

**Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)**

**Von der Monte-Carlo-Produktion zur
Datenanalyse**

**Eine Analyse der 2012 genommenen Daten
des Aktiven Galaktischen Kerns Mrk 421**

Katharina Frantzen
geboren in Willich

Mai 2015

Lehrstuhl für Experimentelle Physik V
Fakultät Physik
Technische Universität Dortmund

Erstgutachter: Prof. Dr. Dr. Wolfgang Rhode
Zweitgutachter: Prof. Dr. Carsten Westphal
Abgabedatum: 6. Mai 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Astroteilchenphysik	4
2.1 Kosmische Strahlung	4
2.2 Quellen kosmischer Strahlung	10
2.3 Beschleunigungsmechanismen	12
2.4 Gammaastronomie	16
2.5 Aktive galaktische Kerne	19
2.6 Markarian 421	24
3 Monte-Carlo-Simulation	27
3.1 Die MAGIC-Teleskope	28
3.2 Schauersimulation mit CORSIKA	30
3.3 Simulation des Reflektors mit <i>Reflector</i>	33
3.4 Simulation von Kamera und Elektronik mit <i>Camera</i>	34
3.5 Kalibration	37
3.6 <i>Star</i> - Bildbereinigung und Bildparametrisierung	40
3.7 <i>Superstar</i> - Stereoskopische Rekonstruktion der Schauer	44
3.8 Automatische MC-Produktionskette an der TU Dortmund	45
4 Analyse der AGN Mrk 421	51
4.1 Gamma-Hadron-Separation und Energieschätzung	51
4.2 Berechnung der Lichtkurve	55
4.3 Entfaltung des Energiespektrums	57
4.4 Mrk 421-Analyse	60
4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich der Datensets	81
5 Multiwellenlängen-Untersuchungen	84
5.1 Teilnehmende Experimente an der MWL-Kampagne	84
5.2 Vergleich der Lichtkurven	86
5.3 Variabilitätsuntersuchung	88
6 Zusammenfassung und Ausblick	92
Literatur	95

1 Einleitung

Terry Pratchett, einer der berühmtesten Fantasy-Autoren, sagte:

„Das Universum ist ein großer Witz“.

Ich bin mir da aber noch nicht so sicher...

Vielleicht hilft diese Doktorarbeit dabei, ein kleines bisschen Licht ins Dunkel des Universums zu bringen. Mit Hilfe von Teilchen, die wir auf der Erde oder mit Hilfe von Satelliten detektieren, können wir versuchen, so viel wie möglich über das Universum zu erfahren. Fragen wie „Woher kommen die Teilchen, die wir hier messen?“, „Wie wurden diese Teilchen beschleunigt?“ oder „Was passiert auf dem Weg von der Quelle bis zu uns mit diesen Teilchen?“ beschäftigen die Astroteilchenphysiker. Um diese Fragen zu klären, stehen verschiedene Botenteilchen mit ihren Vor- und Nachteilen zur Verfügung. Im Folgenden werde ich mich auf die Gammastrahlung als Bote konzentrieren.

Das Konzept der Gammaastronomie wurde in den 50er Jahren entwickelt und in den folgenden Jahren begann die Entwicklung der passenden Teilchendetektoren bis hin zu den abbildenden Luftschauder-Cherenkovdetektoren wie den MAGIC-Teleskopen. Mit Hilfe dieser beiden Teleskope, die sich auf La Palma befinden, ist es möglich Luftschauder, ausgelöst von sehr hochenergetischer Gammastrahlung, zu detektieren.

Eine mögliche Quelle für hochenergetische Gammastrahlung sind Aktive Galaktische Kerne (AGN). Die Quellen Markarian 421 (Mrk 421) und Markarian 501 (Mrk 501) waren die ersten detektierten Quellen dieses Typs. Mrk 421 besitzt eine Rotverschiebung von $z = 0.031$ und wurde als Gammastrahlung-emittierende Quelle in den 90er Jahren vom Whipple-Teleskop entdeckt.

Um die physikalischen Prozesse in diesen Quellen zu verstehen, werden Modelle für die Teilchenproduktion und -beschleunigung benötigt. Die Analyse einer solchen AGN hat unter anderem zum Ziel, das Energiespektrum der emittierten Strahlung zu bestimmen oder eine Lichtkurve anzufertigen, welche die zeitliche Entwicklung des Flusses darstellt. Dabei gibt es einige Herausforderungen: Da das Verhältnis von Signal (Gammastrahlung aus der Quelle) zu Untergrund (hadronische Schauer) im

1 Einleitung

besten Fall ca. 1:1000 beträgt, werden effiziente Algorithmen zur Signal-Untergrund-Trennung benötigt. Diese Klassifikationsalgorithmen werden mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen trainiert. Eine genaue Simulation der Primärteilchen, die einen Teilchenschauer auslösen und vom Experiment detektiert werden, ist wichtig. Alle Simulationsschritte, von der Schauersimulation, über die Simulation der Reflexion der Photonen am Teleskopspiegel bis zur Simulation der Kamera und der Elektronik müssen eine möglichst hohe Genauigkeit erreichen. Dies erfordert die stetige Anpassung der Simulation an die aktuellen Gegebenheiten. Veränderungen der abbildenden Eigenschaften der Spiegel, sowie Veränderungen in der Elektronik müssen in der Simulation berücksichtigt werden. Dies führt dazu, dass bei Veränderungen an der Hardware des Teleskops eine neue Monte-Carlo-Produktion angefertigt werden muss. Die gesamte Monte-Carlo-Produktion für das MAGIC-Experiment wurde im Laufe dieser Doktorarbeit in Dortmund durchgeführt.

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulationsdaten wird die Analyse der AGN Mrk 421 durchgeführt. Die zeitliche Entwicklung des Flusses sowie das Energiespektrum dieser Quelle sind die Analyseergebnisse. Zudem bietet sich die Möglichkeit, eine Quelle in unterschiedlichen Wellenlängen simultan zu observieren. Diese Multiwellenlängendaten von verschiedenen Experimenten beleuchten die Quelle jeweils in einem anderen Licht und können dabei helfen, physikalische Prozesse wie Beschleunigungsmechanismen und die Produktion von Gammastrahlung zu untersuchen. Es existieren zwei grundsätzlich unterschiedliche Modelle für die Produktion von Gammastrahlung in diesem Quelltyp, von denen bisher noch keines bestätigt oder ausgeschlossen werden konnte.

Die Arbeit gliedert sich folgendermaßen:

Kapitel 2 gibt einen Einblick in die Astroteilchenphysik. Verschiedene Quellen kosmischer Strahlung und Beschleunigungsmechanismen werden vorgestellt. Des Weiteren wird auf die Gammaastronomie als eigenes Forschungsgebiet in der Astroteilchenphysik eingegangen. Danach wird der Quelltyp des Aktiven Galaktischen Kerns (AGN) näher beschrieben und die in dieser Arbeit analysierte AGN Mrk 421 vorgestellt.

Kapitel 3 beinhaltet eine Beschreibung der MAGIC-Teleskope und bietet einen Überblick über die Monte-Carlo-Produktion. Jedes Simulationsprogramm und die anschließende Kalibration werden beschrieben. Abschließend beinhaltet dieses Kapitel noch eine Übersicht über die automatische Produktionsstruktur auf dem Rechencluster LiDO an der TU Dortmund.

In **Kapitel 4** befindet sich eine kurze Einführung in die Analyseprogramme, mit denen dann die Analyse der AGN Mrk 421 durchgeführt wird. Für diese Analyse

wird der gesamte Datensatz in vier Teile geteilt, deren Analyse getrennt voneinander erfolgt. Diese Teile unterscheiden sich in ihren äußereren Bedingungen und benötigen verschiedene Monte-Carlo-Simulationsdaten. Es werden für jeden Datensatz einzeln das Energiespektrum und die Lichtkurve bestimmt. Datensatz 2 wird zum Verständnis der Analyse beispielhaft genauer diskutiert. Eine zusammenfassende Lichtkurve, die den gesamten Datensatz enthält, ist am Ende des Kapitels zu finden.

Eine Multiwellenlängenanalyse der Quelle ist in **Kapitel 5** zu finden. Nach einer Vorstellung der beteiligten Experimente werden die Lichtkurven der einzelnen Teleskope sowie die Ergebnisse der durchgeführten Variabilitätsuntersuchung zwischen den verschiedenen Wellenlängen dargestellt.

In **Kapitel 6** werden alle erzielten Ergebnisse zusammengefasst und ein kurzer Ausblick gegeben.

2 Astroteilchenphysik

Die Astroteilchenphysik ist ein noch recht junger Teilbereich der Physik und beinhaltet Fragen der Astrophysik und der Teilchenphysik. Verschiedene Botenteilchen, deren Eigenschaften in Abschnitt 2.1 beschrieben werden, geben Auskünfte über astrophysikalische Quellen, welche in Abschnitt 2.2 erklärt werden. Diese Quellen emittieren geladene, bzw. ungeladene Teilchen, die mit Hilfe von Satelliten im All oder mit bodengebundenen Experimenten auf der Erde detektiert werden. Die Modelle für die grundlegenden Beschleunigungsmechanismen der Teilchen, die in Abschnitt 2.3 beschrieben werden, müssen noch überprüft bzw. weiterentwickelt werden. Im Laufe der Jahre wurden verschiedene Detektionsmethoden entwickelt, die speziell an die zu detektierenden Teilchen angepasst sind. Gleichwohl ist die Forschung in der Detektorentwicklung noch nicht abgeschlossen und die Kollaborationen sowie die konzipierten Detektoren werden fortschrittlicher und damit verbunden auch oft größer. Beispiele dafür sind der IceCube-Neutrino-Detektor oder das geplante Cherenkov-Teleskop-Array CTA. Abschnitt 2.4 bietet eine Übersicht über die Gammaastronomie und beschreibt die Wechselwirkung der Photonen auf dem Weg von der Quelle zum Detektor. Im Abschnitt 2.5 wird noch einmal der spezielle Quelltyp des Aktiven Galaktischen Kerns (AGN: Active Galactic Nuclei) näher beschrieben. Abschnitt 2.6 bietet eine Übersicht über die Quelle Mrk 421, die im Verlauf dieser Arbeit näher untersucht wird.

2.1 Kosmische Strahlung

In Abbildung 2.1 werden schematisch die Eigenschaften der Botenteilchen auf ihrem Weg von der Quelle zum Beobachter dargestellt. Geladene Teilchen wie Protonen oder Elektronen wechselwirken im Allgemeinen mit intergalaktischen oder interstellaren Magnetfeldern. Dadurch stellt die Rekonstruktion ihrer Ursprungsrichtung eine Herausforderung dar. Im Gegensatz zu den geladenen Teilchen können Neutrinos aufgrund ihrer geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit diese Strecke nahezu ungehindert zurücklegen. Allerdings ist ihre Detektion schwierig, sodass nur Detektoren mit sehr großem Volumen sie indirekt über ihre Sekundärteilchen detektieren können.

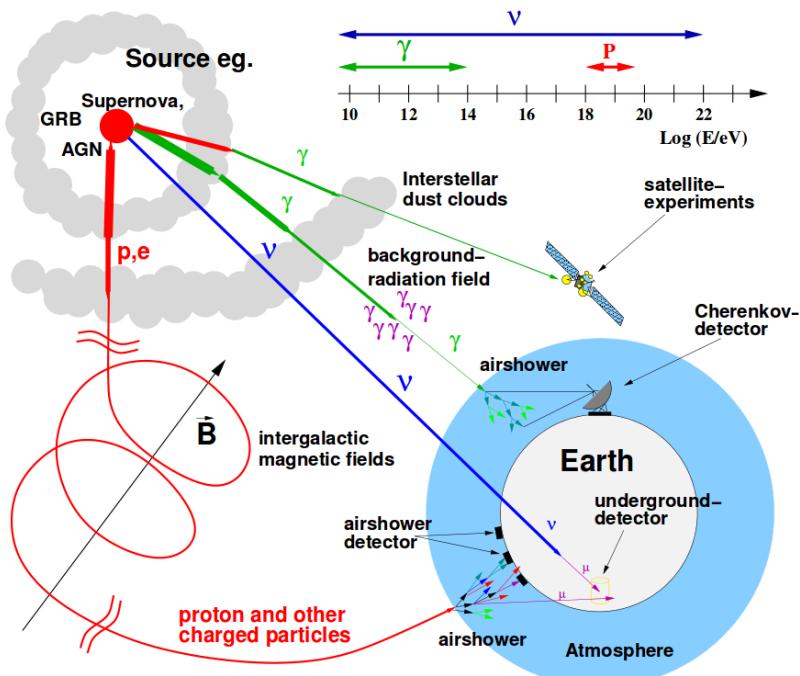


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Wechselwirkungen der Botenteilchen auf dem Weg von der Quelle zum Beobachter sowie ihrer Detektion. Auf ihrem Weg unterliegen die unterschiedlichen Botenteilchen unterschiedlichen Wechselwirkungen. Geladene Teilchen wechselwirken mit Staubwolken und werden von Magnetfeldern abgelenkt, Neutrinos und hochenergetische Photonen behalten ihre Richtungsinformation bei. Photonen wechselwirken ebenfalls mit Staubwolken oder mit niedrigerenergetischen Hintergrundphotonen und werden dann abhängig von ihrer Energie mit unterschiedlichen Detektoren gemessen. Das Bild entstammt [24].

Diese Detektion geschieht z.B. mit IceCube, einem Detektor, der in das Eis am Südpol eingeschmolzen wurde, folgendermaßen: Ein Neutrino wechselwirkt mit einem Nukleon und erzeugt dabei ein geladenes Lepton. Beim Durchgang durch den Detektor produziert dieses geladene Lepton Cherenkov-Strahlung, die mit Hilfe von Photosensoren detektiert wird.

Photonen besitzen den gleichen Vorteil wie Neutrinos und werden auf dem Weg zum Detektor nicht abgelenkt. Allerdings können sie direkt mit Staubwolken oder der niederenergetischen Hintergrundstrahlung (EBL: External Background Light), welche aus Sternenlicht oder Wärmestrahlung von interstellarem Staub besteht, wechselwirken. Hochenergetische Photonen werden von Satellitenexperimenten oder von Luftschauteleskopen detektiert. Die Detektion mit Satellitenexperimenten geschieht direkt, während Luftschauteleskope die Teilchen indirekt detektieren. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben wird, werden die Luftschaue vermessen und daraus auf die Eigenschaften des Primärteilchens geschlossen.

2.1.1 Die geladene kosmische Strahlung

Die geladene kosmische Strahlung wurde Anfang des 20. Jahrhunderts mit Hilfe von Ballonexperimenten entdeckt [35]. Aufgrund des Ergebnisses, dass mit steigender Höhe die Ionisation der Atmosphäre zunimmt, schlossen Hess und Kohlhörster [20], dass die von ihnen detektierte Strahlung aus dem Weltraum kommt. Diese Strahlung besteht zu 85% aus Protonen, zu 12% aus α -Teilchen und 3% aus Elementen mit größerer Kernladung [31]. Das Energiespektrum dieser kosmischen Strahlung ist auf einem sehr großen Energiebereich vermessen und wurde sowohl mit erdbundenen Experimenten als auch mit Satellitenexperimenten bestimmt.

Wie in Abbildung 2.2 zu erkennen ist, kann das Spektrum mit einem gebrochenen Potenzgesetz mit zwei Steigungsänderungen, die als "Knie" und "Ferse" bezeichnet werden, parametrisiert werden [37]. Hierbei ist N die Anzahl, E die Energie, E_p die Primärteilchenenergie und α_{CR} der spektrale Index der kosmischen Strahlung:

$$\frac{dN}{dE} \propto E_p^{-\alpha_{CR}} \quad (2.1)$$

mit [37]

$$\alpha_{CR} = \begin{cases} 2,7 & E \leq 4,5 \cdot 10^6 \text{ GeV} \\ 3,10 & 4,5 \cdot 10^6 \text{ GeV} < E \leq 4 \cdot 10^9 \text{ GeV} \\ 2,7 & E > 4 \cdot 10^9 \text{ GeV.} \end{cases}$$

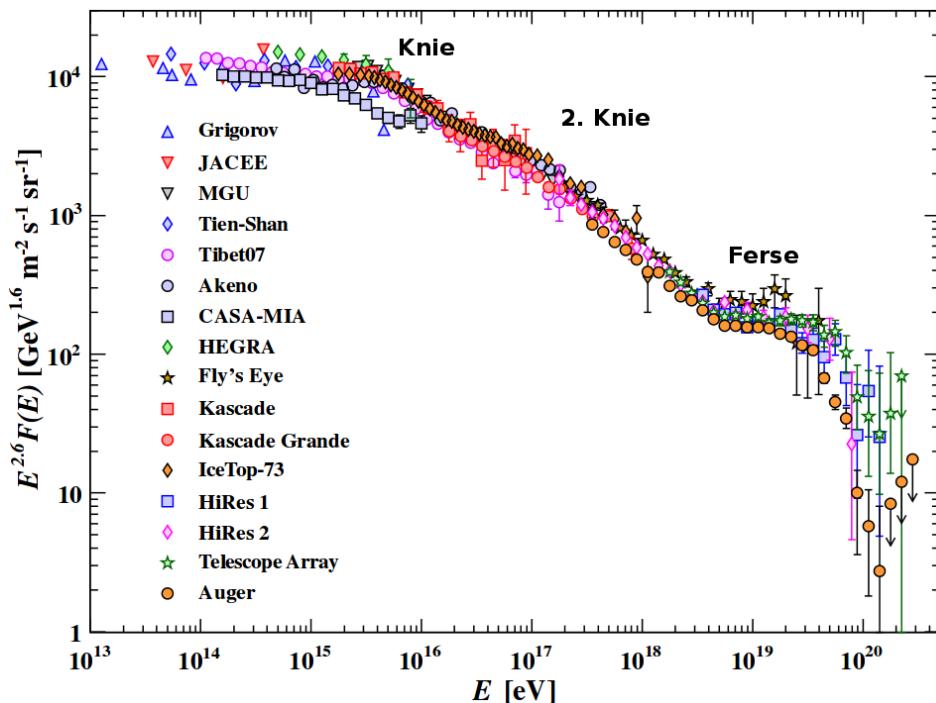


Abbildung 2.2: Spektrum der kosmischen Strahlung. Aufgetragen ist der mit $E^{2,6}$ gewichtete Fluss der Teilchen gegen die Primärteilchenenergie. Bei der Energie $E = 10^{15,4}$ GeV befindet sich das sogenannte „Knie“ und bei der Energie $E = 10^{18,5}$ GeV die „Ferse“ des Spektrums. Bei der Energie $E = 4 \cdot 10^{17}$ GeV [37] wird das zweite Knie erwartet.[52]

Die Existenz eines zweiten Knies bei $E = 4 \cdot 10^8 \text{ GeV}$ [37] wird noch untersucht.

Größere Energien als $5 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ können aufgrund des GZK-Cutoffs [29][71] nur schwer gemessen werden, da sie auf großen Propagationslängen stark unterdrückt sind. Dieser Cutoff tritt auf, wenn Protonen mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB: Cosmic Microwave Background) wechselwirken [29][71]:

$$p\gamma_{CMB} = \begin{cases} \Delta^+ \\ p e^+ e^- \end{cases}$$

Knie und Ferse beinhalten Informationen über die Beschleunigungsmechanismen der Teilchen bzw. über die Quellen. Die Teilchen mit den höchsten Energien jenseits der Ferse können nicht galaktischen Ursprungs sein, da die galaktischen Magnetfelder für die Beschleunigung zu schwach sind. Deswegen wird vermutet, dass diese Teilchen extragalaktischen Ursprungs sind, wobei die Beschleunigungsmechanismen (vgl. Abschnitt 2.3) noch nicht genau bekannt sind.

2.1.2 Neutrinos als Botenteilchen

Neutrinos sind leichte Teilchen, die eine sehr geringe Wechselwirkungswahrscheinlichkeit aufweisen und daher nur in großen Experimenten wie IceCube [1] oder ANTARES [4] indirekt über ihre leptonischen Partner nachgewiesen werden können. Es gibt verschiedene Quellen, in denen Neutrinos produziert werden können. Kosmogene Neutrinos werden in Wechselwirkungen von hochenergetischen Protonen mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund und dem darauffolgenden Zerfall von geladenen Pionen erzeugt. Galaktische Neutrinos können in hadronischen Beschleunigungsprozessen erzeugt werden. Es wird auch vermutet, dass in Gammastrahlenausbrüchen oder in hadronischen Beschleunigungsprozessen in AGNs Neutrinos entstehen können.

Die größte Herausforderung bei der Suche nach hochenergetischen Neutrinos ist der Untergrund, der durch Wechselwirkungen von geladener kosmischer Strahlung mit der Atmosphäre entsteht. Die Produktion von Neutrinos geschieht über schwache Zerfälle von Hadronen, hauptsächlich Pionen. Nachfolgend werden die möglichen Reaktionen beschrieben. Entweder wechselwirkt ein Photon mit einem Proton (mit der in Klammern angegebenen Wahrscheinlichkeit) [13]:

$$p\gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \begin{cases} p\pi^0 & (2/3) \\ n\pi^+ & (1/3), \end{cases}$$

oder ein Proton wechselwirkt mit einem anderen Proton [13]:

$$pp \rightarrow \begin{cases} pp\pi^0 & (2/3) \\ pn\pi^+ & (1/3). \end{cases}$$

Bei höheren Energien tragen auch Kaonen und Neutronen zur Neutrinoproduktion bei. In diesen Prozessen entstehen negativ geladene Pionen, die zerfallen und dabei Neutrinos produzieren [25].

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu \end{aligned}$$

In einer Quelle wie z.B. der Sonne wird eine Verteilung der Neutrinos von $(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau) = (\bar{\nu}_e : \bar{\nu}_\mu : \bar{\nu}_\tau) = (1 : 2 : 0)$ erwartet [25]. Aufgrund von Neutrinooszillationen wird auf der Erde ein Verhältnis von $(\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau) = (1 : 1 : 1)$ [25] beobachtet.

2.1.3 Photonen als Botenteilchen

Genau wie die Neutrinos besitzen Photonen den Vorteil, dass sie nicht von Magnetfeldern abgelenkt werden. Allerdings können aufgrund der Absorption in der Atmosphäre auf der Erde nur Photonen im optischen und im Radiobereich direkt detektiert werden. Deswegen haben sich die optische Astronomie und die Radioastronomie zuerst entwickelt. Danach kam dann die Beobachtung von Strahlung anderer Wellenlängen, wie Röntgenstrahlung oder Gammastrahlung, hinzu. Gammastrahlung lässt sich anhand der Energie in nieder- bis mittelenergetische Gammastrahlung (0,1 MeV-30 MeV), hochenergetische Gammastrahlung (30 MeV-100 GeV), sehr hochenergetische Gammastrahlung (100 GeV-100 TeV) und ultrahochenergetische Gammastrahlung ($E > 100$ TeV) einteilen.[68]

Der Nachteil der hochenergetischen Photonen ist, dass sie mit den niederenergetischen Photonen der Hintergrundstrahlung (EBL) wechselwirken. Mit Hilfe von Messungen können dann Modelle erstellt werden, die die Hintergrundstrahlung parametrisieren und mit Hilfe dieser dann diese Absorption in Beobachtungen berücksichtigt werden kann.

Abschnitt 2.4 geht näher auf die Gammaastronomie ein und erklärt die Wechselwirkungen, die die Photonen auf ihrem Weg zur Erde erfahren.

2.2 Quellen kosmischer Strahlung

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über einige Quellen der kosmischen Strahlung gegeben. Es werden vor allem die wichtigsten Quellen hochenergetischer Gammastrahlung vorgestellt.

2.2.1 Die Galaktische Scheibe und das Galaktische Zentrum

1968 wurde das erste Mal Gammastrahlung von der Galaktischen Scheibe detektiert [39]. Diese galaktische Gammastrahlung kann in verschiedenen Prozessen entstehen, die Photonen unterschiedlicher Energien erzeugen. Niederenergetische Photonen können durch Bremsstrahlung von Elektronen im interstellaren Gas erzeugt werden. Elektronen können auch in einem inversen Comptonprozess an niederenergetischen Photonen gestreut werden, wodurch die Photonen auf hohe Energien beschleunigt werden. Im Zerfall von neutralen Pionen zu Photonen werden Photonen mittlerer Energie erzeugt.

Das Galaktische Zentrum enthält mehrere massive Objekte, wie junge Supernova-Uberreste, die hochenergetische Gammastrahlung emittieren. So befindet sich in einem Radius von 10 pc um das Galaktische Zentrum eine Masse von $3 \cdot 10^7$ Sonnenmassen. Dem Satellitenexperiment EGRET gelang die Detektion der Quelle 3EG J1745-2852, welche hochenergetische Gammastrahlung emittiert. Allerdings ist die Natur dieser Quelle noch unbekannt.[6][68]

2.2.2 Supernovae und Supernovaüberreste

Die Explosion eines Sterns wird als Supernova (SN) bezeichnet. Gammastrahlung, die aus einer SN kommt, wird entweder in den ersten Sekunden der Explosion als Gammastrahlenausbruch (GRB: Gamma Ray Burst) emittiert; oder sie kann, falls nach dem GRB ein Pulsar entsteht, als periodische Emission abgestrahlt werden. Es ist auch möglich, dass die Photonen aus der sich ausbreitenden Hülle des ehemaligen Sterns (SNR: Supernova Remnant) stammen. Diese galaktischen Quellen liefern kosmische Strahlung bis zu Energien von 100 TeV [68]. Eine Beschleunigung von Teilchen auf Energien von 10^{20} eV durch SN und SNR ist nicht möglich. Teilchen mit so hohen Energien stammen somit aus extragalaktischen Quellen.[68]

2.2.3 Pulsare und Binäre Systeme

Pulsare sind rotierende Neutronensterne mit einer Rotationsperiode zwischen einigen Millisekunden und einigen Sekunden. Das bekannteste Beispiel ist der Crab-Pulsar im Zentrum des Krebsnebels.

Dieser Quelltyp wurde vor mehr als 30 Jahren entdeckt und lässt sich in zwei Kategorien einteilen. Pulsare der ersten Kategorie gewinnen ihre Energie durch Rotation und sind im Allgemeinen im Radiobereich gut detektierbar. Pulsare der zweiten Kategorie gewinnen ihre Energie durch Akkretion von Materie und sind vor allem im Röntgenbereich sichtbar. Die Emissionsprozesse der Pulsare der zweiten Kategorie sind rein thermisch und von weniger Interesse für die hochenergetische Gammaastronomie.

Bisher wurden einige Pulsare entdeckt, die im Gammabereich ebenfalls eine hohe Luminosität haben. Genau wie bei SNe und SNRs, können ihre Energiespektren durch ein Potenzgesetz beschrieben werden. Verschiedene Pulsare lassen sich anhand ihrer Spektren voneinander unterscheiden. Ihre Lichtkurven unterscheiden sich in der Position der Peaks bei verschiedenen Wellenlängen. Die Emissionsmechanismen von Pulsaren sind noch nicht komplett verstanden und zwei Modelle konkurrieren miteinander. Eine detaillierte Beschreibung dieser Modelle kann [68] entnommen werden.

Die Hälfte aller Sterne taucht in einer Assoziation mit einem anderen Objekt auf und wird Binäres System genannt. Dieses andere Objekt ist oft ein kompaktes Objekt wie ein Weißer Zwerg, ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch. Hohe Röntgenemission sowie ein zeitlich variables Verhalten sind charakteristisch für diesen Quelltyp. Die Variabilität kann im Bereich von Millisekunden bis zu Jahren liegen und periodisch auftauchen oder in einzelnen Ausbrüchen wird viel Strahlung emittiert.[68]

2.2.4 Gammastrahlenausbrüche

Gammastrahlenausbrüche (GRB: Gamma Ray Burst) wurden während des kalten Kriegs von den amerikanischen *Vela*-Satelliten, die Atombombenexplosionen aufspüren sollten, entdeckt. 16 GRBs mit Zeitspannen von 0,1s - 30s und Teilchenflüssen zwischen $(10^{-5} - 10^{-4}) \frac{\text{erg}}{\text{s}}$ wurden detektiert.

Im Allgemeinen dauern GRBs zwischen Millisekunden und einigen tausend Sekunden an und sind isotrop verteilt. Sie werden in kurzweilige Ausbrüche ($t < 2\text{s}$) und den Rest unterteilt. In den ersten Messungen wurden Energien von 50 keV

bis 1 MeV detektiert. Mit Satellitenexperimenten wurden GRBs auch bei Energien von Gammastrahlung (bis ca. 30 GeV) detektiert. Der Fluss, d.h. die Anzahl der Teilchen pro Fläche und Zeit, ist aber sehr niedrig. Bodengebundene Teleskope, z.B. MAGIC, betreiben GRB-Programme, allerdings kam es bisher noch zu keiner Detektion.[68]

2.2.5 Aktive Galaktische Kerne

Die Klasse der Aktiven Galaktischen Kerne (AGN) wird durch ein supermassives Schwarzes Loch, welches sich in ihrem Zentrum befindet und Materie akkretiert, gekennzeichnet. Abhängig vom AGN-Typ werden aus dem Zentrum noch zwei Jets in entgegengesetzte Richtungen emittiert. Anhand ihrer Ausrichtung zum Beobachter und ihrer Emission in den verschiedenen Wellenlängen werden AGNs klassifiziert. Eine genauere Darstellung dieses Quelltyps, zu dem auch die in dieser Arbeit analysierte Quelle Mrk 421 gehört, wird in Abschnitt 2.5 gegeben.

2.3 Beschleunigungsmechanismen

Im Folgenden werden die Beschleunigungsmechanismen vorgestellt, die in den relativistischen Jets von AGNs oder GRBs relevant sind. Dafür wird zunächst der Fermi-Mechanismus vorgestellt, mit dessen Hilfe geladene Teilchen beschleunigt werden. Danach werden die Prozesse zur Erzeugung, bzw. Abschwächung von hochenergetischer Gammastrahlung beschrieben. Auf Grund der geringen Teilchendichte in Jets ($n \leq 10^{-3} \frac{1}{\text{cm}^3}$) [19] sind Prozesse wie Coulombstreuung oder Bremsstrahlung in AGNs nicht relevant und werden nicht beschrieben.

