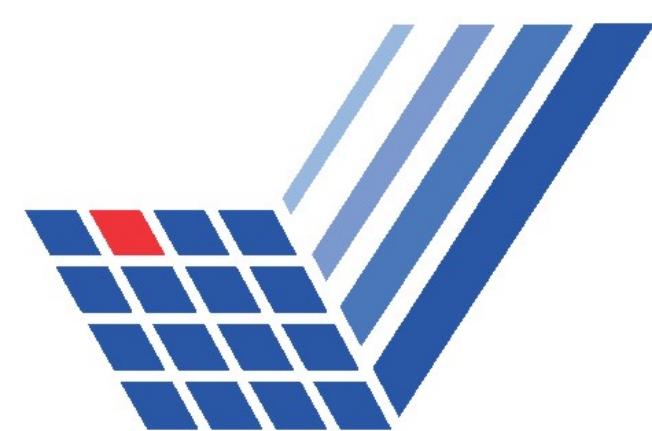


Gamma-Astronomie des Krebsnebels mit dem MAGIC Teleskop



- Lehrstuhlversuch E5b -

Michael Backes, Sebastian Rollke und Daniel Brenner



Der Krebsnebel

Der Krebsnebel besteht aus den Überresten einer Supernova aus dem Jahr 1054. Der explodierte Stern kollabierte zu einem schnell rotierenden superdichten Neutronenstern - einem Pulsar. Pulsare strahlen kontinuierliche hochenergetische Strahlungsjets im Wellenlängenbereich von Radiowellen bis Röntgenstrahlung ab. Durch die Rotation des Pulsars beobachtet man diese auf der Erde immer in regelmäßigen Intervallen. Die typische Periodendauer für diese Pulsation beträgt beim Krebsnebel 33ms.

Der Krebsnebel befindet sich ca. 6300 Lichtjahre von der Erde entfernt und besitzt eine Abmessung von etwa 7×11 Lichtjahren², dabei breitet sich die Hülle mit einer Geschwindigkeit von ca. 1500 km/s aus. Die vom Pulsar zentral emittierten Strahlungspulse breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, treten in Wechselwirkung mit dem Nebel selbst ("Schockbeschleunigung") und regen diesen durch inverse Compton-Streuung zur Emission von hochenergetischer Gammastrahlung an. Der Nebel fungiert somit als nahezu konstante Strahlungsquelle für Gamma Quanten im Energiebereich von GeV bis TeV.

Der Krebsnebel wird häufig auch als "Standardkerze" der Gamma Astronomie - also zur Kalibrierung von Gamma Teleskopen - verwendet.

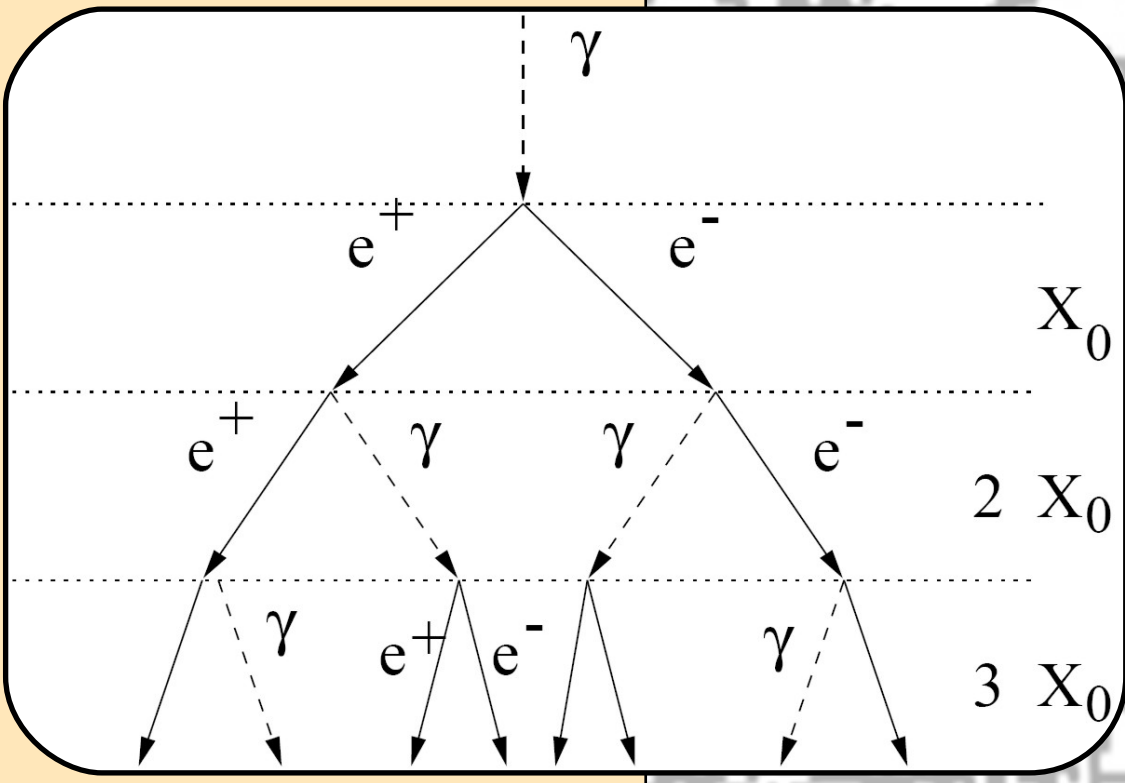
Die Abbildung zeigt die Kombination von optischen (rot) und Röntgenaufnahmen (blau) des Krebspulsars.



Luftschauer

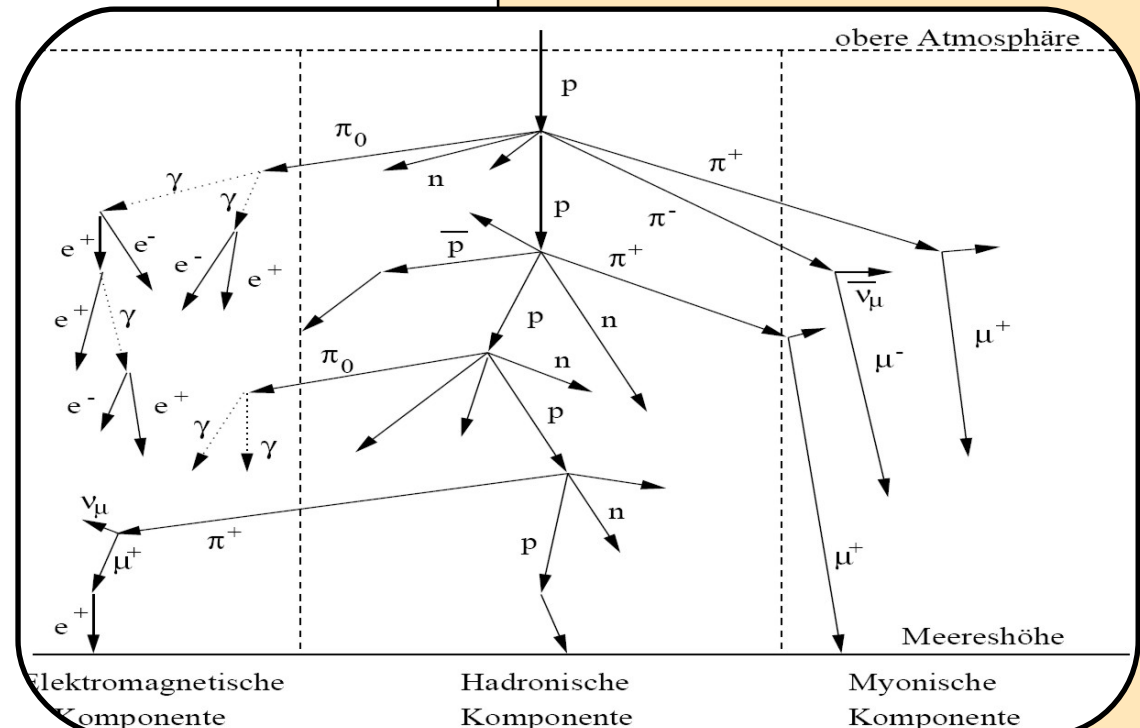
Hochenergetische Teilchen der kosmischen Strahlung wechselwirken beim Eintritt nach einer charakteristischen freien Weglänge mit der Atmosphäre und stoßen hier eine "Sekundärteilchenlawine" an, die sich mit Mediumsüberlichtgeschwindigkeit in Richtung der Flugbahn des Primärteilchens ausbildet. Hierbei gibt es zwei Arten von Luftschauern:

Elektromagnetische Luftschauer (vgl. Abbildung rechts), durch hochenergetische Gammateilchen bzw. Elektronen hervorgerufen, lösen einen eng an der Schauerachse anliegenden Schauer aus. Dieser Prozess dauert an, bis die Teilchen nur noch eine mittlere Energie der kritischen Energieschwelle $E = 81$ MeV besitzen. Hier besitzt der Schauer eine maximale Teilchenzahl, das sogenannte Schauermaximum. Die maximale Teilchenzahl ist hierbei direkt proportional zur Energie des einfallenden



Primärteilchens und die sphärische Eindringtiefe wächst logarithmisch mit seiner Energie.

