

There is overwhelming evidence from cosmological and astrophysical observations supporting the existence of dark matter (DM). Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) are among the better motivated candidates to explain DM, which could be detected in direct, indirect or accelerator searches, complementary to each other. Only one experiment, DAMA/LIBRA, has provided a long-standing positive result: the observation of a highly statistically significant annual modulation in the detection rate, compatible with that expected for galactic halo dark matter particles. This result has neither been reproduced by any other experiment, nor ruled out in a model independent way. Compatibility among the different experimental results in most conventional WIMP-DM scenarios is actually disfavoured. Then, a similar annual modulation search using the same target is mandatory to shed light on the DAMA/LIBRA conundrum, which is the goal of the ANAIS (Annual modulation with NaI Scintillators) experiment.



An annual modulation in the dark matter interaction rate is expected by the revolution of the Earth around the Sun, which distorts the DM particle velocity distribution function as seen by the detector, typically assumed Maxwellian boosted by the Sun velocity. The effect is present unless the DM halo is co-rotating with the Solar System. However, it is strongly dependent on the specific halo model, both in amplitude and in phase. It is natural to assume that the Sun is moving through a locally isotropic DM halo, with the Earth orbiting aside. Consequently, searches are performed for a modulation of DM-like events with a period of one year and a well-defined phase.

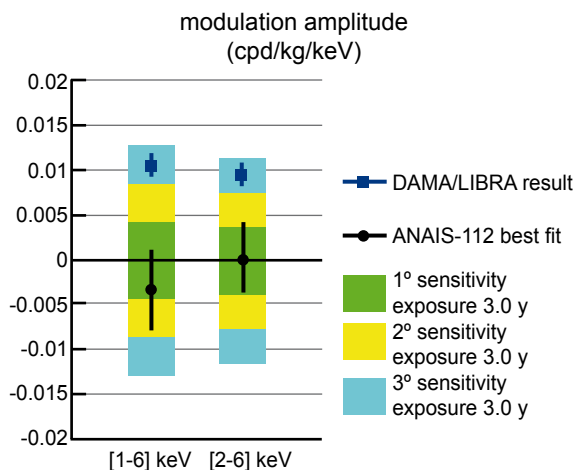
Una evidencia abrumadora de observaciones cosmológicas y astrofísicas respaldan la existencia de materia oscura (DM). Las partículas masivas con interacción débil (WIMP) son uno de los candidatos mejor motivados para explicar la DM, y podrían detectarse en búsquedas directas, indirectas o en aceleradores, técnicas de detección complementarias entre sí. Únicamente el detector DAMA/LIBRA, ha proporcionado un resultado positivo: la observación de una modulación anual significativa en la tasa de detección, compatible con la señal esperada para las partículas de materia oscura en el halo galáctico. Este resultado no ha sido reproducido por ningún otro experimento, ni descartado con un análisis independiente de modelo. La compatibilidad entre los diferentes resultados experimentales en la mayoría de los escenarios WIMP-DM convencionales está desfavorecido. Así, una búsqueda de modulación anual similar usando el mismo objetivo es necesaria para resolver el enigma DAMA / LIBRA, que es el objetivo del experimento de Modulación Anual con Centelleadores de NaI (ANAIS).

Se espera una modulación anual en la tasa de interacción de la materia oscura por la traslación de la Tierra alrededor del Sol, que distorsiona la función de distribución de velocidad de partículas de DM tal como la ve el detector, una distribución Maxwelliana de velocidades incrementada por la velocidad del Sol. El efecto está presente a menos que el halo DM rote solidariamente con el Sistema Solar. Sin embargo, depende en gran medida del modelo de halo específico, tanto en amplitud como en fase. La hipótesis más simple es suponer que el Sol se mueve a través de un halo de DM localmente isotrópico, con la Tierra en órbita y se realizan búsquedas para una modulación de la señal debida a DM con un período de un año y una fase bien definida.

Un análisis completo y consistente requiere varios años de medidas en condiciones muy estables. Este es el objetivo a largo plazo de nuestro experimento. ANAIS-112, que consta de 112,5 kg de detectores de NaI (TI), se instaló en 2017 en el Laboratorio Subterráneo Canfranc (LSC). ANAIS-112 recibe un flujo de rayos cósmicos residuales y condiciones ambientales diferentes a las de DAMA / LIBRA (800 m frente a una sobrecarga de roca de 1400 m, por ejemplo). En consecuencia, la confirmación potencial de una

on August 3rd, 2017. It has accumulated more than three years of data- taking time in quite stable conditions: 1050 days live time raw which, after the muon cut, correspond to an effective live time of 1018.6 days or 313.95 kg.day. The data analysis was extended by fitting simultaneously the 9 detectors with free background parameters for every module and the same modulation amplitude. It was also improved the background description, by fitting the measured rates to a probability density function (PDF) sampled from our background model, instead of just assuming an exponential decrease.

