

# Midiendo la expansión del universo desde el CIEMAT

## Measuring the expansion of the Universe in the CIEMAT

**Ignacio Sevilla Noarbe, Eusebio Sánchez Álvaro** - División de Astrofísica de Partículas. CIEMAT / Particle Astrophysics Division. CIEMAT

**Francisco Javier Rodríguez Calonge** - Unidad de Computación Científica. CIEMAT / Scientific Computing Unit. CIEMAT

Uno de los problemas más importantes de la ciencia en el siglo XXI, que muy posiblemente lleve a una revolución en nuestra comprensión del universo, es entender la naturaleza de la materia oscura (que le da forma) y de la energía oscura (que provoca su expansión acelerada). El CIEMAT, desde los Departamentos de Investigación Básica y Tecnología, ha estado colaborando desde 2006 en la construcción y explotación de algunos de los proyectos clave que aclararán esta cuestión.

Muchos de los retos más importantes para la física fundamental hoy en día provienen de observaciones del cosmos. Durante los años 90 del siglo XX, la tecnología había alcanzado un grado de madurez que permitía hacer medidas de gran precisión mediante el uso de cámaras CCD (*Charged Coupled Devices*; dispositivos de estado sólido de carga acoplada). Si bien por entonces dichas cámaras adolecían de un campo visual muy limitado, lo suplían con creces con medidas de los objetos astronómicos con una alta relación señal-ruido y gran precisión en términos del flujo de luz registrado. Además se evitaban los penosos y lentos procesos de digitalización de las placas fotográficas puesto que la información se volcaba directamente en formato digital.

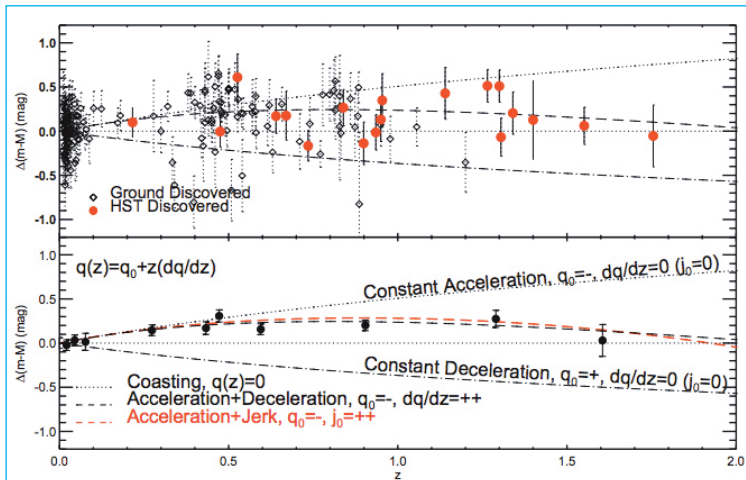
En este contexto favorable para medidas de alta precisión, dos equipos internacionales independientes se lanzaron a la carrera de continuar la labor iniciada por el histórico astrónomo Edwin Hubble setenta años antes, que observó cómo galaxias a distancias mayores se alejaban a velocidades mayores también (estas observaciones se convirtieron en la primera prueba de la expansión del Universo). En el caso de estos dos equipos, la tarea se resumía en medir la segunda derivada de ese proceso, lo que por entonces se denominaba la tasa de desaceleración  $q_0$ , para estudiar cuál sería el destino final del cosmos. Para medir este efecto, más sutil que la medida de la expansión, era necesario sondear mucho más profundamente que como lo hiciera Hubble, y usar las titánicas explosiones de cierto tipo de estrellas (supernovas), como indicadoras de distancias hasta las galaxias donde éstas tenían lugar.

El sorprendente resultado que ambos hallaron es que dicha tasa de desaceleración  $q_0$  es negativa, es decir, que el universo se expande a velocidades cada vez mayores con el tiempo. Esto representa todo un desafío puesto que lo que se espera de la teoría de la gravedad, es que la

One of the major scientific problems of the 21st century, which will very possibly lead to a revolution in our understanding of the Universe, is to ascertain the nature of dark matter (responsible for its shape) and dark energy (which causes its accelerated expansion). The Basic Research and Technology Departments of CIEMAT have been collaborating since 2006 in the construction and execution of some key projects that will clarify this question.

