

Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica, así como sobre sus actores¹

AMS MIDE CON PRECISIÓN LA ANTIMATERIA EN LA RADIACIÓN CÓSMICA

El espectrómetro magnético AMS es un detector de partículas diseñado para analizar con precisión las propiedades de la **materia oscura** y de la **antimateria** en la **radiación cósmica**, en una misión de larga duración que opera en la **Estación Espacial Internacional** desde 2011 (M. Aguilar, J. Berdugo *et al.*, Estudio de la radiación cósmica con el espectrómetro AMS, *Revista Española de Física* 36 (2), 21 (2022)).

Los grupos del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) y del IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias) han tenido una contribución muy significativa en el **diseño, construcción y mantenimiento del detector de radiación Cherenkov** de dicho especlómetro y participan de manera activa en el **mantenimiento, funcionamiento y análisis de los datos obtenidos**.

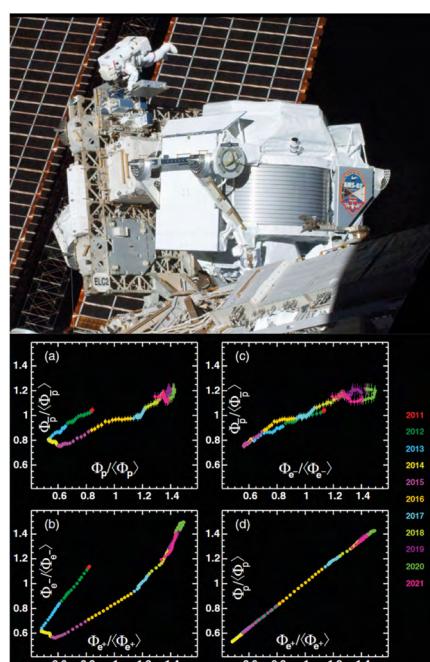
En dos artículos aparecidos recientemente en *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.051001>, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.051002>), la colaboración AMS ha completado la **descripción precisa de la evolución temporal** de las componentes más abundantes de materia y antimateria en la radiación cósmica de origen galáctico con los datos recogidos a lo largo de más de un ciclo solar de 11 años.

Las correlaciones entre las variaciones relativas de los flujos de **antiprotones, protones, positrones y electrones** que se muestran en la figura reproducida de la publicación en *Physical Review Letters* demuestran que las partículas con signo opuesto de carga y misma masa, (a) y (b), exhiben un **claro fenómeno de histéresis**. Sin embargo, las

correlaciones entre partículas con el mismo signo de carga y distinta masa, (c) y (d), muestran un **comportamiento lineal**.

“Este conjunto de medidas permite **validar los modelos de transporte de los rayos cósmicos en la heliosfera** con la precisión necesaria para detectar señales de nueva física”, comenta Jorge Casaus, responsable del proyecto en el CIEMAT y coordinador de la participación española en AMS.

“La precisión de AMS en la medida de las distintas especies de partículas de materia y de antimateria es esencial para la comprensión completa de los



fenómenos de difusión y deriva en el campo magnético heliosférico”, dice Carlos Mañá, investigador senior del CIEMAT.

“Este es el **fruto de más de 25 años de trabajo** de nuestro equipo en este proyecto internacional liderado por el premio Nobel S. C. C. Ting”, apunta Manuel Aguilar, de la Real Academia de Ciencias e investigador emérito en el CIEMAT.

“Las precisiones del 1% alcanzadas en estas medidas con un instrumento con



Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

300 000 canales de lectura operado en el espacio se han conseguido gracias a la **monitorización y optimización permanente**”, dice Francesca Giovacchini, investigadora del CIEMAT destacada en el centro de control de la misión en el CERN (Ginebra, Suiza).

“La capacidad de separar entre materia y antimateria en un amplio rango energético y la medida de su carga eléctrica y su masa hacen que este sea el **único instrumento que ha podido completar este programa experimental**”, puntualiza Carlos Delgado, investigador del equipo del CIEMAT y responsable de las medidas de isótopos ligeros.

