

Erdgebundene Gammastrahlungsteleskope

Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik SS 2010
Martina Müller

17.06.2010



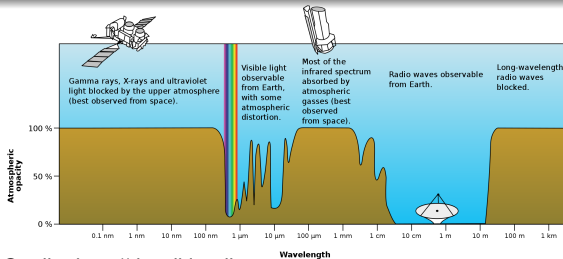
Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Physikalischer Hintergrund
 - Ausgedehnte Luftschauer
 - Cherenkov-Strahlung
 - Vergleich Elektromagnetische ↔ Hadronische Schauer
- 3 Teleskope
 - Wichtige Eigenschaften
 - Heutige Teleskope
- 4 Rekonstruktion
 - Überblick
 - Rekonstruktion - Schritt für Schritt
 - Beispiel Krebsnebel
- 5 Ausblick

Motivation

- Atmosphäre ist für γ -Strahlung undurchlässig
- Beobachtung im Bereich bis \approx GeV mit Satelliten möglich
- Für hohe Energie nimmt der Fluss ab
- Folge: für den Energiebereich GeV - TeV werden große effektive Flächen benötigt

⇒ Beobachtung von γ -Strahlung im gewünschten Energiebereich ist mit Satelliten nicht möglich

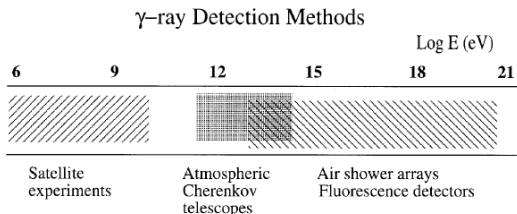


Quelle: <http://de.wikipedia.org>

Motivation

- Lösung: Rekonstruktion der einfallenden Photonen aus erdgebundener Beobachtung der sekundären Teilchenschauer
- Möglichkeiten:
 - Direkte Detektion von Teilchen aus Luftschauern
 - Imaging Atmospheric Cherenkov Teleskope (IACT):
Detektion von Cherenkov-Licht der Sekundärteilchen

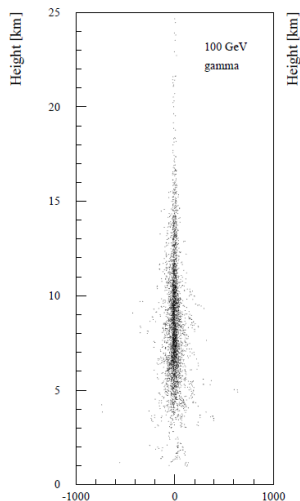
⇒ Im Energiebereich GeV - TeV sind IACTs Mittel der Wahl



Quelle: Ong1998[13]

Elektromagnetische Luftschauber

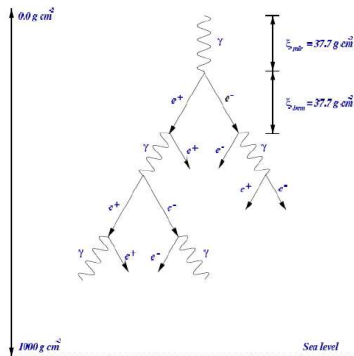
- Primärteilchen wechselwirkt mit Kernen in der Atmosphäre
- Für Photonen sind drei Prozesse relevant:
 - Paarerzeugung von Elektronen und Positronen
 - Bremsstrahlung: e^\pm im Kernfeld emittiert Photon
 - Ionisierung von Molekülen bei niedrigen Energien



Quelle: HESS[1]

Modell eines elektromagnetischen Luftschauers

- Einfallendes Teilchen mit Energie E_0
- Wiederholte Aufspaltung nach jeweils $d \approx X_0 \cdot \ln(2)$ mit Strahlungslänge X_0 in Luft
- Nach n -ter Aufspaltungsebene:
 - $N = 2^n$ Teilchen
 - Zurückgelegte Tiefe $X = n \cdot \lambda_r \cdot \ln(2)$
 - Energie E_0 gleichmäßig auf Schauerteilchen verteilt
- Schauer endet, wenn Teilchenenergie die kritische Energie E_{krit} unterschreitet



Quelle: Celik2008[6]

→ Maximale Teilchenzahl $N_{max} \propto E_0$
Maximale Schauertiefe $X_{max} \propto \log(E_0)$

Cherenkov-Strahlung

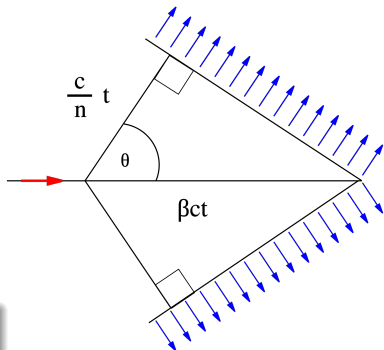
- Im Schauer erzeugte hochenergetische Elektronen und Positronen haben Geschwindigkeiten größer der Lichtgeschwindigkeit c_L in Luft
- Geladene Teilchen (e^\pm) polarisieren beim Durchflug durch ein nichtleitendes, dielektrisches Medium die umliegenden Moleküle
- Rückkehr in den Ausgangszustand erzeugt EM-Wellen
- Für $v < c_L$ interferieren diese destruktiv, also Auslöschung
- Für $v > c_L$ interferieren sie konstruktiv