2.3.1 Fermi-Mechanismus 1. und 2. Art

Die Fermi-Beschleunigung 1. Art beschreibt die Schockbeschleunigung. Die in einer SN abgestoßene Hülle repräsentiert eine Schockfront, die sich mit einer Geschwindigkeit u_1 durch das Interstellare Medium (ISM) fortbewegt. Hinter der Schockfront strömt Gas mit der Geschwindigkeit u_2 in die entgegengesetzte Richtung. Kollidiert nun ein Teilchen, welches sich mit der Geschwindigkeit c bewegt, mit dieser Schockfront und wird dabei reflektiert, so gewinnt es die relative Energie

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{u_1 - u_2}{c}. \quad (2.2)$$

Diese Art der Beschleunigung ist somit linear in der Geschwindigkeit und es können maximale Energien von etwa 100 TeV erreicht werden.[31][40]

Die Fermi-Beschleunigung 2. Art beschreibt die Wechselwirkung eines Teilchens mit Geschwindigkeit c mit magnetischen Gaswolken, die sich mit der Geschwindigkeit u bewegen. Der relative Energiegewinn bei diesem Beschleunigungsmechanismus beträgt:

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{u^2}{c^2}. \quad (2.3)$$

Die Fermi-Beschleunigung 2. Art ist somit quadratisch in der Teilchen- und Wolken-geschwindigkeit. Da die Teilchen der kosmischen Strahlung einen Teil ihrer Energie in Wechselwirkungen mit dem interstellaren oder dem intergalaktischen Gas zwischen zwei Kollisionen wieder verlieren, benötigt dieser Beschleunigungsmechanismus eine minimale Injektionsenergie, oberhalb der die Teilchen effektiv beschleunigt werden können.[31][40]

2.3.2 Synchrotronstrahlung

Propagiert ein geladenes relativistisches Teilchen durch ein Magnetfeld, emittiert es ein breites Spektrum an Synchrotronstrahlung. Der Energieverlust dieses Teilchens mit Masse m , Ladung q , Lorentzfaktor γ und der Geschwindigkeit βc , welches sich mit einem Winkel Ψ zum B-Feld mit der Energiedichte $u_B = \frac{B^2}{8\pi}$ bewegt, beträgt:

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_{Sy} = -\frac{16\pi c}{3} \left(\frac{q}{mc^2} \right)^2 u_B \beta^2 \gamma^2 \sin^2 \Psi. \quad (2.4)$$

Unter der Annahme, dass in relativistischen Jets die abstrahlenden Teilchen sofort in zufällige Richtungen gestreut werden, d.h. dass sie zufällig im Verhältnis zum B-Feld verteilt sind und unter der Annahme, dass die Streuung auf kleineren Zeitskalen abläuft als der Synchrotronstrahlungsprozess, wird über den Winkel Ψ gemittelt. Das führt dazu, dass der Energieverlust umso größer wird, je größer die Masse ist:

$$\frac{dE}{dt} \propto m^{-2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{d\gamma}{dt} \propto m^{-3}, \quad (2.5)$$

wobei

$$\frac{dE}{dt} = mc^2 \frac{d\gamma}{dt}. \quad (2.6)$$

Daraus folgt, dass Elektronen größere Energieverluste durch Synchrotronstrahlung erfahren als Protonen. Für den gleichen Energieverlust müsste ein Proton $6,2 \cdot 10^9$ mal mehr Energie haben als ein Elektron. Ein Nachteil von Elektronen ist, dass sie, nachdem sie zu ultrarelativistischen Energien beschleunigt worden sind, ihre Energie sehr schnell wieder verlieren. Protonen und schwerere Teilchen können einfacher beschleunigt werden, müssen aber auf extrem hohe Energien beschleunigt werden, um Photonen mit nennenswerter Energie abstrahlen zu können.

Zudem tritt noch das Problem der Synchrotron-Selbst-Absorption auf, d.h. Photonen werden von relativistischen Elektronen im B-Feld absorbiert.[19]

2.3.3 Compton-Streuung

Die Streuung von relativistischen Elektronen an einem Strahlungsfeld wird Compton-Streuung genannt. Dieser Prozess tritt auch in Strahlungsfeldern von extragalaktischen Jets auf. Die Photonenergie ϵ wird in Abhängigkeit von der Elektron-Ruhemasse $m_e c^2$ angegeben: $\epsilon = \frac{h\nu}{m_e c^2}$. [19]

In niedrigster Ordnung ist der Energieverlust im Thomson-Limit, d.h. $\gamma\epsilon \ll 1$ gegeben durch:

$$-\left(\frac{d\gamma}{dt}\right) \approx \frac{4}{3}c\sigma_T \frac{u_{\text{Ph}}}{m_e c^2} \gamma^2 \quad (2.7)$$

σ_T : Thomson-Wirkungsquerschnitt, u_{Ph} : Energiedichte des Photonfeldes.

Im Thomson-Limit kommt es zu Photonenergien von $\epsilon_S \sim \gamma^2 \epsilon_0 \ll \frac{1}{\epsilon_0}$, wobei ϵ_0 die Energie des isotropen monoenergetischen Photonfeldes ist.[19]

Für große Elektron- und Photonenergien $\gamma\epsilon > 1$ ist Compton-Streuung unterdrückt.[19]

2.3.4 $\gamma\gamma$ -Absorption und Paar-Produktion

Die Wechselwirkung von hochenergetischen Photonen miteinander oder mit weniger energiereichen Photonen ist der einzige relevante Absorptionsmechanismus für Photonen in astrophysikalischen Umgebungen. Ein Photon mit der Energie ϵ_1 wechselwirkt mit einem Photon der Energie ϵ_2 unter dem Winkel $\Theta = \cos^{-1} \mu$ und produziert ein e^+e^- -Paar falls:

$$\epsilon_1 \geq \frac{2}{\epsilon_2(1 - \mu)}. \quad (2.8)$$

Sehr hochenergetische Gammastrahlung aus einer Quelle in kosmologischer Entfernung wird vom Infrarot- und optischen Hintergrundlicht absorbiert. Dieser Prozess wird EBL (Extragalactic Background Light)-Absorption genannt. Dieses extragalaktische Hintergrundlicht besteht vorwiegend aus der Infrarot-Emission von Staub aus jungen, sternbildenden Galaxien als auch aus der Infrarot- und der optischen Emission von Sternen. Das Spektrum und die Intensität des EBL hängen von der kosmologischen Zeit bzw. der Rotverschiebung ab und dadurch wird auch die Opazität für VHE-Gammastrahlung bestimmt. Aufgrund der großen Emission innerhalb des Sonnensystems und der Milchstraße ist das EBL schwierig zu vermessen. Daraus folgt, dass für Quellen mit großer Rotverschiebung die Absorption durch EBL berücksichtigt werden muss, was mit Hilfe von EBL-Modellen geschieht.[19]

2.3.5 γ -Hadron-Wechselwirkungen

Aufgrund der oft dichten Strahlungsfelder in Jets sind die Wechselwirkungen zwischen relativistischen Hadronen und Photonen bedeutend. Zum einen kann es zur Bethe-Heitler-Paarproduktion und zum anderen zur Photomesonproduktion kommen.[19]

Die Bethe-Heitler-Paarproduktion beschreibt die Reaktion eines Kernteilchens an einem Hintergrund-Photon, wobei ein e^+e^- -Paar entsteht:

$$p \gamma \rightarrow p' e^+ e^- . \quad (2.9)$$

Diese Reaktion tritt auf, sobald die Schwerpunktsenergie groß genug ist:

$$s \geq (m_p c^2 + 2m_e c^2)^2 \approx 0,882 \text{ GeV}^2. \quad (2.10)$$

Die Photo-Mesonproduktion von z.B. Pionen tritt auf, sobald die Schwerpunktsenergie $s \geq (m_p c^2 + 2m_{\pi^0} c^2)^2 \approx 1,16 \text{ GeV}^2$ überschreitet. Dominant ist die Pionenproduktion in photohadronischen Interaktionen, wobei das π^0 mit einer Halbwertszeit von $t_{1/2} \approx 8,4 \cdot 10^{-17} \text{ s}$ in zwei Photonen und die geladenen Pionen nach einer Halbwertszeit von $t_{1/2} \approx 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ in Myonen und Neutrinos zerfallen. Die Produktion und der Zerfall von Kaonen und η -Mesonen trägt (10-20)% zur gesamten Photonen-, Leptonen- und Neutrinoproduktion bei.[19]

2.3.6 Elektromagnetische Kaskaden

In einer photohadronischen Quelle ist die Lichtundurchlässigkeit für primäre Gammastrahlung aus π^0 -Zerfällen oder Compton-Streuung groß, weil sonst keine photohadronischen Wechselwirkungen stattfinden können. Solche primären Photonen verursachen eine elektromagnetische Kaskade, in der Paarproduktion, Synchrotronstrahlung, Comptonstreuung und Bremsstrahlung die wichtigsten Prozesse sind. Solch eine Kaskade kann innerhalb von Jets auftreten, sobald die Photonen genug Energie für die Paarproduktion besitzen und die Dichte an Umgebungsphotonen hoch genug ist. Sobald die Energie der Photonen nicht mehr ausreichend für die Paarproduktion ist, verschwindet die Kaskade.[19]

2.4 Gammaastronomie

Wie in 2.1.3 beschrieben wurde, lässt sich die Gammaastronomie in verschiedene Energiebereiche einteilen. Abhängig vom Energiebereich werden verschiedene Detektoren benötigt.

Satellitenexperimente Gammastrahlung mit Energien, die kleiner sind als 10 GeV werden mit Satellitenexperimenten detektiert. Der Transport ins All stellt limitierende Bedingungen an diese Experimente. Die Detektionsfläche ist relativ klein und aufgrund des kleinen Teilchenflusses werden lange Beobachtungszeiten benötigt. Im Allgemeinen lassen sich abhängig vom dominanten Wechselwirkungsprozess in dem zu beobachtenden Energiebereich zwei Detektionstechniken unterscheiden. Hohenenergetische Gammastrahlung wird über den Prozess der Paarproduktion detektiert und die mittelenergetische Gammastrahlung über den Prozess der Comptonstreuung.[68]

Die Paarproduktionsteleskope arbeiten typischerweise im Energiebereich von ca. 30 MeV-10 GeV. Die Experimente COS-B [15] und EGRET [38] sind zwei Beispiele für diesen Typ. Sie nutzen Funkenkammern zur Detektion der Sekundärteilchen und bestehen aus verschiedenen Bauteilen. EGRET [38] an Bord des *CGRO* besteht aus einem Tracker, der eine Funkenkammer beinhaltet. Ein Gammastrahlungssphoton erzeugt innerhalb dieses Trackers ein Elektron-Positron-Paar, welches in der Funkenkammer detektiert wird. Der Pfad dieses Paares wird in der Kammer aufgezeichnet. Jedes Elektron-Positron-Paar, welches die Funkenkammer verlässt, wird dann vom sogenannten Trigger gezählt. Mit Hilfe des dritten Bauteils, dem Kalorimeter, wird die Energie des Paares bestimmt. Als Veto dient eine Umhüllung des Detektors, die geladene Teilchen detektiert, die nicht innerhalb des Detektors erzeugt werden.[68]

Comptonteleskope dienen der Detektion von Gammastrahlung im Energiebereich 100 keV-10 MeV. Sie bestehen aus einem Szintillationsdetektor aus festem oder flüssigem Material, in dem Licht von geladenen Sekundärteilchen detektiert wird. Diese Sekundärteilchen sind in einer Comptonstreuung mit Gammastrahlung entstanden. Mit Hilfe von Photomultipliern (PMTs) wird das Licht detektiert. Auch diese Teleskope sind von einer Veto-Umhüllung umgeben.[68]

Erdgebundene Gammaastronomie Die erdgebundenen Experimente beruhen auf der Entwicklung einer elektromagnetischen Kaskade in der Atmosphäre. Trifft ein Photon mit einer Energie, die größer als 10 MeV ist, auf die Atmosphäre, dann produziert es typischerweise in einer Höhe von ca. 20 km ein Elektron-Positron-Paar. Diese Paarproduktion erfolgt in Vorwärtsrichtung. In dem typischen Energiebereich für erdgebundene Gammaastronomie $E > 10 \text{ GeV}$ wechselwirkt dieses Paar mit den Molekülen der Luft. Dabei entstehen in Bremsstrahlungsprozessen Photonen, die wiederum weitere Paare produzieren. So entsteht eine elektromagnetische Kaskade in der Atmosphäre. Diese Kaskade wächst so lange bis Ionisations- und Strahlungsverluste gleich groß sind und das Schauermaximum erreicht ist. Danach stirbt der Schauer langsam aus. Begleitet wird der Schauer von Cherenkovphotonen. Diese entstehen sobald die Energie der Sekundärelektronen oberhalb der Schwelle für Cherenkovemission liegt. Photonen werden in Vorwärtsrichtung unter dem sogenannten Cherenkovwinkel emittiert. Dieser Winkel beträgt auf Meereshöhe ca. $1,3^\circ$.[68]

Nur ein kleiner Teil der Primärteilchenenergie ($< 10^{-6}$) geht in die Emission des sichtbaren Cherenkovlichts. Allerdings ist dieses Licht mit Hilfe eines Spiegels und PMTs einfach zu detektieren. Weiterhin ist es möglich aus dem Cherenkovlicht Rückschlüsse auf den Ursprung, die Energie, sowie die Ankunftszeit des Primärteilchens zu ziehen. Bei den für Cherenkovteleskope interessanten Energien ($E \gtrsim 100 \text{ GeV}$)

verhält sich die Atmosphäre wie ein großes Kalorimeter und die Helligkeit des Cherenkovlichtkegels am Boden bietet ein gutes Maß für die Primärteilchenenergie. Das Cherenkovlicht kommt innerhalb einiger Nanosekunden am Detektor an. Bei einem Schauer, der von einem Primärteilchen mit der Energie $E = 1 \text{ TeV}$ ausgelöst wurde, kommen 25% des Lichts von Schauerteilchen in Höhe der ersten Wechselwirkung. Der Hauptanteil (ca. 50%) wird von einem Zylinder mit der Länge 4 km im Schauermaximum emittiert. Dieses Licht stellt ein gutes Maß für die totale Energie des Schauers dar. Die letzten 25% werden von Schauerteilchen unterhalb von 6 km emittiert.[68]

Die Grundidee der atmosphärischen Cherenkovtechnik ist einfach. Es wird ein Lichtdetektor benötigt, der sich in der Fokalebene eines Spiegels befindet, sowie schnelle Ausleseelektronik. Schon mit solch einem einfachen Detektor mit einer Lichtsammelfläche von 2 m^2 und einer Integrationszeit von 10 ns ist es möglich, ein Lichtsignal eines Schauers mit Primärteilchenergie 1 TeV zu detektieren. Allerdings ist die Unterscheidung zwischen einem elektromagnetischen Schauer, ausgelöst von Gammastrahlung, und einem Schauer ausgelöst von kosmischer Strahlung schwierig.[68]

Die Ionen und Protonen der kosmischen Strahlung wechselwirken ebenfalls in der Atmosphäre und lösen hadronische Kaskaden aus, die den elektromagnetischen Kaskaden sehr ähnlich sind. Auch Teilchen dieser hadronischen Schauer emittieren Cherenkovlicht, sodass Teleskope der ersten Generation diese Schauer nicht voneinander unterscheiden konnten. Außerdem ist zu beachten, dass der hadronische Untergrund ca. 10^3 mal so groß ist. Von Vorteil ist, dass sich hadronische Schauer von elektromagnetischen in einigen Eigenschaften leicht unterscheiden. So besitzen diese beiden Arten von Schauern unterschiedliche laterale Verteilungen, zeitliche Verteilungen, ein anderes Lichtspektrum, sowie eine andere Winkelverteilung.[68]

Um einen Schauer detektieren zu können, sind einige Eigenschaften des Detektors bzw. der Umgebung von großer Bedeutung. Die Atmosphäre spielt eine grundlegende Rolle, stellt den Beobachter aber vor Herausforderungen. Aufgrund von Wolken ist die Transmission variabel, sodass die Bewölkung, sowie das Wetter überwacht werden müssen. Das Mond- und Sternenlicht, sowie Menschen-gemachte Lichtquellen sollten ebenfalls minimiert werden, um gute Beobachtungsbedingungen zu erreichen. Das geschieht durch eine gute Standortwahl. Detektor-spezifische Eigenschaften wie eine möglichst große Lichtsammelfläche werden durch segmentierte Spiegel erreicht und Lichtdetektoren, die sensiv für Cherenkovlicht sind, werden in Form von PMTs bereitgestellt.[68]

Wird eine größere Anzahl an PMTs in der fokalen Ebene eines großen Reflektors angeordnet, stellen diese eine Kamera dar. Die Cherenkovphotonen des Schauers, die am Spiegel reflektiert werden, erzeugen dann in der Kamera ein Bild, welches parametrisiert und analysiert werden kann. Anhand der Bildparameter und anhand

der Orientierung zum Kamerazentrum ist es mit dieser Technik möglich, elektromagnetische Schauer von hadronischen zu unterscheiden. Diese Technik wird Imaging Air Cherenkov (IACT)-Technik genannt und von vielen großen Teleskopen bzw. Teleskoparrays wie den in dieser Arbeit betrachteten MAGIC-Teleskopen [8], aber auch von HESS [26] und VERITAS [69] benutzt.[68]

Im Gegensatz zur IACT-Technik existieren noch andere bodengebundene Teleskope, die Gammaastronomie betreiben. Erreicht ein Primärteilchen Energien, die größer sind als 10 TeV, erreichen genug Teilchen des Schauers den Boden, sodass der Schauer direkt detektiert und Energie sowie Ankunftszeit rekonstruiert werden können. Für diese Technik werden viele Teilchendetektoren auf einer großen Fläche verteilt. Außerdem bietet diese Art der Detektion den Vorteil, dass eine durchgängige Observation möglich ist. Als Beispiel dienen der MILAGRO-Detektor [3] in New Mexico, USA, sowie sein Nachfolgeexperiment HAWC [23]. MILAGRO bestand aus ca. 700 Lichtdetektoren in einem See und ca. 200, die außen herum platziert wurden. Auch das Pierre-Auger-Experiment [62], welches sich in der südamerikanischen Pampa befindet ist ein gutes Beispiel. Dieses Experiment beinhaltet ca. 1600 Oberflächendetektoren, die sich in Wassertanks befinden und 27 Fluoreszenzteleskope. Mit diesen beiden Teleskoparten können die Eigenschaften der detektierten Schauer genau bestimmt werden.

2.5 Aktive galaktische Kerne

Aktive galaktische Kerne produzieren sehr hohe Luminositäten in einem sehr konzentrierten Volumen. Die Prozesse, die dazu führen, sind vermutlich andere Prozesse als die Kernfusion in “normalen Sternen”. Wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist, befindet sich im Zentrum einer AGN ein supermassives Schwarzes Loch, welches von einer Akkretionsscheibe umgeben ist. Die Materie dieser Scheibe wird vom Schwarzen Loch akkretiert und verliert dabei Drehimpuls. Von der Akkretionsscheibe wird UV-Licht und manchmal auch schwache Röntgenstrahlung emittiert. Auch harte Röntgenstrahlung wird sehr nahe am Schwarzen Loch produziert. Durch die Rotation kann das Schwarze Loch Energie emittieren. Umhüllt sind das zentrale Schwarze Loch und die Akkretionsscheibe von einem Staubtorus. Im Potential des Schwarzen Lochs befinden sich Gaswolken, die sich schnell bewegen und dabei starke optische und ultraviolette Emissionslinien produzieren, die abhängig von der Sichtlinie und der Lage des Staubtorus beobachtet werden können. Diese Wolken werden “Broad Line Clouds” genannt. Außerhalb des Torus sind Gaswolken, die sich langsamer bewegen und schmale Emissionslinien produzieren. Eine Emission von energiereichen Teilchen erfolgt in Form zweier Jets, die in entgegengesetzte Richtungen emittiert werden. In diesen Jets strömt das Plasma mit hohen Geschwindigkeiten und strahlt

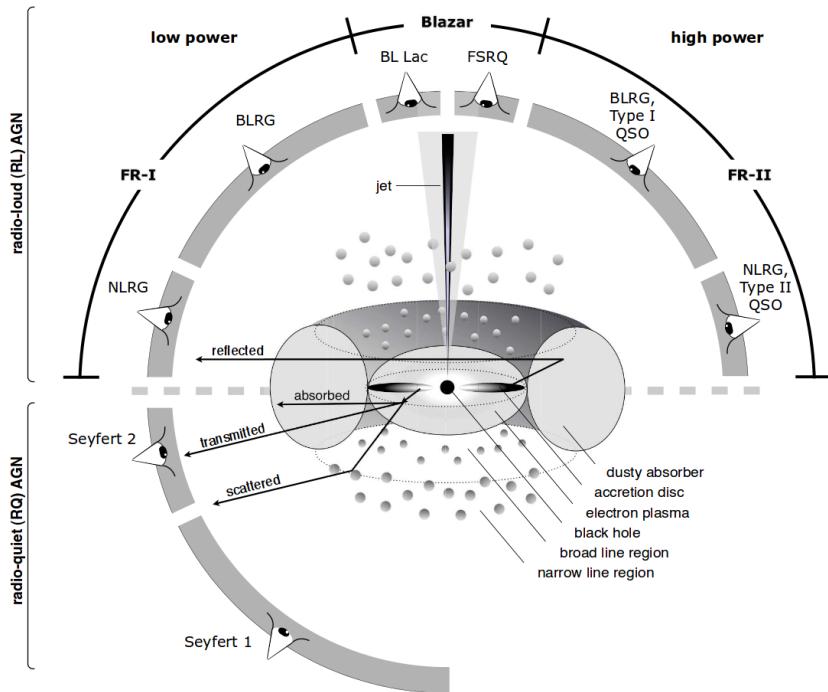


Abbildung 2.3: Schema zur Klassifikation von AGN (siehe Unterabschnitt 2.5.1). Abhängig von der Radioemission und dem Blickwinkel werden die einzelnen AGN-Typen voneinander unterschieden. Im Inneren einer AGN befindet sich ein supermassives Schwarzes Loch, welches von einer Akretionsscheibe umgeben ist. Diese wird wiederum von einem Staubtorus umschlossen. Aus dem Zentrum werden zwei entgegengesetzte Jets emittiert.[14]

relativistisch in Vorwärtsrichtung. Die Achsensymmetrie dieses Modells impliziert, dass AGNs abhängig von der Lage zum Beobachter unterschiedlich aussehen und sich unterschiedlich verhalten. Anhand dieser Eigenschaften können AGNs klassifiziert werden (siehe Unterabschnitt 2.5.1). In der Erforschung von AGNs sind fundamentale Eigenschaften wie die Masse des Schwarzen Lochs oder aber der Spin von Bedeutung. Mit Hilfe dieser Eigenschaften können eventuell die Materieakkretion oder die Jetbildung verstanden werden.[65]

2.5.1 Klassifikation

Der Quelltyp der AGN umfasst einen Zoo an unterschiedlichen Subtypen mit verschiedenen Namen und Eigenschaften. Wie Abbildung 2.3 zeigt, werden nach Urry und Padovani [65] AGNs in radiolaute, AGNs mit Radioemission, und radioleise Vertreter, AGNs ohne Radioemission, unterteilt. Des Weiteren erfolgt eine Unterscheidung in Typ I mit breiten Emissionslinien und Typ II mit schmalen Emissionslinien. Innerhalb dieser Gruppen erfolgt eine weitere Unterteilung anhand der Luminosität. Insgesamt sind ca. 15-20% [65] der AGNs radiolaut. Mit wenigen Ausnahmen sind die Spektren im optischen und ultravioletten, sowie im infraroten Bereich bis zu weicher Röntgenstrahlung bei allen AGNs ähnlich. Die Radioemission hängt vermutlich mit dem Host-Galaxie-Typ oder dem Spin des Schwarzen Lochs zusammen, womit die Produktion von Jets erklärt werden kann. Basierend auf den optischen und ultravioletten Emissionslinien können AGNs in drei Typen eingeteilt werden [65]:

- Typ 1 beinhaltet AGNs mit breiten Emissionslinien, die von heißem Gas, welches sich mit hoher Geschwindigkeit bewegt, stammen. Die radioleisen Vertreter dieser Gruppe werden Seyfert 1 genannt und sind gekennzeichnet durch ihre geringe Luminosität, weswegen sie nur in kurzen Entfernung detektiert werden können. Die radiolauten Vertreter werden zum einen Broad Line Radio Galaxy (BLRG) genannt und sind ebenfalls durch niedrige Luminosität gekennzeichnet. Zum anderen gibt es die radiolauten Quasare mit hoher Luminosität, hier Quasi-Stellar Object (QSO), genannt.
- Typ 2 beinhaltet die AGNs mit schmalen Emissionslinien, die von langsamem Gas emittiert werden, bzw. die Sichtlinie auf die Emission schneller Gasteilchen wird durch den Staubtorus blockiert. Die radioleisen Vertreter dieses Typs werden Seyfert 2 genannt und zeichnen sich durch geringe Luminosität aus. Die radiolauten AGNs werden Narrow Line Radio Galaxy (NLRG) bezeichnet und Fanaroff und Riley haben diese wiederum unterteilt in zwei Subtypen. Diese sind zum einen die Fanaroff & Riley I (FR I), welche von geringer Luminosität geprägt sind und deren symmetrische Radiojets in der

Intensität nach außen hin abnehmen. Zum anderen gibt es noch den Fanaroff & Riley II-Typ, dessen Jets gebündelt sind und in Radiolobes enden, die heiße Dichteschwankungen, genannt Hot Spots, enthalten.

- Der Typ 0 wird im Allgemeinen als Blazar bezeichnet und ist charakterisiert durch den sehr kleinen Winkel zwischen Jet und Beobachter. Dieser Typ beinhaltet den Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ), der sehr variabel ist und breite Emissionslinien wie Typ I-Objekte besitzt. Außerdem gehören die BL-Lac-Objekte zu dieser Klasse. Diese haben keine starken Emissionslinien. Die analysierte Quelle Mrk 421 gehört zum Typ BL-Lac. BL-Lacs können in allen Wellenlängen beobachtet werden, d.h. über die volle Breite des elektromagnetischen Spektrums, was 19 Dekaden in der Energie entspricht. Sie zeichnen sich durch ihre hohe Luminosität im Gammawellenlängenbereich aus und besitzen eine hohe Variabilität in allen Wellenlängen. Außerdem konnten starke Korrelationen zwischen den Wellenlängen beobachtet werden.

2.5.2 Spektrale Energieverteilung

Eine spektrale Energieverteilung (SED: Spectral Energy Distribution) beschreibt die Emission einer Quelle in Abhängigkeit von den verschiedenen Wellenlängen. Die SEDs von Blazaren besitzen eine charakteristische Struktur mit zwei Höckern. Bei sehr hochenergetischen Blazaren, wie z.B. Mrk 421 und Mrk 501, befindet sich ein Peak bei Röntgenenergien und ein anderer Peak bei (10-250) GeV. Beide Peaks sind vergleichbar hoch, was charakteristisch für diesen Quelltyp ist.[68]

2.5.3 Variabilität

Blazare besitzen charakteristische Variabilitäten zwischen einigen Minuten und Jahren. Die erste Detektion eines Flares, also eines außergewöhnlichen Flussanstiegs, in der VHE-Emission einer AGN fand 1994 statt: Whipple beobachtete einen Flussanstieg von Mrk 421 auf den zehnfachen Wert.[68][27]

2.5.4 Multiwellenlängenbeobachtungen

Die simultane Beobachtung einer Quelle mit mehreren Teleskopen zur genauen Aufnahme der Aktivität in allen Wellenlängen wird Multiwellenlängenbeobachtung (MWL-Beobachtung) genannt. Diese Beobachtungen dienen u.a. dazu, Rückschlüsse

auf die Beschleunigungsmechanismen in den Quellen zu ziehen. Es können Korrelationen der Flüsse in verschiedenen Wellenlängen untersucht werden. Die erste MWL-Kampagne wurde 1995 organisiert; Ziel war die Quelle Mrk 421.[68]

2.5.5 Modelle für hochenergetische Gammaemission

Es existieren grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze um die hochenergetische Gammaemission zu erklären. Dies sind zum einen leptonische Modelle und zum anderen hadronische Modelle. Im Folgenden werden zuerst zwei mögliche leptonische Modelle und anschließend ein hadronisches Modell vorgestellt.

Leptonische Modelle

Die spektrale Energieverteilung (SED) gibt Hinweise auf die Strahlungsmechanismen, die sich im Inneren eines Jets ereignen können. Im Jet werden Elektronen durch Schocks beschleunigt. Diese Schocks entstehen durch Materieansammlungen, die den Jet mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen. Die beschleunigten Elektronen verlieren ihre Energie durch Synchrotronstrahlung im Magnetfeld des Jets und produzieren den Synchrotronpeak in der SED. Die Position dieses Peaks wird durch die Effizienz der Schockbeschleunigung und der Cooling-Prozesse, d.h. der Energieverluste bestimmt. Im Folgenden werden zwei verschiedene leptonische Modelle vorgestellt.[68]

- Im Synchrotron-Selbst-Compton-Modell (SSC-Modell) werden die in Synchrotron-Prozessen abgestrahlten Photonen zu hohen Energien beschleunigt, die nahe an den Elektronenergien liegen. Im Thomson-Regime können Photonenergien von $E_\gamma \approx \gamma^2 h\nu$ und im Klein-Nishina-Regime $E_\gamma \approx \gamma m_e c^2$ erreicht werden.[68]
- Im External-Radiation-Compton-Modell (ERC-Modell) werden sogenannte Saat-Photonen benötigt, die dann eine inverse Comptonstreuung erfahren. Diese Saat-Photonen werden außerhalb des Jets produziert, z.B. in der Akretionsscheibe.[68]

Hadronische Modelle

Als Beispiel für ein hadronisches Modell wird im Folgenden das Proton-Modell vorgestellt. In dem Proton-Modell wird die Gammastrahlung in Proton-induzierten

Kaskaden produziert. Ziel dieser Modelle ist es, zwei Phänomene gleichzeitig zu erklären: Dies sind zum einen die Produktion von VHE-Gammastrahlung in AGNs und zum anderen der Ursprung der extragalaktischen kosmischen Strahlung mit Energien von bis zu 10^{20} eV. Die sehr hochenergetische Gammastrahlung entsteht durch beschleunigte Protonen im Jet mit Energien von bis zu 10^{18} eV, die dann mit niedrigerenergetischeren Photonen wechselwirken und Pionen produzieren. Die erzeugten Pionen zerfallen und lösen eine Kaskade aus. In manchen Modellen wird die Gammastrahlung als Synchrotronstrahlung von sehr energiereichen Protonen emittiert. Das Problem der Proton-Modelle ist, dass kurze Zeitvariabilitäten nicht erklärt werden können, da dafür ein sehr schnelles Cooling der Protonen nötig wäre. Durch Synchrotronstrahlung können die Protonen nicht schnell genug abgebremst werden. Kollisionen mit Photonen oder Ionen im Jet wären eine bessere Erklärung. In jedem Fall können hadronische Modelle erst dann verifiziert werden, wenn ein Neutrinostrahlung, resultierend aus dem Pion-Zerfall, detektiert wird.[68]

2.6 Markarian 421

Die AGN Markarian 421 (Mrk 421) ($\text{RA}=11^h 4^m 27,31^s$, $\text{Dec}=38^\circ 12' 31,8''$) wurde 1992 von Whipple als Gammastrahlungsquelle entdeckt [55]. Sie ist eine der hellsten extragalaktischen Quellen im Röntgen- und TeV-Licht und wird dem Typ BL-Lac zugeordnet. Sie besitzt eine Rotverschiebung von $z = 0,0031$ und ist damit die von uns nächste extragalaktische Quelle im TeV-Energiebereich.[47]

Abbildung 2.4 zeigt die spektrale Energieverteilung von Mrk 421, mit Daten einer MWL-Kampagne zwischen dem 19.1.2009 und dem 1.6.2009. Es wurde der Energiebereich von Radiowellen bis sehr hochenergetischer Gammastrahlung einbezogen. Die für BL-Lacs charakteristische doppelhöckrige Struktur ist zu sehen mit Peaks bei keV-Energien und bei (GeV-TeV)-Energien. Die SED kann mit Hilfe von SSC-Modellen beschrieben werden, allerdings sind hadronische Modelle trotzdem nicht auszuschließen.

