HESS, unsere Milchstraße und die Große Magellansche Wolke





Stefan Ohm (DESY, Zeuthen) for the H.E.S.S. Collaboration AT Seminar, DESY Hamburg, 17.02.2015



(Results published in Science, 347, 406 - 412, 2015)

Ausblick

> Einführung

- Kosmische Strahlung und ihr Nachweis
- HESS

> Unsere Milchstraße im Gammalicht

- In anderen Wellenlängen
- Teilchenbeschleuniger und Gammastrahlungsquellen

> Die Große Magellansche Wolke

- Im Kontext
- Die neuen HESS Resultate
- ... und was sie bedeuten (könnten [©])



Kosmische Strahlung: Ein wenig Geschichte

> Geschichte

- Rätsel der natürlichen Radioaktivität (um 1900)
- Theodor Wolf (1910) macht erste Messungen auf Eiffelturm
- Victor Hess (1912) macht Ballonflüge und findet Strahlung extraterrestrischen Ursprungs → Kosmische Strahlung





- Kosmische Strahlung (heute)
 - Spektrum folgt Potenzgesetz in Energie
 - Kaum Änderung der Form über 10 Größenordnungen in Energie!
 - Produziert durch Beschleunigung von Teilchen, nicht durch strahlenden Körper



Kosmische Strahlung

> Eigenschaften

- Energiedichte vergleichbar mit Sternenlicht, interstellaren Magnetfeldern und der Strahlung vom Urknall
- Dominierende Druckkomponente in vielen astrophysikalischen Umgebungen (Solarsystem, Supernovaüberreste (SNR), interstellares Medium, Jets, etc.
- 99% Protonen und schwere Kerne

> Ursprung

- Heiß diskutiert (seit langer, langer Zeit...)
- Schalen von SNRs sind wahrscheinlichster Ursprung für Galaktische CRs bis ~10¹⁵ eV
- Radiogalaxien, Galaxienhaufen, GRBs f
 ür h
 öchste Energien?

Wie können wir die Beschleuniger finden?

→ Neutrale Botenteilchen (Neutrinos und Photonen)



Nicht-thermische Strahlung

> Boten ultra-relativistischer Elektronen und Protonen



Nicht-thermische Strahlung





Nicht-thermische Strahlung



Nicht-thermische "Fenster"

- > Boten ultra-relativistischer **Elektronen und Protonen**
- > Nicht-thermische "Fenster"
 - Radio

Energie-

Fluss (vF_v)

- Harte Röntgenstrahlung
- Gammastrahlung



γ-ray enters the atmosphere

> Abbildende Cherenkov Teleskope

- Atmosphere + Teleskope als 'Teilchendetektor'
- Cherenkovlicht wird von geladenen Teilchen im Luftschauer ausgesandt
- Optischer Reflektor im Cherenkov Lichtkegel reflektiert Licht in schnelle Kamera im Fokus

10 nanosecond snapshot

Electromagnetic cascade

0.1 km² "light pool", a few photons per m².

Primary

Was braucht man um so eine Messung zu machen?

> Reflektor

- Große Spiegelfläche um schwaches Cherenkov Licht zu reflektieren
- Am Besten im blauen reflektieren und im Roten absorbieren ("night sky background")

> Kamera

- Sehr schnelle Photosensoren um die sehr kurzen Lichtblitze zu detektieren (~10 ns lang)
- Sensitiv im Blauen Licht, nicht im Roten
- Pixel um Luftschauergeometrie abzubilden









Stefan Ohm | DESY AT Seminar | February 2015 | Page 10





1/100000 (10 μs)

1/1000000 (1 μs)

1/10000000 (100 ns)

1/100000000 (10 ns)





1/10000 (100 µs)

1/100000 (10 µs)

1/1000000 (1 μs)

1/10000000 (100 ns)

1/100000000 (10 ns)





1/10000 (100 µs)

1/100000 (10 µs)

1/1000000 (1 μs)

1/10000000 (100 ns)

1/100000000 (10 ns)















Instrumente die derzeit in Betrieb sind





Stefan Ohm | DESY AT Seminar | February 2015 | Page 17

Der Gammastrahlungshimmel in 2015

> GeV γ-rays

- ~3000 Quellen insgesamt
- 1/2 Extragalaktisch
- ~1000 nicht assoziiert unassociated (z.B. Galaktische diffuse Emission)
- 25 ausgedehnte Quellen

> TeV γ-rays

- >150 Quellen insgesamt
- ~50 Extragalktisch
- ~100 Galaktisch







Was sind die Galaktischen TeV Quellen?