Many of the most important challenges today in fundamental physics arise from observations of the cosmos. During the 1990s, technology had achieved a degree of maturity that made it possible to make very precise measurements using CCD (*Charged Coupled Device*) cameras. Although these cameras back then suffered from a very limited field of view, this was more than compensated by measurements of astronomical objects with a high signal-noise ratio and great precision in terms of the recorded light flux. Furthermore, they avoided the laborious, slow processes of photographic plate digitalization since the information was directly downloaded in digital format.

In this favorable context for high precision measurements, two independent international teams decided to continue the work begun seventy years earlier by the historical astronomer Edwin Hubble, who observed how galaxies at greater distances moved away at greater speeds as well (these observations became the first proof of the expansion of the Universe). In the case of these two teams, the task boiled down to measuring the second derivative of this process, which back then was called the deceleration rate  $q_0$ , to study what the final destination of the cosmos would be. To measure this effect, which is subtler than measuring the expansion, they had to probe much more deeply than Hubble had done and use the titanic explosions of certain kinds of stars (supernovas) as indicators of distances to the galaxies where these took place.



En este gráfico se colectan todas las medidas de supernovas hasta el año 2004, en el llamado diagrama de Hubble, en el que se representa el desplazamiento al rojo de la supernova (un indicador del tamaño del Universo cuando tuvo lugar dicha explosión) en el eje de las abscisas, y una medida de la distancia en el eje de las ordenadas. En el gráfico superior se muestran todas las supernovas medidas. En el inferior, un resumen de los mismos datos junto con los detalles de los modelos de universo que se superponen como líneas. Un universo en el que la expansión se frena queda claramente descartado. Extraído de A.Riess et al. (2004).

This graphic contains all the supernova measurements up to 2004, in the so-called Hubble diagram, which shows the supernova redshift (an indicator of the size of the Universe when the explosion took place) on the horizontal axis and a measurement of the distance on the vertical axis. The upper graphic shows all the measured supernova. The lower graphic shows a summary of these same data together with the details of the universe models that are superimposed as lines. A universe in which expansion slows down is clearly ruled out. Taken from A.Riess et al. (2004).

atracción universal sólo puede estar ralentizando este proceso. Por este descubrimiento, los líderes de ambos equipos fueron galardonados con el premio Nobel en el año 2011.

Desde entonces, decenas de proyectos han verificado, de manera independiente y con métodos totalmente distintos, este resultado. Así pues, se determinó durante la década de los 2000, que la próxima generación de proyectos encaminados a medir este fenómeno, deberían hacerlo usando varias “sondas” independientes, además de las supernovas, desde un mismo instrumento.

## LOS PROYECTOS DES Y PAU

En este contexto, durante los 2000 surge el primer gran proyecto diseñado específicamente para atacar el problema de la aceleración del universo, o energía oscura: el *Dark Energy Survey*. Esta gran colaboración internacional, muy similar a las que han hecho realidad los distintos proyectos del LHC en el CERN, se propuso como tarea la medida de las propiedades de la energía oscura utilizando cuatro métodos independientes, que describiremos más adelante. Para alcanzar este ambicioso objetivo, era necesaria la construcción y operación de una cámara CCD de 500 megapíxeles, un tamaño sin precedentes en la época, desde el telescopio Blanco en Cerro Tololo (Chile). La situación del telescopio en un entorno desértico como éste, favorece la disponibilidad de cielos estables, sin nubes y con poca absorción de agua en la atmósfera. Dicha cámara (DECam) trabajaría para el proyecto durante cinco años, haciendo uso del 30% de las noches de cada uno (el resto se destina a otros usos científicos, como parte del acuerdo con el organismo estadounidense que administra el observatorio). Durante este periodo, DECam muestrea el cielo, realizando un mapa denso y detallado, el mayor cartografiado del Universo

The surprising result that both teams found is that this rate of deceleration  $q_0$  is negative, i.e. the Universe expands at increasingly greater velocities over time. This represents a real challenge because what is expected from the theory of gravity is that universal gravitation can only be slowing down this process. For this discovery, the leaders of both teams were awarded the Nobel Prize in 2011.