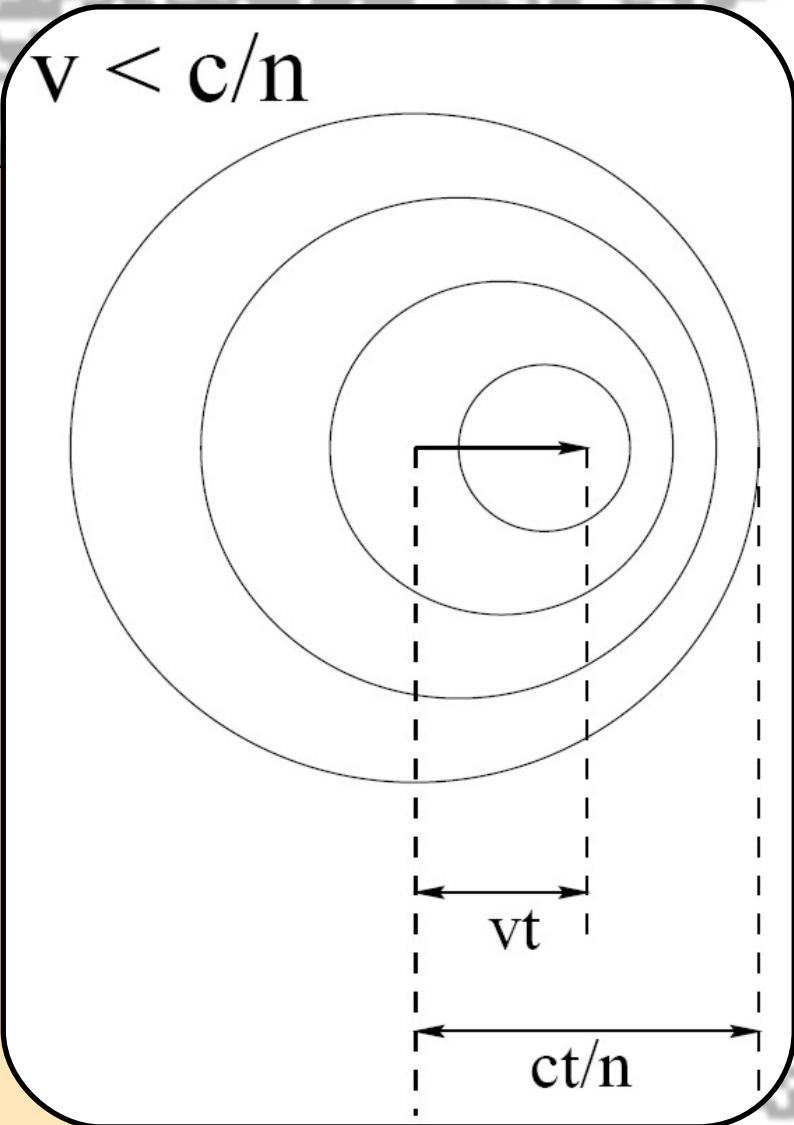
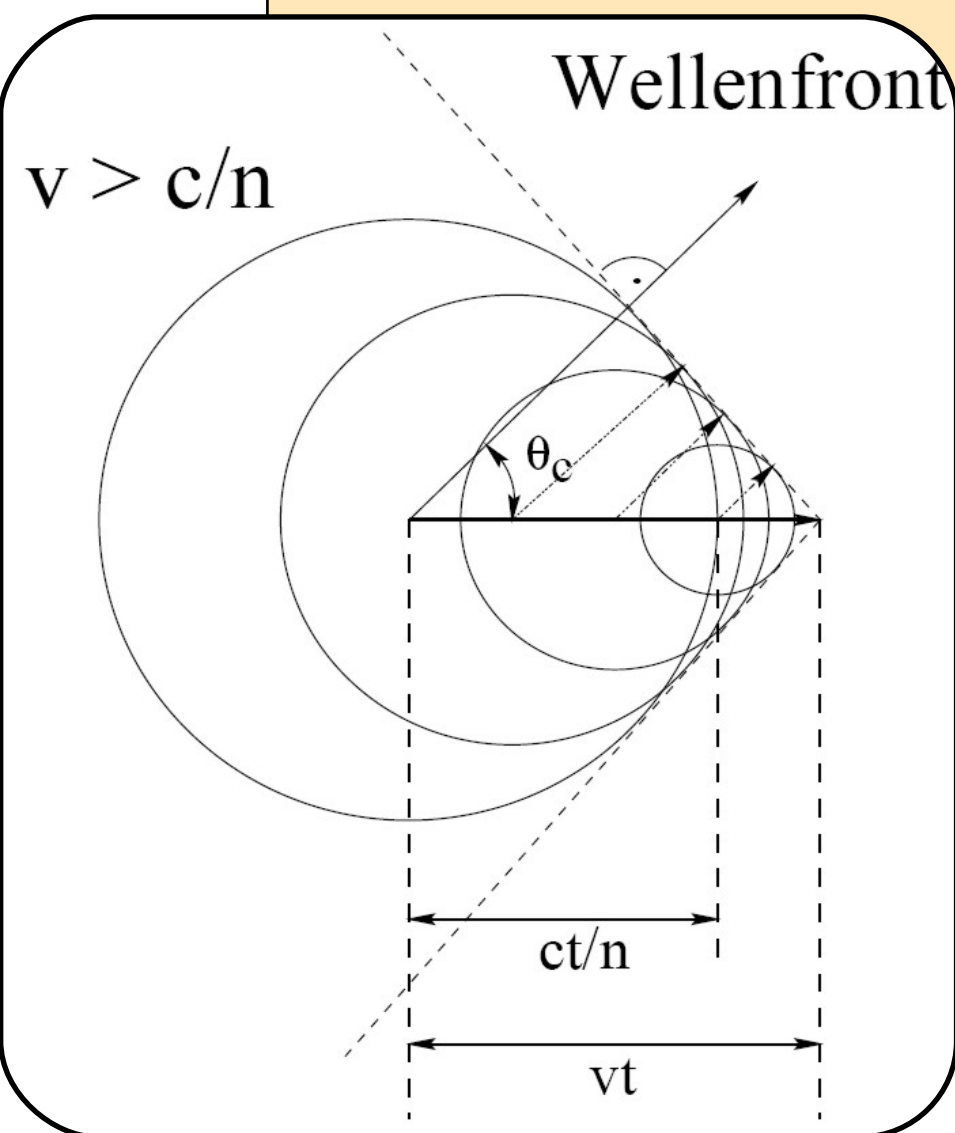
Hadronische Luftschauer (vgl. Abbildung links), ausgelöst durch Atomkerne (zum Großteil Protonen), führen zu einem örtliche weit gefächerten Luftschauer mit jeweils einer elektromagnetischen, myonischen und hadronischen Subkaskade. Erzeugte Neutrinos sind für die Gamma-Astronomie nicht von Bedeutung. Hadronische Luftschauer kommen etwa 1000 mal häufiger vor als elektromagnetische.



Cherenkov-Licht

Die Lichtgeschwindigkeit in einem Medium ist geringer als im Vakuum. Bewegen sich geladene Teilchen mit einer Geschwindigkeit größer der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit durch ein dielektrisches Medium führt dies dazu, dass sie das sog. "Cherenkov-Licht" abstrahlen. Bei Geschwindigkeiten kleiner als Mediumslichtgeschwindigkeit interferieren die durch kurzzeitige Polarisierung des Mediums hervorgerufenen elektromagnetischen Wellen destruktiv - es ist keine Cherenkov-Strahlung zu beobachten (vgl. rechte Abbildung).