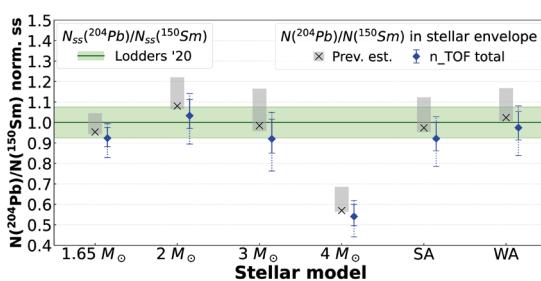
“Estas medidas, junto con las anteriormente publicadas por AMS para electrones y sus antipartículas, los positrones, **constituyen el legado completo de esta misión** para la comprensión de la física de los rayos cósmicos en la heliosfera”, aclara Miguel Ángel Velasco, responsable del análisis de electrones y positrones en el CIEMAT.

Desde su instalación en la Estación Espacial Internacional en 2011, AMS ha colecionado datos de más de 250 mil millones de rayos cósmicos y **continuará tomando datos hasta el final de la operación de la ISS**, previsiblemente en 2030. La **actualización del instrumento que se llevará a cabo en 2026** permitirá aumentar significativamente su sensibilidad en la búsqueda de nueva física mediante el estudio detallado de la materia y antimateria en los rayos cósmicos.

¹ Animamos a que los lectores nos hagan llegar noticias documentadas que la redacción pueda considerar y editar para esta sección.

UNA NUEVA CONFIRMACIÓN SOBRE EL ORIGEN DEL PLOMO EN LAS ESTRELLAS

Un de los temas más fascinantes en el campo de la astrofísica es el origen de los elementos pesados en el universo. Aparte de los elementos más ligeros, como el hidrógeno o el helio, creados en los instantes posteriores al Big Bang, el resto de especies de la tabla periódica se han creado en el interior de las estrellas, a través de reacciones nucleares. En concreto, actualmente se sabe con certeza que



aproximadamente la mitad de las abundancias de elementos más pesados que el hierro en el sistema solar se han creado por reacciones de captura de neutrones en el llamado proceso lento o *s* (del inglés *slow*) de nucleosíntesis estelar.

Una investigación liderada por un equipo científico de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y el Instituto de Física Corpuscular (CSIC-Universitat de València), y publicada en la revista *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.052702>), ha conseguido avanzar en el origen del isótopo de plomo ²⁰⁴Pb. Este forma parte de un selecto grupo de isótopos producidos casi exclusivamente por el proceso *s*, y, por lo tanto, la abundancia solar que observamos de ellos hoy en día es un rastro directo de este mecanismo de nucleosíntesis. “Estos isótopos son de especial interés porque, mediante la comparación directa con las abundancias solares, sirven para validar los modelos teóricos más avanzados tanto de nucleosíntesis como de la evolución estelar de estrellas gigantes rojas”, explica Adrià Casanovas-Hoste, investigador en UPC y uno de los autores del trabajo.

Sin embargo, la cantidad de ²⁰⁴Pb que se produce en las estrellas gigantes rojas no se había podido cuantificar de mane-

ra precisa hasta la actualidad, principalmente porque no se había conseguido medir cómo reaccionan los neutrones con un isótopo radiactivo del elemento precedente: el ²⁰⁴Tl (talio-204). Debido a su corta vida media de 3.78 años, la producción de muestras para experimentos es extremadamente compleja.