The ANAIS results are compatible with no annual modulation, with a statistical analysis refuting the DAMA/LIBRA positive results at more than 99% confidence level. The best fit to the ANAIS data in the [1-6] keV ([2-6] keV) energy region is a modulation amplitude of -0.0034 ± 0.0042 cpd/kg/keV (0.0003 ± 0.0037 cpd/kg/keV), supporting the absence of modulation, and refuting the DAMA/LIBRA result at 3.3 (2.6) σ , for a sensitivity of 2.5 (2.7) σ . Other complementary analyses confirm the absence of modulation in the ANAIS data: a phase-free annual modulation search and the exploration of the possible presence of a periodic signal at other frequencies. In conclusion, data confirm the ANAIS-112 projected sensitivity to the DAMA/LIBRA result. A 3σ sensitivity should be in reach before completing the scheduled 5 years of data taking. Further ANAIS tests to narrow down the causes of the DAMA/LIBRA modulation are ongoing, including the measurement of modulated signals as the neutron background and the time dependence of the background-subtraction methods.



ANAIS-112 results on annual modulation for 3-year exposure

que muestrean las formas de onda con alta resolución a 2 Gs/s (14 bits); y (3) una señal de alta energía (HE) atenuada. El disparador de cada señal del PMT se realiza a nivel de phe, mientras que el disparador de módulo único se realiza por coincidencia (AND lógico) de los dos disparadores PMT en una ventana de 200 ns. El activador global es el OR lógico de las señales de activación de los nueve módulos. La eficiencia de activación es cercana al 100% hasta el umbral de análisis a 1 keV.

ANAIS-112 comenzó a tomar datos en el modo DM el 3 de agosto de 2017. Ha acumulado más de tres años de toma de datos en condiciones bastante estables: 1050 días de tiempo vivo en bruto que, tras el corte de muones, corresponden a un tiempo vivo efectivo de 1018,6 días o 313,95 kg.día. El análisis de los datos se amplió ajustando simultáneamente los 9 detectores con parámetros de fondo libres para cada módulo y la misma amplitud de modulación. También se mejoró la descripción del fondo, ajustando las tasas medidas a una función de densidad de probabilidad (PDF) muestreada a partir de nuestro modelo de fondo, en lugar de suponer simplemente una disminución exponencial.

Los resultados de ANAIS son compatibles con la ausencia de modulación anual, con un análisis estadístico que refuta los resultados positivos de DAMA/LIBRA con un nivel de confianza superior al 99%. El mejor ajuste a los datos de ANAIS en la región de energía de [1-6] keV ([2-6] keV) es una amplitud de modulación de $-0,0034 \pm 0,0042$ cpd/kg/keV ($0,0003 \pm 0,0037$ cpd/kg/keV), lo que apoya la ausencia de modulación y refuta el resultado de DAMA/LIBRA en 3,3 (2,6) σ , para una sensibilidad de 2,5 (2,7) σ . Otros análisis complementarios confirman la ausencia de modulación en los datos de ANAIS: una búsqueda de modulación anual sin fase y la exploración de la posible presencia de una señal periódica en otras frecuencias. En conclusión, los datos confirman la sensibilidad proyectada de ANAIS-112 respecto al resultado de DAMA/LIBRA. Se debería alcanzar una sensibilidad de 3σ antes de completar los 5 años previstos de toma de datos. Están en curso otras pruebas de ANAIS para acotar las causas de la modulación DAMA/LIBRA, incluyendo la medición de las señales moduladas como fondo de neutrones y la dependencia temporal de los métodos de sustracción del fondo.



anti-radon box (continuously flushed with radon-free nitrogen gas), active muon veto system made up of 16 plastic scintillators designed to cover top and sides of the whole ANAIS set-up and 40 cm of neutron moderator (a combination of water tanks and polyethylene blocks). In the design of the muon veto system we followed a tagging strategy instead of a hardware vetoing.

The goal was twofold: on the one hand, to discard events in the NaI(Tl) crystals coincident with muon veto triggers. On the other hand, to analyse eventual correlations between muon hits in the plastic scintillators and events in the NaI(Tl) crystals, especially in the region of interest (ROI), of 1-6 keV.

The ANAIS-112 electronic chain and data acquisition system (DAQ) is shortly described here. Each PMT charge signal is independently processed and divided into: (1) a trigger signal; (2) a low energy (LE) signal that goes to the digitizers which sample the waveforms at 2 Gs/s with high resolution (14 bits); and (3) a high energy (HE) signal, conveniently attenuated. The trigger of each PMT signal is done at the level, while the single module trigger is done by the coincidence (logical AND) of the two PMT triggers in a 200 ns window. The global trigger is the logical OR of the nine modules trigger signals. Trigger efficiency is close to 100% down to the analysis threshold established at 1 keV.