Bei einer Geschwindigkeit größer als Mediumslichtgeschwindigkeit (vgl. linke Abbildung) überlagern sich allerdings die Kugelwellen konstruktiv und es wird Cherenkov-Licht erzeugt. Dieses wird dabei kegelförmig abgestrahlt. Der Öffnungswinkel des Kegels ist bestimmt durch den Brechungsindex des Mediums und die Geschwindigkeit des durchfliegenden Teilchens. Da die minimale kinetische Energie, die aufgewendet werden muss um Cherenkovlicht zu erzeugen, direkt proportional zur Masse des Teilchens ist, liegt die Energieschwelle bei Elektronen und Positronen (21 MeV) deutlich unter der der Hadronen (40 GeV).



MAGIC

Das Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope befindet sich auf der Kanareninsel "La Palma" in einer Höhe von ca. 2200m ü.M. und hat dort 2004 seinen Betrieb aufgenommen.

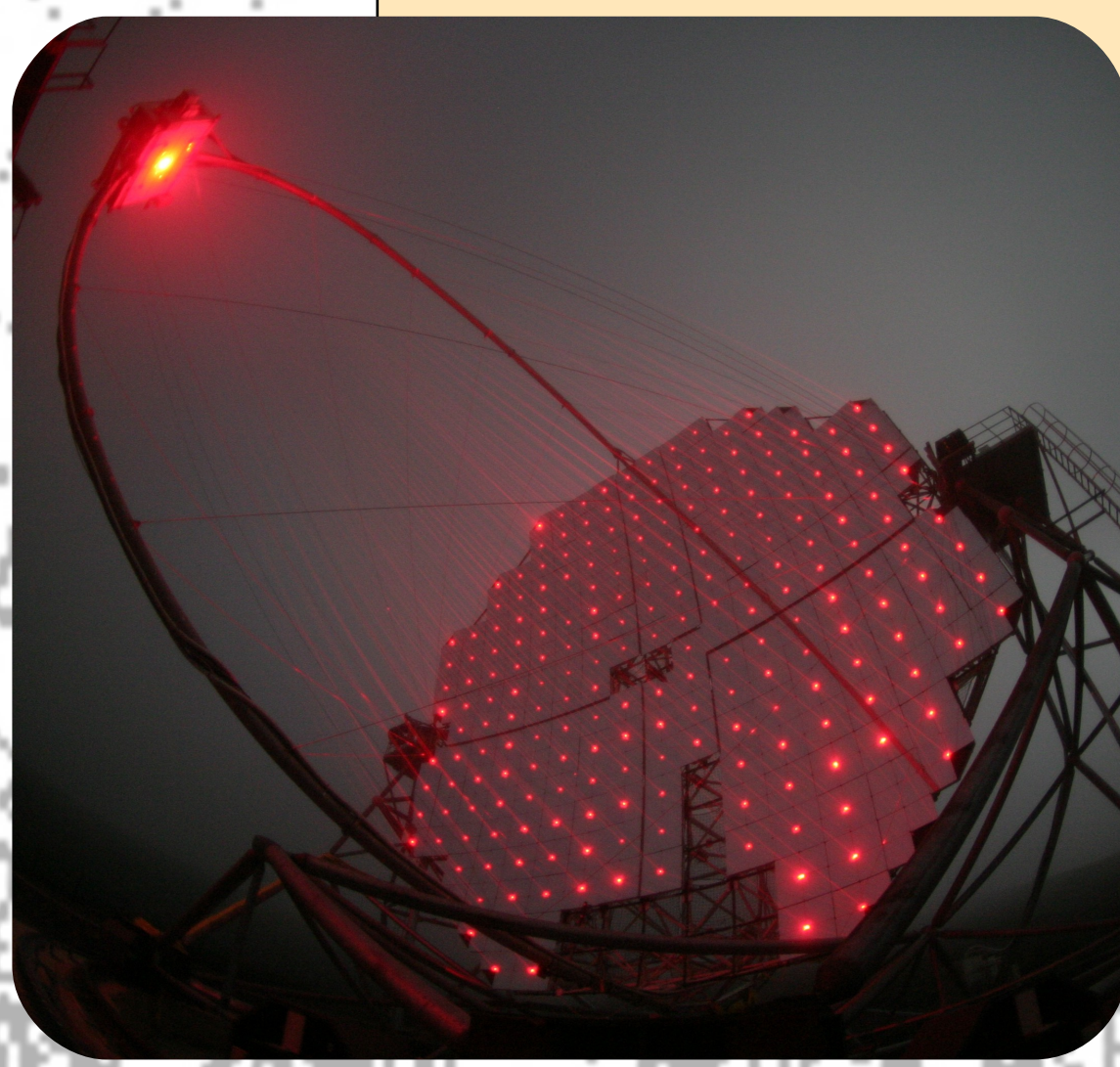
Es ist mit 17m Durchmesser und einer Gesamtspiegelfläche von 234 m² das weltweit größte Luft-Cherenkov-Teleskop und ist auch das erste, das in der Lage ist, Gammateilchen im Bereich unterhalb 100 GeV zu beobachten. Dabei werden die einfallenden Gammateilchen nicht direkt registriert sondern durch das Cherenkov Licht von Sekundärteilchenschauern nachgewiesen, die durch das Auftreffen der hochenergetischen Teilchen auf die obere Atmosphäre entstehen.

Das Cherenkov Licht wird dabei durch die Spiegelanordnung des Teleskops auf die Kamera aus Photomultipliern reflektiert und die entstehenden Photoelektronen von der Messelektronik registriert. Der Einbau neuer Analog-Digital-Converter (ADC) im Jahr 2007 erlauben MAGIC eine Zeitauflösung der einzelnen Ereignisse auf Nanosekunden Skala.

Das Teleskop ist in der Lage einen Bereich des Himmels von 3,5° gleichzeitig zu beobachten. Durch die Leichtbauweise aus Kohlefasern ist es möglich das Teleskop innerhalb von 30

Sekunden auf jede Position des Himmels auszurichten. Es bestehen Hoffnungen in Zukunft auch die extrem energiereichen (aber kurzzeitigen) sog. "Gamma Ray Bursts" zu beobachten und untersuchen zu können.

Die Abbildung zeigt das Teleskop bei Nacht während einer automatischen Kalibrierungssequenz mittels eines in das Teleskop integrierten Lasers.

