

Diss. ETH No. 18322



DETECTION OF PULSED VERY HIGH ENERGY
GAMMA-RAYS FROM THE CRAB PULSAR
WITH THE MAGIC TELESCOPE USING
AN ANALOG SUM TRIGGER

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by
MICHAEL THOMAS RISSI

Dipl. Phys. ETH
born August 31, 1979
citizen of Wartau (SG)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Felicitas Pauss, examiner
Prof. Dr. Christoph Grab, co-examiner
Dr. Adrian Biland, co-examiner

2009

Abstract

Pulsars (PULSating stARS) are strongly magnetized and fast spinning neutron stars emerging from the massive core of a star after the supernova at the end of its lifetime. Their rotational frequency ranges from 0.1 Hz to nearly 1 kHz. In the 1960s, Pulsars were discovered at Radio frequencies. Until the mid 1990s, pulsating electromagnetic radiation was measured over the whole spectrum (radio, infrared, optical, ultraviolet, X-rays) from a few 1000s pulsars. Seven pulsars are even known to radiate pulsating γ -rays, being the photons with the shortest yet measured wavelengths and the highest energies ever observed.

Even though pulsars have been known for the last 40 years, the mechanisms leading to the emission of electromagnetic radiation is hardly known. The main models – the so-called polar cap and outer gap models – have in common that the emission of electromagnetic radiation is related to relativistic electrons and positrons. These particles are accelerated by the electric field induced by the strong rotating magnetic field. Photons are emitted by those particles, e.g. by means of the synchrotron mechanism. The difference between the two models lies in the region, where the acceleration of the charged particles takes place. The polar cap model assumes the acceleration in a region close to the neutron star above the magnetic poles, while in the outer gap model, the acceleration takes place in an area far out in the pulsar's magnetosphere. The magnetosphere is the space in the vicinity of a pulsar, where a strong magnetic dipole field co-rotates with the pulsar. It is filled with a plasma. Due to different absorption mechanism for γ -rays, the two models predict different energy spectra for the pulsed radiation at the highest energies.

Gamma rays with an energy in the MeV to a few GeV range are usually called *High Energy* (HE) γ -rays and are measured by satellite experiments. Photons with energies above a few tens of GeV are called *Very High Energy* (VHE) γ -rays and can be detected from ground with Imaging Air Cherenkov Telescopes (IACT) such as the MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov) Telescope. These kind of telescopes detect the Cherenkov flashes from electromagnetic atmospheric air showers initiated by a γ -ray hitting molecules or atoms in the upper atmosphere. Among all IACTs, MAGIC has the lowest energy threshold of ≈ 55 GeV.

In the last 20 years since the emergence of VHE γ -ray astrophysics with ground based instruments, several unsuccessful attempts to detect VHE γ -rays from pulsars have been made. The reasons for the non-detection is the sharp cut-off of the energy spectra predicted by the two pulsar models and the too high energy threshold of IACTs which did not allow to collect enough pulsating γ -rays. Following a hint for pulsed VHE γ -ray emission above 60 GeV from the Crab Pulsar from data taken with the MAGIC telescope in 2005, we developed a new trigger system for the MAGIC telescope: the sum trigger. The sum trigger allowed to reduce the energy threshold from 55 GeV to 25 GeV.

Between October 2007 and February 2008, we observed the Crab Pulsar with the MAGIC telescope using the sum trigger for about 22 hours under good weather conditions. The

analysis of this data reveals pulsating VHE γ -radiation on a confidence level of 6.2σ .

In case of the Crab Pulsar, the two pulsar models discussed above both predict a cut-off of the pulsed γ -ray spectrum of exponential (outer gap) or super exponential (polar cap) shape in the range between a few GeV and some tens of GeV. For both cases, we calculated the cut-off energy to

$$\begin{aligned} E_{\text{cut}} &= (17.7 \pm 2.8_{\text{stat}} \pm 5.0_{\text{syst}}) \text{ GeV} \quad (\text{exponential}), \text{ and} \\ E_{\text{cut}} &= (23.2 \pm 2.9_{\text{stat}} \pm 6.6_{\text{syst}}) \text{ GeV} \quad (\text{super exponential}), \end{aligned}$$

respectively. Our measurements contradict the polar cap's model predictions.

In a next step, the pulsed spectrum was determined in the cut-off region. I found that the pulsar still emits pulsed γ -rays above 60 GeV which is higher than predictions from the outer gap model indicate. The pulsed spectrum above 25 GeV rather follows a power law ($f(E) \propto E^{-\alpha}$) with spectral index $\alpha = 3.1 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.5_{\text{syst}}$, than the steep exponential cut-off.

Zusammenfassung

Pulsare sind stark magnetisierte, rotierende Neutronensterne, welche aus den massiven Kernen von Sternen nach der Supernova am Ende ihrer Lebenszeit entstehen. Ihre Rotationsfrequenz ist zwischen 0.1 Hz bis fast 1 kHz. Gepulste Radioemission wurde vom ersten Pulsar in den 1960er Jahren entdeckt. Gepulste elektromagnetische Strahlung wurde bis Mitte der 1990er Jahre über das gesamte Spektrum (von Radio über Infrarot, optischen Wellenlängen, Ultraviolett bis Röntgenstrahlen) von ein paar 1000 Pulsaren gemessen. Von sieben Pulsaren ist sogar bekannt, dass sie γ -Strahlung emittieren. Diese Photonen haben die kürzeste je gemessene Wellenlänge und die höchsten bisher beobachteten Energien.