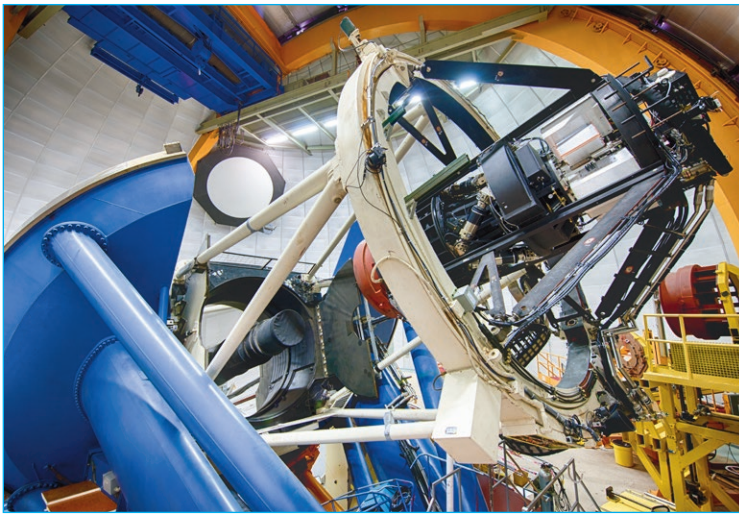
Since then, dozens of projects have independently verified this result with totally different approaches. It was thus determined during the decade of the 2000s that the next generation of projects aimed at measuring this phenomenon should do so by using several independent “probes”, in addition to the supernovas, from one and the same instrument.

## PROJECTS DES AND PAU

In this context, the first major project specifically designed to tackle the problem of the acceleration of the Universe, or dark energy – the Dark Energy Survey (DES) – was launched during the 2000s. This major international collaboration, very similar to those that have given rise to the different projects of the LHC in the CERN, set itself the task of measuring the properties of dark energy using four independent methods, which we will describe later. To achieve this ambitious goal, a 500-megapixel CCD camera, a size without precedent at the time, was built and operated from the Blanco telescope in Cerro Tololo (Chile). The location of the telescope in this desert environment favored the availability of stable skies without clouds and with little water absorption in the atmosphere. This camera (DECam) would operate for the project for five years, making use of 30% of the nights of each year (the rest is allotted to other scientific uses, as part of the agreement with the U.S. agency that administers the observatory). During this period, DECam samples the sky and makes a dense, detailed map – the greatest mapping of the Universe to date. At the same time that it takes these images, it repeatedly tracks certain areas in search of supernovas, as part of its “arsenal” of techniques to determine the characteristics of this acceleration. The four main techniques can be summarized as follows:

- The search for supernovas (described above).
- The study of the distribution of galaxies, where certain structures of known size can be observed in different epochs. Their apparent size provides information on the expansion rate of the Universe.
- The observation of the gravitational lensing effect, whereby light is bent by the matter existing between us and the light source. The statistical quantification of the intensity of this distortion as a function of its position in the heavens reveals at what velocity matter is being aggregated in the Universe – an effect that is countered by dark energy and therefore it is sensitive to it.
- The measurement of the number of galaxy clusters in different epochs enables us to obtain an indicator similar to that of the gravitational lens but with an independent approach.

On the other hand, and thanks to the group of Spanish scientists created by participation in DES, the CIEMAT became one of the institutions that proposed and headed



Vista general del interior de la cúpula del Telescopio Blanco en Cerro Tololo, Chile. Se puede apreciar el espejo primario del telescopio a la izquierda, y la cámara que recibe la luz y la convierte en una señal electrónica (DECam) a la derecha (la estructura negra). Se aprecian las cajas de electrónica en blanco, diseñadas y construidas en buena parte por el CIEMAT.