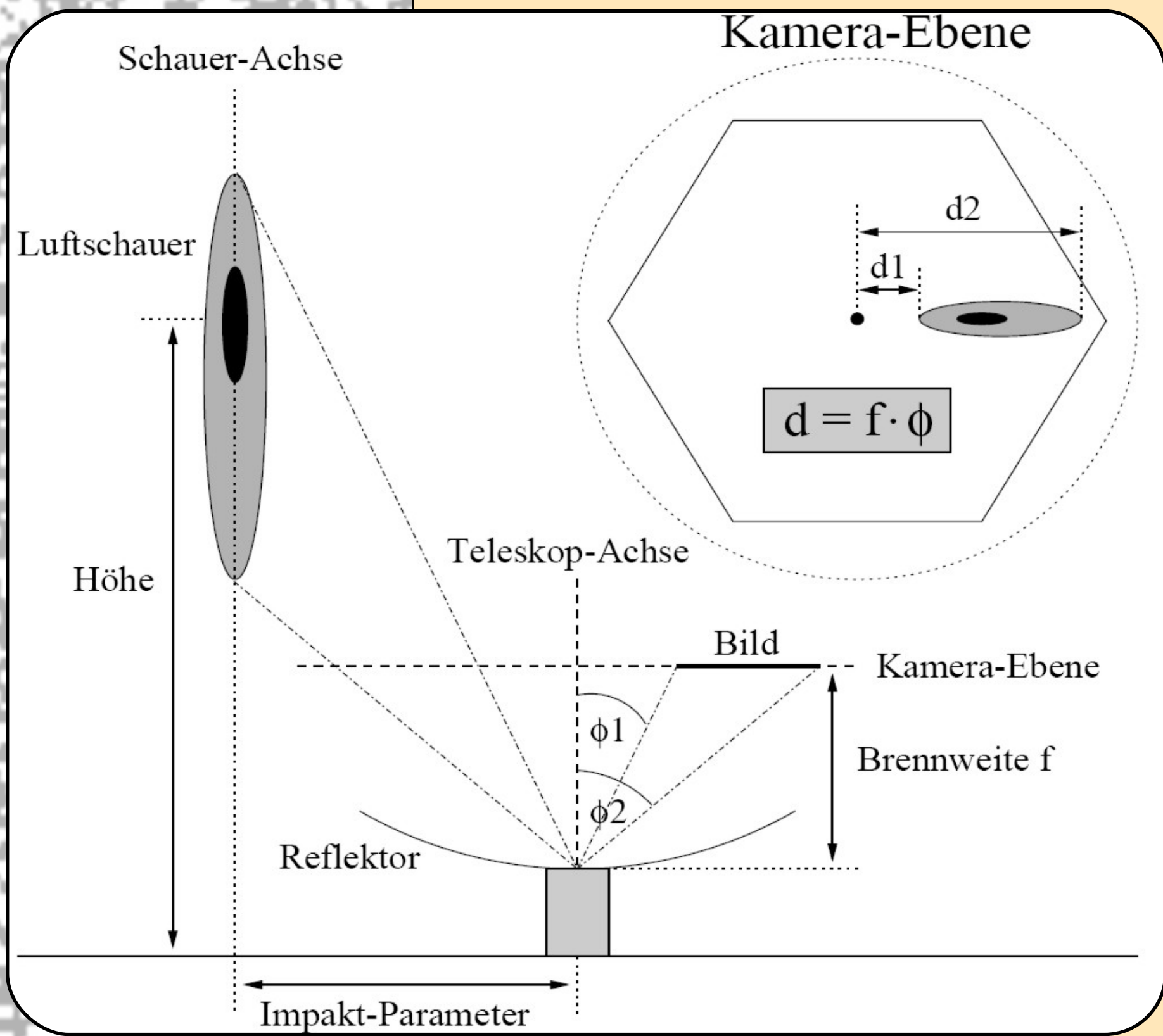


Bildnahme

Das durch einen Luftschauer produzierte Cherenkov-Licht wird von der Spiegelfläche des Cherenkov-Teleskops in eine im Fokus des Spiegels platzierte Kamera reflektiert. Hierzu wird das Cherenkov-Teleskop direkt auf die Quell-Position ausgerichtet. Die Abbildung zeigt hier das Prinzip der Bildnahme am Beispiel eines vertikal einfallenden Schauers. Der Luftschauer entwickelt sich dann

nahezu parallel zur Teleskopachse. Bei einem Gamma-Primärteilchen von 1 TeV Energie bildet sich eine etwa 40 m breite und 3500 m lange Cherenkov-Licht-Säule aus, wobei in etwa 8 km Höhe das Schauermaximum (hier schwarz dargestellt) erreicht wird.

Man sieht sofort, dass ein elipsenförmiges Abbild in der Kamera-Ebene entsteht, das auf den Kamera-Mittelpunkt



ausgerichtet ist. Das Licht, das zu Beginn der Schauerentwicklung emittiert wird, wird hierbei näher zum Mittelpunkt abgebildet als das Licht vom bereits aussterbenden Schauer. Der in der Abbildung noch genannte wichtige Impact-Parameter beschreibt den Abstand von der Schauerachse zur Teleskopachse.

Messungen des Untergrundes erlauben zudem die Rauschunterdrückung in den gewonnenen Messdaten. Hierzu wird meist das Teleskop im sog. "Wobble" Modus betrieben. Dabei "schießt" das Teleskop ca. 0,4° an der Schauerachse vorbei. Dadurch ist es möglich, Untergrund und Luftschauer gleichzeitig zu beobachten.

In der folgenden Software gestützten Analyse der sehr umfangreichen Datensätze (mehrere 10.000 Events pro Beobachtungsintervall von einigen Minuten) erfolgt die Auswertung der Messdaten und zuletzt die Erstellung einer Himmelskarte (Skyplot) sowie die Berechnung des Energiespektrums der beobachteten Himmelsregion.

Auswertung mit MARS

"Magic Analysis

and Reconstruction Software"

Mit dem MAGIC-Teleskop aufgenommene Daten werden mit der Analysesoftware MARS analysiert. Dieses Programm besteht aus einer Reihe von Subroutinen, die hier im einzelnen vorgestellt werden. Die Software basiert auf dem am CERN entwickelten ROOT Toolkit.

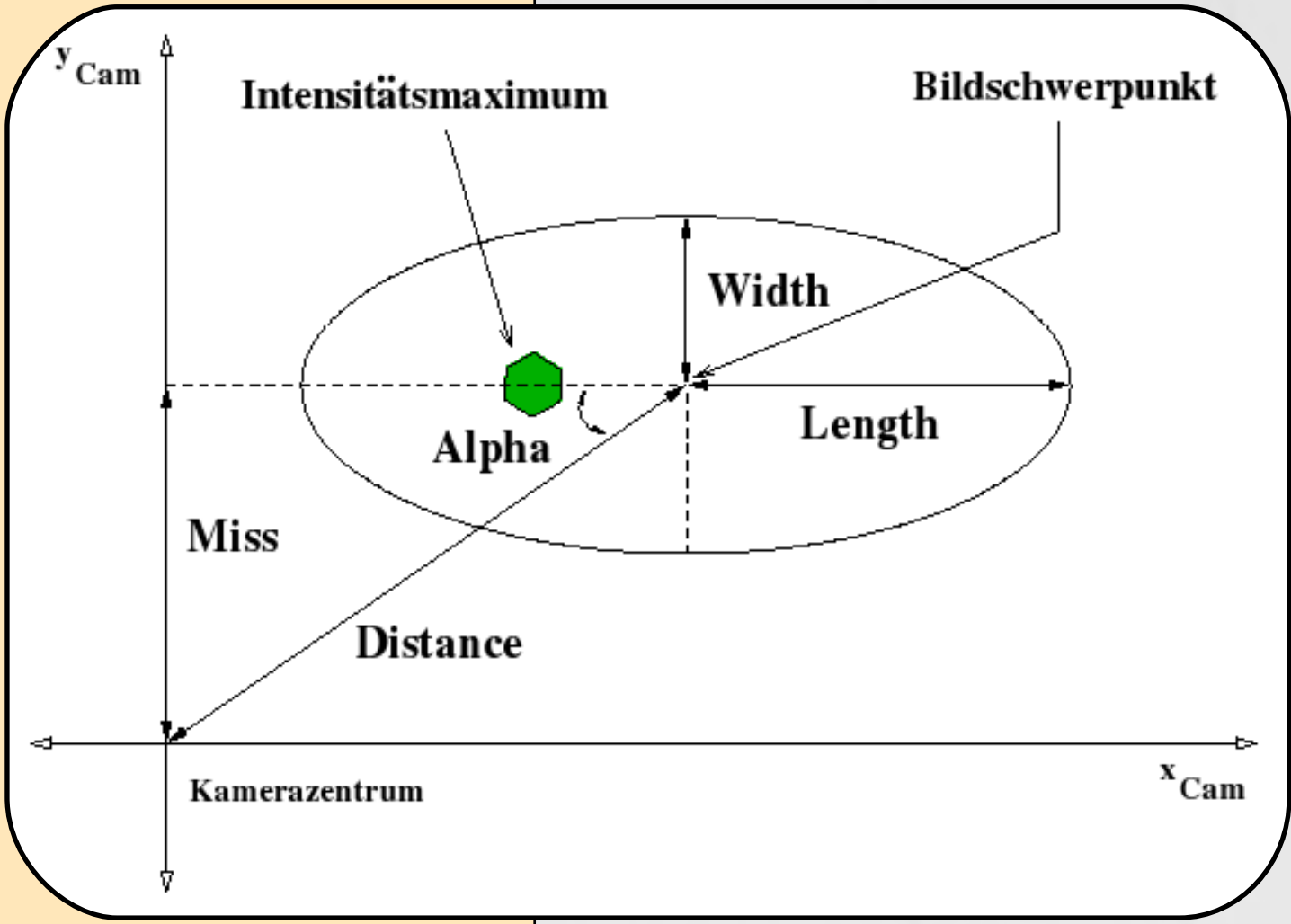
2. STAR

"Standard Analysis And Reconstruction"