Abbildung 2.5 zeigt eine Lichtkurve von Mrk 421, die zwischen 1992 und 2009 aufgenommen wurde. Deutlich sind die Unterschiede zwischen Zeiten niedriger und hoher Aktivität zu erkennen. Das Jahr 2001 ist geprägt von hoher Aktivität und der Fluss liegt zwischendurch bei mehr als dem zehnfachen Fluss von Crab.[63] Die Kurzzeitvariabilität dieser Quelle ist ebenfalls so ausgeprägt, dass eine Verdopplung des Fluxes innerhalb von 15 min beobachtet werden konnte.[68]

Mit Hilfe von MWL-Kampagnen konnten sowohl während aktiver als auch während nicht aktiver Zeiten Korrelationen zwischen der Röntgen- und Gammastrahlungsemision gefunden werden. Aus diesen Multiwellenlängenbeobachtungen wird

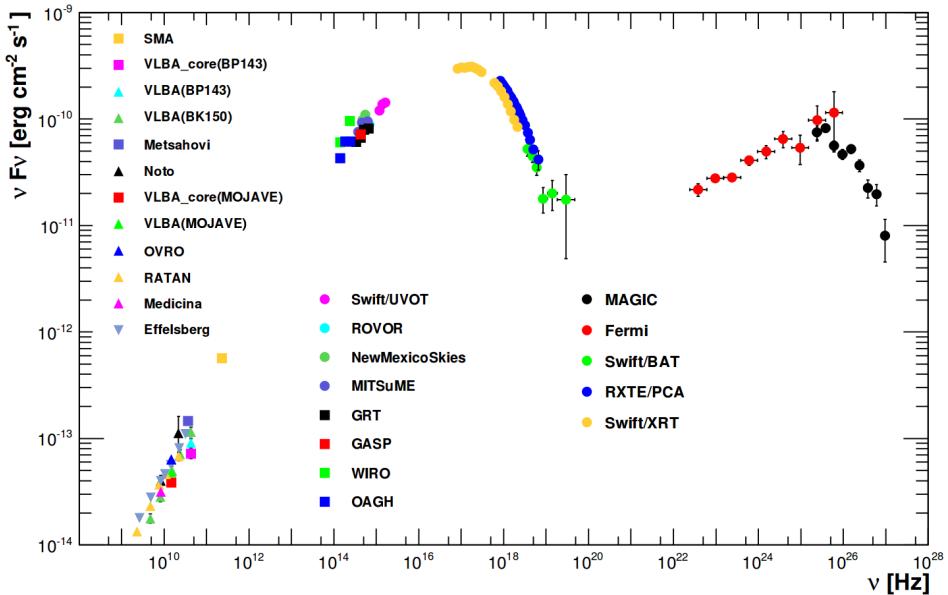


Abbildung 2.4: Die Abbildung zeigt die spektrale Energieverteilung von Mrk 421. Die für Blazare typische doppelhöckrige Struktur ist erkennbar. Des Weiteren ist zu sehen, dass das Maximum des niederenergetischen und des hochenergetischen Höckers einen ähnlichen Fluss aufweist.[2]

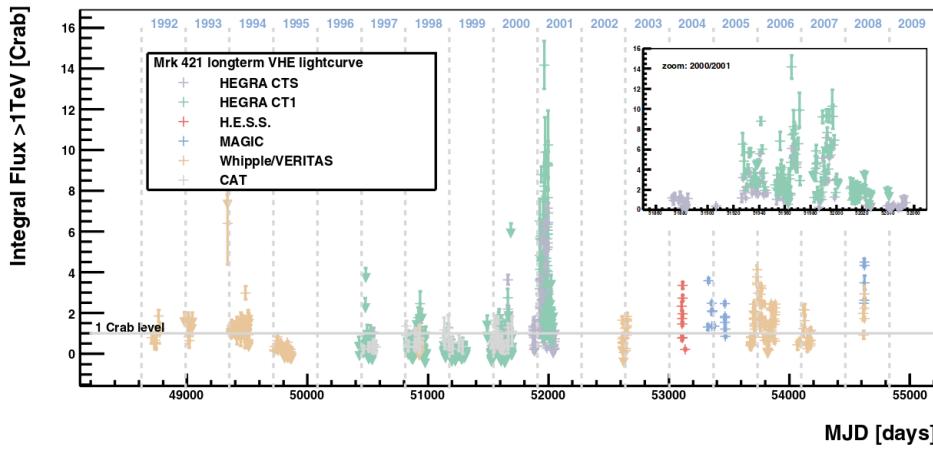


Abbildung 2.5: Die Abbildung zeigt eine Lichtkurve von Mrk 421, die zwischen 1992 und 2009 aufgenommen wurde. Die Variabilität dieser Quelle ist deutlich zu erkennen, wobei 2001 die größte Aktivität herrschte.[63]

2 Astroteilchenphysik

geschlossen, dass mit Hilfe eines leptonischen Modells die Emission der Quelle gut beschrieben werden kann.[47]

3 Monte-Carlo-Simulation

Eines der Ziele in der Astroteilchenphysik ist es, Aussagen über die Energiespektren von astrophysikalischen Quellen zu treffen.

In dieser Arbeit werden Daten analysiert, die von den beiden MAGIC-Teleskopen [8] aufgenommen wurden, die in Abschnitt 3.1 kurz beschrieben werden.

Aufgrund einer fehlenden Gamma-Kalibrationsquelle sind in der Datenanalyse Monte-Carlo-(MC)-Simulationsdaten von grundlegender Bedeutung. Für die Rekonstruktion eines Energiespektrums einer Gamma-Quelle müssen zunächst Signal-Ereignisse, welche aus der Quelle stammen, von den Untergrund-Ereignissen getrennt werden. Hierbei ist das Verhältnis von Signal- zu Untergrund-Ereignissen etwa 1:1000 [68], was eine Herausforderung darstellt. Die Trennung geschieht heutzutage mit Klassifikationsalgorithmen, die auf wohlbekannten Beispieldaten, den MC-Simulationsdaten und ausgewählten Untergrunddaten, trainiert werden. Auch für die Methode der Entfaltung des Energiespektrums, die in Abschnitt 4.3 beschrieben wird, werden MC-Daten benötigt.

Die gesamte Produktion der Gamma-MC-Simulationsdaten für das MAGIC-Experiment wurde im Rahmen dieser Doktorarbeit durchgeführt und wird in diesem Kapitel detailliert beschrieben.

Zunächst wird ein Einblick in die Programme gegeben, die in der MAGIC-MC-Simulationskette genutzt werden. Angefangen mit der Simulation der Luftschauder mit *CORSIKA* [34] (Abschnitt 3.2) über die Reflektor-Simulation [10] (Abschnitt 3.3) wird bis hin zur Kamera-Simulation [16] (Abschnitt 3.4) in diesem Kapitel jeder Simulationsschritt beschrieben. Dabei bauen die Simulationsschritte aufeinander auf, sodass jedes simulierte *CORSIKA*-Ereignis alle Simulations- und Kalibrationsschritte durchläuft.

Für die Simulationsprogramme (*CORSIKA*, *Reflector* und *Camera*) wird jeweils eine Übersicht über einige wichtige Eingabeparameter gegeben. Diese Eingabeparameter werden den Programmen als Textdateien, sogenannten Inputcards, übergeben.

Die anschließenden Schritte der Kalibrationskette (*Sorcerer*, *Star* und *Superstar*) von der Signalextraktion und Ankunftszeitbestimmung bis zur Berechnung der

Stereo-Bildparameter der Ereignisse werden in Abschnitt 3.5 - Abschnitt 3.7 beschrieben. Diese Programme sind alle in der Standard-MAGIC-Software *MARS* (MAGIC Analysis and Reconstruction Software)[49] enthalten. Die Kalibration wird im MAGIC-Datenzentrum ebenso mit den real aufgenommenen Daten durchgeführt, sodass am Ende alle Daten (reale und simulierte) im gleichen Format vorliegen.

Nachdem alle Programme zur Simulation und Kalibration erklärt worden sind, wird auf die automatische Produktionsstruktur auf dem Rechencluster LiDO an der TU Dortmund eingegangen (Abschnitt 3.8).

3.1 Die MAGIC-Teleskope

Die MAGIC-Teleskope bestehen aus zwei Imaging Air Cherenkov Telescopes (IACT) mit einem Spiegeldurchmesser von 17 m, die sich auf dem Roque de los Muchachos auf einer Höhe von ca. 2200 m auf der kanarischen Insel La Palma befinden (siehe Abbildung 3.1). Diese Teleskope werden im Folgenden MAGIC-I und MAGIC-II genannt.

Das Teleskop MAGIC-I ist im Jahr 2004 in Betrieb gegangen und MAGIC-II fünf Jahre später, im Jahr 2009. In den Jahren 2011/2012 wurde ein großes Upgrade des Systems durchgeführt und die Hardware von MAGIC-I durch neuere ersetzt.

Die beiden großen Ziele des Experimentes sind das Erreichen einer niedrigen Energieschwelle und eine schnelle Ausrichtung der Teleskope auf eine transiente Quelle. Hierbei wird mit Hilfe der beiden Teleskope eine Energieschwelle von 50 GeV-60 GeV vor dem Upgrade, welches 2012 stattfand, erreicht [8]. Die niedrige Energieschwelle wird durch die große Spiegelfläche, die große Pixelanzahl in der Kamera und die schnelle Ausleseelektronik erreicht. Durch die leichte Kohlefaser-Struktur des Gerüsts und die automatische Spiegelausrichtung ist es möglich, das Teleskop schnell und genau auf eine neue Quelle auszurichten. Diese schnelle Ausrichtung dauert maximal ca. 25 s, wenn das komplette Teleskop um 180° im Azimuth rotiert. Für die Beobachtung von kurz auftauchenden Phänomenen wie Gamma Ray Bursts ist diese Fähigkeit wichtig.

Vor dem großen Kameraupgrade im Juni 2012 bestand die Kamera von MAGIC-I aus 577 hexagonal angeordneten Pixeln, unterteilt in 397 innere Pixel mit einem Durchmesser von 1 Zoll und 180 äußere Pixel mit einem Durchmesser von 2 Zoll. Die Kamera von MAGIC-II bestand aus 1039 Pixeln mit je 1 Zoll Durchmesser und einem totalen Gesichtsfeld von etwa 3,5°. Nach dem Upgrade im Juni 2012 haben beide Teleskope das MAGIC-II Kameradesign. [9]



Abbildung 3.1: Zu sehen sind die MAGIC-Teleskope auf dem Roque de los Muchachos. Im Vordergrund sind von links nach rechts, MAGIC-I, MAGIC-II und das Counting-Haus zu sehen.[67]

Im Zentrum der Spiegel befindet sich bei beiden Teleskopen die Calibration Box. Diese sendet sehr kurze Lichtpulse mit konstanter Intensität in Richtung der Kamera. Diese Lichtpulse dienen der Kalibration der einzelnen Pixel. Dies geschieht in den sogenannten Calibration Runs oder in den interleaved calibration runs, die während der Datennahme genommen werden.

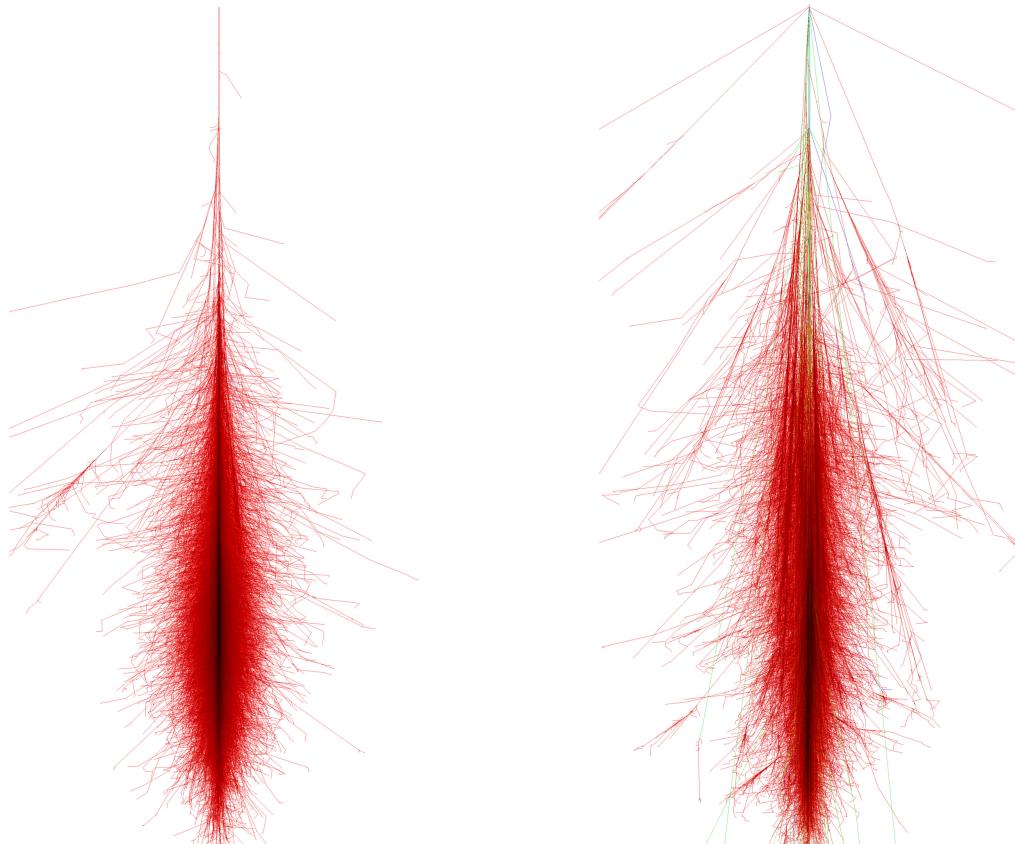
Das analoge Signal, welches aus den PMTs kommt, wird über optische Fasern zum Trigger und zum Readout im Counting-Haus geleitet. Vor dem Upgrade gab es verschiedene Readout-Systeme für MAGIC-I und MAGIC-II: Das Readout-System von MAGIC-I basierte auf dem MUX-FADC-Board, welches robust war und eine gute Performance liefert hat, allerdings teuer und unhandlich war. Das Readout-System von MAGIC-II basierte auf dem DRS2-Chip, welcher unter recht hohem Rauschen litt. Nach dem Upgrade wurden beide Auslesesysteme mit dem DRS4-Chip ausgestattet, welcher sich durch wenig Rauschen, wenig Crosstalk und eine sehr kurze Totzeit auszeichnet.[9]

Der Trigger wird in verschiedene Level unterteilt: Der Level 0-Trigger beinhaltet einen Schwellwert (Discriminator Threshold) für jeden Pixel, der überschritten werden muss, damit ein Ereignis weiterverarbeitet wird. Es folgt ein Nächste-Nachbarn-Trigger, welcher als Level 1-Trigger bezeichnet wird. Für Stereo-Beobachtungen müssen 3 nächste Nachbarpixel eines Pixels ebenfalls ein Signal detektiert haben, damit die Level 1-Triggerbedingung erfüllt ist.[48] Schließlich folgt noch der Stereo-Trigger, welcher die Ereignisse auswählt, die in beiden Teleskopen einen Trigger ausgelöst haben und ihren zeitlichen Abstand überprüft. Dadurch wird der Nachthimmeluntergrund [Night Sky Background (NSB)] unterdrückt.

3.2 Schauersimulation mit CORSIKA

Die Software *CORSIKA* [34] wurde am Forschungszentrum Karlsruhe ursprünglich für das KASCADE-Experiment entwickelt und wird heute in vielen Astroteilchenexperimenten eingesetzt. Mit *CORSIKA* werden ausgedehnte Luftschauder, welche von kosmischer Strahlung ausgelöst werden, simuliert.

Hierbei können verschiedene Primärteilchen wie Protonen, schwere Kerne oder Photonen als Primärteilchen simuliert werden. Diese Primärteilchen werden durch die Atmosphäre propagiert, wo sie Wechselwirkungen mit den Atomen der Luft eingehen und Schauer produzieren oder aber zerfallen. Die Ausbreitung der entstandenen Schauer werden dann bis hin zum Teleskop simuliert.



(a) Simulation eines Schauers mit einem 1 TeV-Photon als Primärteilchen.

(b) Simulation eines Schauers mit einem 1 TeV-Proton als Primärteilchen.

Abbildung 3.2: Es wurden mit Hilfe von *CORSIKA* Schauer simuliert, die von 1 TeV-Primärteilchen ausgelöst wurden. Die verschiedenen Farben zeigen die verschiedenen Teilchentypen. Der elektromagnetische Schauer hat verglichen mit dem hadronischen Schauer eine andere Struktur. Er ist kompakter und nicht so aufgefächert.[57]

In Abbildung 3.2 sind zwei Schauer für ein hochenergetisches Photon und Proton dargestellt: Es ist erkennbar, dass hadronische Schauer verglichen mit elektromagnetischen Schauern einen größeren Querschnitt haben und weniger kompakt sind.

In *CORSIKA* sind verschiedene Modelle für die hadronische Wechselwirkung bei hohen und niedrigen Energien implementiert. Für die MAGIC MC-Simulation werden QGSJET II für die hadronische Wechselwirkung bei hohen Energien und FLUKA für die Wechselwirkung bei niedrigen Energien genutzt. Elektromagnetische Prozesse werden durch das EGS4-Modell beschrieben. Außerdem erfolgt eine Simulation der Cherenkovphotonen, die von den geladenen Teilchen produziert werden und durch die Luft propagieren.

3.2.1 Mmc's

Eine speziell für das MAGIC-Teleskop adaptierte Version von *CORSIKA* wird in der Standardsimulation genutzt. In dieser Version wurde der Einfluss des Magnetfeldes vor der ersten Wechselwirkung auf das Primärteilchen vernachlässigt, um zu verhindern, dass es zu weit vom Teleskop abgelenkt wird. Außerdem ist die Simulation der Cherenkovwellenlänge eingebaut und alle Informationen über das Primärteilchen werden gespeichert.

3.2.2 Inputcards

Die Inputcard stellt das Kernstück der Simulation dar. Sie enthält Informationen über den Teleskopstandort, die simulierten Schauer und über das Magnetfeld am Standort.

Zunächst werden allgemeine Angaben zur Anzahl der simulierten Ereignisse gemacht. So erhält jeder *CORSIKA*-Run eine eigene Runnumber und die Anzahl der Schauer pro Run wird durch den Parameter **NSHOW** angegeben.

Außerdem erfolgen noch Einstellungen über die Eigenschaften der Schauer. Der Parameter **PRMPAR** gibt die Art des Primärteilchens an und **ERANGE** beschreibt den Energiebereich, in dem die Primärteilchen simuliert werden. Die Steigung des Energiespektrums wird mit dem Parameter **NSLOPE** eingestellt. Zusätzlich lassen sich Zenit- und Azimutbereich, in dem die Schauer simuliert werden durch **THETAP** und **PHIP** angeben.

Zudem werden in *CORSIKA* noch Standortangaben zur Geographie des Teleskopstandortes gemacht. So wird die Höhe über NN im Parameter **OBSLEV** angegeben

und eine Angabe über die horizontale, bzw. vertikale Komponente des Magnetfeldes im Parameter **MAGNET** festgelegt. Der Parameter **ATMOSPHERE** gibt an, welche Parametrisierung der Atmosphäre genutzt wird.[33]

Abgesehen von diesen allgemeinen Angaben gibt es in der Inputcard noch einige Parameter, die dediziert für die Simulation der Cherenkovphotonen sind. Der Wellenlängenbereich, in welchem Cherenkovphotonen simuliert werden, wird mit **CWAVLG** angegeben. Der Impact-Parameter gibt an, in welcher Entfernung (projiziert auf den Boden) der Schauer vom Teleskop auftreffen kann. Er wird innerhalb des Parameters **CSCAT** angegeben. Der Parameter **CERTEL** beinhaltet Standort und Größe der Teleskope, die man simuliert und mit der Option **CERFIL** wird angegeben, ob der Output über die Cherenkovphotonen in eine zusätzliche Datei geschrieben wird.

3.3 Simulation des Reflektors mit *Reflector*

Im Programm *Reflector*[10] wird vor allem der Reflektor simuliert, allerdings wurde das Programm noch um weitere Funktionen erweitert.

Mit *Reflector* wird zuerst die atmosphärische Absorption der Cherenkovstrahlung in der Luft simuliert. Dabei werden Rayleigh-Streuung, Mie-Streuung und die Absorption an Ozon simuliert. Nachfolgend wird mit Hilfe von Ray-Tracing simuliert, ob die Cherenkovphotonen die Spiegelfläche treffen. Für die auftreffenden Photonen wird die Absorption der Aluminium-, bzw. Glasspiegel berücksichtigt und die Photonen reflektiert. Nach der Reflexion am Spiegel wird nacheinander überprüft, ob die Photonen die Kamera treffen und letztendlich werden die Ankunftszeiten in der Kamera bestimmt.

3.3.1 Inputcards

Für diese Simulationsschritte werden bestimmte Inputparameter, bzw. Inputdateien benötigt, die die Eigenschaften des Reflektors beschreiben. Die wichtigsten werden im Folgenden kurz erklärt.

Teleskopstandort und Wobble-Position müssen angegeben werden.

Die folgenden Dateien beinhalten Daten zu den einzelnen Spiegeln der Teleskope. So wird pro Teleskop ein **mirror_definition_file** für die verschiedenen Spiegel (Glas und Aluminium) benötigt. In dieser Datei sind grundlegende Eigenschaften des Teleskops wie zum Beispiel der Abstand zwischen Spiegel und Kamera festgelegt. Des Weiteren wird der Kameraradius angegeben und die Anzahl der Spiegel

mit ihrer jeweiligen Größe. Für jeden Spiegel sind einzeln ihre jeweilige ID, der Fokalabstand, die Koordinaten des Spiegelmittelpunkts und der Normalenvektor des Spiegels aufgelistet.

Im sogenannten `reflectivity_file` sind die gemessenen Reflektivitäten der einzelnen Spiegel aufgelistet und das `axisdev_file` beschreibt die Abweichung der einzelnen Spiegel von der idealen Pointing Position. Die gemessene PSF für das Teleskop befindet sich im `measuredpsf_file`.

Letztendlich muss in *Reflector* noch das Atmosphärenmodell, welches für die Simulation benutzt werden soll, angegeben werden. Aktuell wird das `MagicWinter`-Modell benutzt. Eine Parametrisierung des Modells enthält abhängig von der Höhe die Dichte, die Dicke und den Brechungsindex der Atmosphärenschichten [32].

3.4 Simulation von Kamera und Elektronik mit *Camera*

Das Programm *Camera*[16] simuliert das komplette Verhalten der Kamera inklusive des Rauschens, das durch den Nachthimmeluntergrund entsteht. Es werden neben den Schauern auch der diffuse NSB und Sterne im Gesichtsfeld (Field of View [FoV]) simuliert. Des Weiteren simuliert *Camera* den Trigger und das elektronische Rauschen, sodass bei einer Änderung der Hardware der Kamera bzw. der Elektronik nicht die komplette MC-Kette noch einmal durchlaufen werden muss. In Abbildung 3.3 befindet sich das Kamerabild eines generierten Cherenkovereignisses mit einer Energie von 3,0 TeV.

Im Folgenden wird die Simulation beschrieben, die mit zwei möglichen vorbereiteten Schritten beginnt: der Simulation des NSB und der Sterne im FoV.

3.4.1 StarFieldAdder und StarResponse

Da MAGIC sensitiv für Sterne bis zur Magnitude 10 ist, tragen die Sterne zum Rauschen in der Kamera bei. Das Programm *StarFieldAdder* berechnet anhand eines Kataloges, welche Sterne im FoV sind und wie viele Photonen von diesen Sternen mit welcher Wellenlänge den Spiegel treffen. Der Output wird im *CORSIKA*-Format geschrieben und muss von *Reflector* verarbeitet werden, bevor er von *Camera* benutzt werden kann. Eine Simulation der Sterne im FoV wird in der Standard-MC-Simulation nicht durchgeführt, da die MC-Daten für alle Quellen in einem bestimmten Zenitbereich benutzt werden sollen und nicht für jede Quelle eigene MC-Daten produziert werden.

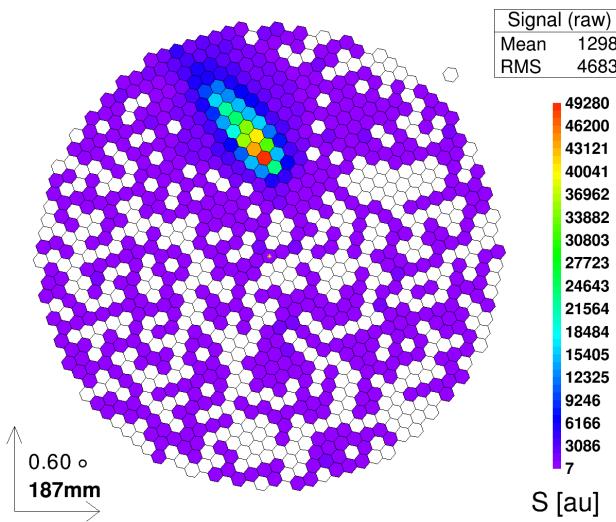


Abbildung 3.3: Darstellung eines simulierten Schauers mit einer Primärteilchenenergie von 3,0 TeV in der Kamera. Die Farbskala zeigt den simulierten Photoneninhalt in den einzelnen Pixeln in beliebigen Einheiten.

Um die Simulation zu beschleunigen und damit nicht für jedes Ereignis der diffuse NSB neu berechnet werden muss, wird mit *StarResponse* eine NSB-Datenbank generiert und daraus das NSB-Rauschen berechnet, welches zusammen mit dem Cherenkovphotonensignal zum Trigger gelangt.

3.4.2 Simulation von Kamera und Elektronik

Nachdem alle Parameter aus der Inputcard eingelesen worden sind und für jeden Pixel individuell NSB simuliert wurde, erfolgt die eigentliche Verarbeitung der zuvor simulierten *Reflector*-Daten. Die Photonen aus den Schauern werden eingelesen und für jedes Photon werden folgende Werte einzeln bestimmt:

- Pixelization: In welchem Pixel kommt das Photon an.
- PhE-Produktion: Unter Berücksichtigung der wellenlängenabhängigen Quanteneffizienz jedes Photomultiplier Tubes (PMT) und den sich darauf befindenden Lichtleiter (Winston Cones) wird entschieden, ob ein Photoelektron erzeugt wird.
- Channel Response: Für jedes Photoelektron, was die Photokathode verlässt, wird das Analogsignal des PMTs simuliert.

Danach werden die Signale und Ankunftszeiten aller Photonen eines Pixel superponiert. Weiterhin wird die Antwort des Triggers und FADC Systems berechnet und elektronisches Rauschen hinzugefügt. Das geschieht für alle Pixel und dadurch kann das analoge Signal rekonstruiert werden. Dann wird durch Subtraktion der Baseline die AC Kopplung simuliert, die zwischen dem PMT Output und dem Signal anliegt, welches in den Discriminator Trigger geht. Daraufhin erfolgt die Simulation des Triggers. Es wird überprüft, ob das analoge Signal eine bestimmte Diskriminator-Schwelle überschreitet. Ist dies der Fall, wird ein digitales Output-Signal simuliert. Nun wird der Level 1-Trigger simuliert. Ob ein Ereignis triggert, beruht auf seiner Topologie und der Multiplizität. Dafür wird eine Nächste-Nachbarn-Bedingung überprüft, d.h. die minimale Anzahl an Pixeln, die einen bestimmten Photoneninhalt haben und ihre Verteilung in der Kamera. Falls diese Bedingungen erfüllt sind, wird ein Level 1-Trigger-Signal generiert und die Ausgabe des FADC Systems, welches die digitalisierte Form des analogen Signals ist, wird gespeichert. Damit ist die Kamera- und Elektroniksimulation für ein Ereignis abgeschlossen und das nächste Ereignis kann prozessiert werden.

3.4.3 Inputcard

Im Folgenden werden einige Parameter erklärt, die in der Inputcard von *Camera* enthalten sind. Wie in jeder Inputcard müssen die Pfade zu den zu prozessierenden *Reflector*-Dateien angegeben sein sowie ein Output-Pfad. Im Folgenden werden einige Dateien angegeben, die das Programm *Camera* benötigt:

- **qe_file:** In dieser Datei sind die Quanteneffizienz der PMTs als Funktion ihrer Wellenlänge angegeben.
- **lightcollection.dat:** Die Lichtkollektionseffizienz der Pixel als Funktion des Winkels zwischen Photontrajektorie nach der Reflexion am Spiegel und der Kameraebene sind in dieser Datei angegeben. In diesem Wert ist die Transmission des Plexiglasfensters der Kamera, die Reflektivität der Winston Cones (Lichtleiter) und die Kollektionseffizienz der Photoelektronen der ersten Dynode der PMTs enthalten.
- **star_field_file:** Diese Datei enthält die Sterne im FoV.

Zudem werden einige Parameter, die den NSB betreffen hier aufgeführt. Zunächst wird definiert, ob der NSB simuliert werden soll. Dies geschieht mit dem Befehl `nsb_on`, bzw. `nsb_off`. Des Weiteren muss der Pfad zur vorher generierten NSB Datenbank angegeben werden, was mit dem Parameter `nsb_directory` geschieht. Falls die äußeren (früher größeren) Pixel einen anderen Verstärkungsfaktor haben,

ist dort auch der Einfluss des NSB anders. Dies wird durch `nsb_dir_outer` angegeben.

Ein weiterer Parameter, der den NSB betrifft und zwei Werte beinhaltet, ist `nsb_mean`. Die erste Zahl gibt die Amplitude des NSB in Anzahl an Photoelektronen pro ns in einem inneren Pixel an. Wenn eine andere Geometrie (größere Spiegel oder größere Pixel) oder eine andere Kamera (andere Quanteneffizienz) simuliert werden soll, wird die Photoelektronenrate automatisch skaliert. Die zweite Zahl gibt an, wie groß die Anzahl der Photoelektronen eines Schauers minimal sein muss, damit NSB für diesen Schauer generiert wird. Die meisten Schauer produzieren wenige oder keine Photonen in der Kamera und werden ignoriert. Für alle Schauer mit weniger als 10 Cherenkovphotonen wird kein NSB produziert, da diese Schauer mit hoher Wahrscheinlichkeit auch nicht getriggert werden.

Der Parameter `mirror_fraction` gibt den Anteil der Spiegel an, der zur Reflexion des Lichts beiträgt. Mit Hilfe dieses Parameters können fehlende Spiegel in der Simulation berücksichtigt werden.

Der Parameter `ct_geom` gibt Aufschluss über die Kamera-Geometrie für jedes Teleskop und beinhaltet Anzahl, Größe und Position der Pixel.

Abgesehen von den oben beschriebenen Parametern gibt es noch zahlreiche weitere, die die Triggereinstellungen und die FADC-Einstellungen betreffen. Diese werden hier aber nicht weiter erläutert.

Nachdem die Verarbeitung der Ereignisse durch das Programm *Camera* abgeschlossen ist, ist die eigentliche Simulationskette beendet. Die simulierten Daten liegen im gleichen Format vor wie die real aufgenommenen Daten. Es erfolgt die gleiche Kalibration wie auch bei den echten Daten und die Einstellungen in den folgenden Programmen unterscheiden sich kaum noch.

3.5 Kalibration

Für die Kalibration ist das Programm *Sorcerer* zuständig. Dieses Programm ist Teil des *MARS*-Pakets. Ziel der Kalibration ist es, für jeden Pixel die Ladung in Photoelektronen und die Ankunftszeit der Photonen zu bestimmen. Dafür muss der Lichtpuls extrahiert und die Baseline subtrahiert werden. Die Baseline wird mit Hilfe von Pedestal-Ereignissen bestimmt. Dies sind Ereignisse mit zufälligem Trigger, welche keine Schauerpulse enthalten sollten [vgl. Abbildung 3.4]. Ziel der Kalibrations-Runs, d.h. Runs mit bekanntem Lichtpuls, ist es, die Konversionsfaktoren der einzelnen Pixel zu berechnen.