General view of the inside of the dome of the Blanco Telescope on Cerro Tololo, Chile. The telescope's primary mirror can be seen on the left, and the camera that receives the light and converts it into an electronic signal (DECam) on the right (the black structure). Also visible are the white electronics boxes, designed and built to a large extent by the CIEMAT.

hasta la fecha. Al mismo tiempo que toma estas imágenes, rastrea repetidamente ciertas zonas en busca de supernovas, como parte de su "arsenal" de técnicas para determinar las características de esta aceleración. Éstas se resumen en cuatro principalmente:

- La búsqueda de supernovas (descrita anteriormente).
- El estudio de la distribución de galaxias, donde ciertas estructuras de tamaño conocido pueden observarse en distintas épocas. El tamaño aparente de las mismas nos informa de la tasa de expansión del Universo.
- La observación del efecto de lente gravitacional por el cual la luz es desviada por la materia existente entre nosotros y la fuente de la luz. La cuantificación estadística de la intensidad de esta distorsión en función de su posición en el cielo desvela a qué velocidad se está agregando materia en el Universo: un efecto al que se contrapone la energía oscura y por ello es sensible a ella.
- La medida del número de cúmulos de galaxias en distintas épocas nos permite obtener un indicador similar al de las lentes gravitacionales pero mediante un método independiente.

Por otra parte, y gracias al grupo de científicos españoles creado por la participación en DES, el CIEMAT se convirtió en una de las instituciones que propusieron y que lideran el proyecto PAU (*Physics of the Accelerating Universe*). Este proyecto hoy en día internacional, surgió como una iniciativa a través de un proyecto Consolider en 2007, y se basa en una idea novedosa de la observación del cosmos usando múltiples filtros de banda estrecha. Su objetivo es también el estudio de la energía oscura, pero dicha técnica da acceso a métodos de medida que no se pueden utilizar en proyectos como DES, lo que le permite ser competitivo aunque el tamaño del proyecto sea bastante menor que éste último u otros proyectos actualmente en funcionamiento.

### APORTACIONES DEL CIEMAT

La división de astrofísica de partículas del CIEMAT, decidió unirse a este esfuerzo global en 2006, a través de estos dos proyectos de vanguardia

project PAU (*Physics of the Accelerating Universe*). This now international project arose as an initiative via a CONSOLIDER project in 2007, and it is based on a novel idea of observing the cosmos by using multiple narrowband filters. Its objective is also to study dark energy but this technique provides access to measuring methods that cannot be used in projects such as DES, which makes it competitive although the project is quite a bit smaller in size than DES and other projects currently under way.

### CONTRIBUTIONS OF CIEMAT

The CIEMAT particle astrophysics division decided to join this global effort in 2006 through these two cutting-edge projects in cosmology and taking advantage of the technical capability developed during the long history of the Basic Research and Technology departments in particle physics experiments.

Specifically, the CIEMAT designed and built a large part of the electronics boards that operate the DECam CCDs (74 CCDs in all, 62 of which are scientific CCDs). The galaxy mapping features that DES aims to achieve imposes strict requirements on the electronic noise of 10 electrons at most. This can be achieved with a CCD camera only if it operates at cryogenic temperatures (170K) and with adequate electronics.

At present, we are participating in the project with observations and data evaluation and analysis, and more than 60 papers have been published with the preliminary data collected in 2012-3. The CIEMAT group's specialty focuses on the large-scale structure of the Universe; the statistical study of the galaxy samples provides valuable information on their expansion as a function of time, as we developed methods to determine the distances to them. In addition, we have developed computing tools that allow us to make calculations much more rapidly, using graphic cards instead of conventional CPUs and classification methods for the detected objects based on their nature or their redshift (whereby we determine the size of the Universe based on when the galaxy in question emitted the light we are observing).

Throughout the project, we have also supervised three doctoral dissertations and we actively take part in the dissemination of the results in various informational initiatives (Theoretical Physics and Astrophysics master courses at the Complutense University and talks for the general public in several settings).