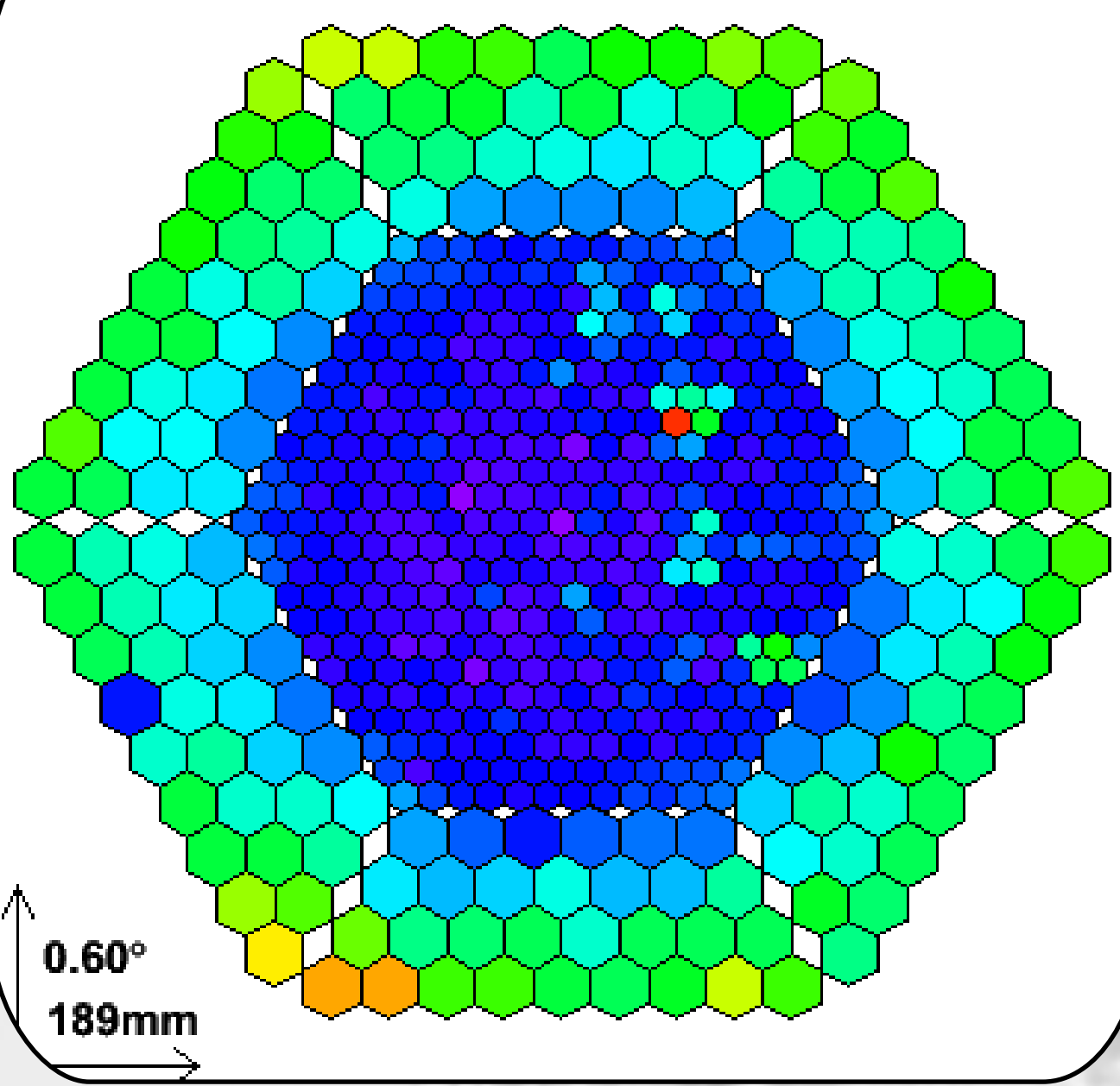
Bereinigt die kalibrierten Daten um Rauschereignisse bzw. Ereignisse, die offensichtlich nicht durch Teilchenschauer ausgelöst wurden. Dazu werden insgesamt zwei Schwellen der Signalintensität festgelegt. Die sog. "Kernschwelle" und die "Umgebungsschwelle". Lediglich Pixel, die die Kernschwelle überschreiten, werden direkt registriert. Pixel die zwischen Umgebungs- und Kernschwelle fallen, werden lediglich registriert, wenn sie sich in Nachbarschaft zu einem Kernpixel befinden. Zusätzlich werden noch vereinzelte Kernpixel entfernt.

Danach wird die Charakterisierung des Bildes anhand der sog. Hillas-Parameter, die die Signalform des Bildes bewerten, durchgeführt. Die Hillas-Parameter, wie in der Abbildung aufgeführt, beschreiben charakteristische Maße der Schauerellipse in der Kameraebene. Zudem gibt es noch die beiden in der Abbildung vorhandenen Parameter "Concentration" (welcher das Verhältnis der Intensität der zwei hellsten Pixel zu der Gesamtlichtmenge angibt) sowie "Size" (als Maß der Gesamtlichtmenge des Schauers). Die Hillas-Parameter erlauben auch die Vergleichbarkeit der

Datensätze mit denen anderer Teleskope.



Average signal after Cleaning



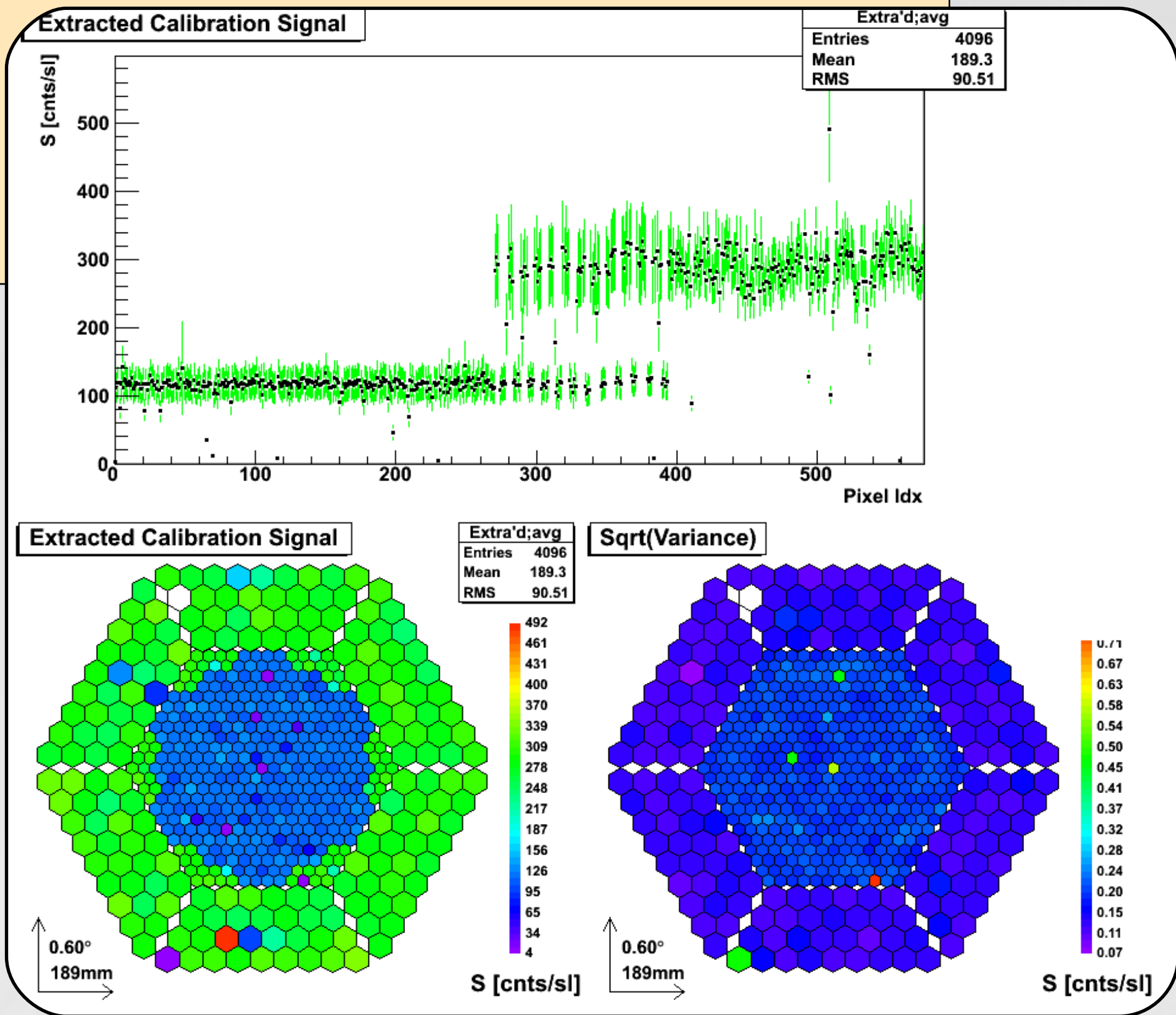
Die Abbildung zeigt das durchschnittliche Signal pro Pixel.