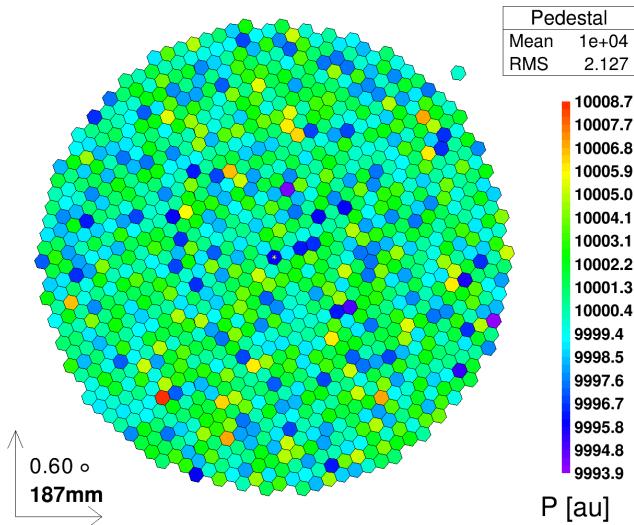


Abbildung 3.4: Darstellung eines simulierten Pedestal-Ereignisses in der Kamera. Dargestellt ist der Pixelinhalt in beliebigen Einheiten.

3.5.1 Signalextraktion

Ziel der Signalextraktion ist die Integration des Signalpulses in der Pulsregion ohne Baseline. Dafür gibt es verschiedene Methoden:

- Fixed Window: Mit dieser Methode wird an einer *a priori* bekannten Position, an der man den Cherenkovpuls erwartet, über eine bestimmte Länge integriert.
- Sliding Window: Bei dieser Methode wird das Integrationsfenster so lange verschoben, bis man den Bereich gefunden hat, in dem das Signal am höchsten ist und integriert dort.
- Spline: Diese Methode beruht auf der Sliding Window-Methode, allerdings erfolgt die Integration mit Hilfe eines Polynoms.

Aktuell wird in MAGIC die Sliding Window-Methode benutzt. Es wird in einem Bereich von 60 time slices nach dem Pulse gesucht und dann über sechs time slices integriert (3 ns).

Nachdem man nun das Signal extrahiert hat, wird es noch von “readout counts” in Photoelektronen umgerechnet.

3.5.2 Ankunftszeitbestimmung

Die Zeitinformationen über die Pulse sind in time slices gespeichert, wobei eine time slice bei einer Sampling Frequenz von 2 GHz 0,5 ns lang ist. Die Ankunftszeit des Pulses wird als mittlere time slice des integrierten Fensters berechnet und mit enthaltenen Signal gewichtet:

$$t_{arrival} = \frac{\sum i s_i}{\sum s_i}, \quad (3.1)$$

mit i : time slice Nummer, s_i : Signal in slice i und der Summierung über sechs slices als Integrationsfenster.

Eine typische Verteilung der Ankunftszeiten für den Cherenkovschauer aus Abbildung 3.3 in der Kamera ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Es ist zu sehen, dass die Ankunftszeiten für die Pixel, die den Schauer beinhalten, gleich sind. Die übrigen Pixel haben zufällig verteilte Ankunftszeiten.

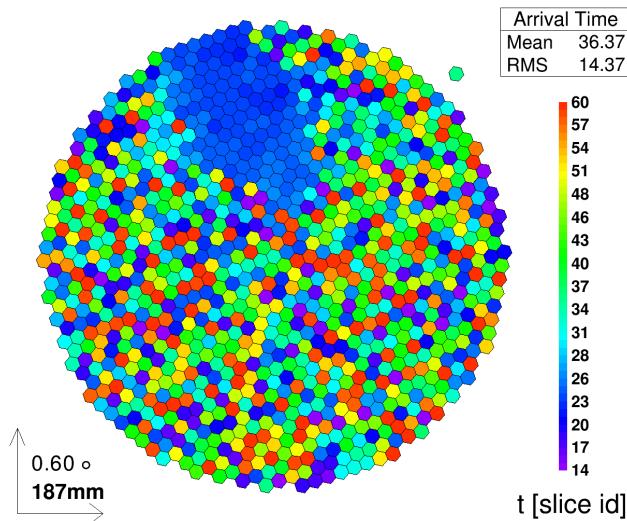


Abbildung 3.5: Darstellung der Ankunftszeiten eines Schauers in der Kamera. Dargestellt sind die Ankunftszeiten in time slices. Die Pixel, die zum Schauer gehören, weisen ähnliche Ankunftszeiten auf, während die übrigen Pixel zufällig verteilte Werte für die Ankunftszeit zeigen.

3.6 Star - Bildbereinigung und Bildparametrisierung

Das Programm *Star* ist genauso wie *Sorcerer* Teil des *MARS*-Pakets und übernimmt Bildbereinigung und Bildparametrisierung. Im Folgenden werden diese beiden Schritte näher erläutert.

3.6.1 Bildbereinigung

Wird ein Ereignis getriggert, werden die Signale der einzelnen Pixel gespeichert. Sowohl NSB als auch elektronisches Rauschen sind dann noch in dem Ereignisbild enthalten (siehe Abbildung 3.3). Ziel der Bildbereinigung ist es, das Bild von allem Untergrund zu bereinigen, sodass nur noch das Signal des eigentlichen Schauers übrig bleibt, damit eine robuste und stabile Parametrisierung dieses Schauerbildes durchgeführt werden kann. Einerseits können Pixel, die nicht zum eigentlichen Schauer gehören und das Image Cleaning überleben, zu einer falschen Rekonstruktion führen, andererseits ist es zu vermeiden, dass zu viele Pixel im Cleaning wegfallen. Dies führt zu einem Signalverlust, welcher ebenfalls zu einer schlechteren Rekonstruktion führt. Diese komplexe Problemstellung erfordert das Anwenden von fortschrittlichen Algorithmen.

Das Programm *Star* übernimmt die Bildbereinigung und die Parametrisierung des Schauerbildes.

Der einfachste und älteste Algorithmus ist das "Absolute Image Cleaning". Dabei wird nur die Photonenladung in den einzelnen Pixeln benutzt. Es werden zwei Schwellwerte für die Kern- (Q_{Core}) und die Nachbar-Pixel ($Q_{boundary}$) definiert. Nun werden alle Pixel mit einer Photonenladung, die größer als Q_{Core} ist, ausgewählt. Ein Pixel ist dann ein Kernpixel, wenn er noch einen Nachbarn hat, welcher ebenfalls eine Photonenladung besitzt, die dieses Limit überschreitet. Im zweiten Schritt werden alle Pixel mit direkten Nachbarn, die den vorherigen Schritt überstanden haben und eine Ladung größer als $Q_{boundary}$ haben, als Nachbar-Pixel markiert. Alle anderen Pixel werden nicht gewertet. Dieser Bildbereinigungsalgorithmus benutzt keine Zeitinformation und es wird damit keine niedrige Energieschwelle erreicht. Die verschiedenen Rauschlevel zwischen den Pixeln werden auch nicht berücksichtigt.

Eine Weiterentwicklung dieses Algorithmus, welcher auch die Zeitinformationen benutzt, ist das "Time Constrained Absolute Image Cleaning". Es funktioniert so wie das "Absolute Image Cleaning", allerdings wird die Ankunftszeit der Photonen zusätzlich berücksichtigt. So wie vorher werden die Kernpixel gesucht. Danach wird die mittlere Ankunftszeit der Kernpixel berechnet, die die Hauptinsel bilden.

3.6 Star - Bildbereinigung und Bildparametrisierung

Die Kernpixel, deren Ankunftszeit nicht innerhalb einer bestimmten Zeit um die mittlere Ankunftszeit der Pixel der Hauptinsel liegen, werden verworfen. Für die Nachbarpixel gilt: Die Ankunftszeit zwischen einem Nachbarpixel und dem Kernpixel darf ebenfalls eine bestimmte Schwelle nicht überschreiten.

Eine weitere Entwicklung ist das “Sum Image Cleaning”, welches folgendermaßen funktioniert: Es wird eine Zweier-, Dreier- oder Vierer-Kombination von Nachbarpixeln gesucht und deren Signale aufsummiert. Ist das aufsummierte Signal über einer bestimmten Schwelle, werden die Ankunftszeiten in der Gruppe untereinander verglichen. Liegen diese nahe genug zusammen, werden die Pixel berücksichtigt, ansonsten verworfen. Anschließend werden Nachbarpixel gesucht und deren Pixelinhalte und Ankunftszeiten betrachtet.

Beim “Dynamic Sum Cleaning” wird zusätzlich noch der Gesamtphotoneninhalt eines Ereignisses berücksichtigt.

3.6.2 Bildparametrisierung

Die Bildparameter basieren auf den Hillas Parametern [36] und berücksichtigen die Verteilung der Photonen in den Pixeln, die zum bereinigten Ereignis gehören. Abbildung 3.6 zeigt ein bereinigtes MC-Ereignis in der Kamera.

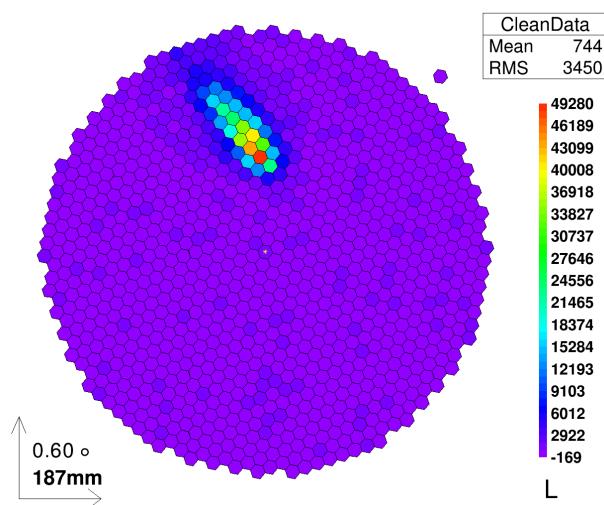


Abbildung 3.6: Darstellung des bereinigten Ereignisses in der Kamera.

Im Folgenden werden einige wichtige Bildparameter aufgelistet und beschrieben (vgl. Abbildung 3.7):

- **size:** Die Gesamtzahl der Photoelektronen in einem Ereignis wird als **size** bezeichnet. Für feste Zenitwinkel und Impact-Parameter ist diese Größe proportional zur gesuchten Primärteilchenenergie.
- **CoG** (Center of Gravity): Das Center of Gravity des Schauers bezeichnet die Position des gewichteten mittleren Signals entlang der X- und Y-Achse in der Kamera. X und Y sind die ersten Momente der Ladungsverteilung und werden **MeanX**, bzw. **MeanY** genannt.
- **Width:** Die halbe Breite der kleinen Halbachse der Schauerellipse wird als **Width** bezeichnet. Mit Hilfe dieses Parameters lassen sich Aussagen über die transversale Ausbreitung des Schauers und damit auch über den Ursprung des Schauers (hadronisch oder elektromagnetisch) treffen. Dieser Parameter ist somit ein guter Trennparameter.
- **Length:** Die halbe Länge der großen Halbachse wird mit dem Parameter **Length** bezeichnet. Dieser Parameter trifft eine Aussage über die longitudinale Entwicklung des Schauers.
- **Conc-n:** Der Anteil der Photoelektronen, welche in den n hellsten Pixeln enthalten sind, wird als **Conc-n** bezeichnet. Damit ist es möglich, die Kompaktheit des Schauermaximums zu beschreiben. Bei Gamma-Schauern ist die Region sehr kompakt.
- **Leakage:** Dieser Parameter beschreibt den Anteil des Signals im äußeren Kameraring im Vergleich zur totalen **size**. Mit diesem Parameter ist es möglich den Signalverlust zu beschreiben und zu entscheiden, ob der Schauer noch rekonstruiert werden kann.
- **M3Long:** Dieser Parameter ist das dritte Moment entlang der großen Halbachse und beschreibt die Asymmetrie des Schauers. Es lässt sich damit auf die Herkunftsrichtung des Schauers schließen. **M3Long** ist positiv wenn der Schauerschwerpunkt in Richtung des Kamerazentrums liegt, ansonsten ist er negativ.
- **Number_of_Islands:** Dieser Parameter bezeichnet die Anzahl der Inseln, die nach der Bildbereinigung übrig geblieben sind. Je größer dieser Wert ist, umso mehr Inseln sind noch vorhanden und umso wahrscheinlicher ist der Schauer hadronischen Ursprungs.

Abgesehen von diesen Bildparametern gibt es auch noch Parameter, die zu einem bestimmten Referenzpunkt, z.B. der Quellposition, in der Kamera berechnet werden.

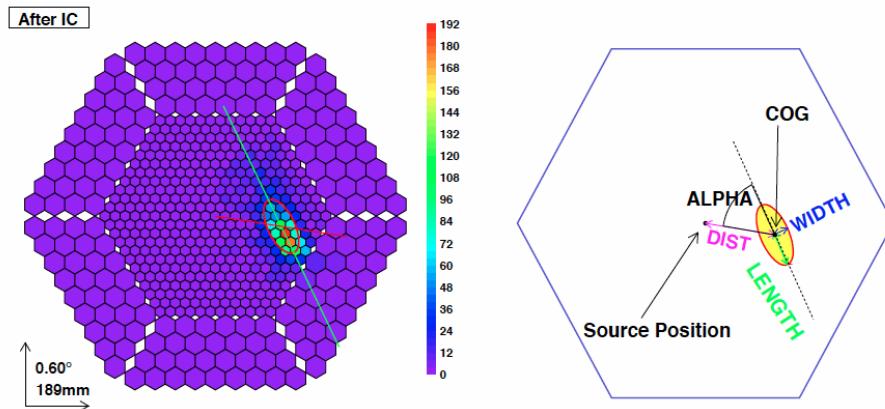


Abbildung 3.7: Beispielhafte Darstellung eines bereinigten Bildes und einiger Bildparameter in der alten MAGIC-Kamera.[43]

- **Alpha:** Alpha bezeichnet den Winkel zwischen der großen Halbachse der Ellipse und der Linie vom CoG zum Referenzpunkt. Dieser Parameter beinhaltet eine große Gamma-Hadron-Trennkraft, da gammainduzierte Schauer zur Quellposition in der Kamera zeigen und somit Alpha klein ist. Hadroninduzierte Schauer sind isotrop in der Kamera verteilt.
- **Dist:** Dist ist der Abstand vom CoG zum Referenzpunkt und bietet Informationen über den Abstand vom Schauermaximum zur Teleskopachse.

Außerdem gibt es noch einige Parameter, die die Zeitinformationen der Cherenkovphotonen berücksichtigen, wie z.B.:

- **TimeGradient:** Der TimeGradient bietet ein Zeitprofil eines Ereignisses. Die Pixel werden auf die Hauptachse projiziert. Dann wird ein Graph der Ankunftszeiten der einzelnen Pixel erstellt und mit einer linearen Funktion gefittet. Die Steigung dieser gefitteten Geraden wird dann als Time Gradient bezeichnet.
- **TimeRMS:** So wird der “Arrivaltime Spread” der Cherenkovphotonen in den Bildpixeln bezeichnet:

$$Time - RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^k (t_i - t_{mean})^2} \quad (3.2)$$

mit k: Anzahl der Pixel, t_i : Ankunftszeit im i-ten Pixel und t_{mean} :mittlere Ankunftszeit

Mit Hilfe dieser Bildparameter und der stereoskopischen Bildparameter kann dann die Gamma-Hadron-Separation durchgeführt werden.

3.7 Superstar - Stereoskopische Rekonstruktion der Schauer

Die vorher beschriebenen Parameter sind Parameter, die für jedes Teleskop einzeln rekonstruiert werden. Da MAGIC ein stereoskopisches System aus zwei Teleskopen ist, können zusätzliche stereoskopische Parameter bestimmt werden.

Mit Hilfe des Programms *Superstar* geschieht die stereoskopische Rekonstruktion der Schauerparameter.

Der Kreuzungspunkt der beiden Hauptachsen der projizierten Bilder des Schauers in den beiden MAGIC-Kameras erlaubt einen Rückschluss auf die Ursprungsrichtung des Schauers. Anhand geometrischer Überlegungen können die Schauerachse und der Core Impact Punkt auf der Erde, sowie die beiden individuellen Impact-Parameter der Teleskope bestimmt werden (siehe Abbildung 3.8).[45]

Auch die Höhe des Schauermaximums wird in *Superstar* bestimmt.

Des Weiteren werden noch der Cherenkovradius und die Cherenkovlichtdichte bestimmt.[45]

Der Cherenkovradius ist der Radius am Boden, der von einem 86 MeV-Elektron, welches in Schauerrichtung fliegt, in der Höhe des Schauermaximums produziert wird. Diese Energie ist die typische Energie eines Elektrons im Schauermaximum.[45]

Die Cherenkovlichtdichte ist die Lichtdichte am Boden, die von einer 1 m langen Spur eines 86MeV Elektrons im Schauermaximum produziert wird, welches ebenfalls in Schauerrichtung fliegt.[45]

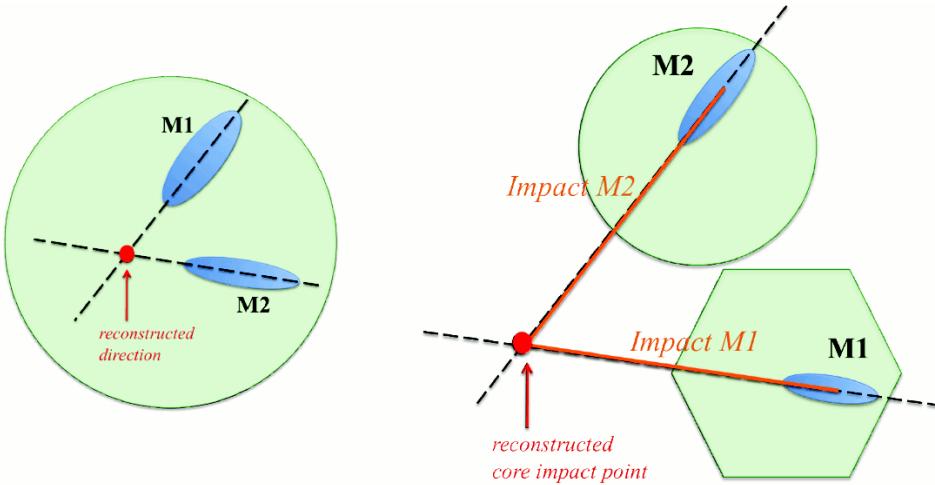


Abbildung 3.8: Rekonstruierte Richtung und rekonstruierter Core Impact-Punkt. Mit Hilfe der beiden Schauerbilder können sowohl die Herkunftsrichtung des Schauers, als auch der Punkt, in dem die Schauerachse den Boden trifft rekonstruiert werden.[45]

3.8 Automatische MC-Produktionskette an der TU Dortmund

Die Monte-Carlo-Produktion an der TU Dortmund geschieht automatisiert mit Hilfe von `bash`-Skripten und einer `mysql`-Datenbank. Das ist schematisch in Abbildung 3.9 dargestellt.

Bei einer neuen Anfrage für MC Daten werden mit Hilfe des `mcinsertintodb`-Skripts die für die gewünschte Produktion benötigten Inputcard-Parameter in die Datenbank geschrieben. Im Hintergrund läuft die ganze Zeit das `jobmanager`-Skript, welches überprüft, ob in der Datenbank ein neuer Auftrag (Job) eingegangen ist. Falls dies der Fall ist, startet das `jobmanager`-Skript automatisch das `runcorsika`-Skript, welches wiederum *CORSIKA* für diesen neuen Job mit den gewählten Einstellungen startet. Sobald *CORSIKA* beendet ist, wird dies in die Datenbank geschrieben, sodass das nächste Programm in der Monte-Carlo-Kette gestartet werden kann. Für das nächste Programm in der Kette sind alle benötigten Parameter schon bei der Inauftragsgabe des Jobs in der Datenbank gespeichert worden. Also wird *Reflector* mit Hilfe des `runreflector`-Skripts gestartet und nach Beendigung und Eintragen in die Datenbank wird auch das Programm *Camera* gestartet.

Nach dem erfolgreichen Durchlauf eines kompletten Jobs bestehend aus 1000-2000

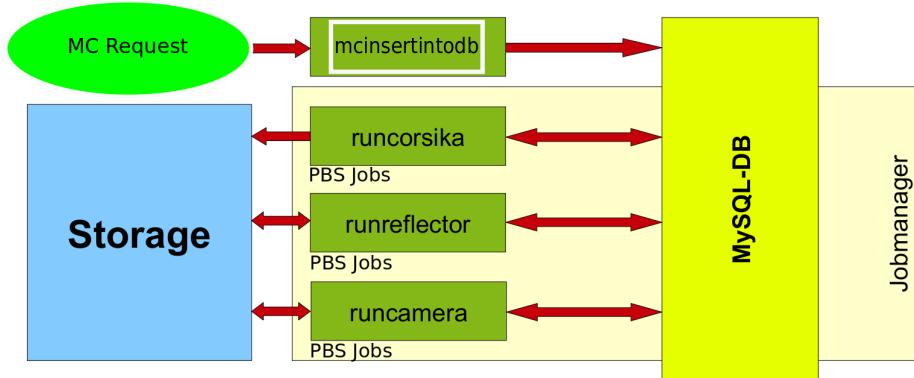


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der automatischen MC Produktionskette.

Runs mit je 1000 Ereignissen werden die generierten MC-Simulationsdaten nach jedem Programmdurchlauf auf dem Cluster gespeichert. Sobald die Simulationskette für einen Job beendet wurde, wird dies wiederum in die Datenbank eingetragen.

Die Kalibrationskette, die aus den Programmen *Sorcerer*, *Star* und *Superstar* besteht, wird analog durchgeführt: Mit Hilfe der run-Skripte werden die Programme gestartet und nach erfolgreichem Durchlauf die Daten gespeichert.

3.8.1 Überblick über die Datenbank

Wie zuvor beschrieben, werden die wichtigsten Inputparameter und die Pfade zu den MCs in einer mysql-Datenbank gespeichert. Diese Datenbank beinhaltet die Tabellen, welche in Tabelle 3.1 aufgelistet sind.

Die Tabelle MCJobs bietet eine Übersicht über alle Jobs. Enthalten sind in dieser Tabelle u.a. die JobID, die jedem Job individuell zugewiesen wird, die erste und letzte RunNumber eines Jobs, wann der Job gestartet wurde, wann *Camera* und *Star* beendet wurden und der Pfad zu den Daten.

Die Tabellen M1CalibrationProcessStatus und M2CalibrationProcessStatus enthalten ebenfalls die JobID, und die Zeitpunkte wann *Camera*, *Sorcerer* und *Star* beendet worden sind. Des Weiteren kann man den Startzeitpunkt und den Zeitpunkt eines Abbruchs des Jobs, sowie den zugehörigen Fehlercode sehen, der Rückschlüsse über die Ursache des Fehlers bietet.

Tabelle 3.1: Auflistung der Tabellen, die in der Datenbank existieren.

Tabellen
AtmosphericModel
AzimuthBinning
FADCType
M1CalibrationProcessStatus
M1CameraCopytoGridStatus
M1StarCopytoGridStatus
M2CalibrationProcessStatus
M2CameraCopytoGridStatus
M2StarCopytoGridStatus
MCCalibrationRuns
MCCameraRunData
MCCorsikaRunData
MCJobs
MCPedestalRuns
MCReflectorRunData
MCRunData
MCRunProcessStatus
MCStatistics
MCSuperstarProcessStatus
MCUserID
MarsVersion
ObservationMode
ParticleType
Source
ZenithBinning

In den Tabellen MCCorsikaRunData, MCReflectorRunData und MCCameraRunData kann man die wichtigsten Inputparameter für die jeweiligen Programme sehen.

Die Tabelle MCRunData bietet eine Übersicht über die RunNumbers, die innerhalb der einzelnen Programme verteilt wurden. So gehört zu jeder RunNumber eine CorsikaRunNumber, eine ReflectorRunNumber und eine CameraRunNumber. Also bietet ein Job mit 2000 x 1000 Ereignissen Platz für 2000 RunNumbers pro Programm.

Die Tabelle MCRunProcessStatus ist eine Übersichtstabelle über die Zeitpunkte,

3 Monte-Carlo-Simulation

zu denen die jeweiligen Inputcards geschrieben und die Programme *CORSIKA*, *Reflector* und *Camera* beendet wurden.

Die gleiche Tabelle gibt es auch noch für *Superstar*.

3.8.2 Einblick in den Linux Cluster DOrtmund - LiDO

Die Monte-Carlo-Produktion wird an der TU Dortmund vorwiegend auf dem LiDo-Cluster (Linux Cluster Dortmund) durchgeführt. Für die gesamte MAGIC Kollaboration werden hier die Gamma-MCs produziert und gespeichert.

Dafür stehen insgesamt 3328 CPUs und 215TB Speicher auf dem LiDO zur Verfügung. Die Struktur des Clusters lässt sich Abbildung 3.10 entnehmen.

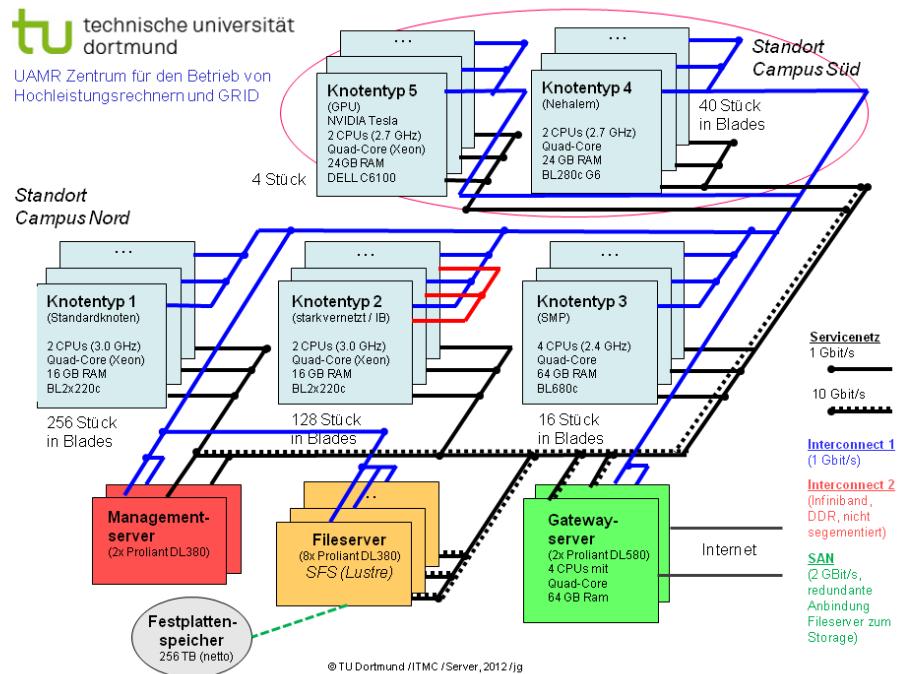


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des Rechenclusters LiDO.[59]

Über die beiden Gateway-Server erhält man Zugriff auf die Rechenknoten und den Speicher. Wie in Abbildung 3.10 zu sehen ist, gibt es verschiedene Knotentypen, die sich in der Zahl der maximalen Jobs pro Queue und Nutzer unterscheiden und über ein Queueingsystem erreichbar sind:

- Die ib-Knoten sind untereinander stark vernetzt und für parallele Jobs reserviert.
- eth-Knoten: Auf diesen Knoten werden serielle und parallele Jobs gerechnet, die die GigabitEthernet Connection nutzen.
- quad-Knoten: Für Anforderungen an viel Speicher oder parallele OpenMP/ Shared Memory Jobs werden die quad Knoten genutzt.
- GPU: Rechnungen auf Grafikkarten finden hier statt.
- nehalem: Diese Knoten sind neue Testknoten, die mehr Arbeitsspeicher als die eth-Knoten besitzen.

Die meisten Knoten haben drei verschiedene Queues, die sich in ihrer maximal zur Verfügung stehenden Walltime, das heißt der Zeit, die einem Job zur Verfügung steht, unterscheiden. Es gibt die short Queues (eth, ib, quad) mit einer maximalen Walltime von 1 h, die medium Queues (eth, eth_nhm, ib, quad) mit einer Walltime von 8 h und die long Queues mit einer maximalen Walltime von 48 h. Falls ein Job eine noch längere Bearbeitungszeit benötigt, kann er die ultralang Queue (eth) mit einer maximalen Walltime von 2688 h nutzen. Um also einen Job zu starten, gibt man den benötigten Speicher und eine maximale Walltime an und verschickt den Job an das Queueingssystem.

Für die MAGIC MC Produktion werden die eth-Knoten benutzt und pro Run 1000 *CORSIKA*-Ereignisse produziert und weiter prozessiert. Ein Standardjob von 2Mio *CORSIKA*-Ereignissen wird also in 2000 Runs mit je 1000 Ereignissen aufgeteilt und somit werden 2000 Runs nacheinander an das Queueingssystem verschickt.

Tabelle 3.2 zeigt das Speichervolumen, welches zur Zeit auf dem LiDO für die Daten nach den verschiedenen Programmen genutzt wird.

Tabelle 3.2: Belegtes Speichervolumen auf dem LiDo für MC-Daten.

Programm	<i>CORSIKA</i>	<i>Reflector</i>	<i>Camera</i>	<i>Sorcerer</i>	<i>Star</i>	<i>Superstar</i>
Speichervolumen [TB]	49	36	9	1.3	0.5	0.5

Alternativ kann auch noch der PhiDo Cluster für Testproduktionen, bzw. früher für dezidierte Protonsimulationen, benutzt werden. Dieser Cluster stellt ca. 1200 CPUs und ca. 200 TB Speicher zur Verfügung, hat allerdings auch eine größere Auslastung, was dazu führt, dass eine komplette Produktion wesentlich länger dauert.

3.8.3 Verfügbarkeit der produzierten MC-Daten

Sobald eine Produktion von MCs fertig simuliert ist, werden die Daten ins Grid kopiert. Das heißt im Moment werden sie zum PIC, auf Computer im Rechenzentrum in Spanien, kopiert, welche zum Grid gehören, und dort gespeichert, sodass sie immer über eine Internetseite erreichbar sind. Die Struktur, in der die MCs gespeichert sind, ist so aufgebaut:

MonteCarlo / Chipsatz der beiden Teleskope / PSF und Mirror fraction / Teilchentyp / Zenitbereich / Observationsart / Version der Software / Level der Prozessierung / Versionsnummer

Über die folgende URL sind die Daten jederzeit für alle Kollaborationsmitglieder verfügbar:

http://data.magic.pic.es/Data/MonteCarlo_Stereo/M1_DR5_1039_M2_DR5_1039/M1_PSF10.1_MF0.60_M2_PSF8.6_MF0.66/gammas/za05to35/ringwobble/std20140317/superstar/mc_v07/.

Eine genaue Auflistung über die verschiedenen Produktionen kann unter der folgenden URL aufgerufen werden. Diese wird ebenfalls nach Fertigstellung einer Produktion auf den aktuellen Stand gebracht:

http://wiki.magic.pic.es/index.php/Recommended_Stereo_MC_productions

4 Analyse der AGN Mrk 421

Im folgenden Kapitel werden die Gamma-Hadron-Separation und Energierekonstruktion (Abschnitt 4.1), die Erstellung von Lichtkurven (Abschnitt 4.2) und die Spektrums-Rekonstruktion (Abschnitt 4.3) erläutert. Zu diesem Zweck werden Standard-Analyseprogramme benutzt, die im *MARS* (MAGIC Analysis and Reconstruction Software)-Paket enthalten sind. Dieses Softwarepaket beinhaltet eine Sammlung von ROOT-Skripten und Macros [49], wie *coach*, womit der Random Forest trainiert wird, *flute*, womit die Lichtkurve bestimmt wird oder *CombUnfold*, was der Entfaltung des Energiespektrums dient.