⇒ Cherenkov-Strahlung wird erzeugt

Mach-Kegel

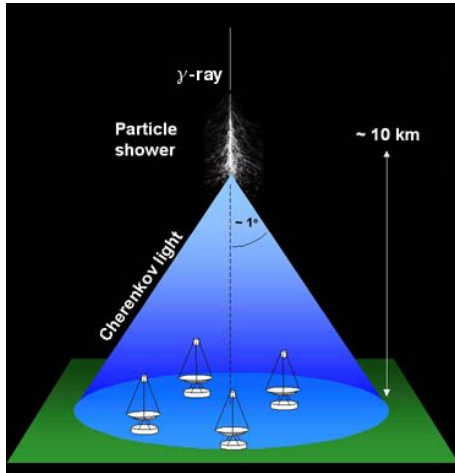
- Im Zeitraum t legt ein Teilchen die Strecke $x_T = v \cdot t = \beta \cdot c \cdot t$ zurück
- Die EM-Wellen legen $x_{EM} = c_L \cdot t = \frac{c}{n_L} \cdot t$ mit Brechungsindex n_L für Luft zurück
- Mach-Kegel wird erzeugt mit $\cos(\theta) = \frac{x_{EM}}{x_T} = \frac{1}{n \cdot \beta}$
- Da $n, \beta \approx 1$, ist θ sehr klein

⇒ Cherenkov-Licht wird nur in sehr kleinem Winkelbereich ($\theta \approx 1^\circ$) abgestrahlt

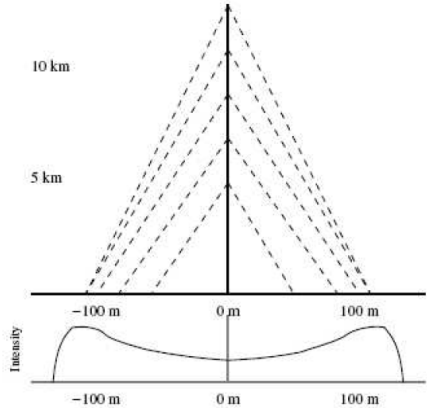


Quelle: <http://de.wikipedia.org>

Mach-Kegel



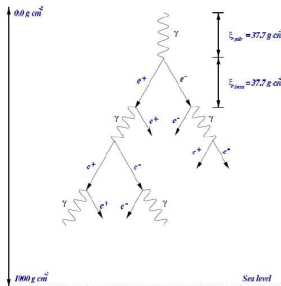
Quelle: W. Hofmann



Quelle: Celik2008[6]

Elektromagnetische ↔ Hadronische Schauer

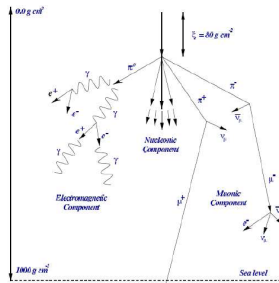
EM-Schauer



Quelle: Celik2008[6]

- Gesamte Energie E_0 in e^\pm
→ viel Cherenkov-Licht
- Schauer beginnt in hohen Atmosphären-Schichten
- Geringe Schauertiefe ($\lambda \approx 37 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$)

Hadronischer Schauer

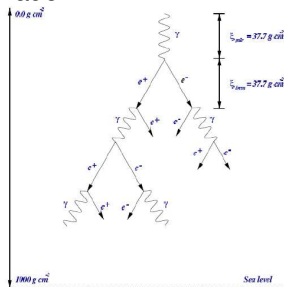


Quelle: Celik2008[6]

- Ein Teil der Schauerenergie in μ, ν, X
→ weniger Cherenkov-Licht
- Schauer beginnt in tieferen Atmosphären-Schichten
- Große Schauertiefe ($\lambda \approx 80 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$)

Elektromagnetische ↔ Hadronische Schauer

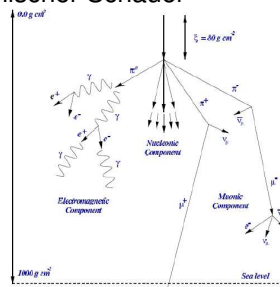
EM-Schauer



Quelle: Celik2008[6]

- Kompakte Schauerform
- Lichtkegel gleichmäßig, zirkular um Schauerachse

Hadronischer Schauer

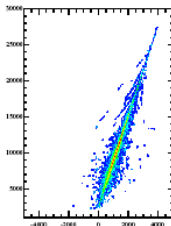


Quelle: Celik2008[6]

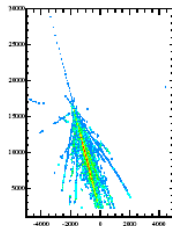
- Schauer diffus, Unter-Schauer aus π -Zerfall → „multi-cored“
- Lichtkegel ungleichmäßig, diffus um Schauerachse

Schauerentwicklung

Elektromagnetischer Schauer

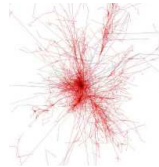
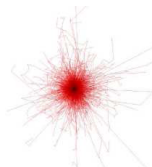


Hadronischer Schauer (Proton)



Longitudinale Entwicklung
eines 1TeV-Schauers

Laterale Entwicklung
eines 100GeV-Schauers



Quelle: Celik2008[6]

Quelle: Celik2008[6]

Cherenkov-Licht

Cherenkov-Lichtpulse sind...