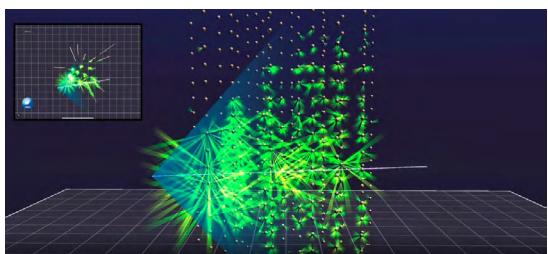
Para este trabajo, y gracias a una colaboración entre el IFIC, la UPC y la Universidad de Sevilla con el Paul-Scherrer Institute (PSI) en Suiza, y con el reactor nuclear del Institut Laue-Langevin (ILL), en Francia, se consiguió producir una muestra de ²⁰⁴Tl adecuada y con la suficiente masa para medir, por primera vez, la tasa de de captura neutrónica del ²⁰⁴Tl en la instalación de haces de neutrones de alta resolución n_TOF del CERN. Con los resultados experimentales de n_TOF se realizaron cálculos de nucleosíntesis estelar del ²⁰⁴Pb, en el marco de la colaboración internacional NuGrid. Los resultados obtenidos muestran un excelente acuerdo con

las abundancias de ²⁰⁴Pb medidas en meteoritos primitivos del sistema solar. “Este resultado apunta, por tanto, a que no sería necesario recurrir a hipótesis alternativas de nucleosíntesis de ²⁰⁴Pb, como explosiones de supernova o posibles mecanismos de fraccionamiento operando en el sistema solar temprano, como se ha apuntado en el pasado”, concluye César Domingo-Pardo, investigador científico de CSIC en IFIC y coautor del estudio.

KM3NET OBSERVA DESDE EL FONDO DEL MEDITERRÁNEO EL NEUTRINO MÁS ENERGÉTICO JAMÁS DETECTADO

Los sucesos lo dirán, Sancho; “que el tiempo, descubridor de todas las cosas, no se deja ninguna que no las saque a la luz del sol, aunque esté escondida en los senos de la tierra”. Así respondía Don Quijote a las preguntas de Sancho sobre lo que había pasado en la cueva de Montesinos (cap. XXV, segunda parte). Algo parecido pondría haber respondido también a lo

que los físicos llevan tiempo preguntándose: **¿qué ocurre en los fenómenos más energéticos del universo?** Para responder a ello contamos con unos aliados muy especiales: los neutrinos. Son partículas fundamentales (las segundas más abundantes en el universo), pero que casi no interactúan. Esto último las hace muy difíciles de detectar, pero también capaces de llegar desde grandes distancias y desde zonas muy densas, lo cual es particularmente interesante para estudiar el universo más cataclísmico, donde se producen partículas de energías extraordinarias. Otros mensajeros más “normales”, como los fotones o los rayos cósmicos, son absorbidos o desviados por campos magnéticos en su camino hacia la Tierra. Para poder observar estos neutrinos de alta energía, la colaboración KM3NeT está construyendo dos detectores en el fondo del mar Mediterráneo llamados ARCA (cerca de Sicilia) y ORCA (cerca de Marsella). Consisten en una serie de detectores de luz instalados en decenas de líneas de cientos de metros de longitud en el fondo del mar que pueden



detectar la luz Cherenkov inducida por los muones producidos por neutrinos que cruzan la Tierra. Recientemente la colaboración anunció la **detección con KM3NeT-ARCA del neutrino de mayor energía nunca observado** (unos 220 PeV, una energía 30 veces mayor del anterior récord, detectado por Ice-Cube, en el Polo Sur). Dicho suceso es realmente extraordinario y mereció la portada en la revista *Nature* (<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08543-1>). ¿Cuál es el origen de tan espectacular suceso? Aún no lo sabemos. Puede que sea el primer neutrino “cosmogénico” observado, es decir, producido tras la interacción de rayos cósmicos de muy alta energía con el fondo de radiación de microondas que permea todo el universo. Puede que venga de una galaxia de núcleo activo (AGN, por sus siglas en inglés). No se ha identificado una