Nach einer kurzen Einführung in diese Programme werden diese in Abschnitt 4.4 für die Analyse der 2012 aufgenommenen Daten der AGN Mrk 421 genutzt. Der Datensatz des gesamten Jahres 2012 wird auf Grund von Änderungen der abbildenden Eigenschaften des Teleskops und Hardwareänderungen in vier Teile geteilt und einzeln analysiert. Für jeden Einzeldatensatz werden dedizierte MC-Daten benötigt.

In Abschnitt 4.5 werden dann alle Ergebnisse zu einer gesamten Lichtkurve zusammengefasst und die ermittelten Spektren miteinander verglichen.

4.1 Gamma-Hadron-Separation und Energieschätzung

Im Folgenden wird ein Überblick über die Methode der Gamma-Hadron-Separation (GH-Separation), die Energieschätzung sowie die Rekonstruktion der Quellposition gegeben. Hierzu wird die Methode des Random-Forests erklärt, welcher zur Gamma-Hadron-Separation und zur Rekonstruktion der Quellposition genutzt wird. Weiterhin wird die Benutzung von Look-Up-Tabellen erläutert, welche zum Schätzen der Energie eines Ereignisses genutzt wird.

4.1.1 Gamma-Hadron-Separation

Da das Signal-Untergrund-Verhältnis zwischen Gamma-Schauern aus Richtung der Quelle und hadronischen Schauern kleiner als 1:1000 ist, werden effiziente Verfahren

benötigt, um das Signal vom Untergrund zu trennen.[18] Diese geringe Anzahl an Signalereignissen stellt sogar für helle Quellen wie Crab eine Herausforderung dar. In der Standard-MAGIC-Analysekette übernehmen die Programme *Coach* und *Melibea* diese Aufgabe. Zu diesem Zweck wird ein Random Forest (RF) genutzt [5]. Dieser RF basiert auf einem Ensemble an Entscheidungsbäumen mit zufällig ausgewählten Parametern an ihren Knoten. Um einen solchen RF zu trainieren, wird ein Trainingsdatensatz aus MCs und Untergrunddaten benötigt, von denen die Klassenzugehörigkeit (Signal oder Untergrund) bekannt ist.

Jedes Ereignis wird durch die in Abschnitt 3.6 beschriebenen Bildparameter charakterisiert. Im Ausgangsknoten eines jeden Entscheidungsbaumes befindet sich der komplette Datensatz mit allen Bildparametern. Dieser Knoten wird dann in zwei Nachfolgeknoten geteilt, indem in einem Bildparameter geschnitten wird. Bei diesem Splittingprozess wird eine bestimmte Anzahl an Parametern für den Schnitt zufällig aus einer vorher begrenzten Menge gezogen und der Parameter mit dem minimalen Gini-Index zur Separation genutzt.[5]

Mit Hilfe des Gini-Index kann die Ungleichheit der beiden Verteilungen als Funktion des Schnittes angegeben werden. Ist der Gini-Index von einem Knoten null, so ist in diesem Knoten nur noch eine Klasse vorhanden.[5]

Weitere Schnitte werden so lange durchgeführt bis die Anzahl der Ereignisse in einem Knoten zu gering wird oder in einem Knoten nur noch eine Klasse vertreten ist. In diesen Endknoten (Terminal Nodes) werden die Ereignisse mit einem Label l_i (Gamma oder Hadron) versehen. Dieser Prozess wird anschließend für alle weiteren i Entscheidungsbäume durchgeführt bis der Random Forest vollständig gebildet wurde.[5]

Beim Anwenden des RF folgt jedes Ereignis einem Pfad durch die i verschiedenen Bäume und wird von allen klassifiziert. Danach wird jedem Ereignis eine Hadroness h als finaler Wert zugewiesen, der die Wahrscheinlichkeit angibt, dass das Ereignis ein Hadron ist. Dies geschieht durch der Entscheidungen aller Bäume [5]:

$$h(\text{Ereignis}) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{Bäume}}} l_i(\text{Ereignis})}{n_{\text{Bäume}}}. \quad (4.1)$$

Es ist möglich in dem Programm *Coach* alle Parameter auszuwählen, die zum Training des RFs für die GH-Separation verwendet werden. Die Parameter für die Disp-Bestimmung sowie zum Bauen der Look-Up-Tables zur Energierekonstruktion werden ebenfalls in *Coach* ausgewählt. Bei der GH-Separation werden in dieser Analyse

elf verschiedene Parameter wie zum Beispiel `Width` oder `Length` genutzt. Des Weiteren ist es möglich die Anzahl der Bäume, sowie die Anzahl der gezogenen Parameter auszuwählen mit denen der RF trainiert werden soll.

4.1.2 Energierekonstruktion mit Hilfe von Look-Up-Tables

Die Energie der Primärteilchen ist proportional zur Anzahl der Cherenkov-Photonen im Schauer und somit auch zum Parameter `size`. Allerdings ist `size` abhängig vom Zenitwinkel, der Lage des Schauers in der Kamera, dem Impact-Parameter und der Höhe des Schauermaximums.[41]

Aufgrund dieser Abhängigkeiten wird eine Tabelle erstellt. Der MC-Trainingsdatensatz wird in Bins für jeden Parameter, der für die Energierekonstruktion benutzt werden soll, aufgeteilt. Anschließend wird in dieser mehrdimensionalen Tabelle in jedem Bin über die MC-Energien gemittelt sowie der quadratische Mittelwert bestimmt, sodass jedem Bin in dieser Tabelle eine Energie zugeordnet ist. Einem realen Ereignis wird anhand seiner Parameter das passende Energie-Bin in der Tabelle zugewiesen und so eine geschätzte Energie (`Estimated Energy`) zugewiesen. Für eine genauere Energierekonstruktion werden noch einige Korrekturen angewandt. Schauer, die nicht vollständig in der Kamera enthalten sind, bedürfen beispielsweise solch einer Korrektur.[41]

Für Mono-Daten geschieht die Energierekonstruktion mit Hilfe einer Random Forest Regression. Dieser Algorithmus schätzt keine Klassenzugehörigkeit von Ereignissen, sondern den Wert einer kontinuierlichen Funktion. In diesem Fall ist der Wert ein Energieschätzer. Um den finalen Wert zu bestimmen, wird nach der Anwendung aller Bäume über die Ergebnisse der einzelnen Bäume gemittelt.[41]

4.1.3 Rekonstruktion der Quellposition

In diesem Abschnitt wird die Bestimmung des Parameters `Disp` beschrieben, mit Hilfe dessen die Herkunft des Primärteilchens rekonstruiert werden kann. Der Parameter `Disp` bezeichnet den Abstand zwischen dem Schauerschwerpunkt und der Quellposition in der Kamera. Für Beobachtungen mit nur einem Teleskop gibt es zwei Möglichkeiten, diesen Parameter zu rekonstruieren. Zum Einen sind dies sogenannte Ghost-Busting-Methoden, die die Asymmetrie des Schauers charakterisieren und zum Anderen eine Random Forest Regression.[44]

Bei den Ghost-Busting-Methoden werden Parameter genutzt, die die Asymmetrie zwischen Schaueranfang und Schauerende in der Kamera charakterisieren. Mit Hilfe von Zeitgradienten der Ankunftszeiten oder des dritten Moments der Verteilung

entlang der großen Halbachse wird entschieden, aus welcher Richtung der Schauer kommt.[44]

In einer Standardanalyse geschieht die Rekonstruktion des Parameters **Disp** für ein Teleskop mit einer Random Forest Regression. Wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, sind zwei Positionen für den Parameter **Disp** wahrscheinlich. Diese befinden sich auf der Schauerachse in den gleichen Entfernung vom Schauerschwerpunkt. Durch Mittelung über die Ergebnisse der Bäume wird der wahrscheinlichere Wert bestimmt.[44]

Wird mit zwei Teleskopen observiert, ist die **Disp**-Rekonstruktion einfacher als mit einem Teleskop. Das Vorgehen dabei besteht aus zwei Schritten. Zunächst werden mit Hilfe einer Random Forest Regression die zwei möglichen **Disp**-Werte bestimmt. Mit diesen Werten ist dann wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, eine effiziente Bestimmung der tatsächlichen Quellposition möglich.

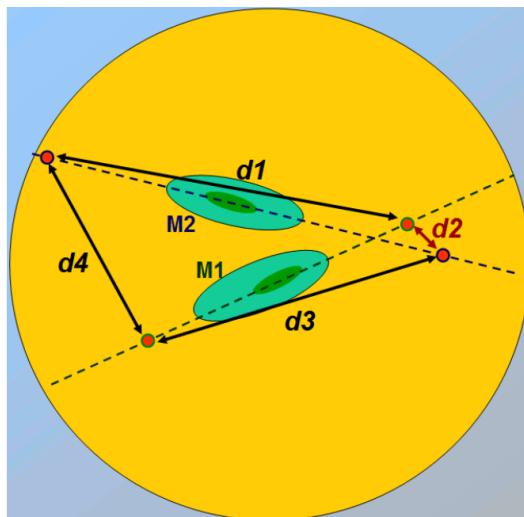


Abbildung 4.1: Schema zur Rekonstruktion des Stereo-Parameters **Disp**. Dargestellt sind die aufgenommenen Schauer beider Kameras, projiziert auf eine Kameraebene. Die roten Punkte stellen die möglichen Quellpositionen des Schauers in der Kamera von MAGIC-I (im Bild: M1) und MAGIC-II (im Bild: M2) dar. Die Abstände zwischen den rekonstruierten Quellpositionen der beiden Teleskope werden durch d_i dargestellt. Der kleinste Wert für d_i beschreibt hier den Abstand zwischen den beiden wahrscheinlicheren **Disp**-Werten. Aus den Abständen dieser Punkte zueinander kann entschieden werden, welche Herkunftsrichtung für den Schauer am wahrscheinlichsten ist.[44]

Nur eine der beiden möglichen Quellpositionen des einen Teleskops ist kompatibel mit einer der rekonstruierten Quellpositionen des anderen Teleskops. Die bevorzugte Position der Quelle ist die, die näher am Schnittpunkt der beiden Hauptachsen liegt und bestimmt Disp für beide Teleskope eindeutig. Letztendlich wird der mit dem Abstand zum Schnittpunkt der Hauptachsen gewichtete Mittelwert der beiden wahrscheinlichsten rekonstruierten Quellpositionen gewählt. Ereignisse mit einer zu großen Differenz der beiden rekonstruierten Quellpositionen zueinander werden bei der GH-Separation verworfen.[44]

4.2 Berechnung der Lichtkurve

Die zeitliche Entwicklung des integralen Flusses der Gammastrahlung wird als Lichtkurve bezeichnet. Die Rate der Gammaphotonen pro Einheitsfläche und Zeit ist die Ausgangsgröße für die Lichtkurve:

$$\Phi = \frac{d^2N}{dS dt} \quad (4.2)$$

mit N : Anzahl der Teilchen, S : Fläche und t : Zeit.

Zur Bestimmung des Flusses werden die Anzahl der detektierten Gammas, die effektive Observationszeit und die effektive Fläche des Detektors benötigt. Wird diese Größe nach der Energie differenziert, stellt die Größe $\frac{d\Phi}{dE}$ den differentiellen Fluss pro Energie dar:

$$\frac{d\Phi}{dE} = \frac{d^3N}{dS dt dE}. \quad (4.3)$$

Der integrale Fluss oberhalb einer bestimmten Energieschwelle (z.B. 500 GeV) kann anschließend mit:

$$\Phi_{E>500GeV} = \int_{500 GeV}^{\infty} \frac{d\Phi}{dE} dE \quad (4.4)$$

berechnet werden. Trägt man diese Größe gegen die Zeit auf, erhält man die Lichtkurve.[42]

Anzahl der Signalereignisse Um die Anzahl der Signalereignisse, d.h. Gamma-photonen aus der Quelle zu bestimmen, wird ein θ^2 -Histogramm benutzt. Dies ist ein Histogramm der quadrierten Entferungen zwischen der rekonstruierten Quellposition und der nominalen Quellposition. Gammaphotonen aus der Quelle haben ein kleineres θ , während der Background eine annähernd isotrope Verteilung liefert. Dieses Verhalten ist exemplarisch in Abbildung 4.2 für On-, Off- und Signalereignisse dargestellt.

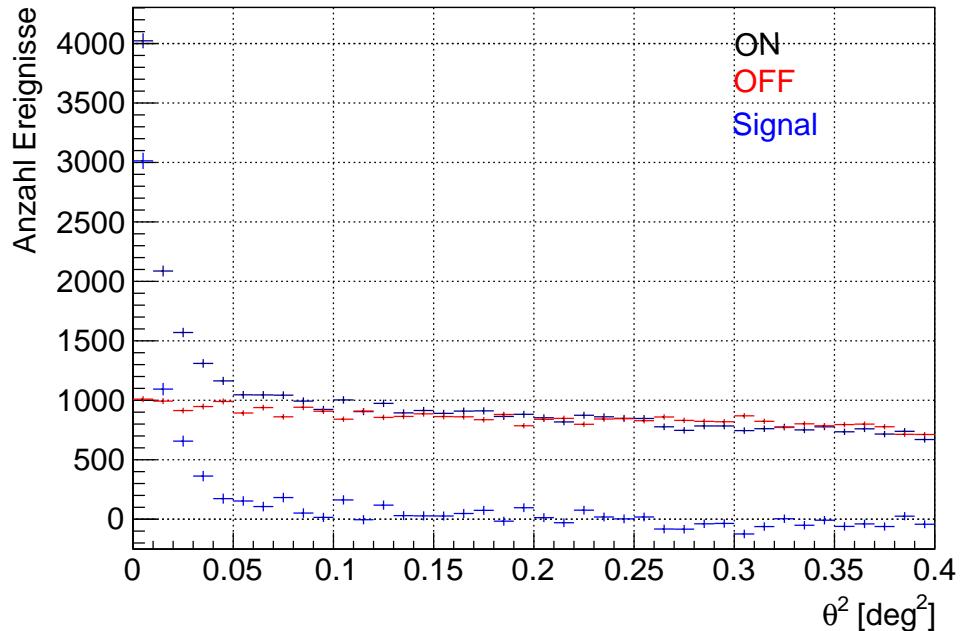


Abbildung 4.2: θ^2 -Verteilung von Crab-Daten aus dem Datensatz 2. Es ist zu sehen, dass die On- (schwarz) und die Off-Daten (rot) für $\theta^2 > 0,1$ miteinander übereinstimmen. Des Weiteren werden die Signal-Daten in blau dargestellt, die sich aus den On-Daten nach Subtraktion der Off-Daten ergeben. Ereignisse aus der Quelle befinden sich wie erwartet bei $\theta^2 \approx 0$.

Um die Anzahl der realen Signal-Ereignisse zu ermitteln, müssen von den Ereignissen aus der Quellrichtung noch die Background Ereignisse subtrahiert und ein Schnitt in θ^2 angewendet werden.

Dank der „Wobble-Beobachtung“ ist eine simultane Datennahme von Signal- und Hintergrund möglich. Bei dieser Beobachtungsmethode ist das Teleskop nicht direkt auf die Quelle ausgerichtet, sondern die Quellposition ist $0,4^\circ$ vom Kamerazentrum entfernt. Wegen der Alt-Azimutalen Montierung rotiert die Quelle um das Zentrum in der Kamera und es ist möglich einen Punkt gegenüber der Quelle als Off-Position

zu benutzen. Es muss gewährleistet werden, dass die Off-Positionen symmetrisch verteilt sind, um Kamerainhomogenitäten entgegenzuwirken. Allerdings tauchen bei dieser Methode die Photonen aus der Quelle auch in der Off- θ^2 -Verteilung auf, haben aber ein großes θ^2 . Eine Off-Position, die zu nah an der Quelle ist, ist aufgrund der beschriebenen Nachteile ungünstig.[42]

Effektive Beobachtungszeit Die effektive Beobachtungszeit berücksichtigt die Totzeit in der Datennahme. Nach dem Aufnehmen eines Ereignisses ist die Elektronik mit der Verarbeitung der Daten beschäftigt und neue Ereignisse können nicht detektiert werden. Die Totzeit ist abhängig vom Chip und beträgt bei den aktuellen DRS4-Chips einige μs .[42]

Effektive Fläche Als effektive Fläche wird die Fläche auf Teleskophöhe bezeichnet, die orthogonal zur Herkunftsrichtung der Schauerteilchen ist. Die Größe dieser effektiven Fläche ist abhängig von der Energie und dem Zenitwinkel des Schauers, sowie von Analyseschnitten. In *MARS* wird diese Größe mit Hilfe von MCs folgendermaßen berechnet:

$$A_{eff}(E) = \frac{N_{\gamma,final}}{N_{\gamma,simulated}} A_{MC,total} \quad (4.5)$$

Dafür wird eine bestimmte Anzahl an simulierten Gammaphotonen ($N_{\gamma,simulated}$) auf einer uniformen Fläche $A_{MC,total}$ simuliert. Die Größe $N_{\gamma,final}$ drückt die Anzahl der Gammaphotonen aus, die alle Analyseschnitte überlebt haben.[42]

4.3 Entfaltung des Energiespektrums

Bei der Messung mit IACTs handelt es sich um eine indirekte Messung. Die Energie des Schauer-auslösenden Teilchens ist nicht direkt messbar. Die Bildparameter und damit auch die geschätzte Energie E_{est} haben eine begrenzte Auflösung und erfordern die Methode der Entfaltung.

Die Probleme bei der Messung lassen sich wie folgt zusammenfassen [46]:

- Begrenzte Akzeptanz: Nicht alle Schauer, die Teilchen auslösen, können vom Teleskop detektiert werden.

- Indirekte Messung: Da eine direkte Messung nicht möglich ist, wird anhand von gemessenen Parametern, wie z.B. der Größe des Schauers in der Kamera, mit Hilfe eines RF die Energie geschätzt. Die Voraussetzung dafür ist, dass diese real gemessenen Parameter stark mit der Energie korreliert sind.
- Begrenzte Auflösung: Es ist nur möglich mit begrenzter Genauigkeit aus den Bildparametern die Energie zu rekonstruieren, d.h. es existiert eine Migration von Ereignissen. Wird die geschätzte Energie gegen die reale Energie aufgetragen, erhält man eine verschmierte Diagonale (siehe Abbildung 4.3)

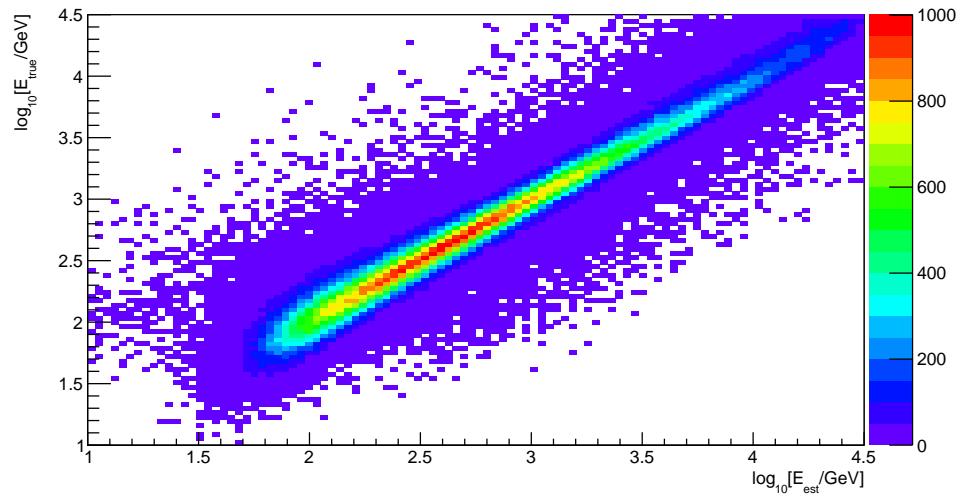


Abbildung 4.3: Dargestellt ist ein zweidimensionales Histogramm, in dem die geschätzte Energie gegen die wahre Energie aufgetragen ist. Es ist erkennbar, dass keine perfekte Energierekonstruktion existiert.

Durch die Methode der Entfaltung können diese Probleme berücksichtigt werden. Das Problem lässt sich mit einer Fredholmschen Integralgleichung darstellen [17]:

$$g(y) = \int_c^d M(x,y) f(x) dx + b(y) \quad (4.6)$$

mit $g(y)$: gemessene Verteilung, $f(x)$: gesuchte Verteilung, $M(x,y)$: Migrationsmatrix bestimmt auf MCs, $b(y)$: Background-Verteilung

Diese Gleichung lässt sich diskretisieren zu:

$$g_i = \sum_j M_{ij} f_j + b_i, \quad (4.7)$$

wobei M_{ij} die Migrationsmatrix ist und damit die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass ein Ereignis in Bin j zum Energiebin i zugeordnet wird.

Das Ziel der Entfaltung ist die wahre Verteilung f zu finden. Die Kovarianzmatrix der gesuchten Verteilung ergibt sich mit der Kovarianzmatrix der gemessenen Verteilung zu:

$$\mathbf{V}[\vec{f}] = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{V}[\vec{g}] (\mathbf{M}^{-1})^T. \quad (4.8)$$

Da die Invertierung der Migrationsmatrix oft zu oszillierenden Lösungen führt, wird die Methode der kleinsten Quadrate angewandt.

$$\chi_0^2 = (\vec{g} - \mathbf{M} \vec{f})^T \mathbf{V}^{-1} [\vec{g}] (\vec{g} - \mathbf{M} \vec{f}). \quad (4.9)$$

Außerdem ist es nötig, eine Regularisierung einzuführen, um die kleinen Ausdrücke in der Migrationsmatrix, die während der Entfaltung verstärkt werden, zu unterdrücken. Durch Einführung eines Regularisierungsterms werden Anforderungen an die Lösung gestellt. Bei zu starker Regularisierung führt dies allerdings zu einem Bias hin zum Trainingsspektrum.

Im Allgemeinen wird Regularisierung durch Addition eines Regularisierungsterms berücksichtigt und lässt sich darstellen als:

$$\chi^2 = \frac{\tau}{2} \chi_0^2 + \text{Reg}(f). \quad (4.10)$$

Verschiedene Arten der Regularisierung können in der Analyse gewählt werden.[70]

Es ist auch möglich, eine Vorwärtsfaltung durchzuführen, wobei ein bestimmtes Modell als Annahme gewählt wird und freie Parameter dieses Modells bestimmt werden.[70] Zum Testen ist dies eine gute Alternative, allerdings keine richtige Entfaltung, da das Ergebnis modellabhängig bleibt und physikalische Phänomene verborgen bleiben.

4.4 Mrk 421-Analyse

In diesem Abschnitt wird die Analyse der Daten beschrieben, wobei für jede der vier Datenepochen sowohl die Lichtkurve als auch das Spektrum gezeigt werden. Dabei wird die Analyse des Datensets 2 der Daten exemplarisch für die Stereo-Analyse erklärt (Unterabschnitt 4.4.2), während die anderen Zeitabschnitte des Jahres mit stereoskopischer Beobachtung (Unterabschnitt 4.4.3 und Unterabschnitt 4.4.4) analog ausgewertet werden. Auf die Mono-Datenanalyse wird in Unterabschnitt 4.4.5 eingegangen. Zusammenfassend wird eine Lichtkurve aller Daten gezeigt.

4.4.1 Überblick über die Daten

Die Daten, die für diese Analyse zur Verfügung standen, sind Daten der Quelle Mrk 421, die 2012 aufgenommen wurden. Die Daten gliedern sich folgendermaßen:

- Datenset 1: 2012-02-25 - 2012-02-29
- Datenset 2: 2012-03-18 - 2012-04-27
- Datenset 3: 2012-05-23 - 2012-06-19 (Mono)
- Datenset 4: 2012-12-11 - 2012-12-23

Datenset 1 und Datenset 2 sind Stereobeobachtungen. Die beiden Datensets unterscheiden sich in ihrer PSF (Point Spread Function), weswegen zwei verschiedene MC-Sets in der Analyse verwendet werden. Die PSF beschreibt die Abbildungsqualität der Spiegel, bzw. wie gut diese ausgerichtet sind. Je größer die PSF ist, desto schlechter sind die Abbildungseigenschaften und umso verschmierter ist die Reflexion einer Punktquelle.

Beim Datenset 3 handelt es sich um Mono-Daten. Aufgrund der defekten MAGIC-I-Kamera und der geplanten Upgrade-Pause, wurde nur MAGIC-II betrieben.

Im Datenset 4 war das Upgrade abgeschlossen, die alte MAGIC-I-Kamera durch eine neue Kamera ersetzt und es wurden wieder Stereo-Beobachtungen durchgeführt. Aufgrund der Hardware-Veränderungen und einer anderen PSF wurde es hier nötig wieder neue MCs zu produzieren.

Die Analyse des zweiten Datensets befindet sich in Unterabschnitt 4.4.2 und die des ersten Datensets wird in Unterabschnitt 4.4.3 beschrieben. Danach erfolgt die dritte Analyseperiode mit Stereobeobachtungen (Datenset 4) in Unterabschnitt 4.4.4. Die Mono-Analyse wird abschließend in Unterabschnitt 4.4.5 beschrieben.

4.4.2 Datenset 2

Anhand der genommenen Mrk 421-Daten, zehn Tage zwischen dem 18.3.2012 (MJD: 56004.1) und dem 27.4.2012 (MJD: 56042.0), wird nun die Stereo-Analyse erklärt.

Diese Daten wurden in einem Zenitwinkelbereich zwischen 12° und 30° genommen (siehe Abbildung 4.4).

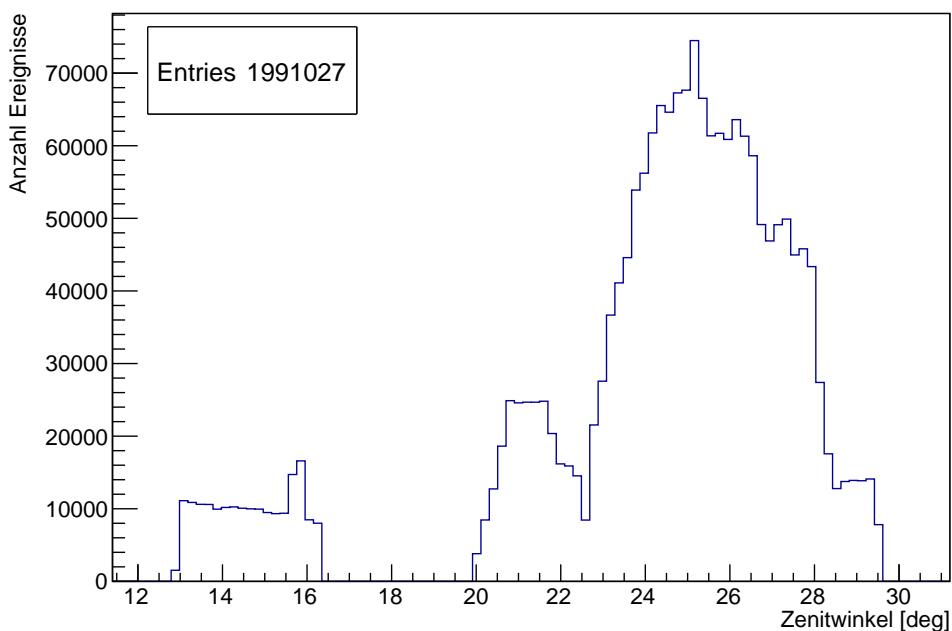


Abbildung 4.4: Zenitverteilung der genommenen Mrk 421-Daten zwischen dem 18.3.2012 und dem 27.4.2012.

Da dieser Datensatz die meisten Daten beinhaltet, wird die Analyse exemplarisch hiermit durchgeführt. Als Background-Daten dienen Daten anderer Quellen, welche in der gleichen Zeitspanne wie die zu analysierenden Daten liegen. Dadurch wird gewährleistet, dass das Teleskop die gleichen Eigenschaften (z.B. PSF, Reflektivität der Spiegel, etc.) hat wie bei der Datennahme der zu analysierenden Quelle. Mit Hilfe von Crab-Daten werden die Einstellungen für die Lichtkurvenbestimmung bestimmt, da Crab als Standardkerze dient und einen bekannten stabilen Fluss hat.

Daten-Auswahl und Qualitätchecks

Zunächst werden die auf *Superstar*-Level prozessierten Daten einem Datencheck unterzogen, um die Daten herauszufiltern, die bei guten Bedingungen genommen wurden. Gute Bedingungen sind durch dunkle Nächte, gutes Wetter, wenig Störlicht durch z.B. Autoscheinwerfer und keine Hardware- oder Softwareprobleme gekennzeichnet.

Um dunkle Bedingungen zu gewährleisten wurde zunächst ein Cut im Direct Current (DC) (MAGIC-I < 500 nA, MAGIC-II < 800 nA) durchgeführt. Anschließend wurden mit Hilfe des *MARS Macros Quate* alle Daten mit einem Zenitwinkel < 35° ausgewählt, Runs mit einer Länge unter 10 s und Runs mit einer Abweichung des Pointings von mehr als 15 arcmin verworfen. Außerdem wurden die Mittelwerte der Rate, der Parameter *Number of Islands*, *Concentration*, *Width* und *Length* gebildet und ebenfalls Ausreißer aussortiert, um eine gute Qualität der Daten zu gewährleisten.

Diese Kriterien für den Datencheck wurden für die Mrk 421-Daten, die Crab-Daten und die Background-Daten angewendet.

In der Tabelle 4.1 ist aufgelistet, an welchen Tagen Mrk 421-Daten nach dem Datencheck für die Analyse zur Verfügung stehen.

Tabelle 4.1: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421 aus Datenset 2.

Monat	Tag
März	18., 22., 28.
April	11., 13., 15., 19., 21., 23., 25.

Tabelle 4.2 zeigt wieviele Minuten Daten, Background-Daten und Crab-Daten den Datencheck überstanden haben. Auf eine tageweise Auflistung der Background- und Crab-Daten wird an dieser Stelle verzichtet.

Für diesen Teil der Analyse werden die in Dortmund produzierten Standard-MC-Daten im Zenitbereich 5°-35° verwendet, in denen die alte MAGIC-I Kamera simuliert wurde. Die PSF für MAGIC-I beträgt hierbei 10,5 mm und die Mirror Fraction 0,58, während diese Werte für MAGIC-II 10,2 mm für die PSF und 0,70 für die Mirror Fraction sind.

Es ist zu beachten, dass für alle Daten (Mrk 421/Crab/Background) und die MCs das gleiche Cleaning benutzt wird, da zu dieser Zeit zwei verschiedene Cleaning-

Tabelle 4.2: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421, Crab und Background aus Datenset 2.

Quelle	Observationszeit [min]
Mrk 421	272
Crab	161
0FGLJ0631	77
1ES1011	492
1ES1426	424
PG1553	971
PKS1222	247
SegueJ	3252

Schwellen im Next-Neighbor-Cleaning gebräuchlich waren. Die Schwellwerte für die Kern und Nachbarpixel betragen in diesen Daten 6, bzw. 3.

Coach und Melibea

Für das Training des RF für die GH-Separation und die Disp-Bestimmung sowie das Erstellen der Look-Up-Tables zur Energierekonstruktion ist es wichtig, dass in jedem Zenitbin ausreichend Background- und MC-Daten vorhanden sind. Es wird ein Zenitbereich von $10\text{--}35^\circ$ ausgewählt. Wie in Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6 zu sehen ist, ist diese Voraussetzung erfüllt.