- räumlich begrenzt: Abstrahlung im Bereich von $\approx 1^\circ$
- im Frequenzbereich von blauem/UV- Licht
- zeitlich stark begrenzt: in der Größenordnung von einigen ns

⇒ hohe Anforderungen an Teleskope

Kenngößen

Cherenkov-Teleskope sind optische Teleskope, die wichtigsten Bestandteile sind der optische Reflektor und die Kamera.

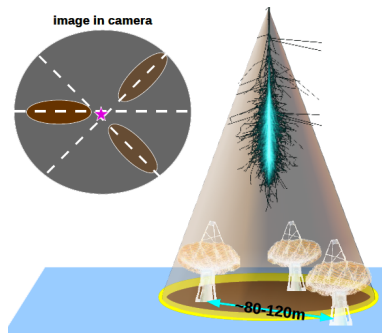
- Anzahl Teleskope (in stereoskopischen Arrays)
- Spiegelfläche
- Effektive Fläche
- Sichtfeld (FOV = field of view)
- Empfindlichkeit
- Schwellenenergie
- Kamera-Eigenschaften:
 - Art der Detektoren
 - Pixel Anzahl
 - Trigger und Koinzidenz-Trigger



Quelle: HESS[1]

Teleskop-Arrays

- Größere gesamte Spiegel-Fläche
- Geringere Triggerschwellen möglich
- Abstand der Teleskope optimal bei $\approx 100\text{m}$ (kleiner bei geringen Energien, größer für hohe Energien, da effektive Fläche mit Abstand skaliert)
- Wichtig ist auch die Standort-Auswahl: möglichst hoch über NN, trocken, dunkel, gut genug zugänglich, ...)



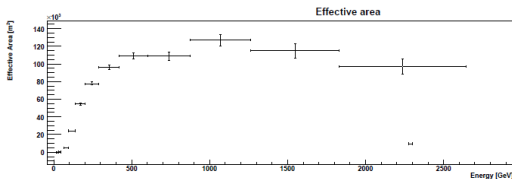
Quelle: Daniel2009[7]

⇒ Stereoskopie ermöglicht...

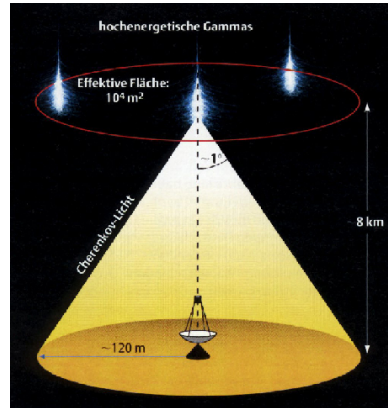
- ... bessere Winkel- und Energieauflösung
- ... bessere Filterung von Hintergrund-Ereignissen

Effektive Fläche

- Spiegelfläche pro Teleskop ist von der Größenordnung 100m^2
- Effektive Fläche A_{eff} ist wesentlich größer (Größenordnung $10^4 - 10^5\text{m}^2$)
- A_{eff} ist abhängig von Energie (und Energieauflösung)



Quelle: <http://ihp-lx.ethz.ch>[4]



Quelle: www.teilchen.at

Sichtfeld (FOV), Schwellenenergie, Sensitivität

FOV: field of view

- Im Survey erlaubt ein großes Sichtfeld höhere Beobachtungszeit pro Quelle
- Für hohe Energien ermöglicht ein großes Sichtfeld die Beobachtung entfernter Ereignisse

Schwellenenergie

- Entspricht Maximum der „differential rate curve“ (aus effektiver Fläche und erwartetem Spektrum)
- Größere effektive Fläche bedeutet kleinere Schwellenenergie

Sensitivität

- Kalibrierung am Krebsnebel
- Empfindlichkeit angegeben in „% crab“

Kamera

- Kamera besteht aus PMT-Pixeln:
 - gute blau/UV- Response
 - sehr schnelle Reaktion (Zeitskalen von ns)
- Pixel-Größe bestimmt Bild-Auflösung (aber für Winkelauflösung der Rekonstruktion zweitrangig)
- Trigger löst Aufnahme aus, wenn Pixel-Wert signifikant über das Hintergrundniveau steigt
- Koinzidenz-Trigger für stereoskopische Systeme
- Recht großes Bild in Kamera-Ebene

⇒ Geringe Ansprüche an optische Qualität (Reflektor, Pixel-Größe), aber gute off-axis-performance notwendig