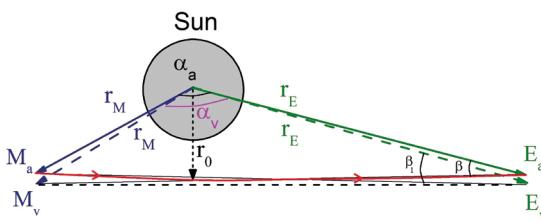
correlación con ninguna fuente astrofísica, pero quizás es porque su fuente es demasiado lejana para poder verla. O puede ser algo aún más exótico. Como dice el profesor de la Universidad de Valencia Juan de Dios Zornoza, coordinador de los grupos españoles en KM3NeT (IFIC, UGR, UPV, IEO, LAB), “cuando se detectó este ‘suceso’ solo estaba instalado un 15 % de ARCA; estamos impacientes por saber qué más nos queda por ver conforme sigamos construyendo KM3NeT y tomando más datos”.

UN CÁLCULO MÁS PRECISO DEL ÁNGULO DE DESVIACIÓN GRAVITACIONAL DE LA LUZ

La desviación gravitacional de la luz es un fenómeno bien conocido desde el desarrollo de la mecánica newtoniana. Inicialmente calculado por Johan Georg von Soldner a principios del siglo XIX, no fue hasta el desarrollo de la teoría general de la relatividad de Einstein cuando se obtuvieron los famosos 1,75 segundos de arco para luz estelar que “rozaba” la superficie del Sol. Este resultado fue confirmado experimentalmente por Eddington durante sus célebres expediciones del eclipse solar del 29 de mayo de 1919.

Existe otro método para el estudio del efecto de la gravedad sobre la luz, al menos, en las situaciones astrofísicas menos complejas. Se trata de la aproximación del medio material (“Material Medium Approach” o método MMA, por sus siglas en inglés) y está basado en la idea de representar el campo gravitatorio como un “medio óptico” con un índice de refracción efectivo. De hecho, el propio Eddington afirmó que el efecto de la gravedad solar sobre la luz estelar podría ser reproducido considerando la propagación de la luz en un medio óptico con estratificación esférica.

Basándose en esta aproximación MMA, el profesor Óscar del Barco Novillo, de la Universidad de Murcia, ha desarrollado una expresión analítica exacta para el cálculo del ángulo de desviación gravitacional de la luz debido a un objeto masivo estático,



considerando las distancias reales entre la fuente y el observador a la masa gravitacional.

En este trabajo, publicado recientemente en la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (<https://doi.org/10.1093/mnras/stae2277>), se estudia la propagación de la luz desde el planeta Mercurio hasta la Tierra, suponiendo una variación continua en el índice de refracción de la luz.

En este contexto, el ángulo de desviación gravitacional α se calcularía mediante la diferencia entre el ángulo “real” α_a (obtenido a partir de la ecuación exacta MMA) y el ángulo “virtual” α_v (mediante cálculos trigonométricos que involucran distancias conocidas).

Estos nuevos resultados han sido comparados con el formalismo post-newtoniano parametrizado (PPN) hasta primer orden, que es el método estándar para el estudio de la desviación gravitacional de la luz en el sistema solar (donde se tienen en cuenta masas gravitatorias como el Sol, planetas e incluso asteroides de mayor tamaño). Como consecuencia, la discrepancia entre el resultado MMA y el formalismo PPN resulta ser del orden de milisegundos (mas), tanto para fuentes emisoras en nuestro sistema solar como para estrellas distantes. Sirva como ejemplo el tamaño angular de la estrella Proxima Centauri, del orden de 1 mas.

En esencia, esta nueva expresión analítica podría ser una herramienta útil en la investigación actual y futura sobre astrometría de alta precisión.

ALTA VARIABILIDAD INTERANUAL DE LAS PRECIPITACIONES EN EL MEDITERRÁNEO

Un grupo interdisciplinar internacional liderado por Sergio M. Vicente-Serrano (Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC), y en el que

participan varios miembros de la RSEF, ha publicado en *Nature* (<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08576-6>) un estudio sobre la precipitación en el Mediterráneo, examinando las variaciones en las precipitaciones en la región mediterránea y sus cambios a largo plazo.