> Ursprüngliche Erwartung

- TeV Emission sollte auf Beschleuniger Galaktischer CRs hinweisen
- → CR Beschleunigung in SNR Überresten

> Beobachtungen

- Galaktische TeV γ-ray Quellen liegen auf der Galaktischen Ebene
- Dort wo sich dichtes Gas befindet und massive Sterne entstehen
- Wir sehen SNR Überreste im Gammalicht!



SN 1006





> Zoo von Gammastrahlungsquellen

- Teilchenbeschleunigung weit verbreitet in der Milchstrasse
- Einzelne Objekte können im Detail studiert werden (Beschleunigung/Wechselwirkung)

Wo? Wann?

~100 TeV Quellen → Populationsstudien

> Einfluss

- Rückkopplung nicht-thermischer Teilchen?
- Umgebung? (z.B. Magnet- u. Strahlungsfelder)
- CR Transport
- Was passiert in anderen Galaxien?
 - Michstrasse ist kein Einzelfall
 - Nicht-thermische Teilchen könnten für Galaxienentstehung und –entwicklung relevant sein



You are here

Galaxien in unserer Nachbarschaft





Galaxien in unserer Nachbarschaft



> Milchstraße

 TeV Quellen meistens ausgedehnt für HESS (10s of pc / 0.1 – 1 deg)

> Große Magellansche Wolke

- Nächste stern-bildende Galaxie
- ~50 kpc Distanz
- 50 pc ≈ 0.07 deg ≈ HESS PSF
- > Kleine Magellansche Wolke
 - ~60 kpc Distanz
 - Niedrigere Sternbildungsrate
 - Trotzdem interessant
 - → Schauen wir auf die LMC



Die Große Magellansche Wolke

> Wesentliche Fakten

- Satellitengalaxie der Milchstraße
- ~10 deg am Himmel
- Fast stirnseitiger Anblick

→ Unsicherheiten in Quelldistanz und Verwechslung von Quellen nicht so problematisch

Sterninhalt

- Stellare Masse: ~4% der Milchstraße
- Sternbildungsrate pro "Sternmasse" 5x höher
- Historische Supernova SN 1987A
- Zahlreiche Sternhaufen, SNRs, rotierende Neutronensterne (PSRs)



HESS observations of the LMC

Declination (J2000)

Declination (J2000)

> Datensatz

- Fast 10 Jahre HESS Beobachtungen
- Einer der größten Datensätze in der TeV Astronomie
- 210 Stunden an Beobachtungen (50 Stunden in 2012 publiziert)

> Results

- Entdeckung von 3 extrem leuchtstarken TeV Quellen
- Bestätigung des PWN N 157B -
- Detektion von Gammstrahlung von der Superbubble 30 Dor C
- Emission von SNR N 132D





Der Pulsar Wind Nebel N 157B

- > Was ist ein Pulsarwindnebel?
 - PSR der vorbeschleunigte Teilchen ausstößt
 - Diese treffen auf das interstellare Medium, ein Schock bildet sich
 - Teilchen werden zu noch höheren Energien beschleunigt



- N 157B ist mit dem Sternhaufen LH 99 assoziiert
- eingebettet in starke Infrarot-Strahlungsfelder
- Elektronen die im PWN beschleunigt wurden, treffen auf die zahlreichen IR Photonen vom Sternhaufen
- → Gammastrahlung!





Der Pulsar Wind Nebel N 157B

Interpretation

- Hohe Strahlungsfelder→ starke
 TeV Emission
- Niedriges Magnetfeld im PWN
- 11% der PSR Rotationsenergie geht in hoch-energetische Elektronen



> Galaktischer Zwilling

- Krebsnebel hat die selbe Rotationsenergie wie N 157B
- Höheres Magnetfeld und mehr Energie in Elektronen
- N 157B ist ein ineffizienter Teilchenbeschleuniger
- → Aber ist 10x heller als der Krebsnebel im TeV Gammalicht
- → Umgebung in der Gammastrahlung entsteht ist wichtig!