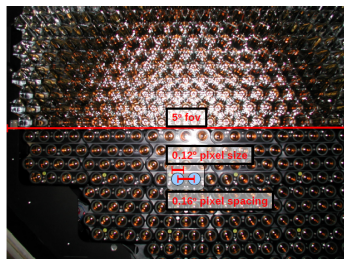
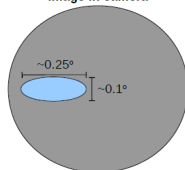


image in camera



Quelle: Daniel2009[7]

Grenzen der IACT-Methode

- Für kleinere Schwellenenergien werden immer größere Spiegelflächen benötigt
→ Großer Kostenfaktor
- Geringe Auslastung ($\approx 1024\text{h}/\text{Jahr}$), da nur in klaren Nächten mit geringem Mondlicht gemessen werden kann
→ Kurze Beobachtungszeiten begrenzen die Empfindlichkeit
- Starker Hintergrund: nur sehr geringer Anteil der registrierten Schauer sind elektromagnetischen Ursprungs
→ IACTs sind nur so gut wie ihre Filteralgorithmen

M.A.G.I.C.

Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Telescope



Quelle: MAGIC[2]

- Standort: Roque de la Muchachos Observatory, La Palma
- Zwei Teleskope
- Große Spiegelfläche (2 x 236m²) → größtes IACT
- Niedrigste Schwellenenergie:
 $E \geq 25\text{GeV}$ messbar

V.E.R.I.T.A.S.

Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System



Quelle: VERITAS[3]

- Standort: Whipple Observatory, Arizona, USA
- Vier Teleskope (je 106m^2) in unregelmäßiger Anordnung
- Effektive Fläche bis zu 10^5m^2
- Sichtfeld $3,5^\circ$

H.E.S.S.

High Energy Stereoscopic System

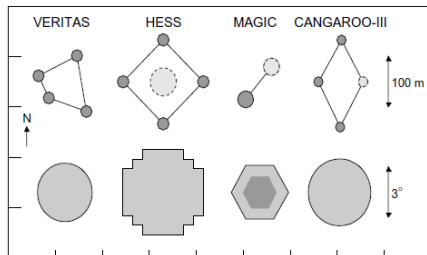


Quelle: HESS[1]

- Standort:
Windhoek/Goellschau,
Namibia
- Vier Teleskope (je 107m^2)
in quadratischer Anordnung
- Kameras mit je 960 Pixeln
- HESS II (in Bau): zentrales
 600m^2 Teleskop

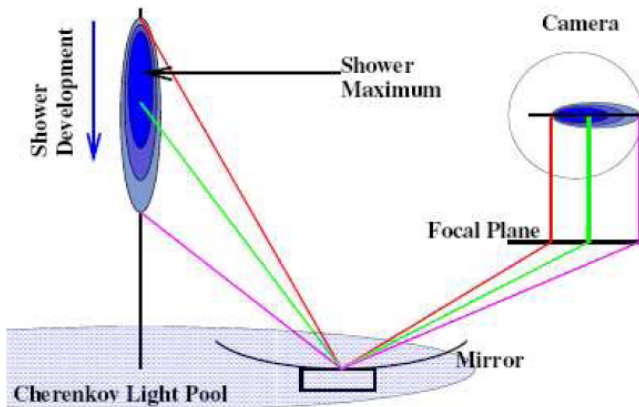
Wichtige Eigenschaften im Überblick

	# Tel.	Area (m ²)	# Pix. pro Tel.	FOV (°)	Sens. (% Crab)	Energie (TeV)	E res. (%)	Ang. res. (°)
MAGIC	2	472	574	3,5	2	> 0,025	10 - 20	< 0,1
VERITAS	4	424	499	3,5	1	0,1 - 50	10 - 20	< 0,14
HESS	4	428	960	5	0,7	0,1 - 100	≈ 15	<0,1



Quelle: Daniel2009[7]

Bildentstehung



Quelle: Celik2008[6]

Rekonstruktions-Schritte

Die Stärke der IACT-Methode liegt in der Effizienz, mit der das Signal der γ -Strahlung durch offline Bildbearbeitung vom Hintergrundsignal gefiltert werden kann, sowie in der Rekonstruktion der Eigenschaften des Primärteilchens.

- 1 Kalibrierung und Pixel-Analyse
- 2 Cleaning
- 3 Hillas-Parametrisierung
- 4 Daten-Filterung und γ -Hadron-Unterscheidung
- 5 Rekonstruktion der Schauer-Richtung
- 6 Rekonstruktion des Schauer-Cores
- 7 Energie-Rekonstruktion
- 8 Erweiterte Analyse (Detektion von Quellen, Spektren, 2D-Rekonstruktion)

Kalibrierung und Pixel-Analyse

Einfallendes Photon erzeugt Ladung im PMT. Die gemessene Gesamtladung ist proportional zur Anzahl Photonen. Ausschlaggebend ist es, die Hardwareabhängigkeit vom Messsignal zu entfernen.