Der MC-Datensatz wurde in zwei Teile geteilt. Der eine Teil, das Trainings-Set, wird zusammen mit den Background-Daten zum Trainieren des RF für die GH-Separation und für die Disp-Abschätzung, sowie zum Aufstellen der Look-Up-Tables für die Energie benutzt. Der andere Teil wird in nachfolgenden Analyseschritten zur Bestimmung der effektiven Fläche zur Entfaltung benutzt.

Sobald das Training der RFs und das Erstellen der Look-Up-Tables in *Coach* beendet ist, werden in *Melibea* die Daten nach Gamma- und Hadron-Ereignis klassifiziert und jedem Ereignis eine geschätzte Energie und ein Disp-Wert zugeordnet. Das gleiche geschieht auch mit den Crab-Daten und dem anderen Teil der MCs, dem Test-Set.

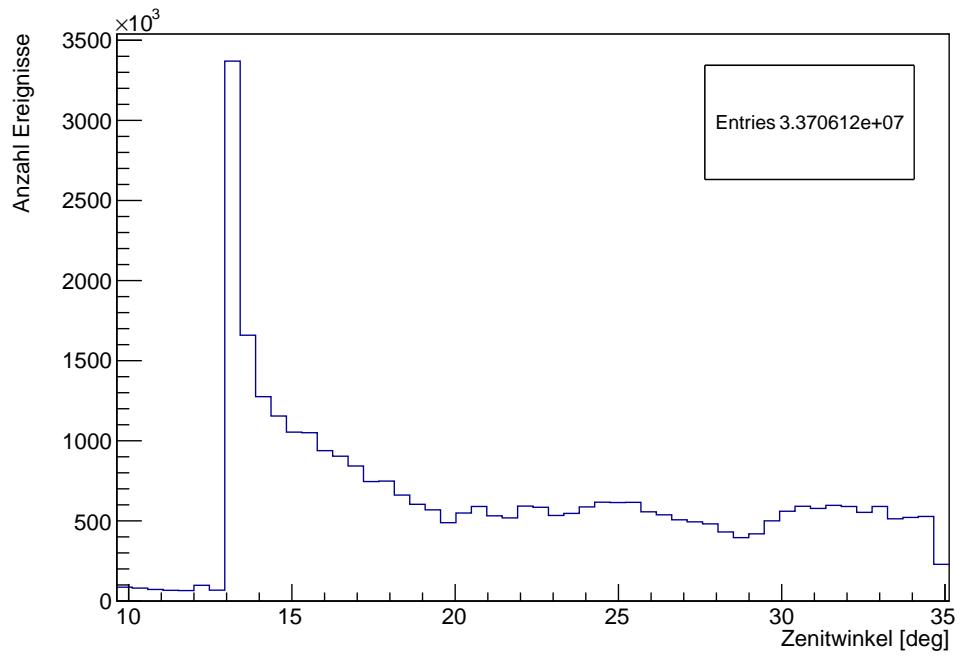


Abbildung 4.5: Zenitverteilung der Background-Daten zwischen dem 18.3.2012 und dem 27.4.2012.

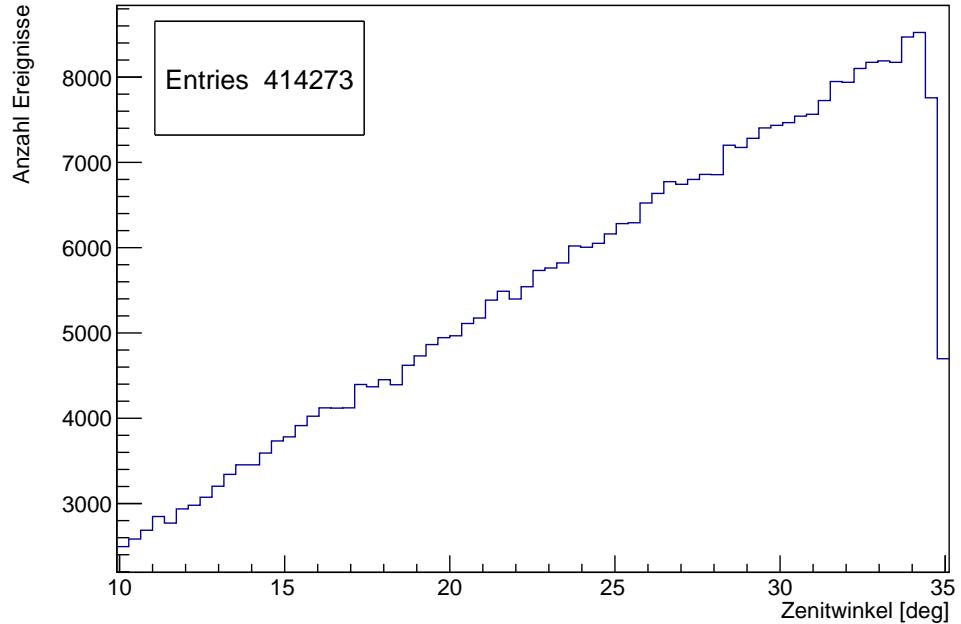


Abbildung 4.6: Zenitverteilung des Trainingssets der MC.

Lichtkurve: Crab

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, wird nun sowohl für die Crab-Daten als auch für die Mrk 421-Daten eine Lichtkurve erstellt. Da der Fluss von Crab stabil und bekannt ist, werden mit Hilfe der Crab-Daten die passenden Parameter (Hadronen-effizienz und θ^2 -Effizienz) für die Lichtkurven-Bestimmung in diesem Zeitraum für Mrk 421 ausgewählt.

Wie in Abbildung 4.7 zu sehen ist, ist es möglich mit *Flute* neben der Lichtkurve (vgl. Abbildung 4.7d) auch einen θ^2 -Plot (vgl. Abbildung 4.7a), sowie die spektrale Energieverteilung (vgl. Abbildung 4.7c) zu berechnen.

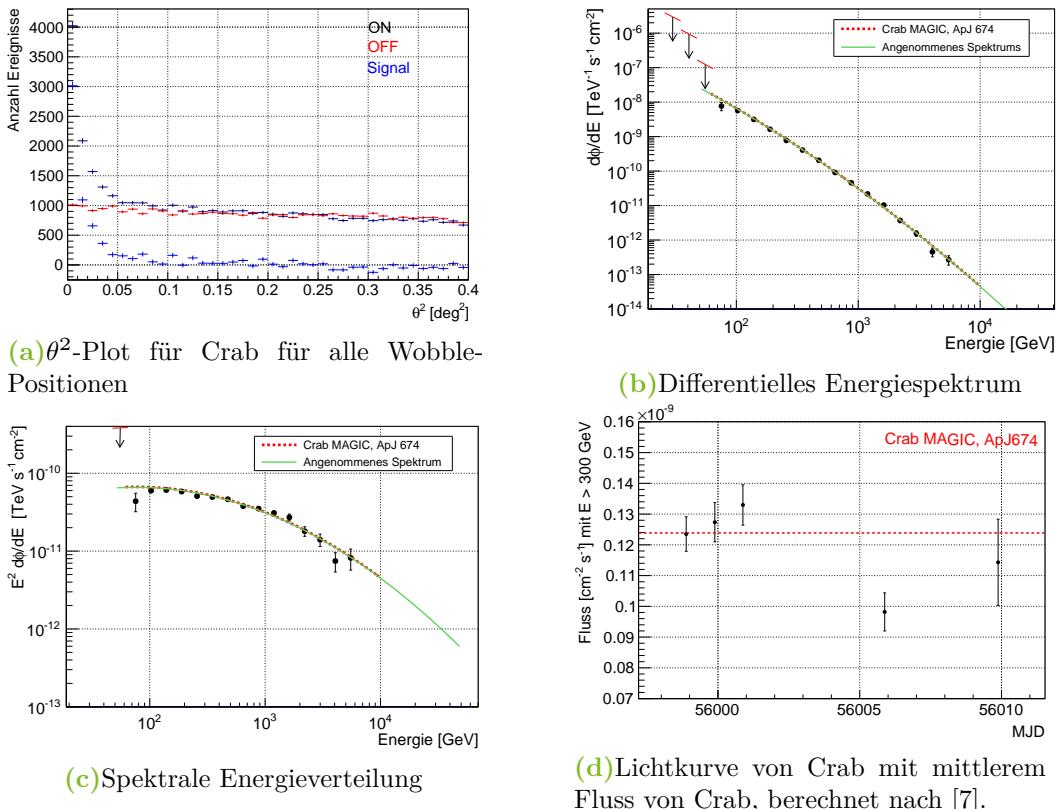


Abbildung 4.7: Genrierte Plots von *Flute* für Crab-Daten

In Abbildung 4.7a ist der θ^2 -Plot für Crab zu sehen. Für kleine θ ist die Anzahl der Signal-Ereignisse ca. vier Mal höher als im Off-Bereich.

In Abbildung 4.7b ist das differentielle Energiespektrum zu sehen.

Abbildung 4.7c zeigt die spektrale Energieverteilung, d.h. das mit E^2 gewichtete Spektrum aus Abbildung 4.7b. Das in der Literatur angegebene Spektrum ist durch eine rot gestrichelte Linie gekennzeichnet und wird von dem ermittelten Spektrum überdeckt, welches in grün dargestellt ist.

Wie in Abbildung 4.7b und in Abbildung 4.7c zu sehen, beschreibt das ermittelte Spektrum die Daten und ist konsistent mit dem bekannten Crab-Spektrum. Das ermittelte Spektrum folgt diesem Ausdruck:

$$\frac{dN}{dE} \propto \left(\frac{x}{300 \text{ GeV}} \right)^{-2,31 - 0.26 \cdot \log_{10}(x/300 \text{ GeV})} \text{ TeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}. \quad (4.11)$$

Die Lichtkurve in Abbildung 4.7d zeigt, dass der Crab-Fluss in diesem Zeitraum um den mittleren Crab-Fluss schwankt. Die Parameter für den Hadroness-Schnitt bei 0,95 und den θ^2 -Schnitt bei 0,9, die zum Erstellen der Lichtkurve in *Flute* verwendet wurden, können somit als korrekt angenommen werden.

Lichtkurve: Mrk 421

Es wird nun mit den gleichen Effizienz-Einstellungen wie für Crab eine Lichtkurve für Mrk 421 angefertigt.

Die Abbildung 4.8 zeigt, dass der Fluss von Mrk 421 im Vergleich zu Crab niedriger ist. Er schwankt etwa um den halben Crab-Fluss. Auch die spektrale Energieverteilung unterscheidet sich von Crab (vgl. Abbildung 4.9), da ein anderes Spektrum angenommen wurde:

$$\frac{dN}{dE} \propto \left(\frac{x}{300 \text{ GeV}} \right)^{-2,75} \text{ TeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (4.12)$$

Spektrum: Crab

Mit Hilfe von *CombUnfold* wird nun das Spektrum von Crab entfaltet. In Abbildung 4.10 ist das entfaltete Spektrum von Crab dargestellt, welches mit dem Literaturwert nach [7] berechnet wurde.

Anhand dieser Entfaltung ist festzustellen, dass der ermittelte Fluss mit den bisherigen Messungen konsistent ist.

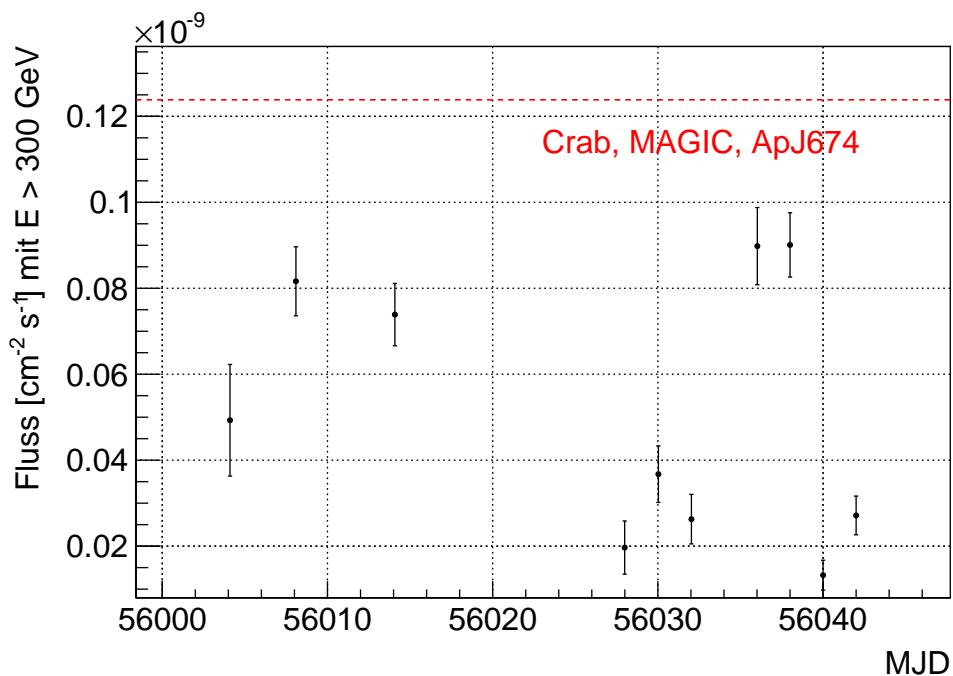


Abbildung 4.8: Lichtkurve von Mrk 421 im Zeitraum vom 18.3.2012 bis zum 25.4.2012. Der Fluss von Mrk 421 liegt im Durchschnitt bei 41% des Flusses von Crab, den die rote Linie darstellt.

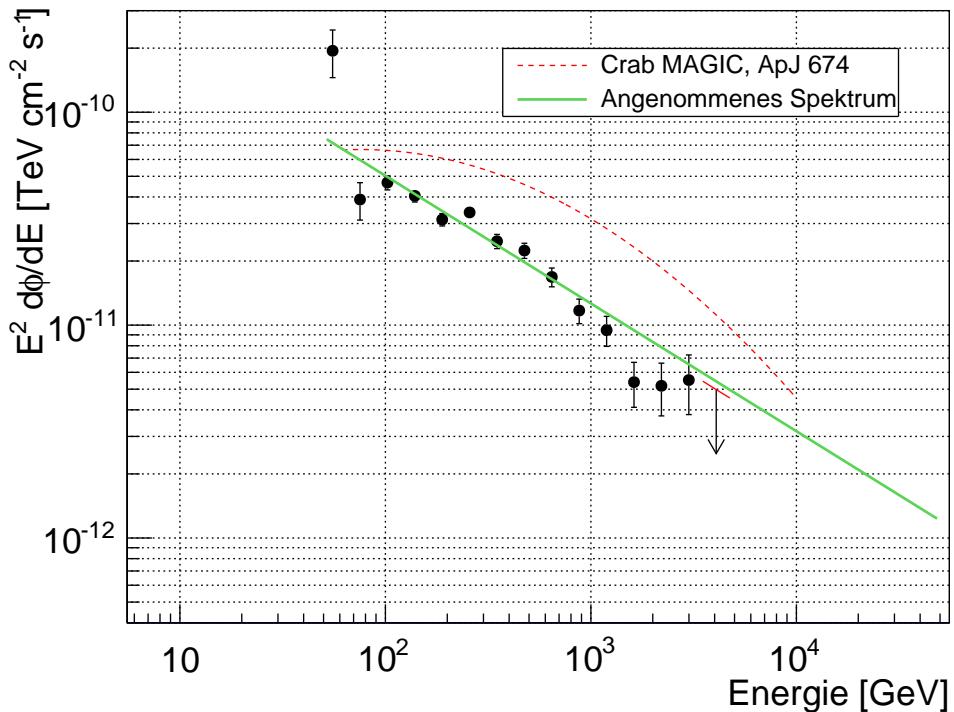


Abbildung 4.9: Spektrale Energieverteilung von Mrk 421. Zum Vergleich ist die spektrale Energieverteilung von Crab in rot eingezeichnet.

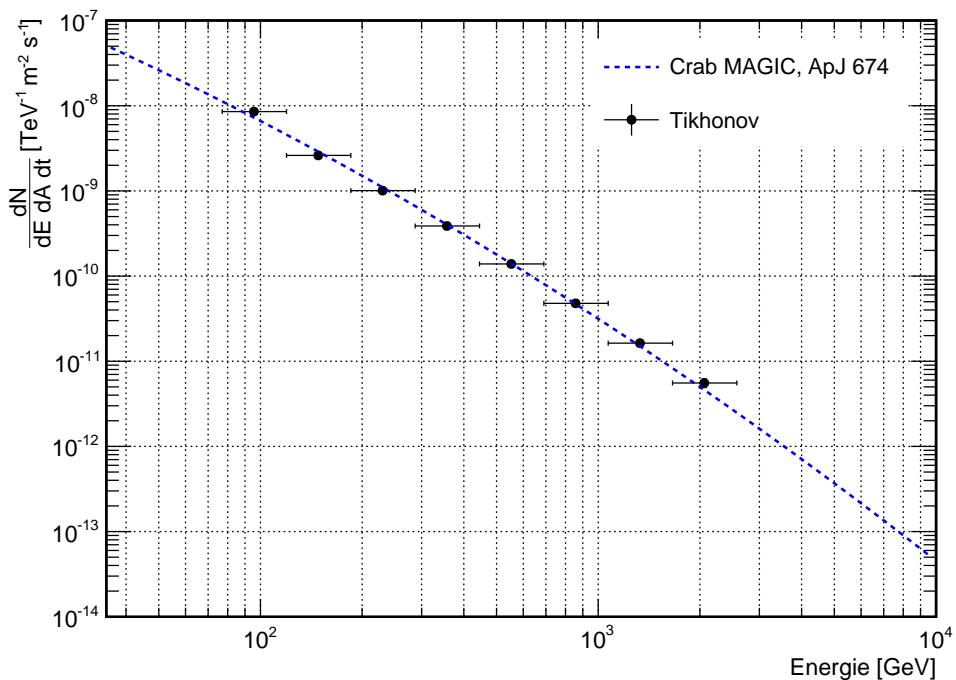


Abbildung 4.10: Entfaltetes Crab-Spektrum im Zeitraum vom 18.3.2012 bis zum 25.4.2012 mit einem Literaturvergleich (siehe [7]).

Spektrum: Mrk 421

Die Abbildung 4.11 zeigt das entfaltete Spektrum von Mrk 421 mit fünf verschiedenen Regularisierungsmethoden. Wie man sieht, zeigen die entfalteten Datenpunkte keine signifikanten Abweichungen voneinander. Lediglich bei kleinen Energien ist eine Abweichung zu erkennen, welche allerdings weiterhin nicht signifikant ist.

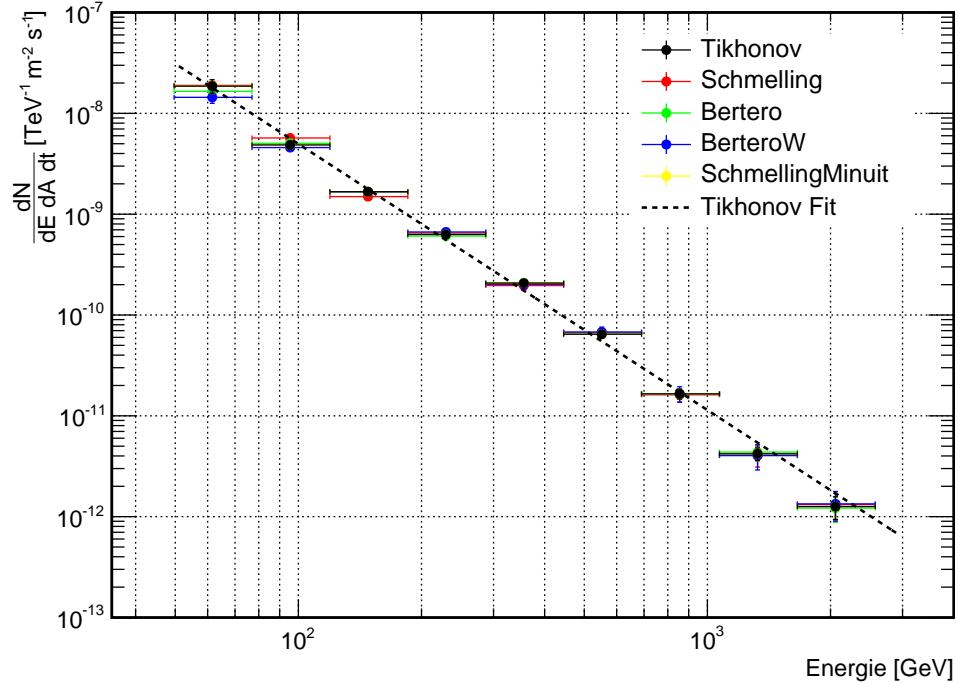


Abbildung 4.11: Entfaltetes Mrk 421-Spektrum im Zeitraum vom 18.3.2012 bis zum 25.4.2012 mit allen wählbaren Regularisierungsmethoden. Die gestrichelte Linie stellt das gefittete Spektrum dar, welches mit Hilfe der Tikhonov-Regularisierung berechnet wurde.

Es wurde zusätzlich der Fit dargestellt, der in der Entfaltung mit Tikhonov-Regularisierung erstellt wurde, da diese Regularisierungsmethode in den meisten Fällen die besten Ergebnisse lieferte. Folgende Funktion wurde angenommen:

$$\frac{dN}{dE dA dt} = f_0 \left(\frac{E}{r} \right)^\alpha . \quad (4.13)$$

Die angepasste Funktion ergibt sich somit zu:

$$\frac{dN}{dE dA dt} = (2,74 \pm 0,06) \cdot 10^{-10} \left(\frac{E}{0,3 \text{ TeV}} \right)^{-2,64 \pm 0,03} \text{ TeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}. \quad (4.14)$$

4.4.3 Datenset 1

Der folgende Teil beschreibt die Analyse der Daten vom 25.2.2012 und 29.2.2012. Da diese Daten eine andere PSF haben als die Daten aus dem Datenset 2, benötigt es eigene MCs und die Daten müssen separat von Datenset 2 analysiert werden. Die Daten an diesen zwei Tagen haben ebenfalls einen Zenitbereich von unter 35°.

Datencheck

Der Datencheck für diese Daten geschieht analog zum Datencheck des Datensets 2. Die Tabelle 4.3 zeigt an welchen Tagen Mrk 421-Daten den Datencheck überstanden haben und für die Analyse zur Verfügung stehen.

Tabelle 4.3: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421 aus Datenset 1.

Monat	Tage
Februar	25., 29.

Tabelle 4.4 zeigt die selektierten Mrk 421-/Crab- und Background-Daten nach dem Datencheck.

Lichtkurve: Crab und Mrk 421

Mit Hilfe von Crab-Daten wurden die Einstellungen für die Lichtkurve von Mrk 421 bestimmt. Es wurde nur an einem Tag zwischen dem 25.2.2012 und dem 29.2.2012 Crab beobachtet. Deswegen beinhaltet die Lichtkurve von Crab nur 20 min an Crab-Daten (vgl. Abbildung 4.12).

Die Lichtkurve von Mrk 421 befindet sich in Abbildung 4.13.

Es ist zu sehen, dass der Fluss an diesen beiden Tagen verglichen mit den Daten aus Datenset 2 auf einem niedrigen Niveau liegt.

Tabelle 4.4: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421, Crab und Background aus Datenset 1.

Quelle	Observationszeit [min]
Mrk 421	70
Crab	20
0FGLJ0631	3
1ES1011	172
HB89	87
PG1553	115
PKS1222	106
SegueJ	401

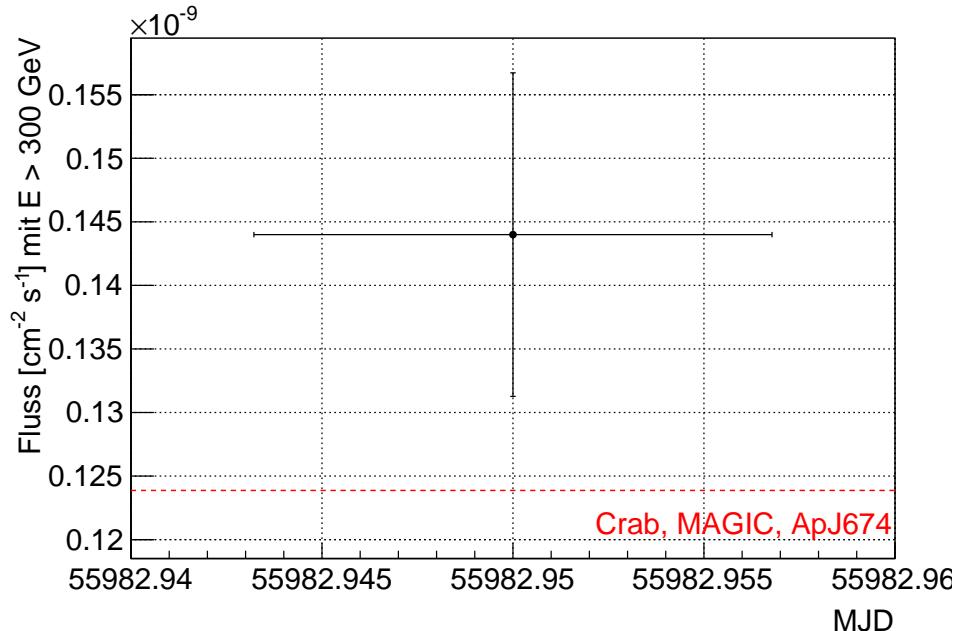


Abbildung 4.12: Lichtkurve von Crab im Zeitraum vom 25.2.2012 bis zum 29.2.2012 mit dem mittleren Crab-Fluss (nach [7]).

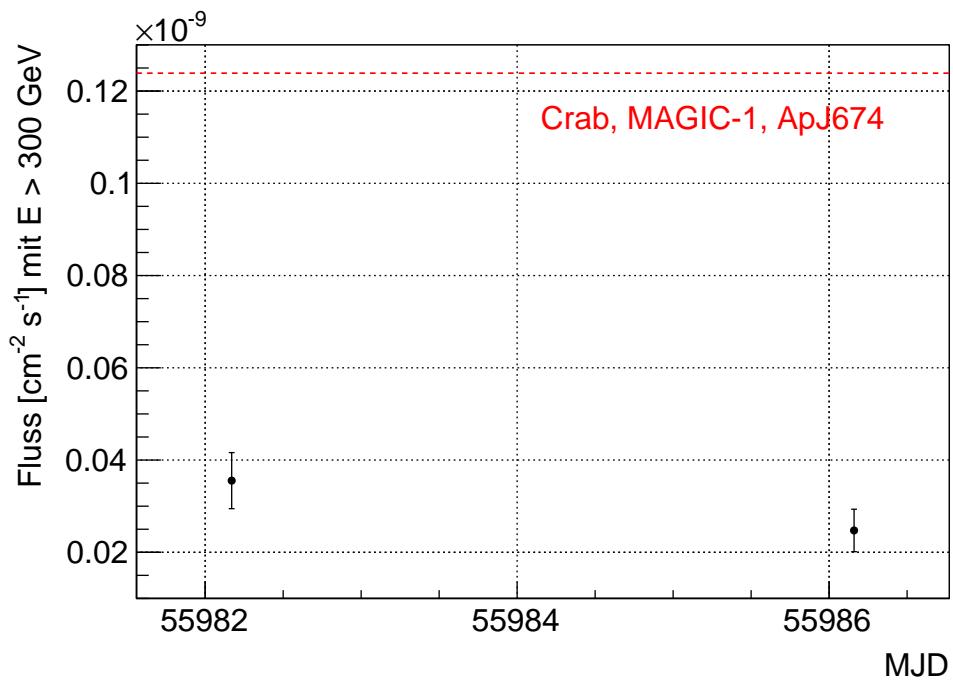


Abbildung 4.13: Lichtkurve von Mrk 421 im Zeitraum vom 25.2.2012 bis zum 29.2.2012. Der Fluss von Mrk 421 liegt im Durchschnitt bei 24% des Fluxes von Crab, den die rote Linie darstellt.

Spektrum: Mrk 421

Analog zu Datenset 2 wurde wieder ein Spektrum bestimmt. Das Resultat befindet sich in Abbildung 4.14.

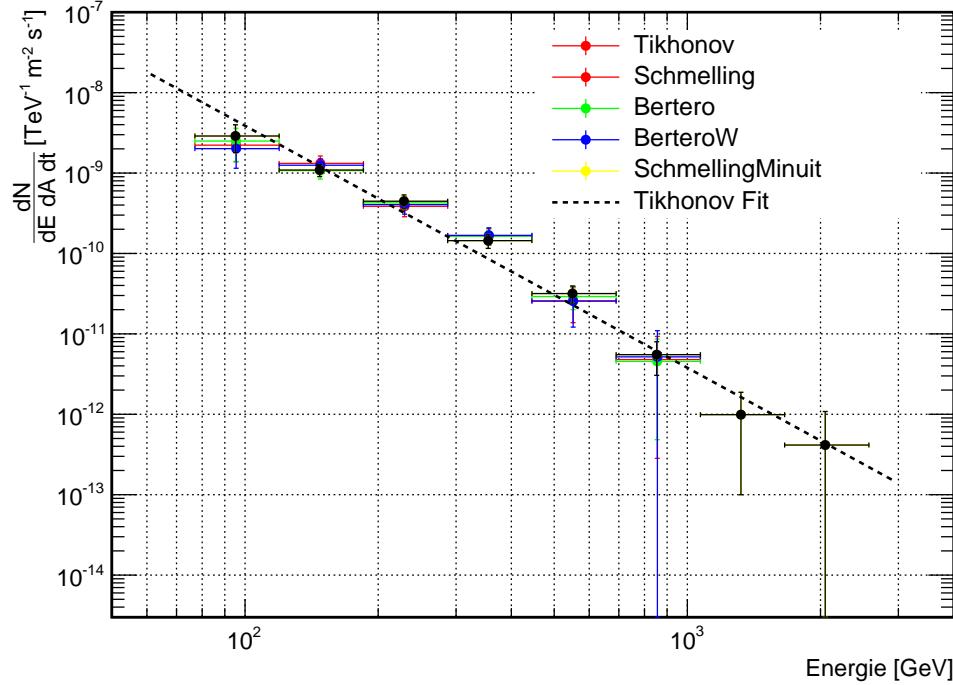


Abbildung 4.14: Entfaltetes Spektrum von Mrk 421 im Zeitraum vom 25.2.2012 bis zum 29.2.2012 mit allen wählbaren Regularisierungsmethoden. Die gestrichelte Linie stellt das gefittete Spektrum dar, welches mit Hilfe der Tikhonov-Regularisierung berechnet wurde.

Es ist zu sehen, dass die Entfaltungen ohne Tikhonov-Regularisierung im hohen Energiebereich, d.h. $E > 9$ TeV, keine Ergebnisse liefern. Aufgrund des großen Energiebereichs, in dem die Entfaltung mit Tikhonov-Regularisierung Ergebnisse liefert, wird wieder ein Fit der Daten eingezeichnet. Der Fit lieferte folgendes Ergebnis:

$$\frac{dN}{dEdAdt} = (1,42 \pm 0,11) \cdot 10^{-11} \left(\frac{E}{0,3\text{TeV}} \right)^{-3,01 \pm 0,14} \text{TeV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}. \quad (4.15)$$

Aufgrund der kurzen Observationszeit wurde keine Entfaltung der Crab-Daten vorgenommen.

4.4.4 Dataset 4

Dieses Datenset beinhaltet die ersten Daten, die von Mrk 421 nach dem Austausch der MAGIC-I-Kamera aufgenommen wurden. Wie das Datenset 1 umfasst dieses Datenset nur wenige Tage. An drei Tagen wurde Mrk 421 im Stereo-Modus observiert.