Die Superbubble 30 Dor C

> Was ist eine Superbubble?

-69°06

-69°09'

-69°12'

-69°15'

-69°18'

05^h37ⁿ

Declination (J2000)

- Massive Sterne die als SNe explodieren, bilden sich in Gruppen oder Haufen von Sternen
- Superbubbles bilden sich wenn die Sternwinde und SNe vieler Sterne des Haufens sich vereinen
- Lange Zeit vermutete man Superbubbles als CR Beschleuniger

> 30 Dor C

- Zusätzliche Emission neben N 157B
- Kompatibel mit der Schale der superbubble und dem Sternhaufen LH 90





Die Superbubble 30 Dor C: Modellierung

> Ursprung

- Kommen die Gammas von Elektronen oder von Protonen?
- Form des Spektrums lässt beide Schlüße zu
- > Hadronisches Szenario
 - Gammastrahlung entsteht wenn
 Protonen mit Gasteilchen kollidieren
 - Extrem viel Energie in Protonen benötigt
 - Schwierig X-rays und Gammas gleichzeitig zu erklären
 - Starke Turbulenz im inneren der Superbubble notwendig



> Leptonisches Szenario

- Passt besser
- Nicht-thermische Röntgenstrahlung bedarf eines sehr ausgedünnten Inneren der Superbubble



Der Supernova Überrest N 132D

> N 132D

- Berühmter Kern-Kollaps SNR
- Starke Röntgenquelle
- Alter zwischen 2500 und 6000 Jahren
- Sehr hohe Explosionsenergie 6 x 10⁵¹ erg (10⁵¹ sind typisch)
- > HESS resultate
 - $L_{1-10 \text{ TeV}} = (0.9 \pm 0.2) \times 10^{35} \text{ erg/s}$
 - Leuchtstärker als Galaktische SNRs





Der Supernova Überrest N 132D: Modellierung

> Hadronisches Szenario

- Extrem viel Energie muss in Protonen stecken
- Oder aber viel Gas

> Leptonisches Szenario

 Wechselwirkung von Elektronen mit Emission von Staub in der SNR Schale

Galaktisches Pendant

- Sieht genauso aus wie SNR HESS J1640-465
- Ähliches Alter, Energie in Protonen, hohe Dichten, Wechselwirkung mit interstellaren Gaswolken



Die historische Supernova SN 1987A

> HESS Resultate

- Keine Detektion von TeV γ-ray Emission
- Starke Grenzen auf den γ-ray Fluss kurz nach der Explosion des Sterns

> Hadronisches Szenario

- Basierend auf theoretischen Modellen
- Schockfront hat äqutorialen Ring erreicht (Dichten von 10³ ... 3 x 10⁴ cm⁻³)
- Energie in wechselwirkenden Protonen
 <0.1% der Explosionsenergie (typisch sind 10% für ältere SNRs)
- → SN 1987A ist (derzeit) kein effizienter Telchenbeschleuniger!



Zusammenfassung (bisher)

- > Warum ist die Große Magellansche Wolke interessant?
 - Unabhängige Probe Galaktischer Teilchenbeschleuniger
 - Wir können stellare Gammastrahlungquellen mit TeV Energien sehen
 - Man kann die Wichtigkeit der Umgebung f
 ür die Gammastrahlungsproduktion testen
- > Warum kommt sowas in das Science Magazin?
 - Erste Detektion stellarer Gammastrahlungsquellen in einer externen Galaxie
 - Alle 3 Quellen sind mindestens so leuchtstark wie ihre Galaktischen Partner
 - Von den Beobachtungen her, riesiger Schritt nach vorne fuer bodengebundene Gammastrahlungsinstrumente
 - 30 Dor C: Erste Superbubble die bei TeV Energien detektiert wurde
 - N 132D: mittelalter SNR der immernoch Teilchen auf mehrere 10 TeV beschleunigt
 - N 157B: Umgebung ist wichtig f
 ür Teilchenbeschleunigung



Wie geht es weiter mit den Magellanschen Wolken?

