

# Resum

Aquesta tesi és sobre el problema dels raigs csmics galàctics, enfocat des de l'astrofísica.

Els raigs csmics són partícules d'alta energia que impacten l'atmosfera de la terra des de dalt. El descobriment del seu origen extraterrestre s'atribueix a Victor Hess, que va dur a terme una sèrie d'experiments clau ara fa cent anys. El centenari del descobriment ha estat celebrat mentre aquesta tesi era escrita. Aquesta coincidència ha motivat que es fes una breu recerca històrica sobre els desenvolupaments clau dels inicis de la física de raigs csmics. També es revisa l'estat actual del camp, posant l'èmfasi en la composició, la forma espectral i la cerca d'anisotropies. El Capítol 1 acaba amb la discussió sobre el coneixement que es té actualment sobre els possibles llocs d'acceleració de raigs csmics. A energies per sota de  $10^{15.5}$  eV, es creu que les restes de supernova de la Galàxia són els principals contribuents. La resta de la tesi és dedicada a l'estudi de l'emissió de raigs gamma d'aquests objectes.

Els processos físics presents en restes de supernova són introduïts al Capítol 2. El mecanisme paradigmàtic conegut com acceleració difusiva per xocs emplacen les restes de supernova com eficients acceleradors de raigs csmics. La millor manera d'aconseguir informació sobre les partícules accelerades a les restes de supernova és observar-ne els raigs gamma. Per tant, els processos d'emissió de raigs gamma són explicats. Els processos d'emissió que involucren protons accelerats són d'un interès particular, ja que aquests són les partícules majoritàries dels raigs csmics. Ens concentrem en la possibilitat de que hi hagi núvols moleculars a prop de les restes de supernova, doncs aquests intensifiquen l'emissió de raigs gamma. Finalment, una llista de candidates a ser observades des de l'hemisferi nord és produïda.

Els telescopis als que hem tingut accés per dur a terme observacions de restes de supernova en el domini dels raigs gamma són *Fermi*/LAT i MAGIC. Ambdós són presentats al Capítol 3. *Fermi*/LAT és un telescopi espacial, amb cobertura de tot el cel, que proveeix accés lliure a les dades a través d'una pàgina web. Per tant, la cobertura dels objectes seleccionats estava garantida en aquest rang d'energia. En canvi, MAGIC és operat per una col·laboració internacional d'institucions de recerca. Com a membres de la col·laboració MAGIC, vam poder proposar l'observació d'alguns dels objectes a la nostra llista de candidats, i aquestes van ser acceptades i dutes a terme. Els telescopis MAGIC són descrits detalladament, en particular pel que fa a l'anàlisi de dades, ja que l'autor hi tenia responsabilitats dins de la col·laboració.

El primer objecte individual en ser presentat són les restes de supernova HB21 (Capítol 4). L'anàlisi de les dades públiques del telescopi *Fermi*/LAT ens porta a destacar l'existència d'una font extensa i resolta de raigs gamma. Vam ser capaços de dividir la font en tres regions i obtenir l'espectre de cada una d'elles. Com a resultat, vam trobar variacions espectrals al llarg de les restes de supernova, que nosaltres relacionem amb variacions de les propietats del medi interestel·lar.

Al Capítol 5 expliquem les observacions de les restes de supernova conegudes com el Llac del Cigne. De la mateixa manera que per HB 21, la font és resolta en les observacions amb *Fermi*/LAT, i duem a terme un anàlisi similar al de HB 21, en el que trobem que les variacions espectrals són encara més acusades. Hi ha dos punts en particular que presenten un espectre més dur, que s'estén fins uns quants GeV. Resulta que un d'aquests punts va ser observat gràcies a la nostra proposta d'observar el Llac del Cigne amb els telescopis MAGIC, abans de tenir la informació de *Fermi*/LAT, i basant-nos només en estimacions grolleres del flux fetes a partir de la densitat del medi interestel·lar.

Tant el Llac del Cigne com HB 21 resulten ser restes de supernova properes i de baixa lluminositat. Per contra, les restes de supernova W51C (presentades al Capítol 6) són les més lluminoses detectades fins ara a la Galàxia. Les nostres observacions amb els telescopis MAGIC estenen fins a 5 TeV les mesures de l'espectre fetes prèviament per la col·laboració *Fermi*. Amés, localitzem la regió d'emissió en una zona molt particular on W51C interacciona amb la W51B, una regió de formació estel·lar vena. La resta de la closca que formen les restes d'aquesta supernova no emet raigs gamma, excepte per una pic d'emissió secundària (no significatiu per ell mateix) que coincideix amb una possible nebulosa de vent de púlsar.

