ Arnquist, DM Asner, D Baxter, E Behnke, M Bressler, B Broerman, G Cao, CJ Chen, et al. Dark matter search results from the complete exposure of the pico-60 c 3 f 8 bubble chamber. *Physical Review D*, 100(2):022001, 2019.

- [8] Bing-Lin Young. A survey of dark matter and related topics in cosmology. *Frontiers of Physics*, 12(2):121201, 2017.
- [9] Stefano Profumo. Tasi 2012 lectures on astrophysical probes of dark matter. *arXiv preprint arXiv:1301.0952*, 2013.
- [10] Chitta R Das, Olga Mena, Sergio Palomares-Ruiz, and Silvia Pascoli. Determining the dark matter mass with deepcore. *Physics Letters B*, 725(4-5):297–301, 2013.
- [11] P Amram, M Anghinolfi, S Anvar, and et al. Ardellier-Desages. The ANTARES Optical Module. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A*, 484(1-3):369–383, 2002.
- [12] P. Fernández. Status of gadzooks!: Neutron tagging in super-kamiokande. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 273-275:353–360, 2016. 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP).
- [13] K. Abe, Y. Hayato, T. Iida, Iyogi, and et al. Calibration of the super-kamiokande detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 737:253–272, February 2014.
- [14] R. Abbasi, M. Ackermann, J. Adams, J. A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, J. M. Alameddine, C. Alispach, A. A. Alves, and et al. Search for gev-scale dark matter annihilation in the sun with icecube deepcore. *Phys. Rev. D*, 105:062004, Mar 2022.
- [15] Markus Ahlers and Francis Halzen. Icecube: Neutrinos and multimessenger astronomy. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2017(12):12A105, 2017.
- [16] R. Abbasi and et al. Calibration and characterization of the icecube photomultiplier tube. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 618(1):139–152, 2010.
- [17] M.G. Aartsen and et al. The icecube neutrino observatory: instrumentation and online systems. *Journal of Instrumentation*, 12(03):P03012–P03012, March 2017.
- [18] M. G. Aartsen and et al. Evidence for astrophysical muon neutrinos from the northern sky with icecube. *Phys. Rev. Lett.*, 115:081102, Aug 2015.
- [19] IceCube Collaboration*. Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the icecube detector. *Science*, 342(6161):1242856, 2013.
- [20] MG Aartsen, M Ackermann, J Adams, JA Aguilar, M Ahlers, M Ahrens, I Al Samarai, D Altmann, K Andeen, T Anderson, et al. Measurement of atmospheric neutrino oscillations at 6–56 gev with icecube deepcore. *Physical review letters*, 120(7):071801, 2018.
- [21] Gerard Jungman, Marc Kamionkowski, and Kim Griest. Supersymmetric dark matter. *Physics Reports*, 267(5-6):195–373, 1996.
- [22] MG Aartsen, M Ackermann, J Adams, JA Aguilar, M Ahlers, M Ahrens, C Alispach, K Andeen, T Anderson, I Ansseau, et al. Searches for neutrinos from cosmic-ray interactions in the sun using seven years of icecube data. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021(02):025, 2021.