1. CALLISTO

"CALibrate Light Signals and Time Offsets"

Verarbeitet die Kalibrationsdaten der einzelnen Pixel und skaliert somit die entsprechenden Messdaten, um die Vergleichbarkeit der einzelnen Pixel zu ermöglichen. Defekte Pixel werden erkannt und entsprechende Messwerte durch die Werte der Nachbapixel interpoliert. Konversionsfaktoren werden berechnet, um die von den Photomultipliern registrierten Ereignisse in Photoelektronen (und somit Signalintensität) umzurechnen.

Die Abbildung zeigt das von CALLISTO extrahierte Kalibrationssignal in Counts pro aufgenommenem Bild (slice) sowie die Varianz aufgelöst nach Pixelnummer. Aufgrund der Sampling Frequenz von 300 MHz entspricht dies der Anzahl Counts pro 0,03 µs.



3. GANYMED

"Gammas Are Now Your Most Exciting Discovery"

Separiert die Messdaten vom Untergrund und filtert aus dem erheblich dominanten Myonen- und Hadronenuntergrund die Gamma Ereignisse heraus.

Dies geschieht durch Schnittbildung im Raum der durch STAR bestimmten Bildparameter. Die Schnitt-Parameter zur Gamma/Hadronen-Separation werden

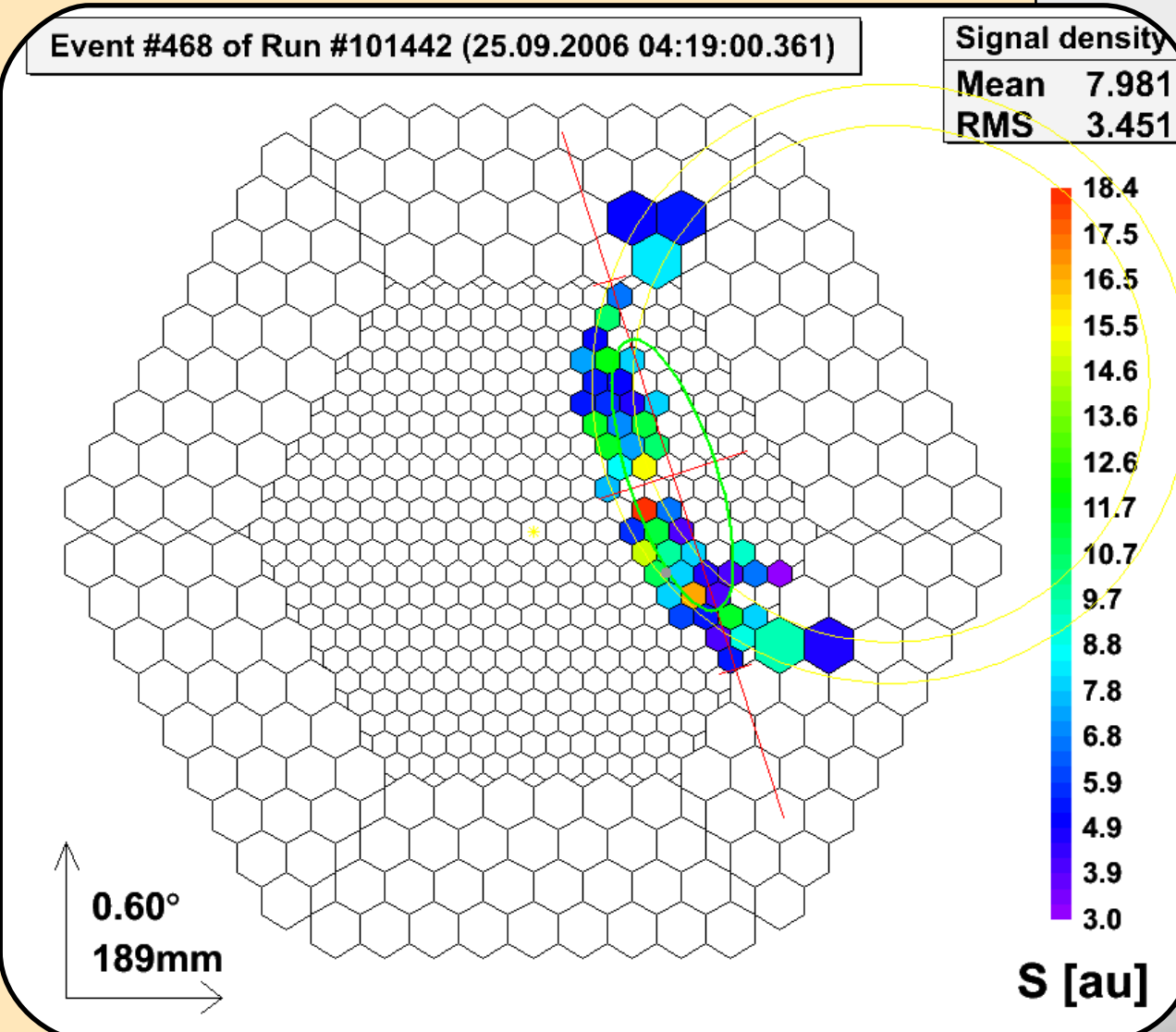
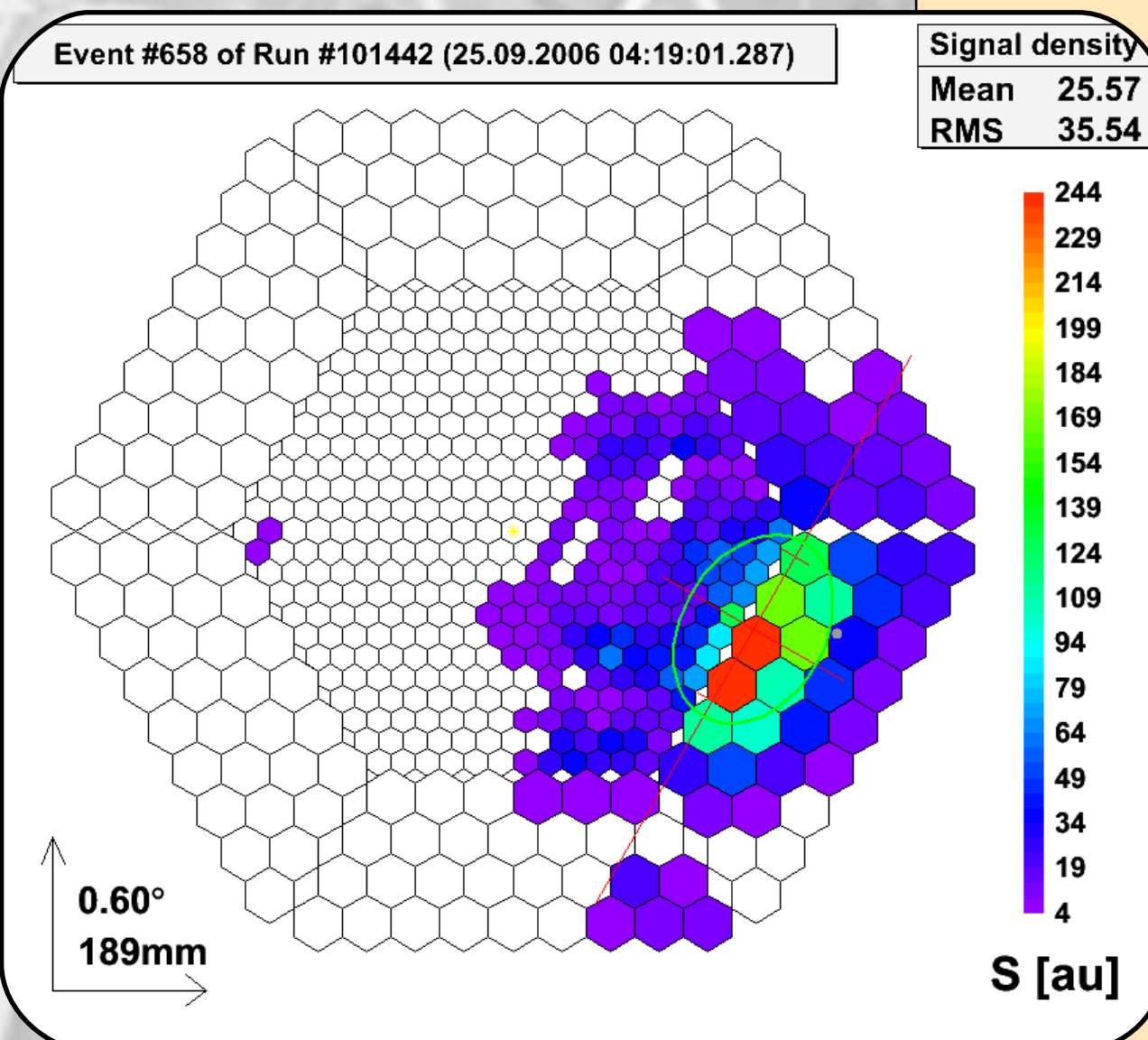
mit Hilfe von Daten aus einer anderen Messung des Krebsnebels auf eine möglichst große Signifikanz optimiert. Die Optimierung erfolgt dabei auf einen anderen Datensatz um keine Optimierung auf Rauschereignisse durchzuführen. Der Krebsnebel dient dabei auf Grund seiner konstanten Strahlung generell als Eichquelle für verschiedenste Aufnahmen in der Gamma Astronomie.