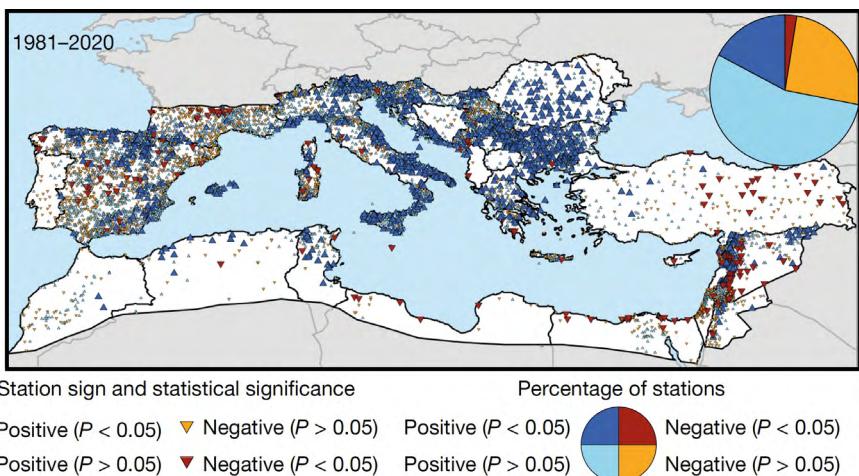
Los modelos climáticos actuales proyectan una reducción significativa de las precipitaciones en el Mediterráneo en el futuro. Sin embargo, estudios basados en datos observados en décadas recientes han reportado tendencias contradictorias, con algunas áreas que muestran disminuciones y otras sin cambios claros. Esta disparidad ha generado incertidumbre sobre la dirección y magnitud de los cambios en las precipitaciones en la región.

Para abordar esta incertidumbre, los autores analizaron una extensa base de datos de precipitaciones diarias, utilizando más de 23 000 estaciones en 27 países mediterráneos, con un total de más de 10 000 000 de datos de precipitación mensual. Este análisis detallado permitió evaluar las tendencias a largo plazo y la variabilidad interanual y decadatal de las precipitaciones en la región.

Los resultados indican que, las tendencias resultan escasas y no estadísticamente significativas en la mayoría de las estaciones analizadas. Más notable es la alta variabilidad interanual de las precipitaciones, que supera cualquier tendencia a largo plazo. Esta variabilidad está fundamentalmente determinada por factores atmosféricos de gran escala, como la Oscilación del Atlántico Norte y otros patrones climáticos que afectan la circulación atmosférica en el Mediterráneo. Estos factores causan la variabilidad temporal y explican las tendencias, tanto positivas como negativas observadas en períodos de tiempo cortos.

Los autores concluyen que, aunque el cambio climático puede influir en las precipitaciones mediterráneas, la alta variabilidad natural complica la identificación de tendencias significativas. Por lo tanto, enfatizan la necesidad de considerar esta variabilidad al desarrollar estrategias de gestión de recursos hídricos y adaptación al cambio climático en la región.

Este estudio subraya la complejidad de los patrones de precipitación en el



Mediterráneo y la importancia de utilizar datos observacionales detallados para comprender mejor las dinámicas climáticas regionales. También resalta el importante grado de ajuste entre la evolución de las precipitaciones observada y estimada mediante modelizaciones climáticas y enfatiza la importancia de desarrollar políticas flexibles que puedan adaptarse a la incertidumbre inherente en la dinámica de la precipitación.

La ausencia de cambios claros en la precipitación no quiere decir que el cambio climático no esté afectando a la región. Además de los aspectos dinámicos, la precipitación y sus extremos se ven afectados por el incuestionable aumento de la temperatura —que en el Mediterráneo supera la media global— lo que agrava la severidad de las sequías agrícolas e hidrológicas, haciendo a la región especialmente vulnerable al cambio climático.