Datencheck

Der Datencheck für diese Daten geschieht analog zum Datencheck des Datensets 2. Die Tabelle 4.6 zeigt, welche Mrk 421-/Crab- und Background-Daten nach dem Datencheck vorhanden sind und die Tabelle 4.5 zeigt, an welchen Tagen die Mrk 421-Daten genommen wurden.

Tabelle 4.5: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421 aus Datenset 4.

Monat	Tag
Dezember	15., 19., 23.

Tabelle 4.6: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421, Crab und Background aus Datenset 4.

Quelle	Observationszeit [min]
Mrk 421	74
Crab	852
1ES0229	221
NGC1275	112
SegueA	900

Lichtkurve: Crab und Mrk 421

Die Lichtkurve von Crab befindet sich in Abbildung 4.15. Es ist zu sehen, dass diese Lichtkurve mit dem mittleren Fluss von Crab gut übereinstimmt. Die Lichtkurve von Mrk 421 ist in Abbildung 4.16 dargestellt. In diesem Zeitraum liegt der Mrk 412-Fluss weiterhin unterhalb des Crab-Flusses.

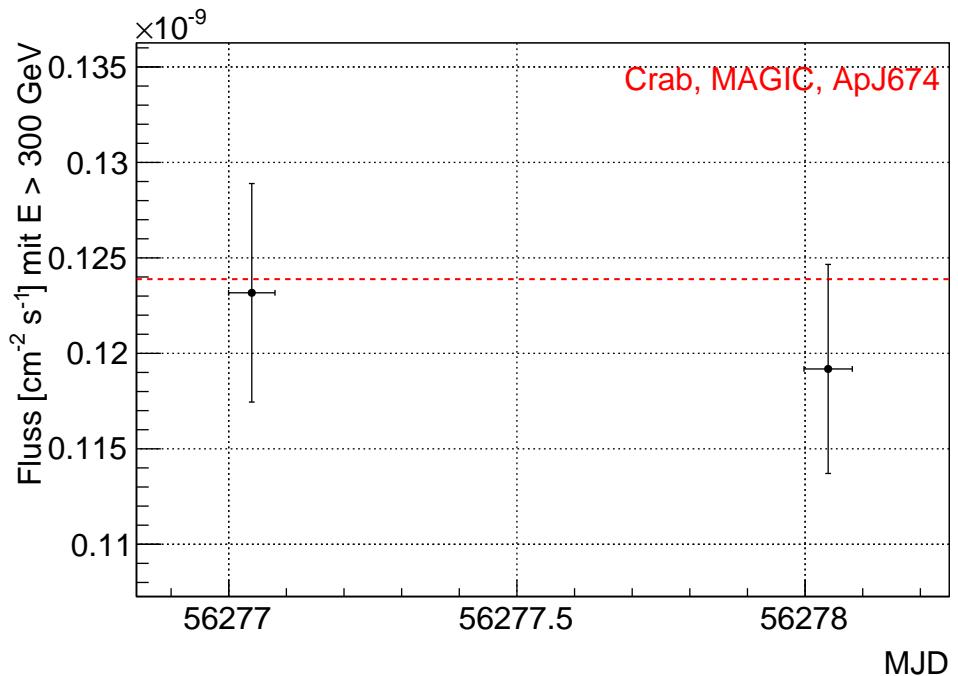


Abbildung 4.15: Lichtkurve von Crab im Zeitraum vom 15.12.2012 bis zum 23.12.2012 mit dem mittleren Crab-Fluss (nach [7]).

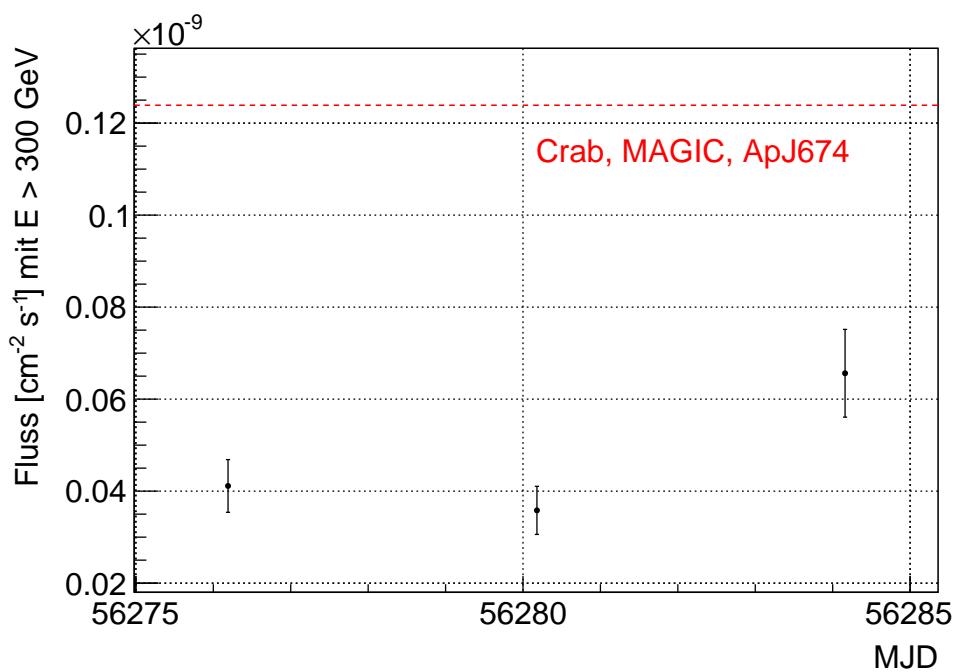


Abbildung 4.16: Lichtkurve von Mrk 421 im Zeitraum vom 15.12.2012 bis zum 23.12.2012. Der Fluss von Mrk 421 liegt im Durchschnitt bei 38% des Flusses von Crab, den die rote Linie darstellt.

Spektrum: Mrk 421

Das entfaltete Spektrum von Mrk 421 befindet sich in Abbildung 4.17.

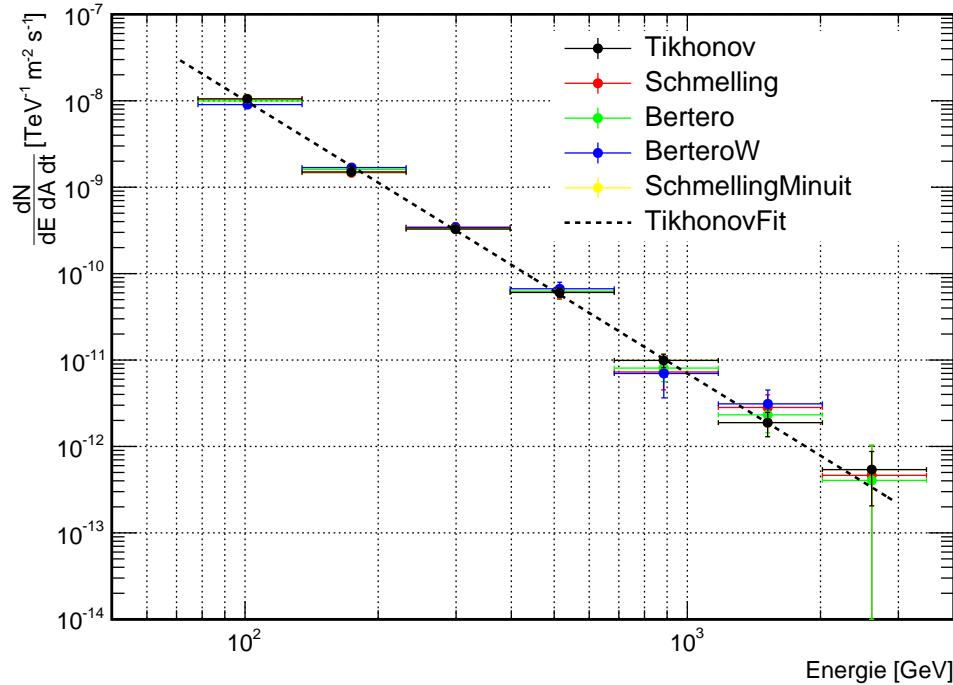


Abbildung 4.17: Entfaltetes Spektrum von Mrk 421 im Zeitraum vom 15.12.2012 bis zum 23.12.2012 mit allen wählbaren Regularisierungsmethoden. Die gestrichelte Linie stellt das gefittete Spektrum dar, welches mit Hilfe der Tikhonov-Regularisierung berechnet wurde.

Der Fit des entfalteten Spektrums mit Tikhonov-Regularisierung liefert folgendes Ergebnis:

$$\frac{dN}{dEdAdt} = (3,14 \pm 0,15) \cdot 10^{-10} \left(\frac{E}{0,3\text{TeV}} \right)^{-3,16 \pm 0,07} \text{TeV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}. \quad (4.16)$$

4.4.5 Dataset 3

Datencheck

Der Datencheck für die Mono-Daten geschieht analog zum Datencheck der anderen Datensets. Die Analyse beruht auf Daten auf Star-Level und nicht Superstar-Level wie zuvor. Tabelle 4.7 und Tabelle 4.8 zeigen, welche Mrk 421-und Background-Daten nach dem Datencheck vorhanden sind. Ein Beobachtung von Crab fand in diesem Zeitraum nicht statt.

Tabelle 4.7: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421 aus Dataset 3.

Monat	Tag
Mai	23., 25., 26., 27.
Juni	15., 19.

Tabelle 4.8: Übersicht über alle nach dem Datencheck zur Verfügung stehenden Daten von Mrk 421, Crab und Background aus Dataset 3

Quelle	Observationszeit [min]
Mrk 421	333
1ES1959	360
AE-Aqr	54
HD215227	649
M87	64

Energieschätzung

Im Vergleich zu der Stereo-Analyse müssen für die Mono-Analyse ältere Programme verwendet werden. Die RFs für die Disp-Bestimmung und Gamma-Hadron-Separation werden mit Hilfe von *Osteria* erstellt. Im Gegensatz zur Standardanalyse werden keine Look-Up-Tables zur Energieschätzung benutzt, sondern ebenfalls ein RF.

Lichtkurve: Mrk 421

Nachdem allen Ereignissen eine Hadroness, ein Disp-Wert sowie eine geschätzte Energie zugeordnet worden sind, wird nach Anwendung eines Hadroness-Schnittes eine Lichtkurve erstellt. Dies geschieht mit Hilfe des Programms *Fluxlc*. Obwohl keine Crab-Daten zur Verfügung standen, um die Einstellungen für die Lichtkurve mit einem bekannten Fluss zu überprüfen, wird eine Lichtkurve für Mrk 421 erstellt. Abbildung 4.18 zeigt die Lichtkurve für Mrk 421.

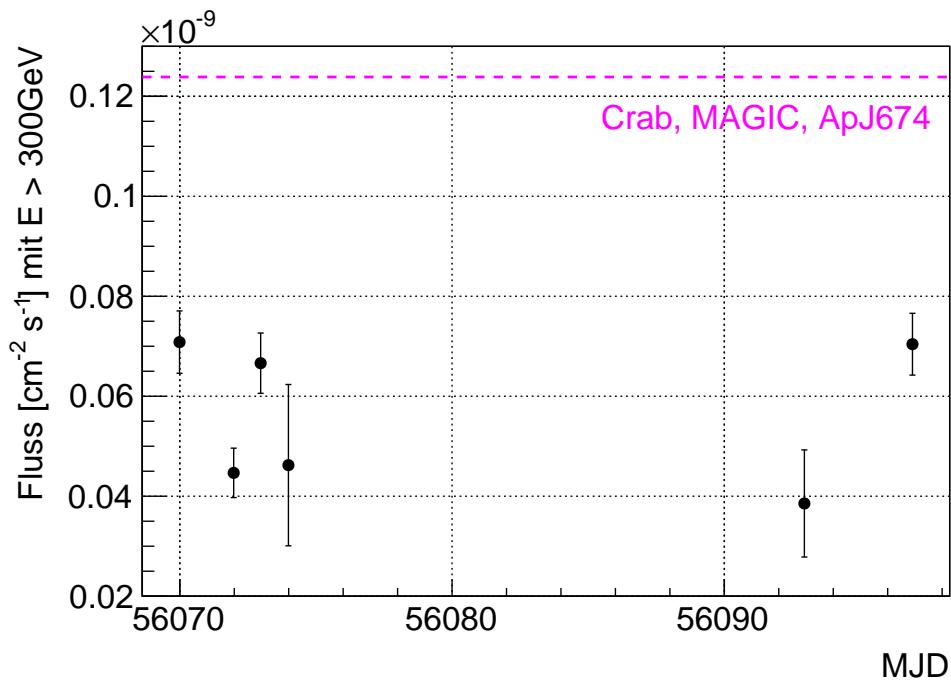


Abbildung 4.18: Lichtkurve von Mrk 421 im Zeitraum vom 23.05.2012 bis zum 19.06.2012. Der Fluss von Mrk 421 liegt im Durchschnitt bei 45% des Flusses von Crab, den die rosa Linie darstellt.

Es zeigt sich, dass der Fluss von Mrk 421 in diesem Zeitbereich genau wie in den anderen Zeitbereichen ebenfalls geringer als der Crab-Fluss ist.

Spektrum

In Abbildung 4.19 ist das entfaltete Spektrum für diesen Zeitraum dargestellt. Der Fit an die Datenpunkte nach der Entfaltung mit Tikhonov-Regularisierung liefert folgendes Ergebnis:

$$\frac{dN}{dEdAdt} = (5,42 \pm 0,23) \cdot 10^{-10} \left(\frac{E}{0,3 \text{ TeV}} \right)^{(-3,25 \pm 0,09)} \text{ TeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}. \quad (4.17)$$

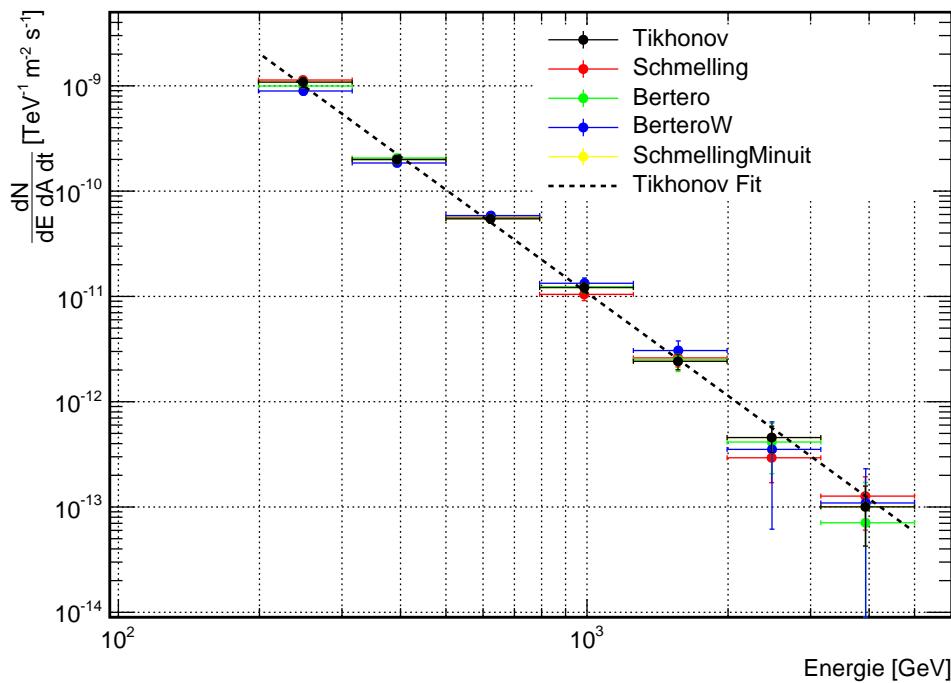


Abbildung 4.19: Spektrum von Mrk 421 im Zeitraum vom 23.05.2012 bis zum 19.06.2012 mit allen wählbaren Regularisierungsmethoden. Die gestrichelte Linie stellt das gefittete Spektrum dar, welches mit Hilfe der Tikhonov-Regularisierung berechnet wurde.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich der Datensets

Nachdem für jedes Datenset einzelne Lichtkurven erstellt worden sind, sind in Abbildung 4.20 nun alle Daten in einer Lichtkurve dargestellt. Da zwischen dem 20.06.2012 und dem 10.12.2012 keine Daten von Mrk 421 genommen wurden, weil die MAGIC-I-Kamera außer Betrieb war, das Upgrade durchgeführt wurde und Mrk 421 zwischen Juli und November nicht beobachtbar ist, befindet sich eine Lücke in der Lichtkurve.

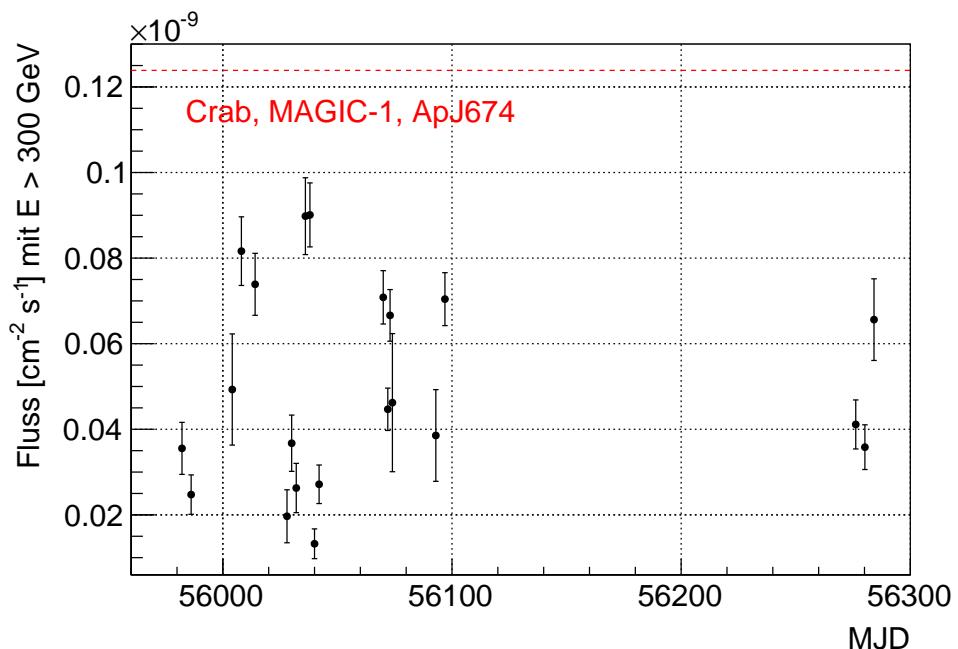


Abbildung 4.20: Zusammenfassende Lichtkurve der Mrk 421-Daten. Es sind alle vorher berechneten Lichtkurven-Daten in einem Diagramm dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Fluss von Mrk 421 im gesamten Jahr 2012 unterhalb des mittleren Flusses von Crab liegt, allerdings durchaus zeitliche Variabilitäten aufweist.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich der Datensets

Anhand der Abbildung ist zu sehen, dass alle Datenpunkte etwa auf dem gleichen niedrigen Niveau liegen. Der Fluss von Crab wird zu keinem Zeitpunkt erreicht. Physikalisch interessante Phänomene wie Flares wurden im gesamten Jahr 2012 von MAGIC nicht beobachtet. Verglichen mit dem gesamten Fluss von MAGIC zwischen Dezember 2004 und Dezember 2009 [12] ist der Fluss von 2012 auf einem niedrigen Niveau. Im Dezember 2006 war er an vielen Tagen auf einem ähnlich niedrigen Niveau.

Im Gegensatz zu den Flares von 2007 und 2008, bei denen der Fluss bis zu 20 mal so hoch wie zu ruhigen Zeiten [12] war, ist der Fluss 2012 konstant niedrig.

Ein Vergleich mit dem Fluss zwischen Januar und Mai 2009 [60] liefert ebenfalls das Ergebnis, dass sich Mrk 421 2012 in einem ruhigen Zustand befand.

In Tabelle 4.9 sind die spektralen Indizes der Entfaltung der einzelnen Datensets zusammengefasst. Die spektralen Indizes der Datensets 1, 3 und 4 beschreiben ein steiles Spektrum mit relativ niedrigem hochenergetischem Fluss. Datenset 2 hat einen kleineren spektralen Index, d.h. das Spektrum ist härter, wobei der Fluss wie oben erwähnt, den Crab-Fluss nicht erreicht.

Tabelle 4.9: Vergleich der spektralen Indizes und Flusskonstanten der einzelnen Datensets.

Datenset	Normierung [$\text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]	spektraler Index
Datenset 1	$(1,42 \pm 0,11) \cdot 10^{-10}$	$-3,01 \pm 0,14$
Datenset 2	$(2,74 \pm 0,06) \cdot 10^{-10}$	$-2,64 \pm 0,03$
Datenset 3	$(5,42 \pm 0,23) \cdot 10^{-10}$	$-3,25 \pm 0,09$
Datenset 4	$(3,14 \pm 0,15) \cdot 10^{-10}$	$-3,16 \pm 0,07$

5 Multiwellenlängen-Untersuchungen

In diesem Kapitel werden neben der MAGIC Lichtkurve noch Lichtkurven anderer Experimente in anderen Wellenlängen dargestellt, die im Rahmen einer Multiwellenlängen -Kampagne (MWL-Kampagne) genommen wurden und mit den MAGIC Daten verglichen. Es stehen dazu Daten im Energiebereich zwischen Radiowellen und Very High Energy Gamma Rays zur Verfügung. Die MWL-Kampagne fand zwischen dem 23.12.2011 und dem 01.06.2012 statt und war die Fortsetzung einer früheren MWL-Kampagne von 2009. Genauso wie während der Vorgängerkampagne befindet sich innerhalb der Beobachtungszeit kein Flare. Das Ziel dieser Kampagne ist, den Fluss und die spektrale Entwicklung der Breitband-Emission über eine lange Zeitspanne zu untersuchen, wobei jeweils tageweise Daten genommen wurden. Während es viele Untersuchungen zu den Emissionsszenarien bei Flares gibt (siehe z.B. [61]), wurde der ruhige Zustand von Mrk 421 nicht sehr ausführlich untersucht (abgesehen von [47]). Mit Hilfe von diesen Daten, können grundlegende Emissionsprozesse untersucht werden.

Blazare wie Mrk 421 sind in allen Wellenlängen sehr variabel. Die Spektrale Energieverteilung (SED) wird von der Jet-Emission dominiert und besitzt eine zweihöckrige Struktur. Der erste Höcker findet sich bei niedrigen Energien [Radio, optisch, Röntgenstrahlen] und der andere bei höheren Energien [Röntgen, Gamma, VHE]. Während der Ursprung des niederenergetischen Höckers Synchrotron-Emission von relativistischen Elektronen ist, ist der Ursprung des hochenergetischen Höckers noch nicht genau bekannt. Sowohl leptonische als auch hadronische Modelle versuchen die Struktur zu erklären. Um Modelle für den hochenergetischen Höcker zu bestimmen, sind weiterhin Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängen nötig.

5.1 Teilnehmende Experimente an der MWL-Kampagne

Von den folgenden Experimenten, die sich an dieser Kampagne beteiligt haben, stehen für diese Analyse Daten zur Verfügung:

- MAGIC: eigene Analyse

- *Swift*/XRT: *Swift* ist ein Satellitenexperiment mit dem Ziel GRBs zu detektieren und zu untersuchen. Dabei liegt die Priorität darauf, den Ursprung von GRBs zu finden, die Entwicklung der GRBs und die Wechselwirkung mit der Umgebung zu untersuchen und die GRBs zu klassifizieren. Dazu sind drei Instrumente an Bord, die in verschiedenen Wellenlängen sensitiv sind. Mit *Swift* können Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, UV-Strahlung und optisches Licht detektiert werden. Mit Hilfe des Burst Alert Telescope (BAT) werden Teilchen mit Energien zwischen 15 keV und 150 keV untersucht. Das UV/Optical Telescope (UVOT) detektiert im sichtbaren und im UV-Bereich (170-600 nm). Die für diese Analyse vorliegenden Daten sind vom Xray Telescope (XRT), womit Röntgenstrahlung mit einer Energie zwischen 0,3 keV und 10 keV detektiert wird.[28]
- OVRO: Das Owens Valley Radio Observatory (OVRO) befindet sich in der Nähe von Bishop in Kalifornien im Osten der Sierra Nevada. Es ist ein Radioteleskop mit einem Durchmesser von 40 m, welches bei 15 GHz operiert. Ziel dieses Experimentes ist das Monitoring von ca. 1200 Blazaren. Dabei wird jede Quelle in einem Abstand von zwei Tagen regelmäßig beobachtet. Diese Daten werden dann mit den Daten, die mit *Fermi* von den gleichen Quellen aufgenommen wurden, verglichen und Korrelationen in der Variabilität gesucht. Letztendlich ist ein genaueres Verständnis von Emissionsprozessen in AGNs das Ziel.[56]
- Metsahovi: Metsahovi ist ein Radioteleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 14 m. Es befindet sich in Finnland, in Kirkkonummi, und beobachtet Frequenzen zwischen 2 GHz und 150 GHz. Mit dem Teleskop werden hauptsächlich extragalaktische Quellen beobachtet, aber auch die Sonne und es nimmt an VLBI (Very Large Baseline Interferometry)-Beobachtungen teil.[30]
- Optische Teleskope: Für diese Analyse stehen die Daten einiger optischer Teleskope zur Verfügung, deren Datennahme unter Einsatz des R-Filters geschah. Im Folgenden werden diese Teleskope aufgelistet:
 - Crimean: Das Crimean Astrophysical Observatory befindet sich in Nauchny auf der Krim, Ukraine, und beherbergt verschiedene optische Teleskope.[22]
 - KVA: Das Kungliga Vetenskapliga Academy (KVA)-Teleskop befindet sich genauso wie die MAGIC Teleskope auf dem Roque de los Muchachos auf La Palma. Es handelt sich um ein Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 35 cm. Die Daten sind alle im Johnson R-Band genommen.[50]

- Perkins: Das Perkins Telescope ist ein 72 inch (1,83 m)-Teleskop, das zum Lowell Observatory in Arizona, USA, gehört. Mit diesem Teleskop werden vor allem Wide-Field-Bilder aufgenommen und es dient der Multi-Objekt-Spektroskopie. Unter anderem soll mit diesem Teleskop auch die variable Natur von Blazaren untersucht werden.[51]
 - ROVOR: Das Remote Observatory for Variable Object Research (ROVOR) gehört zur Brigham Young University. Es handelt sich um ein optisches Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 16 inch (0,41 m) und es befindet sich 12 km nordwestlich von Delta (Utah). Es wurde gebaut, um variable Objekte wie AGNs dauerhaft zu monitoren und damit die existierenden Modelle für AGNs zu verbessern. ROVOR nimmt am Gamma Ray Burst Coordinate Network (GCN) teil und beobachtet die Afterglows im optischen Wellenlängenbereich.[64]
 - St. Petersburg: Das Pulkovo Astronomical Observatory befindet sich südlich von St. Petersburg auf einer Höhe von 75 m über NN.[54]
 - TeB: Das Bradford Robotic Telescope ist Teil des Observatorio del Teide auf Teneriffa, Kanarische Inseln. Es befindet sich auf einer Höhe von 2400 m und wird robotisch betrieben.[21]
 - NMSkies: New Mexico Skies bietet einen Standort und Support für dort aufgestellte Remote Teleskope. Das Teleskop NMSkies GRAS-001 befindet sich in Mayhill, New Mexico, USA.[58]
- *Fermi*: Das Large Area Telescope (LAT) befindet sich an Bord des *Fermi* Gamma-Ray Space Telescope und detektiert sowohl Gamma-Strahlen als auch geladene kosmische Strahlen. Das Teleskop beinhaltet einen Antikoinzidenzdetektor, durch den das Photon im Gegensatz zur geladenen kosmischen Strahlung wechselwirkungsfrei fliegt. Danach wechselwirkt es mit Atomen in einer der Schichten aus Wolfram-Folie und produziert ein Elektron-Positron-Paar, welches getrackt wird. Die finale Energie dieses Elektron-Positron-Paares wird dann in einem Kalorimeter gemessen. Das Entdecken und Überwachen von variablen Quellen und GRBs sowie die Erstellung von aktuellen Katalogen von hochenergetischen Quellen gehören zu den Hauptzielen von *Fermi*.[11]

5.2 Vergleich der Lichtkurven

In Abbildung 5.1 befinden sich die Lichtkurven der verschiedenen Experimente, die im Zeitraum zwischen dem 23.12.11 (MJD: 55918) und dem 01.06.12 (MJD: 56079) gemessen wurden.

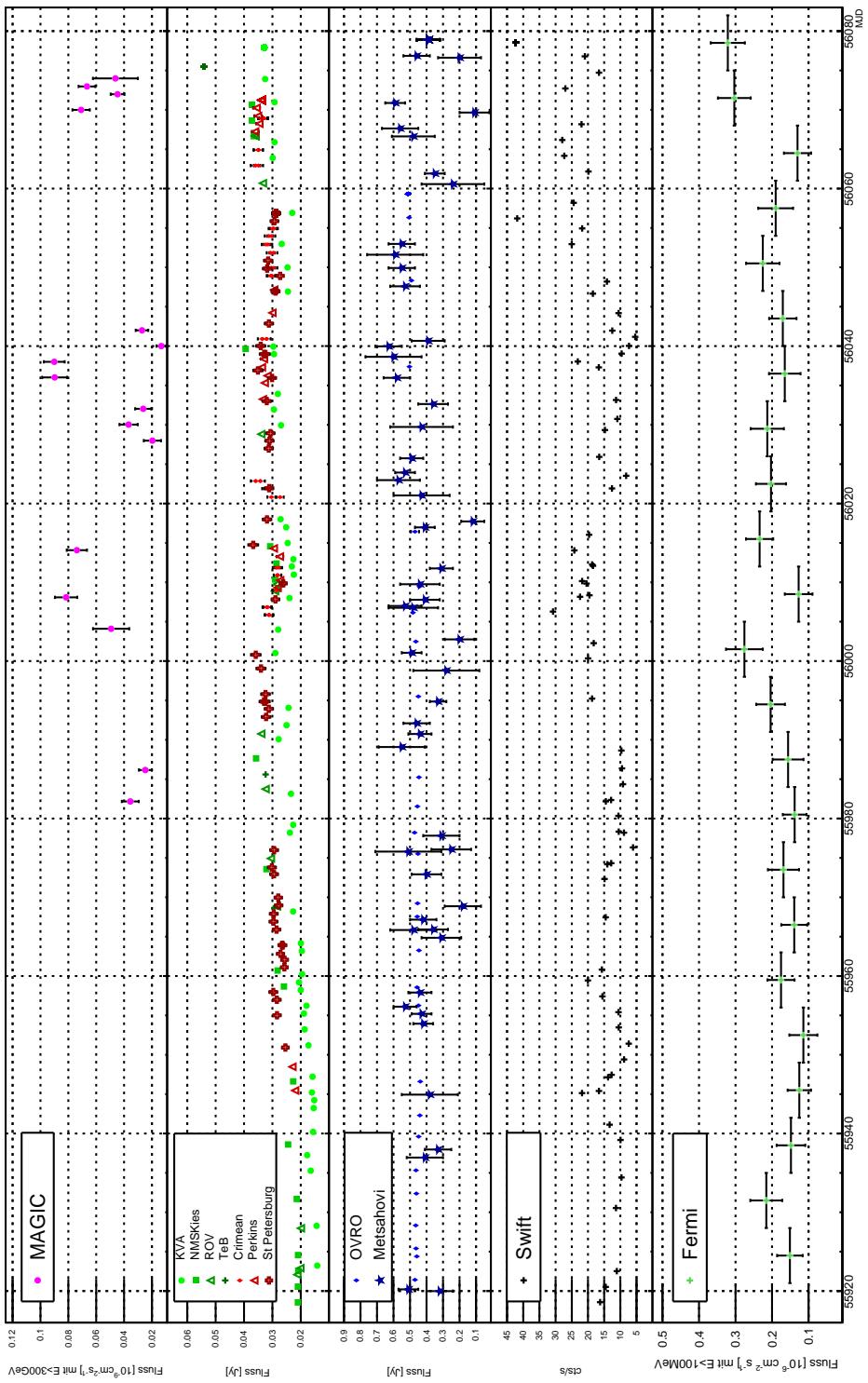


Abbildung 5.1: Alle Lichtkurven, die während der MWL-Kampagne aufgenommen wurden: von oben nach unten: VHE, Optische Teleskope, Radio, Röntgen, Gamma

Leider hat MAGIC an nur 16 Tagen davon Daten genommen, weswegen die Lichtkurve im Vergleich zu den anderen Experimenten recht kurz ist, bzw. große Lücken aufweist. Auf den ersten Blick weist die Lichtkurve eine variable Struktur auf, was in Abschnitt 5.3 noch getestet wird.