Obwohl Pulsare seit 40 Jahren bekannt sind, wissen wir heute immer noch relativ wenig über deren Emissionsmechanismus. Die beiden Hauptmodelle (das “polar cap” und das “outer gap” Modell) haben gemein, dass die Emission der elektromagnetischen Strahlung mit relativistischen Elektronen und Positronen zusammenhängt. Diese Teilchen werden im elektrischen Feld, welches vom rotierenden Magnetfeld induziert wird, beschleunigt. Die Photonen werden dann zum Beispiel über den Synchrotron Mechanismus ausgestrahlt. Die beiden Modelle unterscheiden sich in der angenommenen Region, in der die Beschleunigung der geladenen Teilchen stattfindet. Das “polar cap” Modell nimmt an, dass die Beschleunigung oberhalb der magnetischen Polkappen nahe am Pulsar stattfindet. Im “outer gap” Modell dagegen findet die Beschleunigung weit aussen in der Magnetosphäre statt. Wegen unterschiedlicher Absorptionsmechanismen der hochenergetischen Gammastrahlung sagen die beiden Modelle unterschiedliche Energiespektren für die höchsten Energien voraus.

Gammastrahlen mit einer Energie zwischen MeV und wenigen GeV werden mit Satellitenexperimenten gemessen. Die Photonen mit Energien oberhalb ein paar Dutzend GeV können mit Experimenten auf der Erde nachgewiesen werden; zum Beispiel mit dem MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov) Teleskop. Dieses Teleskop registriert die Cherenkov-Lichtblitze von elektromagnetischen atmosphärischen Luftschauern, die von einem Gammateilchen initiiert werden, welches Atome oder Moleküle der Atmosphäre trifft. Von allen existierenden Cherenkovteleskopen hat MAGIC die tiefste Energieschwelle von 55 GeV.

Seit den Anfängen der Gammastrahlen-Astrophysik mit erdgebundenen Instrumenten vor 20 Jahren wurde erfolglos versucht, gepulste hochenergetische Gammastrahlung von Pulsaren zu messen. Ein Grund für diese Nichtdetektion ist der von den Pulsarmodellen vorausgesagte starke “cut-off” (Abbruch) des Energiespektrums und die zu hohe Energieschwelle der Cherenkovteleskope, welche es verunmöglichte, eine genügende Anzahl gepulster Gammateilchen zu messen. Nachdem in Daten, die 2005 genommen wurden, mit dem MAGIC Teleskop ein Hinweis für gepulste hochenergetische γ -Strahlung oberhalb 60 GeV vom Krebspulsar gefunden wurde, haben wir ein neues Trigger-System¹ für das MAGIC Teleskop entwickelt (der sogenannte Summentrigger, oder sum trigger). Dieser neue Trig-

¹Ein Trigger-System ist ein Auslösemechanismus, welcher bewirkt, dass die gemessenen Daten gespeichert werden.

ger reduzierte die Energieschwelle von 55 GeV auf 25 GeV.

Zwischen Oktober 2007 und Februar 2008 beobachteten wir den Krebspulsar mit dem Summentrigger während gut 22 Stunden bei guten Wetterbedingungen. Die Analyse dieser Daten führte zur Entdeckung von gepulster hochenergetischer γ -Strahlung mit einer Signifikanz von 6.2σ .

Die beiden obengenannten Pulsarmodelle sagen einen steilen cut-off des gepulsten Gammaskpektrums mit exponentiellem (outer gap) respektive super-exponentiellem Verlauf (polar cap) voraus. Für beide Fälle habe ich die charakteristische Energie, bei welchem das Spektrum abbricht, berechnet:

$$\begin{aligned} E_{\text{cut}} &= (17.7 \pm 2.8_{\text{stat}} \pm 5.0_{\text{syst}}) \text{ GeV} \quad (\text{exponentiell}), \text{ respektive} \\ E_{\text{cut}} &= (23.2 \pm 2.9_{\text{stat}} \pm 6.6_{\text{syst}}) \text{ GeV} \quad (\text{super-exponentiell}). \end{aligned}$$

Die hier vorgestellte Messung widerspricht den Voraussagen des polar cap Modelles und schliesst dieses daher aus.

In einem weiteren Schritte habe ich das gepulste Energiespektrum bestimmt und herausgefunden, dass der Pulsar Gammastrahlen sogar oberhalb 60 GeV aussendet; d.h. höher als das outer gap Modell voraussagt. Das gepulste Spektrum oberhalb 25 GeV folgt eher einem Potenzgesetz ($f(E) \propto E^{-\alpha}$) mit spektralem Index $\alpha = 3.1 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.5_{\text{syst}}$, als dem steilen exponentiellen Abbruch.