ANAIS-112 started taking data in the DM mode

calibran simultáneamente usando un sistema de múltiples fuentes. Los eventos de fondo de la desintegración de ^{40}K y ^{22}Na en la masa de cristal, asociados a depósitos de energía de 3.2 y 0.9 keV, y seleccionados por coincidencia con un depósito de energía en un segundo módulo de 1461 y 1275 keV, respectivamente, también se utilizan para mejorar la precisión de la calibración hasta el umbral de energía.

El blindaje ANAIS-112 consta de 10 cm de plomo arqueológico, 20 cm de plomo de baja actividad, caja anti-radón (continuo flujo de gas nitrógeno sin radón), sistema de veto de muones compuesto por 16 centelleadores de plástico que cubren la parte superior y los lados de toda la configuración de ANAIS y 40 cm de moderador de neutrones (una combinación de tanques de agua y bloques de polietileno). En el diseño del sistema de veto de muones, seguimos una estrategia de identificación en lugar de un veto por hardware.

El objetivo es doble: descartar eventos en los cristales de NaI (Tl) que coinciden con los debidos a los muones vetados y analizar correlaciones eventuales entre los muones y los eventos en los cristales de NaI (Tl), especialmente en la región de interés (ROI), de 1-6 keV.

La electrónica y el sistema de adquisición de datos (DAQ) se describen brevemente aquí. Cada señal de carga del PMT se procesa independientemente y se divide en: (1) señal de activación; (2) señal de baja energía (LE) que va a los digitalizadores

A full and consistent analysis requires then several years of measurement in very stable conditions. This is the long-term goal of our experiment. ANAIS-112, consisting of 112.5 kg of NaI(Tl) detectors, was installed in 2017 at the Canfranc Underground Laboratory (LSC) in Spain. The ANAIS-112 set-up undergoes a different residual cosmic ray flux and environmental conditions than DAMA/LIBRA (800 m versus 1400 m rock overburden, for instance). Consequently, the potential confirmation of a modulation with same phase and amplitude would be very difficultly explained as an effect of backgrounds or systematics.

We briefly summarize here the most relevant features of the experimental apparatus. ANAIS-112 uses nine NaI(Tl) modules produced by Alpha Spectra Inc. in Colorado. These modules have been manufactured from 2012 to 2017, and shipped to Spain avoiding air travel in order to prevent cosmogenic activation of the module materials. Each crystal is cylindrical (4.75" diameter and 11.75" length), with a mass of

12.5 kg, and it is housed in OFE (Oxygen Free Electronic) copper. This encapsulation has a Mylar window allowing low energy calibration using external gamma sources. It incorporates two quartz optical windows to couple the photomultiplier tubes (PMTs). All PMT units and all relevant materials used in the building of the detectors, have been screened for radiopurity using HPGe detectors in the low background facilities at LSC. Their contribution to the experiment background has been estimated and included in our background model. Our modules show an outstanding light collection, at the level of 15 photoelectrons (phe) per keV.

ANAIS-112 is calibrated every two weeks using external ^{109}Cd sources: all the nine modules are simultaneously calibrated using a multi-source system which minimizes down time periods. Background events from the decay of ^{40}K and ^{22}Na in the crystal bulk, associated to 3.2 and 0.9 keV energy depositions, and selected by coincidence with an energy deposition in a second module of 1461 and 1275 keV, respectively, are also used to improve the accuracy of the calibration down to the energy threshold.

The ANAIS-112 shielding consists of 10 cm of archaeological lead, 20 cm of low activity lead,



modulación con la misma fase y amplitud se explicaría muy difícilmente por el fondo o errores sistemáticos.

Resumimos aquí las características más relevantes del experimento. ANAIS-112 utiliza nueve módulos NaI (Tl) producidos por Alpha Spectra Inc. en Colorado. Estos módulos se fabricaron entre 2012 y 2017 y se trajeron a España evitando los viajes aéreos con el objetivo de reducir la activación cosmogénica de los materiales del módulo. Cada cristal es cilíndrico (4.75" de diámetro y 11.75" de largo), con una masa de 12.5 kg, y está alojado en una cápsula de cobre libre de oxígeno (OFE). Esta encapsulación tiene una ventana tipo Mylar para calibración de baja energía con fuentes gamma externas. Incorpora dos ventanas ópticas de cuarzo para acoplar los tubos fotomultiplicadores (PMT). Todos los PMT y materiales relevantes utilizados en la construcción de los detectores han sido caracterizados radioactivamente en las instalaciones de bajo fondo en LSC. Su contribución al fondo del experimento se ha incluido en nuestro modelo de fondo. Nuestros módulos muestran un excelente nivel de 15 fotoelectrones (phe) por keV.

ANAIS-112 se calibra cada dos semanas. usando fuentes externas de ^{109}Cd : los nueve módulos se