1 Hintergrund-Levels: Messung des Pedestals

- NSB (night sky brightness) Verteilung wird an dunkler Position gemessen
- Beim Digitalisieren in den FADCs (Flash Analog Digital Converter) wird Offset addiert, um auch negative Schwankungen zu sehen
- Mean Pedestal = mittleres Hintergrundsignal pro Zeitsample wird aus Langzeitintegration ermittelt
- Pedvar = Schwankung (FWHM) des Mean Pedestals
- Skalierte Pedvar: $sc.Pedvar = \frac{Pedvar - \langle Pedvar \rangle}{\sigma_{Pedvar}}$

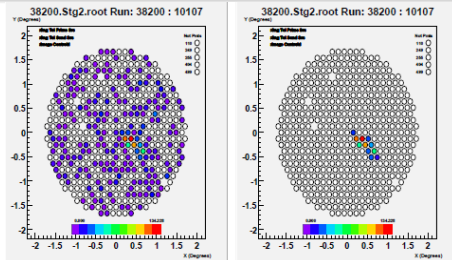
Kalibrierung und Pixel-Analyse

- ② Zeitverzögerungskalibrierung: Time Shift
 - Notwendig aufgrund unterschiedlicher Kabellängen, Elektroneinfluss, ...
 - Laserrun misst jede Nacht neu den Zeitoffset für jeden Kanal
- ③ Kalibrierung der PMT-Response: Channel Gain
 - Alterung, Verschmutzung und Schwankungen in der Elektronik verändern den Pixel-Gain kontinuierlich
 - Laserrun misst jede Nacht neu den Gain jedes PMTs
- ④ Pixel Analyse: Pixel werden ausgeschaltet, wenn...
 - sie aus ungeklärtem Grund inaktiv sind ($Pedvar \approx 0$)
 - sie eine Funktionsstörung aufweisen ($Pedvar$ sehr hoch)
 - sie sehr hohe Zeitoffsets oder einen stark veränderten Channel Gain aufweisen
 - sie einen hellen Stern abbilden

Cleaning

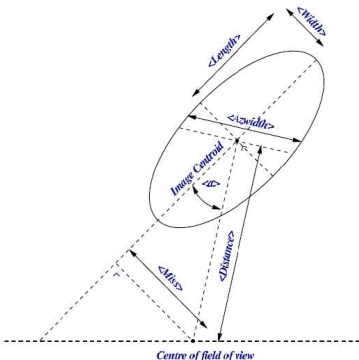
- Ziel: Unterscheidung von Bildpixeln und Hintergrundpixeln
- Definiere Bildpixel als Pixel, deren Wert $\geq 5 \cdot \text{pedvar}$ ist
- Begrenzungs- („boundary“) Pixel sind Pixel mit Wert $\geq 2,5 \cdot \text{pedvar}$, die an Bild- oder Begrenzungspixel angrenzen
- Isolierte Bildpixel werden entfernt

⇒ Ergebnis ist Bild des Cherenkov-Schauers



Quelle: Celik2008[6]

Hillas-Parametrisierung



Quelle: Celik2008[6]

distance	Entfernung des Bildmittelpunkts zum Zentrum des FOV
width	Effektive Ausdehnung entlang der kleinen Hauptachse des Bildes
length	Effektive Ausdehnung entlang der großen Hauptachse des Bildes
miss	Entfernung (\perp) zwischen großer Hauptachse und Zentrum des FOV
azwidth	Effektive Ausdehnung \perp zur <i>distance</i>
assymetry	Assymetrie der Lichtverteilung entlang der großen Hauptachse
alpha	Winkel zwischen großer Hauptachse und <i>distance</i>
size	Gesamtladung in allen Pixeln
frac3	% der Gesamtladung innerhalb der drei stärksten Pixel

Hillas-Parametrisierung

Parametrisierung der Schauerbilder nach dem Cleaning ermöglicht:

- Selektion der Bildqualität
- Unterscheidung zwischen γ - und hadronischen Ereignissen
- geometrische Rekonstruktion der Schauer-Richtung und des Schauer-Cores (essentiell für genaue Energierekonstruktion)

⇒ Hillas: mindestens 4 der Parameter sollten innerhalb des vorausgesagten Wertebereichs liegen

Daten-Filterung

Mean Scaled Parameter und „Event Quality Selection“

- Definition für Parameter *width* und *length* als:

$$MSP = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{p_i}{\langle p_{\text{simuliert}}(\text{size}, r) \rangle}$$

- Anwendung zum Vergleich der ermittelten Parameter mit erwarteten Werten aus Simulationen
- Simuliert wird für gegebene Schauer-Entfernung (r) und Größe ($size$)
- Filterung der Daten, um stark fehlerbehaftete Auswertung zu vermeiden. Verworfen werden Ereignisse...
 - mit zu kleiner $size$ (zu schwaches Bild)
 - die keine klare Form aufweisen (z.B. mit kleiner Pixel-Anzahl oder mit MSP außerhalb der erwarteten Wertebereiche)
 - die an der Kante des FOV liegen (weit entfernte Schauer)

γ -Hadron-Unterscheidung

1 Cherenkov-Yield

- Gesamte Energie des Photons verteilt sich auf e^\pm
- Folge: Weniger Cherenkov-Photonen in hadronischen Schauern (v.a. bei niedriger Energie)
- Filterkriterium ist $frac3$