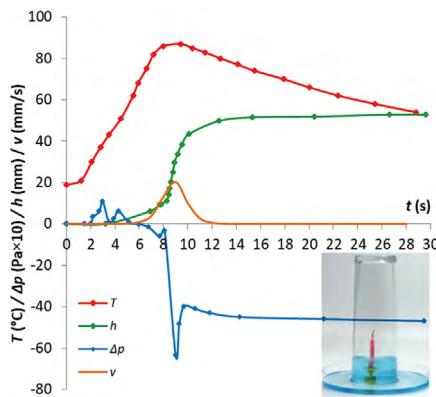
MEDIDAS DETALLADAS PARA ERRADICAR ERRORES EN LA EXPLICACIÓN DE UN EXPERIMENTO POPULAR

El experimento en el que asciende el agua por el interior de un vaso, cuando se cubre con él una vela encendida, cuya base está rodeada de agua, es una **experiencia clásica para poner de manifiesto la acción de la presión atmosférica**. A pesar de su aparente sencillez, el **experimento suele ser mal interpretado por los estudiantes e, incluso, por parte del profesorado**. Una proporción notable de observadores afirma (acertadamen-

te) que ocurre una disminución de la presión en el interior del vaso, pero **justifica (incorrectamente) la caída de presión por el consumo del oxígeno contenido en el aire atrapado por el vaso**, sin reparar que en la combustión de los componentes de la vela (principalmente, parafina $C_{25}H_{52}$) se forma dióxido de carbono y vapor de agua ($C_{25}H_{52}(g) + 38 O_2(g) \rightarrow 25 CO_2(g) + 26 H_2O(g)$).

Como se señala en las conclusiones de un artículo publicado recientemente por R. Garcia-Molina y A. Tomas-Serrano en *Physics Education* (10.1088/1361-6552/adaf6b), la combustión desempeña un papel fundamental en el experimento, pero no por el consumo de oxígeno, sino por el aumento, y posterior disminución, de la temperatura dentro del vaso, lo que provoca notables cambios en la presión dentro del vaso. Para apoyar estas ideas, **los autores utilizan un sencillo dispositivo experimental (termómetro digital, manómetro diferencial y cámara de video) para medir la variación de la temperatura, de la presión y de la altura del agua dentro del vaso**, durante el transcurso del experimento.

Los resultados obtenidos muestran que la variación de la presión es com-



pleja, dado que las tres variables de las que depende (número de moles de gas, temperatura y volumen) varían durante el curso del experimento. No obstante, **en la práctica totalidad de los casos, la variación de la presión se ajusta al mismo patrón**. Inicialmente, mientras se cubre la vela con el vaso, la presión dentro del vaso permanece igual a la presión atmosférica, debido a que el aumento de temperatura dentro del vaso provoca el escape de aire caliente hacia la atmósfera. En cuanto se debilita la llama, y disminuye la temperatura, la presión se reduce rápidamente y comienza a entrar el agua, hasta que al cabo de unos minutos se alcanza el equilibrio cuando la temperatura dentro del vaso se iguala a la temperatura ambiente.

La velocidad con que entra el agua en el vaso (medida mediante una grabación de vídeo) se ajusta razonablemente bien a una curva logística, que es prácticamente nula excepto en el breve período en el que la presión experimenta su mayor caída.

Con los resultados publicados en ese artículo se espera ayudar a la comunidad educativa a acabar con la propagación de una explicación errónea de un fenómeno ampliamente usado en el ámbito docente.

DILUCIDANDO SI HAY TENSIÓN DE HUBBLE CON SUPERNOVAS GEMELAS

La constante de Hubble, H_0 , mide la tasa actual de expansión del universo. Se conoce como la **tensión de Hubble** la discrepancia entre el valor de H_0 que se deduce de la observación del fondo cósmico de micro-ondas, combinada con el modelo cosmológico estándar (Λ CDM: constante cosmológica más materia oscura fría) y el obtenido al utilizar indicadores locales de distancia como las cefeidas y las supernovas. Tal discrepancia puede llegar a ser del nivel de 5.7σ (Riess *et al.* 2024, colaboración SH0ES).