Durch Hadronen induzierte Schauer zeigen typischerweise eine breite räumliche Verteilung, die sich auch im gemessenen Signal äußert (vgl. Abbildung rechts).

Myonen (die im Zuge von hadronischen Schauern entstehen) zeigen ein charakteristisches ringförmiges Signal (vgl. Abbildung links), da ihre

Lebensdauer ausreicht den Erdboden zu erreichen und sie somit beim Auftreffen auf das Teleskop einen Kegel aus Cherenkov Licht hinter sich herziehen.

Die Gamma Ereignisse sind die seltensten der drei Klassen. Sie sind charakterisiert durch eine stark begrenzte räumliche Verteilung. Die große Halbachse der Ellipse zeigt dabei immer auf den Mittelpunkt der Kamera bzw. den um wenige Grad verschobenen sog. "Wobble-Punkt". Von den gemessenen Gamma Ereignissen wird der Ursprungspunkt bestimmt und eine Himmelskarte des aufgenommenen Himmelsbereichs erstellt (vgl. untere linke Abbildung). Der Signifikanzplot (rechts unten) erlaubt nun zu bewerten, ob tatsächlich eine Quelle gefunden wurde. In dem hier vorliegenden Fall wurde ein Signal gemessen, das 13.9 mal stärker war als die Standardabweichung - also mit sehr großer Sicherheit wirklich von einer Gamma Quelle stammt.