2 Schauerform

- γ -Strahlung erzeugt kompakte Ellipsen
- Kosmische Strahlung erzeugt diffuse, unregelmäßige Bilder, z.T. mit μ -Ringern
- Filterung: Photon-Effizienzen von $\approx 50\%$ bei Unterdrückung von $99,7\%$ der kosmischen Strahlung erreichbar

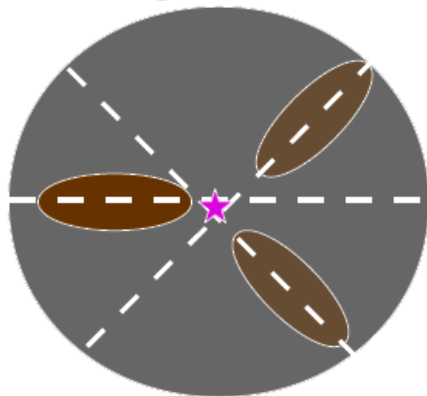
3 Einfallsrichtung

- Schauer aus der gewünschten Einfallsrichtung (Teleskop-Ausrichtung) ergeben Ellipsen, deren große Hauptachse in Richtung des Zentrums des FOV zeigt
- Schauer mit geneigten Einfallswinkeln haben andere Orientierung
- Filterkriterium ist θ^2 -Parameter (entspricht Winkeloffset)

Schauer- (Einfalls-) Richtung

- Bei stereoskopischer Beobachtung schneiden sich (nahezu) die großen Hauptachsen der einzelnen Bilder im FOV
- Schnittpunkt ergibt die Einfallrichtung des Primärteilchens
- Methode: Minimierung der gewichteten (*size*) Abstände der großen Hauptachsen zur gesuchten Einfallrichtung

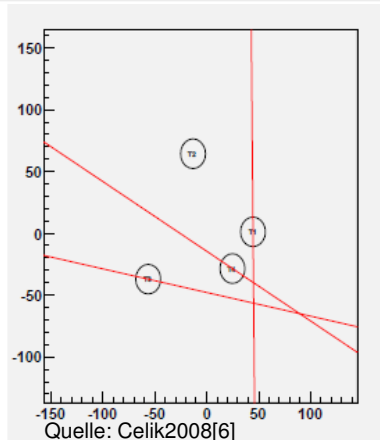
image in camera



Quelle: Daniel2009[7]

Schauer-Core

- Gesucht: Punkt in der Spiegel-Ebene (Ebene senkrecht zur rekonstruierten Schauer-Richtung)
- Schauer-Core entspricht Zentrum der einfallenden Schauerteilchen
- Methode: Minimierung des gewichteten Abstands zwischen den projizierten Hauptachsen
- *ImpactParameter*: Abstand (in der Spiegel-Ebene) zwischen Schauer-Core und Teleskop, der die Energieabschätzung beeinflusst



⇒ Genaue Rekonstruktion des Schauer-Kerns ist ausschlaggebend für gute Energie Rekonstruktion

Energie-Rekonstruktion

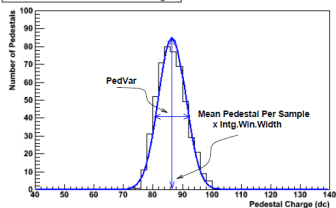
- Energie wird wie MSP aus lookup-tables (aus Simulationen) abgeschätzt
- Energie des Primärteilchens wird berechnet als gewichteter (*size*) Mittelwert der abgeschätzten Werte der einzelnen Teleskope
- Relativer Fehler $\Delta E = \frac{E_{rekonstruiert} - E_0}{E_0}$
- Energie-Bias $\langle \Delta E \rangle$ zeigt Energie-Bereich auf, in dem spektrale Rekonstruktion sinnvoll ist
- Breite von ΔE gibt Energieauflösung des Detektors an
- Energieauflösung ist Energie-abhängig

Erweiterte Rekonstruktion

- 1 Detektion von Quellen:
 - Bestimmung des Signals aus Richtung der Quelle, das über das Hintergrundsignal hinausgeht
 - Ausschlaggebend ist die Signifikanz der Abweichung
- 2 Spektrale Rekonstruktion
 - Energie-Rekonstruktion der einfallenden Strahlung getrennt für ON-/OFF- Modus
 - Energie-Auflösung gibt Bin-Breite
 - Berechnung des differentiellen Flusses pro Bin mit Hilfe der bekannten effektiven Fläche
- 3 Zweidimensionale Rekonstruktion
 - Schauer-Richtung der einfallenden Strahlung rekonstruieren
 - Winkelauflösung gibt Bin-Breite

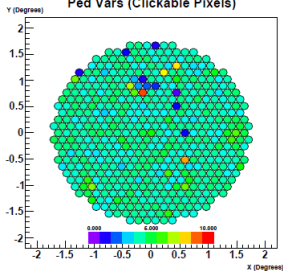
Kalibrierung und Pixel-Analyse

Distribution of the Pedestal Charge



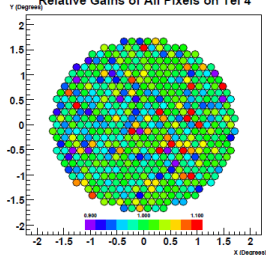
- Pedvar bestimmen
- Gain und Zeitoffset im Laserrun bestimmen
- Fehlerhafte Pixel ausschalten