Para medir H_0 hay que determinar con precisión las distancias a galaxias lo bastante lejanas como para que su velocidad de recesión se deba casi exclusivamente a la expansión del universo: que estén en el “flujo de Hub-

ble". Un método muy común requiere tres etapas: 1) Se calibran primero indicadores como las cefeidas, en galaxias cercanas. 2) Por medio de éstos, se calibran las supernovas del Tipo Ia, a distancias intermedias, del orden de los 40 Mpc. 3) Se usa dicha calibración para medir las distancias a supernovas en el flujo de Hubble (de 65 a 200 Mpc). Todo ello se basa en observaciones fotométricas, en mediciones de curvas de luz.

En un artículo recientemente publicado en *The Astrophysical Journal* (10.3847/1538-4357/ad736d) por P. Ruiz-Lapuente, del Instituto de Física Fundamental (CSIC) y J. I. González Hernández, del Instituto de Astrofísica de Canarias, se presenta un **nuevo método para medir distancias extragalácticas**, usando no solo las curvas de luz, sino también espectros tomados a lo largo de la evolución de las supernovas, cuando estas son casi idénticas: el método de las "gemelas de por vida".

El método da una medida directa de la distancia y la hace mucho más precisa, con un error de solo el 2 %, por lo que

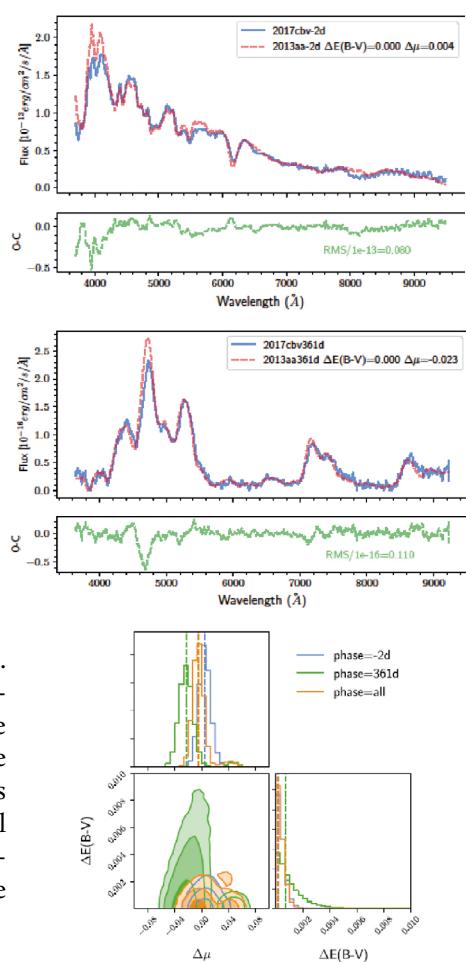
es muy útil para establecer la escala correcta.

Otro 2 % de error proviene de sumar al de las distancias relativas el error en las distancias de anclaje, al obtener las distancias absolutas.

Hay que subrayar que en este método se **comparan directamente supernovas cercanas con las del flujo de Hubble**, sin necesidad de la calibración a distancias intermedias que se precisa en el método más usado.

En la figura se muestran los ajustes de los espectros de una pareja de gemelas: SN 2013aa y SN 2017cbv, en dos fases diferentes: -2 y +361 días con respecto a sus brillos máximos, con los "corner plots" para cada fase y para el conjunto.

Se ha empezado ya a utilizar el método para algunas supernovas del flujo de Hubble. Estas y las cercanas con las que se comparan tienen las mismas curvas de luz, son del mismo subtipo espectral y gemelas perfectas. Los primeros resultados indican que la tensión de Hubble es real.



FÍSICA Y CIENCIA PARA TODOS

RSEF
Real Sociedad
Española de
Física

**FUNDACIÓN
RAMÓN ARECES**

frA

CATARATA