> HESS

- Beobachtet weiter die LMC (bisher nur innerer Teil abgedeckt)
- Das ge-upgradete HESS Instrument ist perfekt dafür
- Suche nach ausgedehnter Emission
- Scan der Kleinen Magellanschen Wolke
- Großes Thema in und starke Einbindung von der DESY HESS Gruppe im Upgrade und der LMC/SMC
- > Weiter in der Zukunft
 - Wir arbeiten am Sensitivitätslimit mit HESS
 - Wir brauchen CTA dafür
 - → Es ist das einzige Instrument das die Magellanschen Wolken beobachten kann.





The Cherenkov Telescope array

- > A huge improvement in all aspects of performance
 - A factor ~10 in sensitivity, much wider energy coverage, much better resolution, field-of-view, full sky
- > A user facility / proposal-driven observatory
 - With two sites with a total of >100 telescopes
- > A 27 nation ~€200M project
 - Including everyone from HESS, MAGIC and VERITAS
 - Plus many other interested people from e.g. particle physics and space science



Outlook: The LMC with CTA

> CTA status

- Currently in the prototyping phase
- Decision for southern site expected this summer
- → Foundations and infrastructure development expected to begin shortly after
- CTA proprietary time used for key science projects
- LMC is on the list!

> Expected CTA performance

- One order of magnitude more sources
- \rightarrow Allowing for population studies in almost unbiased way
- → Probe CR accelerators in extreme environment
- Probe CR propagation away from accelerators



If you want to know more

> Check the Science paper...

REPORTS

ASTROPHYSICS

The exceptionally powerful TeV γ-ray emitters in the Large Magellanic Cloud

The H.E.S.S. Collaboration*

The Large Magellanic Cloud, a satellite galaxy of the Milky Way, has been observed with the High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) above an energy of 100 billion electron volts for a deep exposure of 210 hours. Three sources of different types were detected: the pulsar wind nebula of the most energetic pulsar known, N 1578; the radio-loud supernova remnant N 132D; and the largest nonthermal x-ray shell, the superbubble 30 Dor C. The unique object SN 1987A is, unexpectedly, not detected, which constrains the theoretical framework of particle acceleration in very young supernova remnants. These detections reveal the most energetic tip of a γ -ray source population in an external galaxy and provide via 30 Dor C the unambiguous detection of γ -ray emission from a superbubble.

ment Telescope (EGRET) (11) and, more recently, by the Fermi Large Area Telescope (LAT) (12), which revealed diffuse emission with an extension of several degrees in diameter, tracing massive star-forming regions. VHE y-ray telescopes, like H.E.S.S., besides providing information on much higher energy CRs, have an angular resolution of a few arcminutes, which is substantially better than Fermi-LAT's resolution at y-ray energies <10 GeV. The good angular resolution allows H.E.S.S. to identify individual sources in the LMC. As we will detail below, a deep H.E.S.S. observation revealed three luminous sources in the LMC: the superbubble 30 Dor C, the energetic PWN N 157B, and the radio-loud SNR N 132D. Of these sources, only N 157B was detected previously in a 47-hour exposure (13). The observations extend the scope of VHE y-ray astronomy by providing examples of sources from a population outside the Milky Way. N 157B and N 132D belong to known y-ray source classes, but both have distinguishing characteristics, N 157B being powered by the most energetic young pulsar, and N 132D being one of the oldest VHE y-ray emitting SNRs. The super-





www.sciencemag.org/content/347/6220/406/suppl/DC1

Supplementary Materials for

A molecular census of 26S proteasomes in intact neurons

The H.E.S.S. Collaboration*

2015 | Page 38



Backup: Extragalactic objects

> LMC

- contains many superbubbles, HII regions, 30 Doradus
- HESS and Fermi detected
- > M 31
 - next-nearest spiral galaxy
 - Fermi-detected
- > NGC 253 and M 82
 - both detected at GeV and TeV





> Arp 220

- only ULIRG within reach for CTA
- not detected at γ-rays yet