Die optischen Lichtkurven der verschiedenen Teleskope liegen insgesamt auf einem ähnlichen Niveau, wobei KVA immer etwas niedriger ist. Die meisten Daten stammen von KVA (Beobachtung an 48 Tagen), dem St. Petersburger Teleskop (Beobachtung an 46 Tagen) und dem Crimean Astrophysical Observatory (Beobachtung an 35 Tagen). Die Variabilität im Fluss zwischen den verschiedenen Teleskopen ist ähnlich. Einige Schwankungen sind zu erkennen und zum Ende der Lichtkurve nimmt das Niveau etwas zu.

Im Radiobereich sind bei den OVRO-Daten kaum Variabilitäten zu erkennen. Die Daten von Metsahovi unterliegen größeren Schwankungen, sind aber auch mit einem größeren Fehler behaftet. Quantitativ wird dieses Verhalten in Abschnitt 5.3 gezeigt.

Die Daten des Röntgenteleskops *Swift*, welches eine sehr konstante Datennahme aufweist, zeigen einen eher variablen Fluss, was im Folgenden noch überprüft wird.

Die Daten von *Fermi*-LAT sind gemittelte Resultate von einer Woche, zeigen also keine täglichen Schwankungen. Aufgrund des Mittelns und der dadurch Nicht-Vergleichbarkeit mit den anderen Experimenten wird im Folgenden keine Variabilität berechnet.

Insgesamt kann man erkennen, dass die Variabilität in der VHE-Lichtkurve auf Zeitskalen von ca. einem Tage auftritt, während der Fluss im optischen oder Röntgenbereich eher innerhalb einer Woche ansteigt und wieder abnimmt. Die Radio-lichtkurven weisen keine sichtbaren Variabilitäten auf.

5.3 Variabilitätsuntersuchung

Obwohl es in der Zeit der MWL-Kampagne zu keinem Flare kam, sind die Daten von Mrk421 variabel. Um quantifizieren zu können, wie variabel die Daten sind, wird für jeden Energiebereich die Fractional Variability nach [66] ausgerechnet. Der Wert für die Fractional Variability F_{var} wird mit S : der Standardabweichung der N Flussmessungen, $\langle \sigma_{err} \rangle$: dem mittleren quadrierten Fehler und $\langle x \rangle^2$: dem Quadrat des mittleren Photonflusses berechnet:

$$F_{var} = \sqrt{\frac{S^2 - \langle \sigma_{err} \rangle^2}{\langle x \rangle^2}}. \quad (5.1)$$

Der Fehler davon ist [53] entnommen:

$$\Delta F_{var} = \sqrt{F_{var}^2 + err(\sigma_{N XS}^2)} - F_{var} \quad (5.2)$$

mit $err(\sigma_{N XS}^2)$ aus [66]:

$$err(\sigma_{N XS}^2) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{N} \frac{\langle \sigma_{err}^2 \rangle}{\langle x \rangle^2}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\langle \sigma_{err}^2 \rangle}{N} \frac{2F_{var}}{\langle x \rangle}} \right)^2}. \quad (5.3)$$

Damit die Berechnung von F_{var} stabil ist, wird eine Mindestanzahl von 20 gemessenen Datenpunkten empfohlen. Obwohl die MAGIC-Daten nur aus 16 gemessenen Punkten bestehen, wird trotzdem zum Vergleich einmal die Variabilität ausgerechnet. Die berechneten Werte für die Variabilität F_{var} mit Fehler ΔF_{var} sowie die Anzahl der Messpunkte N befinden sich in Tabelle 5.1, bzw. in Abbildung 5.2.

Tabelle 5.1: Anzahl der Messpunkte, sowie die berechneten Variabilitäten für die verschiedenen Lichtkurven.

Wellenlänge	Experiment	N	F_{var}	ΔF_{var}
Radio	Metsahovi	55	0,1390	0,0319
	OVRO	27	0,0381	0,0036
optisch	KVA	48	0,2227	0,0031
	St. Petersburg	46	0,0768	0,0067
	Crimean	35	0,0586	0,0075
Röntgen	Swift	70	0,4428	0,0015
Gamma	MAGIC	16	0,4913	0,0380

Abbildung 5.2 zeigt die Variabilitäten in den einzelnen Wellenlängen, wobei die Breite des x-Balkens den Energiebereich angibt, in dem die jeweiligen Instrumente messen. Abbildung 5.2 zeigt, dass die Variabilität von Mrk421 im Radio- und im optischen Bereich sehr niedrig ist, während die AGN im Röntgen- und im Gamma-Bereich Variabilität aufweist, wobei beachtet werden muss, dass der Wert für MAGIC mit Vorsicht betrachtet werden muss, da die Anzahl der Datenpunkte niedrig

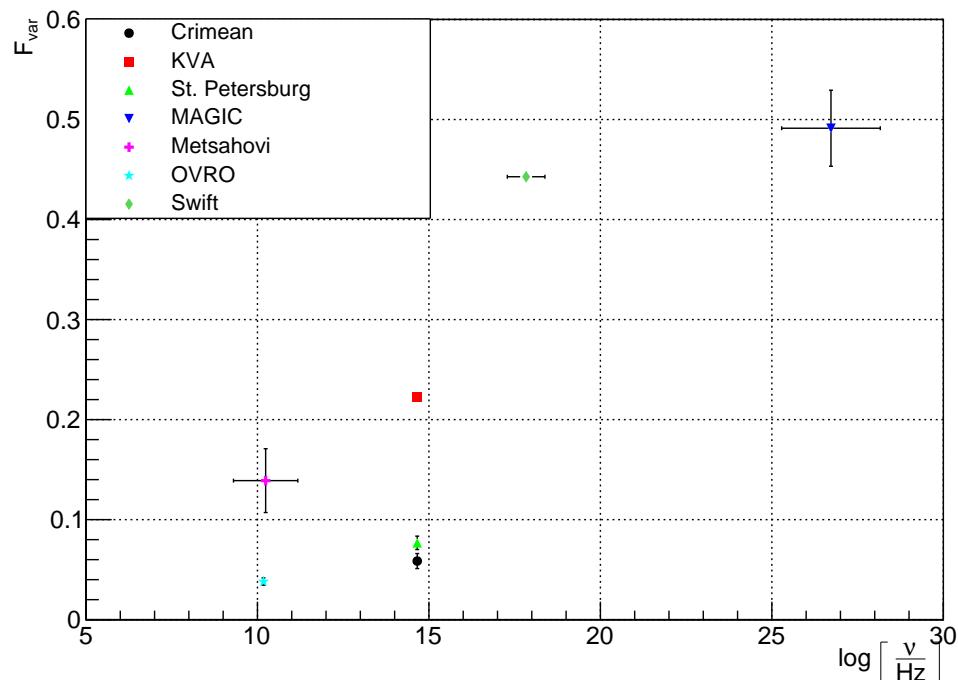


Abbildung 5.2: Darstellung der Variabilitäten in den verschiedenen Wellenlängen. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Frequenz die Variabilität zunimmt. Die Variabilität der Röntgen- und der Gammastrahlung ist auf einem ähnlichen Niveau.

5.3 Variabilitätsuntersuchung

ist. Insgesamt lässt sich sagen, dass die Variabilitäten mit steigender Frequenz ebenfalls ansteigen. Die hier berechneten Variabilitäten sind ähnlich zu den berechneten Werten für Mrk421 von 2009 [47].

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst eine Einführung in die Astroteilchenphysik gegeben. Die kosmische Strahlung wurde beschrieben und die möglichen Quellen dieser Strahlung vorgestellt. Anschließend wurden mögliche Beschleunigungsmechanismen dargestellt. Die Überleitung zum Gebiet der Gammaastronomie führt in das eigentliche Forschungsthema dieser Arbeit ein. Dieses Thema umfasst die Analyse des Aktiven Galaktischen Kerns (AGN: Active Galactic Nucleus) Markarian 421, welcher nachfolgend vorgestellt wurde.

Ein essenzieller Grundstein für diese Analyse sind die speziell angepassten Monte Carlo-Simulationsdaten. Diese wurden im Zeitraum der Doktorarbeit in Dortmund für die gesamte MAGIC-Kollaboration produziert und an aktuelle Hardwareveränderungen des Teleskops angepasst. Beginnend mit der Luftschausimulation mit *CORSIKA* werden nacheinander die Reflektor-Simulation und die Kamera- und Elektronik-Simulation vorgestellt. Diese Programme benötigen spezielle Eingabeparameter, welche ebenfalls beschrieben werden. Diesen reinen Simulationsprogrammen folgen die Kalibrationsprogramme. Nach dem Durchlaufen durch die Simulations- und die Kalibrationsprogramme liegen die Monte-Carlo-Simulationsdaten im gleichen Format vor, wie die realen Daten, welche der Kollaboration zur Verfügung gestellt werden. Um eine schnelle Produktion von ausreichend MC-Daten zu gewährleisten, wird die an der TU Dortmund implementierte automatische Produktionskette genutzt. Diese aus Skripten und einer Datenbank bestehende Kette wurde im Verlaufe dieser Doktorarbeit betreut und die Skripte an aktuelle Hardwareveränderungen angepasst.

Im Analyse-Teil dieser Arbeit wird die Bedeutung der MC-Simulationsdaten in den einzelnen Programmen herausgestellt. Es wird zunächst die Methode des Random Forests in der Gamma-Hadron-Separation und in der Rekonstruktion der Quellposition vorgestellt. Danach wird die Energierekonstruktion mit Hilfe von Look-Up-Tabellen erklärt. Abschließend wird die Methode der Entfaltung kurz beschrieben. Nachdem diese Methoden der Analyse vorgestellt wurden, erfolgt die Analyse der Daten der AGN Mrk 421 aus dem Jahr 2012. Diese Daten wurden während des Teleskop-Upgrades genommen, was zu einer geringeren Menge an Daten im Vergleich zum Normalbetrieb führte. Da die Quelle von bodengebundenen Teleskopen generell zwischen Juli und November nicht beobachtet werden kann, weist die

Datennahme in diesem Zeitraum eine große Lücke auf. Des Weiteren mussten die Daten aufgrund verschiedener Hardwareveränderungen und Spiegeleigenschaften in vier separate Datensätze getrennt werden, die jeweils vier separate MC-Datensätze erfordern. Ein Datensatz besteht aus Mono-Beobachtungen, da die alte Kamera von MAGIC-I, kurz bevor sie durch eine neue Kamera ersetzt werden sollte, defekt war. Aufgrund dieser Tatsache waren keine stereoskopische Beobachtung mehr möglich und es musste wiederum ein speziell angepasster MC-Datensatz verwendet werden. Aus der Analyse dieser einzelnen Datensätze folgt, dass die Quelle Mrk 421 im Jahr 2012 keine Flares aufweist. Ihr Fluss liegt zwischen 24% und 45% des Flusses von Crab und somit auf einem für diese Quelle konstant niedrigen Niveau.

Anschließend an die Analyse der Daten mit MAGIC wurden die Daten einer Multiwellenlängenkampagne, die 2012 durchgeführt wurde, ausgewertet. Diese enthält Beobachtungen unterschiedlicher Instrumente wie bodengebundener Teleskope oder Satellitenexperimente. Die Lichtkurven der einzelnen Instrumente wurden in einem Diagramm dargestellt und ihre Variabilität untersucht. Diese Untersuchung hat ergeben, dass die Quelle während der Multiwellenlängenkampagne vor allem variable Gamma- und Röntgenstrahlung emittiert. Mit steigender Frequenz steigt auch die Variabilität. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen, die eine MWL-Studie 2009 geliefert hat, wobei diese Studie die höchste Variabilität für Röntgenstrahlung gefunden hat. Die hohe Variabilität für Röntgenstrahlung lässt Hinweise auf das SSC-Modell zu. Allerdings sind hadronische Modelle auch noch nicht ausgeschlossen, da eine erfolgreiche Beobachtung dieser Quelle mit Neutrino-Teleskopen noch nicht gelang.

Ausblick

Die möglichst schnelle Verfügbarkeit von MC-Simulationen für die Analyse der Daten erfordert eine zeitnahe Produktion. Mit Hilfe einer weiterhin schnellen Produktion, die optimal an die Hardware angepasst ist, können gute Analyseergebnisse erzielt werden. Technisch gesehen könnte dies durch eine Aktualisierung der MC-Kette unter Benutzung einer aktuellen Programmiersprache geschehen. Sinnvoll wäre auch der Einbau von mehr Fehlermeldungen in der Produktionsstruktur. Des Weiteren wäre es von großem Vorteil, die Laufzeit von *CORSIKA* zu verringern, da dieses Programm mit Abstand die längste Laufzeit benötigt.

In Zukunft könnten Neutrino-Teleskope Aufschlüsse über die Emissionsmodelle in extragalaktischen Quellen geben, sofern sie mit Sicherheit Neutrinos detektieren oder nicht detektieren. Mit deren Hilfe und mit Hilfe weiterer Multiwellenlängenkampagnen könnte die Physik im Quelltyp der AGN besser verstanden werden. So

6 Zusammenfassung und Ausblick

könnte es damit dann möglich sein, die bis jetzt bekanntesten AGNs, Mrk 421 und Mrk 501, genau zu beschreiben.

Mit Gammateleskop-Arrays der neueren Generation wie CTA kann die Sensitivität erhöht werden und der beobachtbare Energiebereich erweitert werden. Es wird möglich sein schwache Quellen zu detektieren, die große Entfernung zu uns haben. Dann ist es wahrscheinlich, mit Hilfe der Gammaastronomie in neue Bereiche vorzudringen:

„Der Weltraum, unendliche Weiten. Wir schreiben das Jahr [ca.] 2200. [...] Viele Lichtjahre von der Erde entfernt dringt [die Gammaastronomie] in Galaxien vor, die nie ein Mensch zuvor gesehen hat“. Star Trek

Literatur

- [1] M. G. Aartsen et al. "Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data". In: *Physical Review Letters* 113.10, 101101 (Sep. 2014), S. 101101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.101101. arXiv: 1405.5303 [astro-ph.HE].
- [2] A. A. Abdo et al. "Fermi Large Area Telescope Observations of Markarian 421. The Missing Piece of its Spectral Energy Distribution". In: *The Astrophysical Journal* 736, 131 (Aug. 2011), S. 131. DOI: 10.1088/0004-637X/736/2/131. arXiv: 1106.1348 [astro-ph.HE].
- [3] A. A. Abdo et al. "TeV Gamma-Ray Sources from a Survey of the Galactic Plane with Milagro". In: *The Astrophysical Journal, Letters* 664 (Aug. 2007), S. L91–L94. DOI: 10.1086/520717. arXiv: 0705.0707.
- [4] M. Ageron et al. „ANTARES: The first undersea neutrino telescope“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 656 (Nov. 2011), S. 11–38. DOI: 10.1016/j.nima.2011.06.103. arXiv: 1104.1607 [astro-ph.IM].
- [5] J. Albert et al. „Implementation of the Random Forest method for the Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope MAGIC“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 588 (Apr. 2008), S. 424–432. DOI: 10.1016/j.nima.2007.11.068. arXiv: 0709.3719.
- [6] J. Albert et al. "Observation of Gamma Rays from the Galactic Center with the MAGIC Telescope". In: *The Astrophysical Journal, Letters* 638 (Feb. 2006), S. L101–L104. DOI: 10.1086/501164. eprint: astro-ph/0512469.
- [7] J. Albert et al. „VHE γ -Ray Observation of the Crab Nebula and its Pulsar with the MAGIC Telescope“. In: *Astrophysical Journal* 674 (Feb. 2008), S. 1037–1055. DOI: 10.1086/525270. arXiv: 0705.3244.
- [8] J. Aleksić et al. „Performance of the MAGIC stereo system obtained with Crab Nebula data“. In: *Astroparticle Physics* 35 (Feb. 2012), S. 435–448. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2011.11.007. arXiv: 1108.1477 [astro-ph.IM].
- [9] J. Aleksić et al. „The major upgrade of the MAGIC telescopes, Part I: The hardware improvements and the commissioning of the system“. In: *ArXiv e-prints* (Sep. 2014). arXiv: 1409.6073 [astro-ph.IM].

Literatur

- [10] A.Moralejo. „The Reflector Simulation Program v.0.6“. In: *MAGIC-TDAS 02-11 (internal notes)* (Jan. 2003).
- [11] W. B. Atwood et al. “The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission”. In: *The Astrophysical Journal* 697 (Juni 2009), S. 1071–1102. DOI: 10.1088/0004-637X/697/2/1071. arXiv: 0902.1089 [astro-ph.IM].
- [12] Michael Backes. „Long-term observations of the TeV blazar 1ES 1959+650. Temporal and spectral behavior in the multi-wavelength context“. Dissertation. TU Dortmund, 2011.
- [13] Julia Becker. „Neutrinos On The Rocks - On the phenomenology of potential astrophysical neutrino sources“. Dissertation. TU Dortmund, 2007.
- [14] V. Beckmann und C. R. Shrader. “The AGN phenomenon: open issues”. In: *ArXiv e-prints* (Feb. 2013). arXiv: 1302.1397 [astro-ph.HE].
- [15] G. F. Bignami et al. „The COS-B experiment for gamma-ray astronomy“. In: *Space Science Instrumentation* 1 (Aug. 1975), S. 245–268.
- [16] O. Blanch und A. Moralejo. „How to use the Camera simulation program 0.7“. In: *MAGIC-TDAS 04-07 (internal notes)* (Sep. 2004).
- [17] V. Blobel und E. Lohrmann. *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*. Teubner Studienbücher Physik. Stuttgart: Teubner, 1998. URL: <https://cds.cern.ch/record/437773>.
- [18] R.K. Bock et al. „Methods for multidimensional event classification: a case study using images from a Cherenkov gamma-ray telescope“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 516.2–3 (2004), S. 511–528. ISSN: 0168-9002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2003.08.157>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203025051>.
- [19] M. Boettcher, D. E. Harris und H. Krawczynski. *Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei*. Wiley-VCH, 2012.
- [20] W. Bothe und W. Kolhörster. „Das Wesen der Höhenstrahlung“. In: *Zeitschrift für Physik* 56.11-12 (1929), S. 751–777. ISSN: 0044-3328. DOI: 10.1007/BF01340137. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01340137>.
- [21] University of Bradford. *Tenerife Observatory*. 2015. URL: http://www.telescope.org/infopage.php?title=Tenerife_Observatory.
- [22] Official Site of the Crimean Astrophysical Observatory. *Crimean Astrophysical Observatory*. 2015. URL: <http://www.crao.crimea.ua/ru/>.

-
- [23] T. DeYoung und HAWC Collaboration. „The HAWC observatory“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 692 (Nov. 2012), S. 72–76. DOI: 10.1016/j.nima.2012.01.026.
 - [24] Marlene Doert. „The talkative AGN next door Broad-band spectral variability of the TeV blazar Markarian 501“. Dissertation. TU Dortmund, 2013.
 - [25] S. I. Dutta, M. H. Reno und I. Sarcevic. „Tau neutrinos underground: Signals of $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations with extragalactic neutrinos“. In: *Physical Review D* 62.12, 123001 (Dez. 2000), S. 123001. DOI: 10.1103/PhysRevD.62.123001. eprint: [hep-ph/0005310](#).
 - [26] S. Funk et al. „The trigger system of the H.E.S.S. telescope array“. In: *Astroparticle Physics* 22 (Nov. 2004), S. 285–296. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2004.08.001. eprint: [astro-ph/0408375](#).
 - [27] J. A. Gaidos et al. „Extremely rapid bursts of TeV photons from the active galaxy Markarian 421“. In: *Nature* 383 (Sep. 1996), S. 319–320. DOI: 10.1038/383319a0.
 - [28] N. Gehrels et al. “The Swift Gamma-Ray Burst Mission”. In: *The Astrophysical Journal* 611 (Aug. 2004), S. 1005–1020. DOI: 10.1086/422091.
 - [29] Kenneth Greisen. „End to the Cosmic-Ray Spectrum?“ In: *Phys. Rev. Lett.* 16 (17 Apr. 1966), S. 748–750. DOI: 10.1103/PhysRevLett.16.748. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.16.748>.
 - [30] A. Greve et al. „147 GHz VLBI observations: Detection of 3C 273 and 3C 279 on the 3100 km baseline Metsähovi - Pico Veleta“. In: *Astronomy and Astrophysics* 390 (Juli 2002), S. L19–L22. DOI: 10.1051/0004-6361:20020893.
 - [31] C. Grupen. *Astroparticle Physics*. Springer Verlag, 2005.
 - [32] Marijke Haffke. „Atmosphere is MAGIC. Berechnung und Implementierung neuer Atmosphärenmodelle in die MAGIC-Monte-Carlo-Kette“. Diplomarbeit. TU Dortmund, 2007.
 - [33] D. Heck und D. Pierog. „Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User’s Guide“. 2013.
 - [34] D. Heck et al. *CORSIKA: a Monte Carlo code to simulate extensive air showers*. Feb. 1998.
 - [35] V. F. Hess. „Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten“. In: *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912), S. 1084–1091.
 - [36] A. M. Hillas. „Cerenkov light images of EAS produced by primary gamma“. In: *International Cosmic Ray Conference* 3 (Aug. 1985), S. 445–448.

- [37] J. R. Hörandel. „Cosmic Rays from the Knee to the Second Knee:: 10^{14} to 10^{18} eV“. In: *Modern Physics Letters A* 22 (2007), S. 1533–1551. doi: 10.1142/S0217732307024139. eprint: astro-ph/0611387.
- [38] G. Kanbach et al. „The project EGRET (Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope) on NASA’s Gamma-Ray Observatory (GRO)“. In: *Space Science Reviews* 49 (1988), S. 69–84.
- [39] W. L. Kraushaar et al. “High-Energy Cosmic Gamma-Ray Observations from the OSO-3 Satellite”. In: *The Astrophysical Journal* 177 (Nov. 1972), S. 341. doi: 10.1086/151713.
- [40] M. S. Longair. *High Energy Astrophysics. Stars, the Galaxy and the interstellar medium.* 2. Aufl. Bd. 2. Cambridge University Press, 2002.
- [41] MAGIC. *Energy Reconstruction (Theory)*. 2015. URL: [http://wiki.magic.pic.es/index.php/Energy_reconstruction_\(Theory\)](http://wiki.magic.pic.es/index.php/Energy_reconstruction_(Theory)).
- [42] MAGIC. *Flux Estimation (Theory)*. 2015. URL: [http://wiki.magic.pic.es/index.php/Flux_estimation_\(Theory\)](http://wiki.magic.pic.es/index.php/Flux_estimation_(Theory)).
- [43] MAGIC. *Image cleaning (Theory)*. 2015. URL: [http://wiki.magic.pic.es/index.php/Image_cleaning_\(Theory\)](http://wiki.magic.pic.es/index.php/Image_cleaning_(Theory)).
- [44] MAGIC. *Position reconstruction (Theory)*. 2015. URL: [http://wiki.magic.pic.es/index.php/Position_reconstruction_\(Theory\)](http://wiki.magic.pic.es/index.php/Position_reconstruction_(Theory)).
- [45] MAGIC. *Stereo reconstruction (Theory)*. 2015. URL: [http://wiki.magic.pic.es/index.php/Stereo_reconstruction_\(Theory\)](http://wiki.magic.pic.es/index.php/Stereo_reconstruction_(Theory)).
- [46] MAGIC. *Unfolding (Theory)*. 2015. URL: [http://wiki.magic.pic.es/index.php/Unfolding_\(Theory\)](http://wiki.magic.pic.es/index.php/Unfolding_(Theory)).
- [47] MAGIC Collaboration et al. „The 2009 multiwavelength campaign on Mrk 421: Variability and correlation studies“. In: *ArXiv e-prints* (Feb. 2015). arXiv: 1502.02650 [astro-ph.HE].
- [48] Daniel Mazin. „A study of very high energy gamma ray emission from AGNs and constraints on the extragalactic background light“. Dissertation. TU München - MPI für Physik, 2007.
- [49] R. A. Moralejo et al. *MARS: The MAGIC Analysis and Reconstruction Software*. Astrophysics Source Code Library. Nov. 2010. ascl: 1011.004.
- [50] K. Nilsson et al. „Host galaxy subtraction of TeV candidate BL Lacertae objects“. In: *Astronomy and Astrophysics* 475 (Nov. 2007), S. 199–207. doi: 10.1051/0004-6361:20077624. arXiv: 0709.2533.
- [51] Lowell Observatory. *Lowell Observatory*. 2015. URL: http://www.lowell.edu/research_telescopes_perkins.php#.

-
- [52] K. A. Olive und Particle Data Group. „Review of Particle Physics“. In: *Chinese Physics C* 38.9, 090001 (Aug. 2014), S. 090001. DOI: 10.1088/1674-1137/38/9/090001. arXiv: 1412.1408.
 - [53] J. Poutanen, A. A. Zdziarski und A. Ibragimov. „Superorbital variability of X-ray and radio emission of Cyg X-1 - II. Dependence of the orbital modulation and spectral hardness on the superorbital phase“. In: *Monthly Notices of the RAS* 389 (Sep. 2008), S. 1427–1438. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13666.x. arXiv: 0802.1391.
 - [54] Official Site of the Pulkovo Astronomical Observatory. *Pulkovo Astronomical Observatory*. 2015. URL: <http://www.gao.spb.ru/russian/index.html>.
 - [55] M. Punch et al. „Detection of TeV photons from the active galaxy Markarian 421“. In: *Nature* 358 (Aug. 1992), S. 477. DOI: 10.1038/358477a0.
 - [56] Joseph L. Richards et al. “Blazars in the Fermi Era: The OVRO 40 m Telescope Monitoring Program”. In: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 194.2 (2011), S. 29. URL: <http://stacks.iop.org/0067-0049/194/i=2/a=29>.
 - [57] F. Schmidt. *CORSIKA Shower Images*. 2015. URL: <http://www.ast.leeds.ac.uk/~fs/showerimages.html>.
 - [58] NEW MEXICO SKIES. *New Mexico Skies*. 2015. URL: <http://www.nmskies.com/>.
 - [59] LiDo Team. *System overview*. 2015. URL: http://lidong.itmc.tu-dortmund.de/lbw/index.php/System_overview.
 - [60] Diego Tescaro. „TeV-ray observations of nearby Active Galactic Nuclei with the MAGIC telescope: exploring the high energy region of the multiwavelength picture“. Dissertation. IFAE/Universitat Autònoma de Barcelona, 2010.
 - [61] The MAGIC Collaboration et al. „Unprecedented study of the broadband emission of Mrk 421 during flaring activity in March 2010“. In: *ArXiv e-prints* (Dez. 2014). arXiv: 1412.3576 [astro-ph.HE].
 - [62] The Pierre Auger Collaboration et al. „The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2013)“. In: *ArXiv e-prints* (Juli 2013). arXiv: 1307.5059 [astro-ph.HE].
 - [63] M. Tluczykont et al. „Long-term lightcurves from combined unified very high energy γ -ray data“. In: *Astronomy and Astrophysics* 524, A48 (Dez. 2010), A48. DOI: 10.1051/0004-6361/201015193. arXiv: 1010.5659 [astro-ph.HE].
 - [64] Brigham Young University. *ROVOR*. 2015. URL: <http://rovor.byu.edu/index.php>.

Literatur

- [65] C. M. Urry und P. Padovani. „Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei“. In: *Publications of the ASP* 107 (Sep. 1995), S. 803. DOI: 10.1086/133630. eprint: [astro-ph/9506063](#).
- [66] S. Vaughan et al. „On characterizing the variability properties of X-ray light curves from active galaxies“. In: *Monthly Notices of the RAS* 345 (Nov. 2003), S. 1271–1284. DOI: 10.1046/j.1365-2966.2003.07042.x. eprint: [astro-ph/0307420](#).
- [67] Robert Wagner. *MAGIC Picture Gallery*. 2015. URL: <https://magiccold.mpp.mpg.de/gallery/pictures/>.
- [68] T. C Weekes. *Very High Energy Gamma-Ray Astronomy*. Institute of Physics Publishing, 2003.
- [69] T. C. Weekes et al. „VERITAS: the Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System“. In: *Astroparticle Physics* 17 (Mai 2002), S. 221–243. DOI: 10.1016/S0927-6505(01)00152-9. eprint: [astro-ph/0108478](#).
- [70] W. Wittek. „Unfolding“. In: *MAGIC-TDAS 05-05 (internal notes)* (Apr. 2006).
- [71] G. T. Zatsepin und V. A. Kuz'min. „Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays“. In: *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* 4 (Aug. 1966), S. 78.

Danksagung

Letztendlich möchte ich mich noch bei einigen Menschen sehr bedanken, die mich während der Entstehung dieser Arbeit begleitet haben.

Zuerst möchte ich mich sehr bei Prof. Dr. Dr. Wolfgang Rhode bedanken, ohne den es diesen Lehrstuhl wie er jetzt ist und damit auch diese Arbeit überhaupt nicht gegeben hätte. Es war mir ein großes Vergnügen hier meine Arbeit schreiben zu dürfen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr. Carsten Westphal dafür bedanken, dass er so schnell zugesagt hat, mein Zweitprüfer zu werden und sich die Zeit genommen hat meine Arbeit zu lesen.

Außerdem möchte ich mich bei Sabrina für herzhafte Diskussionen und freundliche Korrekturvorschläge zu meiner Arbeit bedanken. Des Weiteren bedanke ich mich beim L^AT_EX-Meister Max N. für sofortige Hilfe bei jeglichen L^AT_EX-Problemen. Weiterer Dank gebührt meinen ganzen Korrekturlesern an diesem Lehrstuhl, die mit einem Kuchen entlohnt werden. Wo ich gerade schon dabei bin, möchte ich mich auch noch bei allen bedanken, die, wenn sie mit mir auf Reisen waren, immer aufgepasst haben, dass weder ich, noch mein Gepäck verloren gegangen ist... Also bedanke ich mich einfach beim gesamten Lehrstuhl E5b, in dem immer eine super Atmosphäre geherrscht hat.

Auch bei der MAGIC-Kollaboration möchte ich mich bedanken. Sehr viele nette Menschen standen mir bei Fragen zur Monte-Carlo-Produktion oder zur Analyse sofort zur Seite. Allen voran danke ich Julian Sitarek und Emiliano Carmona.

Zum Schluss bedanke ich mich noch bei meiner Familie, die immer hinter mir stand und mich unterstützt hat und bei meinem Freund, der mich ebenfalls immer unterstützt und erheitert hat, auch wenn ich gerade überhaupt gar keine Lust mehr auf Monte-Carlo-Probleme oder auf das Schreiben der Arbeit hatte.