Ped Vars (Clickable Pixels)



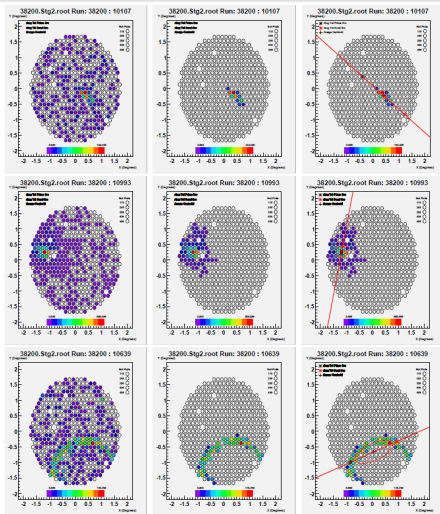
Quelle: Celik2008[6]

Relative Gains of All Pixels on Tel 4

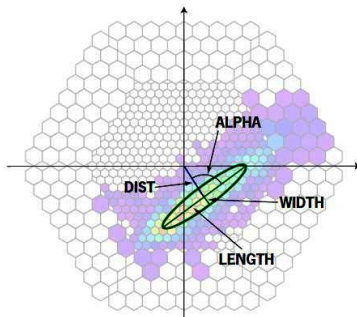


Quelle: Celik2008[6]

Cleaning und Hillas-Parametrisierung



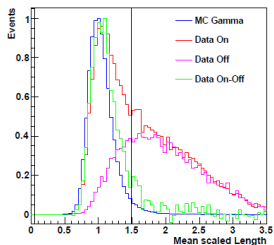
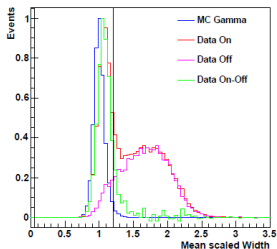
- Hintergrund entfernen (cleaning)
- Hillas-Parameter bestimmen



Quelle: [http://ihp-lx.ethz.ch\[4\]](http://ihp-lx.ethz.ch[4])

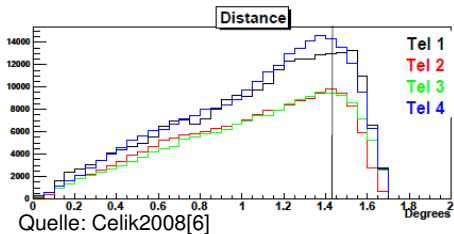
Quelle: Celik2008[6]

Daten-Filterung



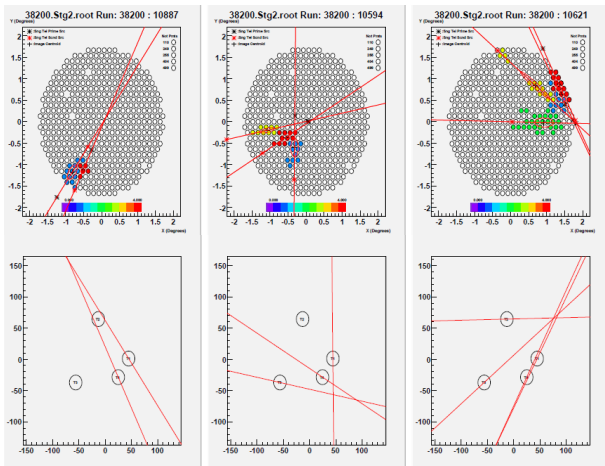
Quelle: Celik2008[6]

- MSP bestimmen
- Daten Filtern nach MSP, # Pixel, *size*, *distance*



Quelle: Celik2008[6]

Rekonstruktion von Schauer-Richtung und -Core

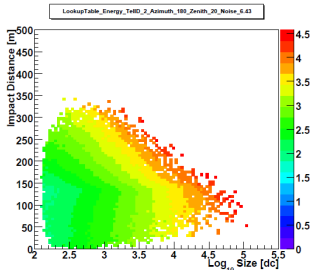


Quelle: Celik2008[6]

- Schauer-Richtung rekonstruieren aus Orientierung der großen Hauptachsen in der Kameraebene (FOV)
- Schauer-Core rekonstruieren aus Orientierung der großen Hauptachsen in der Spiegelebene (ergibt *Impact Parameter*)

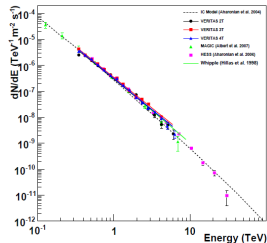
Energie- und Erweiterte Rekonstruktion

- Lookup-tables aus Simulationen erstellen
- Energie-Abschätzung aus *size* und *Impact Parameter*
- Energie und Schauer-Richtung ermöglicht spektrale und 2D-Rekonstruktion