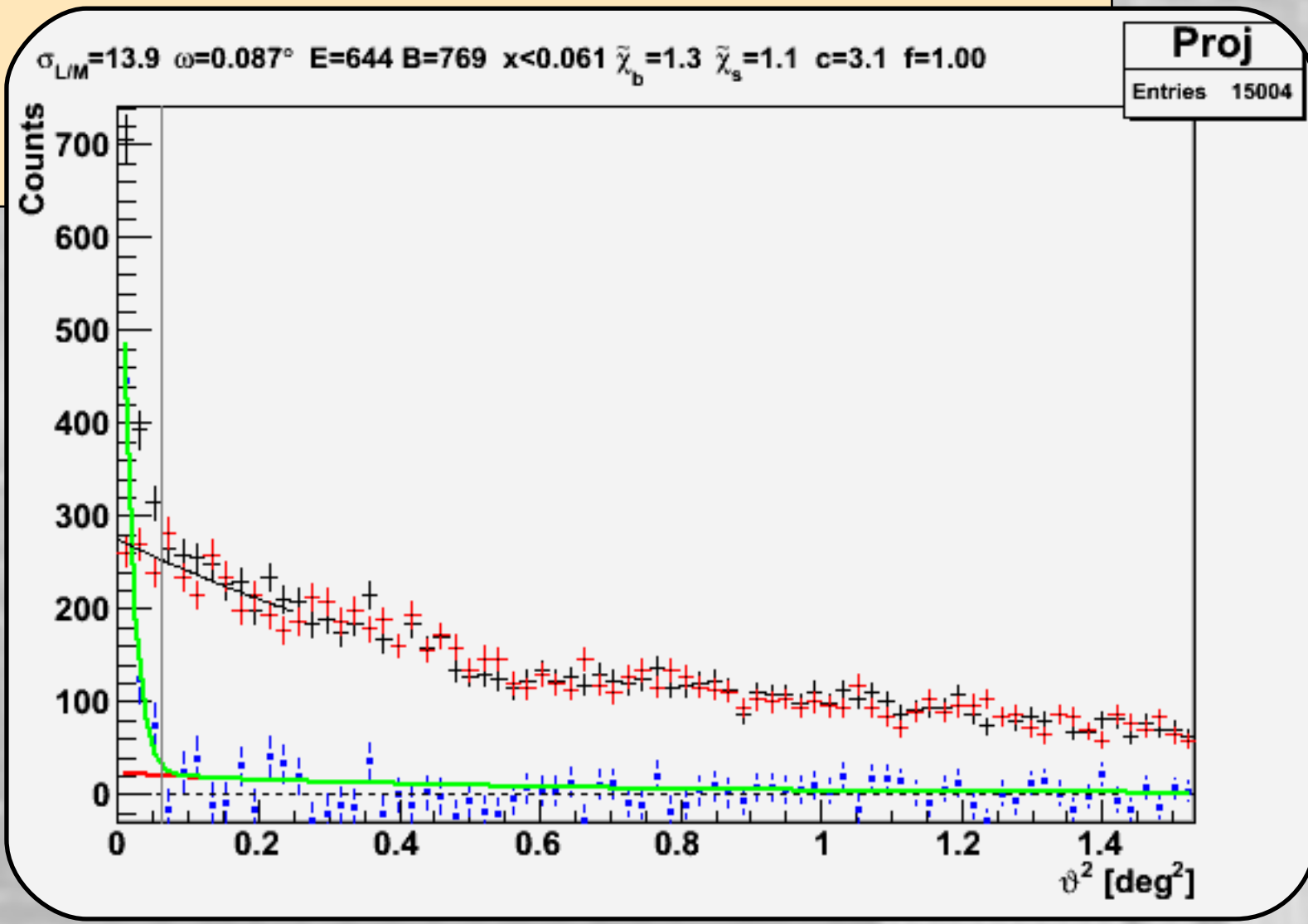
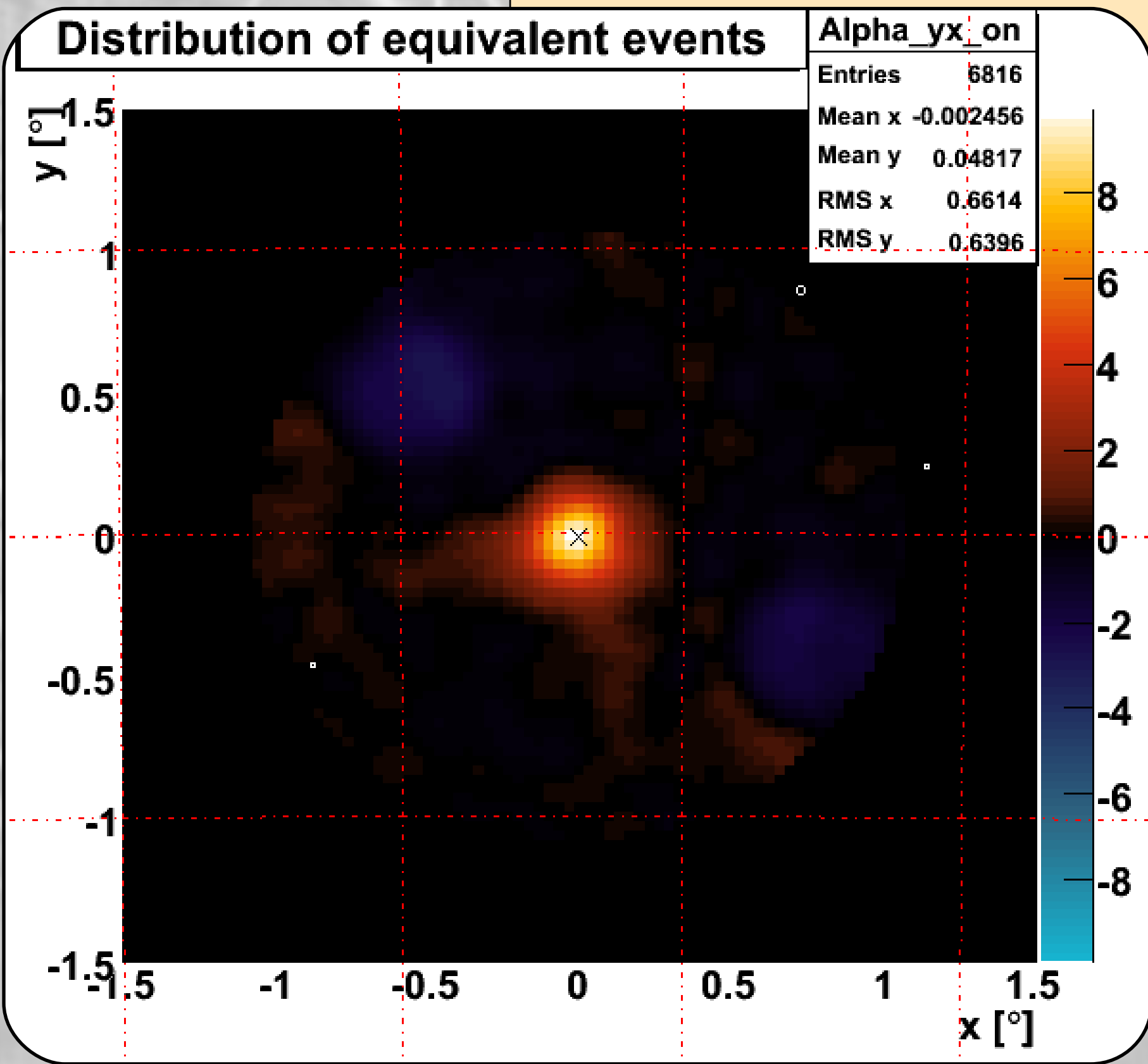
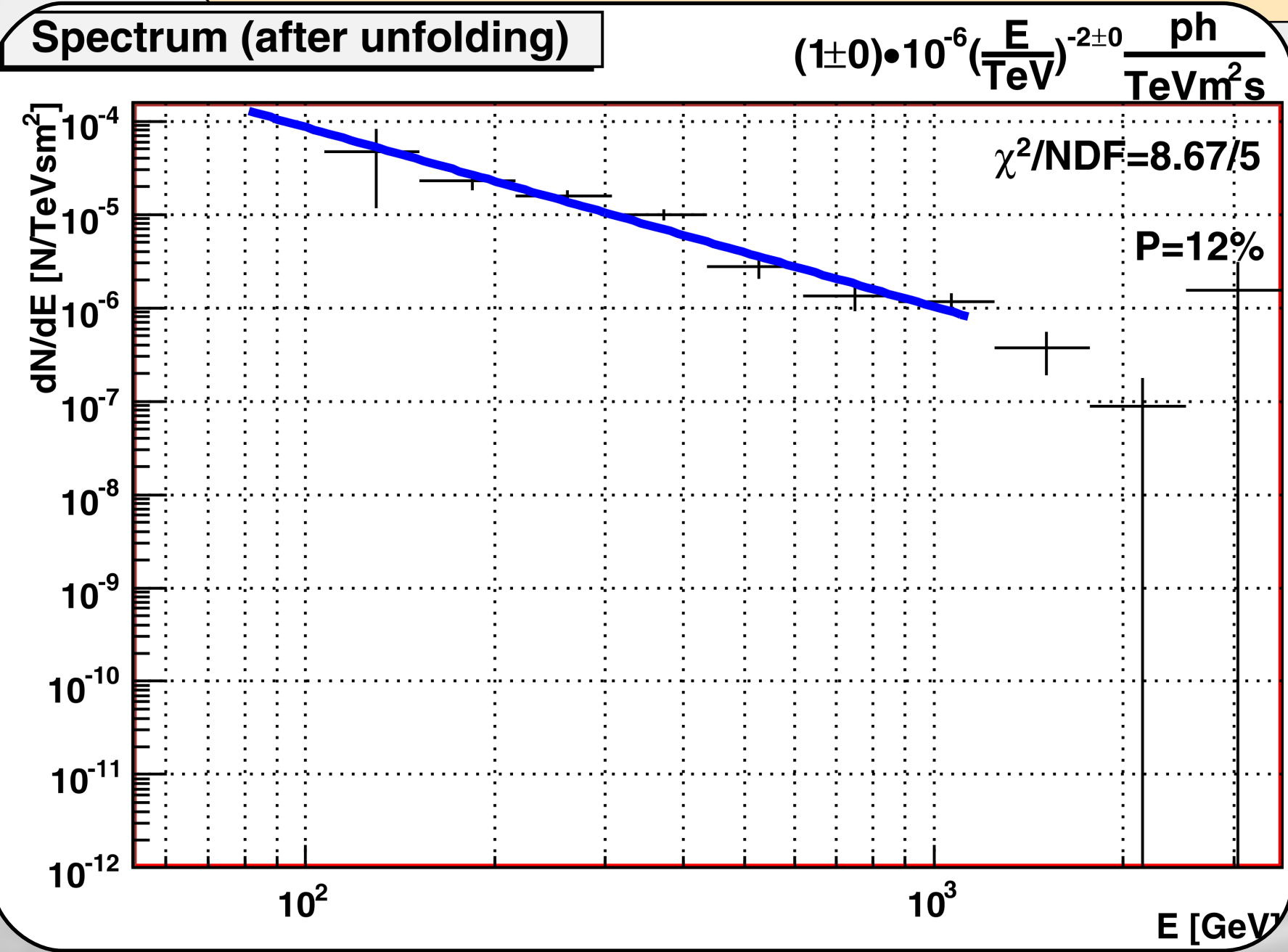


4. SPONDE

"SPectrum ON DEMand"

Bestimmt die Energie der einzelnen Gamma Ereignisse. Dies geschieht durch den Vergleich mit Monte-Carlo Simulationen, in denen die Signalbilder von Teilchen definierter Energie simuliert werden. Der "Size" Parameter der gemessenen Ereignisse, der dem Gesamt signal (in Photoelektronen gemessen) entspricht, wird mit den Simulationen verglichen und somit die Energien der einzelnen Gamma Ereignisse bestimmt.

Aus den gemessenen Daten bestimmt Sponde das Spektrum des gemessenen Himmelsbereichs (vgl. untere Abbildung).



Quellen

[Informationen/Bilder] Dissertation zum Thema "Suche nach TeV-Bazaren mit dem HEGRA-System der abbildenden Cherenkov-Teleskope" von Heidrun Bojahr (12.2002)
[Informationen] Diplomarbeit zum Thema "Berechnung und Implementierung neuer Atmosphärenmodelle in die MAGIC-Monte-Carlo-Kette" von Marijke Haffke (03.2007)
[Informationen] "Kosmische Spurensuche - Astroteilchenphysik in Deutschland" Herausgegeben vom Komitee für Astroteilchenphysik (07.2006)
[Informationen] Dissertation zum Thema "Beobachtung hochenergetischer Gamma-Strahlung aus Richtung der aktiven Galaxien Mkn 421 und Mkn 501" von Dirk Petry (09.1997)
[Informationen] "Search for pulsed VHE Gamma ray emission from the Crab Pulsar" - 29th International Cosmic Ray Conference Pune (2005) - M. Lopez
[Informationen] "The optical to gamma-ray emission of the Crab pulsar: a multicomponent model" - Astronomy & Astrophysics manuscript no. MCCRab (03.2007) - Masaro et al.
[Informationen/Bilder] Wikipedia, die freie Enzyklopädie (www.wikipedia.org)