

Resumen

La astronomía de neutrinos es un campo en auge dentro de la Física de Astropartículas. Los neutrinos ofrecen grandes ventajas como sondas para estudiar el Universo lejano y de alta energía. En la comunidad científica es extensamente aceptado que mediante la combinación de la información que proporcionan los neutrinos junto a la obtenida mediante fotones de alta energía (rayos gamma) y partículas cargadas (rayos cósmicos) se podría obtener una imagen más completa de los procesos astrofísicos fundamentales que tienen lugar a lo largo de nuestro Universo. Además, los neutrinos también proporcionan el único medio de entender algunos aspectos de la Física de Partículas. La prueba experimental de que los neutrinos tienen masa y de que sufren mezcla de sabores procede de observaciones realizadas en los primeros telescopios de neutrinos.

La razón fundamental por la que los neutrinos son tan altamente valorados como mensajeros es la baja interacción con el medio que los rodea. Al ser partículas sin carga interactúan muy débilmente con la materia, por ello pueden escaparse de la fuente donde se han producido y, al contrario de lo que ocurre con el resto de mensajeros, pueden llegar a la Tierra sin ser desviados por los campos magnéticos y sin prácticamente pérdida de energía. Esta misma razón que los hace tan valorados es a su vez la que los hace tan difíciles de detectar. Dada su baja interacción con la materia se impone la necesidad de construir detectores con grandes volúmenes de detección, del orden del km^3 , altamente instrumentados. Para ello se utilizan medios naturales (en el fondo del mar, en lagos o en enterrados en el hielo de la Antártida) aprovechando el agua (o hielo) como material diana donde se espera que interactúe el neutrino. ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch) es el primer telescopio

submarino de neutrinos construido en el fondo del mar Mediterráneo. Fue desarrollado por un consorcio internacional y financiado con fondos europeos y de los distintos países colaboradores. ANTARES está optimizado para la detección óptica de la luz Cherenkov inducida por los muones relativistas producidos en la interacción de neutrinos de alta energía en los alrededores del detector. La información de la carga, posición y tiempo de llegada de los fotones a los fotomultiplicadores que componen el detector permite tanto la reconstrucción de la trayectoria del neutrino, con una alta resolución angular, como el conocimiento de su energía. Además, ANTARES acoge el experimento AMADEUS (Antares Modules for Acoustic DEtection Under Sea) mediante el cual se está investigando y testeando la detección acústica de neutrinos de muy alta energía que, al interactuar en el agua, producen un pulso termo-acústico que se pretende registrar con una red de hidrófonos.

El trabajo desarrollado en esta tesis se engloba bajo el marco del experimento ANTARES, por ello es el tema desarrollado en el Capítulo 1 a modo de contextualización. Como es común en las tesis desarrolladas en este experimento, el trabajo se ha dividido en dos áreas diferenciadas: por un lado, una parte de enfoque más tecnológico y, por otro lado, una parte analítica de datos tomados por el telescopio. Por su contexto y el carácter de las actividades realizadas ha sido necesaria la formación en distintos campos: telescopios de neutrinos, astropartículas, física de partículas. Además, se ha desarrollado diversas capacidades y destrezas en diversos ámbitos como instrumentación, aplicaciones informáticas, técnicas de simulación, análisis masivo de datos.

La primera parte de la tesis está centrada en el desarrollo de un calibrador capaz de reproducir la señal acústica que se emite en la interacción de un neutrino de alta energía con un núcleo de agua que, generalizando, es un pulso bipolar altamente directivo. El disponer de un buen calibrador es clave a la hora de testear la detección acústica en el telescopio y poder sintonizar y “entrenar” los receptores para este tipo de señales.

En el Capítulo 2 se describen los procesos que intervienen en la emisión acústica del neutrino y las condiciones de propagación y ruido ambiental presentes en el *site* de ANTARES. Asimismo se introduce el concepto de fuentes acústicas paramétricas que será el punto de partida para el diseño del calibrador. En el Capítulo 3 se describen y se presentan los test iniciales realizados para evaluar la posibilidad de usar la técnica de fuentes paramétricas para reproducir el característico pulso acústico generado por el neutrino. Este trabajo supuso realizar estudios pioneros de generación paramétrica en casos con simetría cilíndrica y señales transitorias y demostraron el potencial de esta técnica para el desarrollo de un calibrador compacto para detección acústica de neutrinos. En el Capítulo 4 se presenta el prototipo desarrollado, un *array* de tres elementos ensamblados en una estructura compacta, y los test realizados al mismo. Éste es capaz de operar en dos rangos frecuenciales aumentando así su funcionalidad pudiéndose utilizar tanto desde el fondo del mar como operado desde un barco.

La segunda parte de la tesis, con carácter de análisis de datos, se ha centrado en el análisis de datos registrados por ANTARES con el fin de contrastar posibles modelos astrofísicos para la búsqueda de materia oscura. Este trabajo ha focalizado en la detección de los productos de la aniquilación de materia oscura atrapada en el centro del Sol. En concreto, se ha testado el modelo de *Secluded Dark Matter* (SDM) a través de la detección de dimuones (pareja de muones co-lineales) y neutrinos en la dirección del Sol. A grandes rasgos, este modelo se basa en la idea de la existencia de un mediador resultado de la aniquilación de materia oscura que posteriormente decaería en partículas del modelo estándar como muones o neutrinos. Estos modelos han sido propuestos con el fin de explicar ciertas ‘anomalías’ experimentales observadas, tales como el espectro del flujo de positrones detectado en satélites, medido recientemente con gran precisión por AMS-II. El estudio realizado en esta tesis constituye la primera búsqueda de evidencias experimentales de este tipo de modelos en telescopios de neutrinos.

En el Capítulo 5 se resumen las evidencias de la presencia de materia oscura en el Universo así como los actuales métodos de detección de la misma. También se recogen

las búsquedas de materia oscura realizadas con ANTARES, entre otras en el Sol, y se introducen las características del modelo de SDM. El Capítulo 6 está dedicado a la descripción de la metodología y herramientas utilizadas para este análisis. Se detalla el funcionamiento del código creado para la simulación de la generación de di-muones provenientes del decaimiento del mediador y su detección por ANTARES con objeto de conocer la respuesta del detector a este tipo de señal. Para finalizar, el Capítulo 7 recoge el proceso de análisis de los datos y su interpretación en términos de búsqueda indirecta de SDM. Dado que los resultados obtenidos en el análisis no indican un exceso de señal significativo se han establecido experimentalmente los primeros límites a modelos SDM en telescopios de neutrinos. Los límites impuestos a estos modelos son los más restrictivos que existen en la actualidad para un buen rango de valores de los parámetros a considerar: masa de la materia oscura, masa del mediador y vida media de este último. Así pues, estos resultados mejoran y/o complementan límites realizados por otros métodos, tales como la detección directa de materia oscura o detección indirecta a través de la búsqueda de positrones o rayos gamma.