The CIEMAT's participation has been and is crucial for PAU. We have participated in all aspects of the project because, as we have indicated above, we are one of the institutions that proposed and founded it. For the construction of the camera, we have participated in the design and characterization of several of the components, e.g. the CCD electronics, and their properties insofar as quantum efficiency and noise are concerned. We have been responsible for the complete characterization of the optical filters that are

en cosmología, aprovechando la capacidad técnica desarrollada en el largo historial de los departamentos de Investigación Básica y Tecnología en los experimentos de física de partículas.

En concreto, el CIEMAT diseñó y construyó buena parte de las tarjetas de electrónica que operan los CCD de DECam (74 CCD en total de los cuales hay 62 CCD científicos). Las características del cartografiado de galaxias que se quiere hacer con DES impone unos requisitos estrictos en el ruido electrónico de 10 electrones a lo sumo. Esto puede alcanzarse con una cámara CCD sólo si opera a temperaturas criogénicas (170K) y con la electrónica adecuada.

Actualmente, participamos en el proyecto en las observaciones y en la evaluación y análisis de los datos, con más de 60 artículos publicados con los datos preliminares recogidos en 2012-3. La especialidad del grupo del CIEMAT se concentra en la estructura a gran escala del Universo: el estudio estadístico de las muestras de galaxias contiene valiosa información sobre la expansión del mismo en función del tiempo, ya que desarrollamos métodos para determinar las distancias hasta ellas. Asimismo, hemos desarrollado herramientas de computación que nos permiten hacer los cálculos de manera mucho más rápida, usando tarjetas gráficas en lugar de CPU convencionales, y métodos de clasificación de los objetos detectados según su naturaleza o su “desplazamiento al rojo” (con el cual determinamos el tamaño del Universo cuando la galaxia en cuestión emitió la luz que observamos).

A lo largo del proyecto, también hemos dirigido tres tesis doctorales y participamos activamente en la difusión de los resultados en varias iniciativas de divulgación (másteres de Física Teórica y Astrofísica de la Universidad Complutense o charlas en diversos ámbitos para el público).

Para PAU, la participación del CIEMAT ha sido y es central. Hemos participado en todos los aspectos del proyecto, puesto que como hemos señalado antes, somos una de las instituciones proponentes y fundadoras del mismo. En la construcción de la cámara hemos participado en el diseño y caracterización de varios elementos de la misma, como son la electrónica de los CCD, o sus propiedades en cuanto a ruido y eficiencia cuántica. Hemos sido responsables de la caracterización completa de los filtros ópticos que son el corazón de la técnica de espectrofotométrica que usa este instrumento, y nuestra es también la responsabilidad completa del diseño, producción, instalación y mantenimiento de la mecánica y del sistema de refrigeración de la electrónica completa de la cámara. PAUCam incorpora muchos aspectos innovadores que nunca antes se habían utilizado en cámaras astronómicas, y que se han desarrollado para poder observar de manera novedosa. Entre ellos podemos destacar el contenedor de la cámara, fabricado en fibra de carbono, que alberga los filtros; el método de intercambio de los mismos que opera en vacío y en un ambiente criogénico; y el sistema de refrigeración de la electrónica basado en gases y no líquidos para evitar cualquier goteo que dañe el espejo del telescopio.

