

# Conclusiones

A lo largo del desarrollo de esta tesis, he contribuido a la puesta en marcha de la Red de Telescopios Cherenkov (Cherenkov Telescope Array (CTA) en inglés), aportando mi granito de arena a la astrofísica de rayos  $\gamma$  de muy alta energía.

El prototipo del telescopio grande de CTA, el Large Size Telescope (LST)1, se encuentra en fase de comisionado desde Diciembre de 2018, y desde sus inicios, me he involucrado en diferentes tareas para su puesta en marcha. La mitad del trabajo que he desarrollado durante mi tesis, ha estado destinado al desarrollo y prueba del software de análisis de datos de este telescopio, durante su operación en solitario. Este software, actualmente en una versión muy avanzada, permite tratar los datos recogidos por el telescopio, desde el más bajo nivel (R0), hasta la reconstrucción de la información de la partícula primaria (es decir, su energía, dirección y distinción entre  $\gamma$ s y hadrones, nivel DL2). La reconstrucción de los datos se realiza en varias fases. En primer lugar, los datos recogidos en cada pixel de la cámara son calibrados, de manera que es posible realizar la conversión entre cuentas del Analog to Digital Converter (ADC) y fotoelectrones. Una vez obtenida la imagen de la cascada Cherenkov en la cámara, esta es parametrizada según el método de Hillas. Estos parámetros, junto a la información del tiempo de llegada de la luz a cada pixel, son utilizados para reconstruir la energía, dirección y tipo de partícula primaria con la ayuda de técnicas de Machine Learning, los Random Forests (RFs). Mi contribución a este trabajo, ha consistido en la escritura y verificación de gran parte del código del software, especialmente en sus primeras fases de desarrollo. He utilizado la cadena de análisis, aplicada a simulaciones de Monte Carlo, para derivar el rendimiento del telescopio, que alcanza una resolución en la energía del 20 % en el rango desde  $\sim 100$  GeV hasta  $\sim 1$  TeV. Con respecto a la resolución angular, esta es de hasta  $\sim 0,2^\circ$  en el mismo rango de energías. También he derivado la sensibilidad del telescopio a la detección de una fuente puntual tras 50h de observación, que se acerca al 10 % del flujo de la Nebulosa del Cangrejo en el rango entre 100 GeV y 1 TeV. He utilizado la misma cadena de análisis para reconstruir los datos obtenidos durante las tres campañas de toma de datos llevadas a cabo con el LST1, en las que se ha alcanzado una significancia de detección de la Nebulosa del Cangrejo de entre  $6-10 \sigma/\sqrt{h}$ .

Adicionalmente, he desarrollado un método alternativo para el cálculo de los parámetros de Hillas basado en un algoritmo de Esperanza-Maximización (Expectation-Maximization (EM) en inglés), que no requiere la aplicación de cortes en el número

de fotoelectrones de los pixeles para eliminar el fondo de la noche. Aplicando este método, he demostrado que se puede obtener un rendimiento similar al obtenido con el modo tradicional, evitando ajustar los parámetros del corte en los fotoelectrones de las imágenes, que claramente afectan al rendimiento de la reconstrucción. Además, se ha visto que el método de EM, permite realizar una mejor reconstrucción de cascadas con pocos foto electrones, al favorecer la clasificación como  $\gamma$ s de un mayor número de eventos. Al hacer el análisis con EM, se pueden recuperar hasta un 40 % de eventos de  $\gamma$ s que tras un corte de gammaness  $>0.7$ , serían descartados por el método tradicional. Por otro lado, no obstante, tiene la desventaja de asignar un valor de gammaness más alto a algunos eventos de protones. Para el mismo corte de gammaness  $>0.7$ , habría un 10 % más de protones que serían erróneamente clasificados como  $\gamma$ s.

Aplicado a datos reales del LST1, el método de EM muestra que puede igualar en sensibilidad al método tradicional, sin hacer cortes en la intensidad de las cascadas, y recuperando por tanto un gran número de eventos, ya que típicamente, para obtener un buen rendimiento con el método tradicional, es necesario descartar cascadas con menos de 500 fotoelectrones. Como consecuencia, presumiblemente este método permitiría conservar un mayor número de eventos de baja energía, reduciendo el umbral de energía del telescopio.