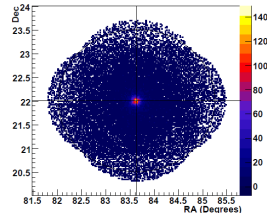


Quelle: Celik2008[6]

The Crab Nebula Spectrum



2D Map of Arrival Directions



Quelle: Celik2008[6]

Model Analysis

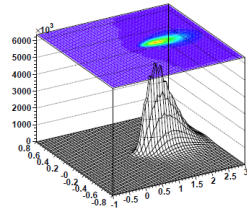
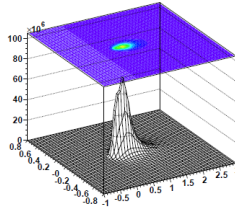
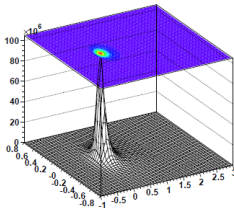
Prinzip: „High Performance Likelihood Reconstruction Of Gamma-Rays for IACTs“

- Vergleich der Rohdaten (ursprüngliche Pixelwerte) mit Vorhersagen eines Modells
- Minimierung der logarithmischen Wahrscheinlichkeit (über alle Kamera-Pixel) liefert rekonstruierte Parameter
- Diese Methode betrachtet u.a.:
 - Präzise Beschreibung des NSB-Hintergrunds
 - Stereoskopie
 - Atmosphärische Tiefe der ersten Wechselwirkung

Model Analysis

Ergebnis:

- Präzisere Energie- und Richtungs-Rekonstruktion
- Sensitivität steigt um Faktor ≈ 2 im Vergleich zur Hillas-Methode
- Bei Verbesserung des Modells erwartet man eine weitere Verbesserung der Genauigkeit

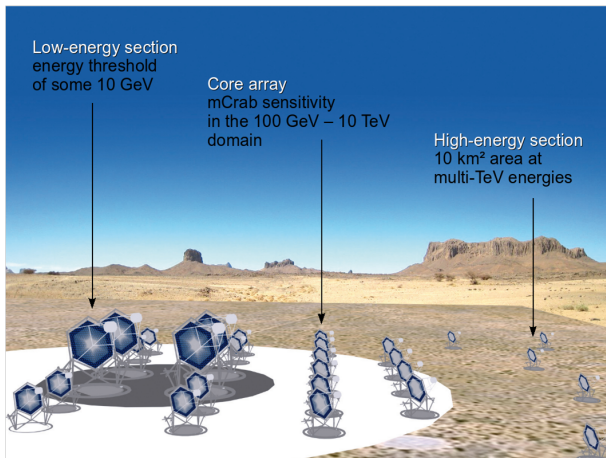


Quelle: NauroisRolland2009[8]

CTA - Cherenkov Telescope Array

Angestrebte Eigenschaften:

- Große Fläche
- Größeres Sichtfeld ($6-8^\circ$)
- Bessere Winkelauflösung
- Sensitivität im Bereich von mCrab
- Breiter Spektralbereich



Quelle: Stegmann2010[14]

A large radio telescope dish is silhouetted against a bright sunset sky. The dish is illuminated from below, creating a blue glow. The sky transitions from a bright yellow-orange at the horizon to a dark blue at the top. The telescope structure is visible in the foreground, and the horizon line is clearly defined.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Literatur I



<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>.



<http://www.magic.mppmu.mpg.de/>.



<http://veritas.sao.arizona.edu/>.



<http://ihp-lx.ethz.ch/>.



Barrau et al.

Observation Of The Crab Nebula Gamma-Ray Emission Above 220 GeV By The CAT Cherenkov Imaging Telescope, 1997.



Özlem Celik.

Observations of Crab Nebula and Pulsar with VERITAS.

PhD thesis, University of California, 2008.

Literatur II



Michael Daniel.

Cherenkov Telescope Arrays.

University of Durham,

<http://www.physics.utah.edu/~lebohec/SIIWGWS/Slides/IACCTMDaniel.pdf>, 2009.



Mathieu de Naurois and Loic Rolland.

A high performance likelihood reconstruction of gamma-rays for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes, 2009.



Jim Hinton.

Ground-based gamma-ray astronomy with cherenkov telescopes.

New Journal of Physics 11 (2009) 055005.



Jim Hinton and Werner Hofmann.

Teraelectronvolt astronomy.

Annual Review of Astronomy and Astrophysics 2009.47.

Literatur III



Werner Hofmann.

Opening remarks.

CTA 2009 Fall Meeting, Zurich, 2009.



Steffen Müller.

Ausgedehnte Luftschauer.

Radboud University Nijmegen, <http://particle.astro.kun.nl/hs/mueller.pdf>, 2006.



Rene A. Ong.

Very high-energy gamma-ray astronomy.

Physics Reports 305 (1998) 93-202.



Christian Stegmann.

CTA - HEAD meeting, Hawaii.

Erlangen Centre for Astroparticle Physics, 2010.



Andreas Zech.

Multi-wavelength observation of the 2006 TeV active state of PKS2155-304.

H.E.S.S. Collaboration, 2008.