Per concloure, discutim l'impacte d'aquestes observacions en el camp de l'emissió d'alta energia de restes de supernova. Emfatitzem la utilitat de les observacions resoltes espacialment per l'estudi de l'escapament i difusió de raigs csmics procedents de restes de supernova. També mencionem l'existència d'una població de restes de supernova de baixa lluminositat a la qual pertanyen el Llac del Cigne i HB 21. Aquestes restes de supernova de baixa lluminositat podrien ser abundants a la Galàxia, i per tant tenir una contribució important al flux de raigs csmics.

# Summary

This thesis is an astrophysical approach to the problem of the Galactic cosmic rays.

Cosmic rays are energetic particles that hit the Earth atmosphere from above. The discovery of its extraterrestrial origin is attributed to Victor Hess, who conducted a series of key experiments one hundred years ago. The centenary of the discovery has been celebrated at the time this thesis has been written. This coincidence motivated to perform a brief historical search of the key developments of the early history of the cosmic-ray physics. The current status of the field is also reviewed, focusing in composition, spectral shape and anisotropy searches. Chapter 1 ends discussing the current knowledge of the possible acceleration sites of cosmic rays. At energies below  $10^{15.5}$  eV, Galactic supernova remnants are believed to be the main contributors. The rest of the thesis is devoted to the study of gamma-ray emission from some of these objects.

Physical processes in supernova remnants are introduced in Chapter 2. The paradigmatic mechanism known as diffusive shock acceleration places supernova remnants as efficient cosmic-ray accelerators. Information regarding particles accelerated in supernova remnants is best gathered by observing them in the gamma-ray domain. Therefore, emission processes yielding gamma rays are discussed. Mechanisms involving accelerated protons are of particular interest, as they prove the majority component in the cosmic rays. We focus in the possibility of having molecular clouds near supernova remnants enhancing the gamma-ray emission. Finally, a list of candidates for being observed from the northern hemisphere is elaborated.

The telescopes to which we had access to perform observations of supernova remnants in the gamma-ray domain were *Fermi*/LAT and MAGIC. Both are introduced in Chapter 3. *Fermi*/LAT is a space telescope with all-sky coverage that provides free access to the data through a web page. Therefore, the coverage of the objects of interest was granted in this energy range. MAGIC instead, is operated by an international collaboration of institutions. As members of the MAGIC collaboration, we were able to propose observations of some of the objects in our target list, that were accepted and conducted. The MAGIC telescopes themselves are described with some detail, in particular the aspects regarding data analysis, in which the author had responsibilities within the collaboration.

The first of the individual objects to be discussed is the supernova remnant HB 21 (Chapter 4). The analysis of the public *Fermi*/LAT data lead us to claim the existence of a resolved gamma-ray source. We were able to divide the source in three regions and obtain the spectrum of each of them. As a result, we found that there are spectral variations across the supernova remnant, that we attribute to variations in the properties of the interstellar medium.

In Chapter 5 we discuss observations of the Cygnus Loop supernova remnant. Same as for HB 21, the source is resolved in the observations with *Fermi*/LAT, and we perform an analysis similar to that of HB 21, in which we find even more marked spectral variations.

There are two spots in particular that present a harder spectrum, extending to energies of several GeV. It turns out that one of these spots was targeted by our proposal to observe the Cygnus Loop with the MAGIC telescopes, prior to knowing the information from *Fermi*/LAT, and based only on rough flux expectations based on the interstellar medium density.

Both the Cygnus Loop and HB 21 happen to be low-luminosity, nearby supernova remnants. In contrast with these objects, the supernova remnant W51C (discussed in Chapter 6) is the most luminous gamma-ray emitting supernova remnant detected so far in the Galaxy. Our observations with the MAGIC telescopes extend the spectrum previously measured by the *Fermi* Collaboration up to energies of 5 TeV. In addition, we locate the emission region in a very particular zone of interaction between W51C and the adjacent star-forming region W51B. The rest of the supernova remnant shell is dark in gamma rays, except for a secondary emission peak (not significant by itself) coincident with a possible pulsar wind nebula.

To conclude, we discuss the impact that these observations have in the field of high-energy emission from supernova remnants. We stress the convenience of space-resolved observations for the study of the escape and diffusion of cosmic rays from supernova remnants. We also note the existence of a population of low luminosity supernova remnants of which Cygnus Loop and HB 21 are representatives. These low luminosity supernova remnants could be abundant in the Galaxy, and thus could have a large contribution to the cosmic rays.