Como segunda parte de la tesis, realizada en paralelo con la anterior, he participado en el proyecto científico de la Gran Nube de Magallanes (Large Magellanic Cloud (LMC) en inglés) de CTA. Este proyecto ha asignado más de 300 horas de observación a esta galaxia, con las que se pretende alcanzar tres principales objetivos científicos: El estudio de las potentes fuentes de rayos  $\gamma$  presentes en la LMC y descubrimiento de otras nuevas, el estudio de la inyección y propagación de rayos cósmicos en la LMC a través de la detección de una emisión difusa; y la posible detección de una señal de aniquilación de Materia Oscura en la galaxia. Para garantizar el éxito de este proyecto, ha sido necesario crear un modelo de la emisión esperada en la LMC en el rango de energías de CTA. El modelo de emisión construido comprende fuentes puntuales conocidas, emisión difusa producida por rayos cósmicos interaccionando con el medio interestelar y una población sintética de nebulosas de viento de púlsar (Pulsar Wind Nebulae (PWNe)). El modelo ha sido utilizado para realizar una simulación de observación con el software de CTA, *ctools*, que reproduce el aspecto que tendrán los datos obtenidos al completar el tiempo de observación asignado al proyecto. Con esta simulación como ‘datos’, se ha realizado un ajuste al modelo de emisión, utilizando el método de máxima verosimilitud, para obtener predicciones en las posibilidades de CTA para detectar y estudiar las diferentes fuentes de rayos  $\gamma$  en la LMC. Los resultados muestran que las potentes fuentes puntuales conocidas serán detectadas con una gran significancia, permitiendo estudiar sus características espectrales en el rango de energías desde 100 GeV hasta 100 TeV. También, se estima que al menos una decena de nuevas fuentes del tipo de PWNe serán detectadas. Con respecto a la emisión difusa de rayos cósmicos, el modelo utilizado para recrear la componente leptónica producida por scattering Compton inverso de rayos cósmicos cargados parece

demasiado débil como para poder ser distinguida del fondo instrumental en el análisis. La componente hadrónica, producida por decaimiento de piones, ofrece resultados más optimistas, pudiendo ser detectada con alta significancia, especialmente en las regiones donde hay más acumulación de gas en la galaxia.

Además del estudio de las fuentes astrofísicas, se ha utilizado el modelo de emisión creado como un fondo sobre el que estimar si CTA podría ser capaz de detectar una señal de rayos  $\gamma$  producida por la aniquilación de materia oscura formada por partículas pesadas que interaccionan débilmente (Weak Interacting Massive Particles (WIMPs)). Para ello, se han construido diferentes modelos de perfiles de materia oscura en la LMC, combinados con diferentes canales de aniquilación, comunmente utilizados en la literatura, para estudiar el espacio de parámetros entre sección eficaz de aniquilación y masa de la partícula de Materia Oscura que podría ser estudiado por CTA. Los resultados de este análisis muestran que, salvo en los modelos en los que la materia oscura está muy concentrada en un volumen muy pequeño (modelos, por otro lado, poco realistas), CTA no sería capaz de descartar el modelo típico de WIMPs con la sección eficaz canónica.

Este trabajo servirá como base para el proyecto de la LMC dentro de CTA, y abre el camino para la realización de análisis más realistas y que se acercaría más a los resultados con datos reales. Los próximos pasos serían hacer un análisis ‘ciego’ de las fuentes puntuales, estudiar en detalle las características que se podrán derivar de las fuentes conocidas, incluir en el model el remanente de supernova SNR1987A, incluir una población desconocida de remanentes de supernova, etcétera. Los resultados de este trabajo han dado como fruto un artículo dentro del consorcio CTA que se encuentra actualmente en fase de preparación, y del cual soy una de las principales autoras.



# Conclusions

Along the scope of this thesis, I have contributed to the commissioning of the Cherenkov Telescope Array (CTA), playing my small part to the very high energy  $\gamma$ -ray astrophysics field.

The prototype of the Large Size Telescope (LST) is currently in its commissioning phase since December 2018, and since its beginning I have participated in several activities related to it. Half of the work done during this thesis has been destined to the development and verification of the software for the analysis of LST1 data during single telescope operation. This software, currently in a very advanced version, allow to reduce the data taken by the telescope, from the raw level (R0), to the reconstruction of the primary particle information (energy, direction and distinction between  $\gamma$ s and hadrons, level DL2). The data reconstruction is made in several phases. In first place, the data recorded in each pixel is calibrated, doing the conversion between Analog to Digital Converter (ADC) counts and photoelectrons. Once the image of the Cherenkov shower is extracted, it is parameterized following the Hillas method. These parameters, together with the arrival time of the light to each pixel, are used to reconstruct the energy, direction and type of particle making use of a set of Random Forests (RFs), a machine learning method. My personal contribution to this task, has consisted in the writing and verification of the code for the analysis, specially in its initial versions. I have used the analysis chain, applied to Monte Carlo simulations, to obtain the performance of the telescope, which reaches an energy resolution of 20% in the range from  $\sim 100$  GeV to  $\sim 1$  TeV. About the angular resolution, it goes down to  $\sim 0.2^\circ$  in the same energy range. I have also computed the sensitivity of the telescope to the detection of a point source in 50 hours of observation time, which goes close to the 10% of the Crab Nebula flux in the range from 100 GeV to 1 TeV. I have applied the same analysis chain to reconstruct real data recorded with the telescope during the three data taking campaigns, where a significance of  $6-10\sigma/\sqrt{h}$  has been reached for the detection of the Crab Nebula.