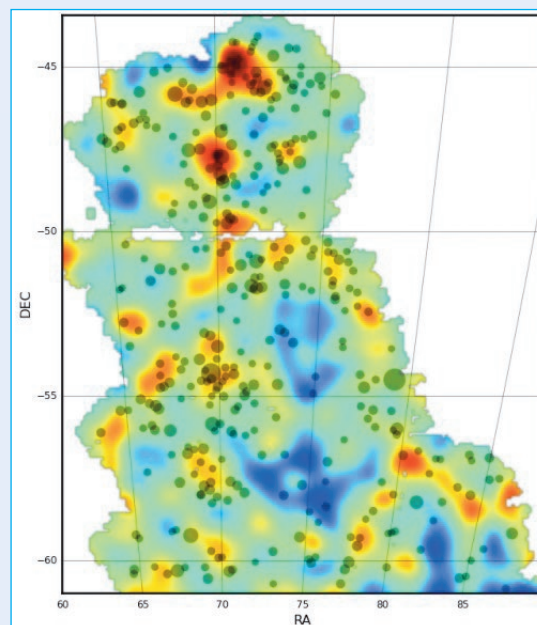
## ESTADO Y EVOLUCIÓN

El *Dark Energy Survey* ha estado en funcionamiento desde 2012, cuando empezó su periodo de pruebas. Este verano de 2016, se iniciará la cuarta temporada de observaciones. Hasta ahora el funcionamiento de la cámara ha sido impecable. Los primeros resultados de cosmología

*at the core of the spectrophotometric technique used by this instrument, and also for the design, production, installation and maintenance of the cooling system and mechanics of all the camera electronics. PAUCam includes many innovative elements that had never been used before in astronomical cameras and that have been developed to be able to observe in a new way. These include the camera casing, made of carbon fiber, that houses the filters; the filter exchange mechanism that operates in a vacuum and cryogenic environment; and the electronics cooling system based on gases, not liquids, to prevent any dripping that could damage the telescope mirror.*

## STATUS AND EVOLUTION

*The Dark Energy Survey has been in progress since 2012 when its test period began. The fourth season of observations will begin this summer of 2016. So far the camera operation has been impeccable. The first cosmology results will be published in late 2016, but the impact of this project goes well beyond the cosmological results. The data from the first two years have made it possible to find more than one dozen small galaxies neighboring ours. This discovery is important to understand how the structures in the Universe are formed on the scale*



Mapa de una determinada región de la bóveda celeste, en la que se marca la zona observada por DECam durante su periodo de pruebas. Las zonas de color, indican la cantidad de masa en dicha región del universo medida por DES por efecto de lente gravitacional. Los puntos indican la densidad de galaxias observadas. Este tipo de medidas ayudará a determinar la relación que hay entre la distribución de galaxias que podemos ver y la cantidad de masa real en el universo. Extraído de C.Chang et al. (2015).

Map of a certain region of the sky, on which the zone observed by DECam during its test period is marked. The colored zones indicate the amount of mass in that region of the universe measured by DES on the basis of the gravitational lensing effect. The points indicate the density of the observed galaxies. This type of measurement will help to determine the relationship between the distribution of galaxies that we can see and the quantity of real mass in the universe. Taken from C.Chang et al. (2015).



Observación durante la "primera luz" de PAUCam, en el que se aprecia la calidad de imagen.  
Observation during the "first light" of PAUCam, which shows the image quality.

se publicarán a finales del 2016, pero el impacto de este proyecto va mucho más allá de los resultados cosmológicos. Los datos de los primeros dos años han permitido encontrar más de una docena de pequeñas galaxias vecinas de la nuestra. Este descubrimiento es importante para entender cómo se forman las estructuras en el Universo a la escala de nuestro "vecindario" y permitirá arrojar luz sobre otro de los grandes misterios de la física moderna: la materia oscura. Igualmente, las características de la cámara la hacen especialmente valiosa para buscar planetas en los límites de nuestro sistema solar, o contrapartidas ópticas de fuentes de ondas gravitacionales. El valor de legado de este cartografiado para todas las disciplinas de la astronomía y cosmología será tremendamente importante y duradero. Asimismo, para otros proyectos más ambiciosos de características similares (tales como el *Large Synoptic Survey Telescope* LSST), los procedimientos y fuentes de error que se encuentren con DES resultarán de gran utilidad para su propio desarrollo.