In addition, I have developed an alternative method for the calculation of the Hillas parameters based the Expectation-Maximization (EM) algorithm, which do not require the application of a cleaning to the shower images. Using this method, I have shown that it can be obtained a similar performance than the traditional way with cleaning, avoiding the task of tuning the cleaning parameters, which clearly affect the performance of the reconstruction. Besides, this method has shown a better reconstruction

of showers with low number of photoelectrons, as it favors the classification of  $\gamma$ -like events with higher gammaness. Performing the data reconstruction with EM, it is possible to recover up to a 40% of  $\gamma$  events after a gammaness cut  $> 0.7$ , which with the traditional tailcuts cleaning method are discarded. On the other hand, it has the caveat of giving a higher value of gammaness to some hadron events, misclassifying 10% more of hadrons for the same cut in gammaness.

The EM method applied to real data shows that it can reach a similar sensitivity as the traditional method, but avoiding making cuts in the intensity of the showers, recovering a big number of events. Typically, to obtain a good performance with the traditional method, it is necessary to discard showers with at least less than 500 photoelectrons. However, with EM a cut in less than 100 photoelectrons is enough, meaning that analyzing data with this method preserves a bigger number of low energy events, lowering the energy threshold of the telescope.

As a second part of the thesis, in which I have worked in parallel with the previous, I have participated in the Key Science Project (KSP) of the Large Magellanic Cloud (LMC) for CTA. This project has more than 300 hours of observation assigned to a full galaxy survey, which pursues three main scientific goals: The study of the powerful  $\gamma$ -ray sources of the LMC and the discovering of new ones, the study of cosmic-ray injection and propagation by the detection of the  $\gamma$ -ray diffuse emission in the LMC; and the possible detection of a Dark Matter (DM) annihilation signal in the galaxy. For this project, it has been necessary to create a model of the expected  $\gamma$ -ray emission from the LMC in the energy range of CTA. The model computed includes four known point sources detected by current  $\gamma$ -ray telescopes, diffuse emission produced by Cosmic Rays (CRs) interacting with the Interstellar Medium (ISM), and a synthetic population of Pulsar Wind Nebulae (PWNe). The model has been given as input for a simulation of the data that would be obtained from the CTA LMC survey, using the CTA software *ctools*. This simulation has been then used to perform a binned likelihood analysis, fitting the ‘data’ to the model, in order to foresee the possibilities of CTA to detect and study the different  $\gamma$ -ray sources of the LMC. The results show that the powerful known point sources will be detected with high significance, allowing to study their spectral features on the energy range from 100 GeV to 100 TeV. Also, at least around a ten of new sources of the Pulsar Wind Nebula (PWN) type will be discovered by CTA. About the diffuse emission from CRs, the model built to reproduce the leptonic component, as a result of Inverse Compton (IC) scattering of charged CRs, seems to be too faint to be disentangled from the instrumental background. On the other hand, the hadronic component, produced by pion-decay, offers more optimistic results, with high significance values specially in regions with high gas density.

Besides the study of the astrophysical sources, the emission model and the results from the previously described analysis, have been used as background over which to study the possibilities of CTA to detect a signal from the annihilation of DM composed by Weak Interacting Massive Particles (WIMPs). To do so, different models of DM

profiles in the LMC have been tested, together with a set of different annihilation channels, typically used in the literature, to study the parameter space of annihilation cross section and DM particle masses which could be probed by CTA. The results from this analysis show that, except for the models with very cuspy DM profiles (yet unrealistic ones), CTA will not be able to rule out the typical WIMP model of the canonical thermal cross section.

This work will serve as a baseline for the LMC KSP, opening the path for more detailed and realistic analysis. The next steps would be to perform a blind analysis of the point sources, with a detailed study of the spectral features which could be derived, include in the model the Supernova Remnant (SNR) 1987A, include a synthetic population of SNRs, etc.

The results from this work have been gathered in a CTA consortium paper, currently in preparation, for which I am one of the corresponding authors.