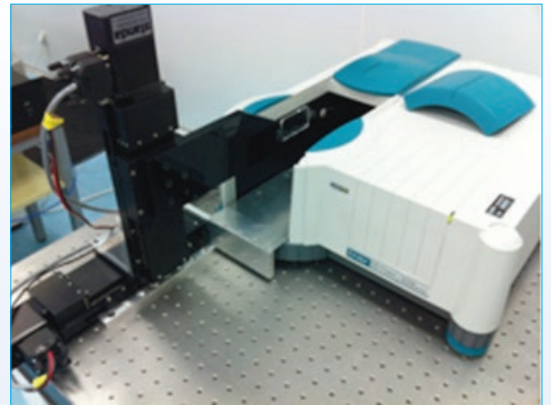
Por otro lado, PAUCam ha observado durante dos docenas de noches desde el telescopio William Herschel del Observatorio del Roque de los Muchachos desde 2015, con un buen rendimiento igualmente. Esperamos poder obtener los primeros resultados científicos durante el 2017-2018, y poder estudiar este fenómeno con esta nueva tecnología.

En suma, estamos en un momento idóneo para el estudio de la energía oscura, una cuestión central en física fundamental. El CIEMAT se ha posicionado durante la última década para poder estar en la vanguardia de la investigación en este campo, con el objetivo de llevar a cabo descubrimientos importantes en los próximos años.

Podéis seguir los proyectos en:

- [www.pausurvey.org](http://www.pausurvey.org)
- [www.darkenergysurvey.org](http://www.darkenergysurvey.org) (pronto en español).
- La página de Facebook de DES: [www.facebook.com/darkenergysurvey/](https://www.facebook.com/darkenergysurvey/)
- DES en twitter: @theDESsurvey, @Darkbites

Poner en marcha estos proyectos requiere el esfuerzo de muchísima gente. En el CIEMAT, este grupo, liderado por Eusebio Sánchez ha estado constituido por diversas personas de dos departamentos a lo largo de los últimos diez años: Julia Campa, Miguel Cárdenas, Aurelio Carnero, Javier Castilla, Carlos Díaz, Joaquín García, Manuel García, Sergio Jiménez, Gustavo Martínez, Miguel Polo, Rafael Ponce, Francisco Javier Rodríguez, Francisco Javier Sánchez, Ignacio Sevilla y Juan de Vicente.



Dispositivo de calibración de filtros usado para PAUCam en la sala limpia de la Unidad de Física de Partículas.  
Filter calibration device for PAUCam in the clean room of the Particle Physics Unit.

*of our "neighborhood", and it will shed light on another of the big mysteries of modern physics: dark matter. Furthermore, the camera's features make it especially valuable for looking for planets at the outer boundaries of our solar system, or optical counterparts of sources of gravitational waves. The valuable legacy of this mapping will be tremendously important and long-lasting for all the disciplines of astronomy and cosmology. Moreover, for other more ambitious projects of similar characteristics (such as the Large Synoptic Survey Telescope LSST), the procedures and sources of error found with DES will be of great use to their development.*

*On the other hand, PAUCam has observed for two dozen nights since 2015 from the William Herschel telescope at the Roque de los Muchachos Observatory, also with a good performance. We hope to obtain the early scientific results during 2017-2018 and to be able to study this phenomenon with this new technology.*

*In short, we are at an ideal time for the study of dark energy, which is a core issue in fundamental physics. The CIEMAT has positioned itself over the last decade to be able to be at the forefront of research in this field, in order to make important discoveries in the years to come.*

*The projects can be consulted at:*

- [www.pausurvey.org](http://www.pausurvey.org)
- [www.darkenergysurvey.org](http://www.darkenergysurvey.org) (out soon in Spanish).
- The DES Facebook page: <https://www.facebook.com/darkenergysurvey/>
- DES in Twitter: @theDESsurvey, @Darkbites

*To implement these projects requires the efforts of many people. In CIEMAT, this group, led by Eusebio Sánchez has been made by various people in two departments over the last ten years: Julia Campa, Miguel Cárdenas, Aurelio Carnero, Javier Castilla, Carlos Díaz, Joaquín García, Manuel García, Sergio Jiménez, Gustavo Martínez, Miguel Polo, Rafael Ponce, Francisco Javier Rodríguez, Francisco Javier Sánchez, Ignacio Sevilla and Juan Vicente.*