

Fokussierende Facettenaugen

Das MAGIC-Zwillingsteleskop erforscht höchstenergetische kosmische Gammastrahlung.

Cornelia Schultz

Vor nunmehr 22 Jahren öffnete sich das Fenster zur Hochenergie-Gamma-Astronomie mit der Beobachtung der ersten hochenergetischen Gammaquelle. Inzwischen wurden mehr als 100 solcher Quellen gefunden und eine Reihe fundamentaler Entdeckungen gemacht. Ermöglicht haben dies große Tscherenkow-Teleskope, die in der Lage sind, atmosphärische Luftschauer genau zu registrieren.

Die ersten TeV-Gammastrahlen aus Richtung des Krebsnebels wurden 1989 von der Whipple-Kollaboration mit einem 10-Meter-Reflektor nachgewiesen [1]. Die zurzeit größten Teleskope mit je 17 m Spiegeldurchmesser und der niedrigsten Energieschwelle, MAGIC I und II, befinden sich auf dem Roque de Los Muchachos auf La Palma. Sie detektieren Tscherenkow-Licht im sichtbaren und nahen UV-Bereich, das in Schauern in der Atmosphäre entsteht, welche durch Gammastrahlung ausgelöst werden. MAGIC kann Gammastrahlung im Bereich von 50 GeV bis 30 TeV beobachten [2]. In galaktischen und extragalaktischen Quellen wie Supernovaüberresten oder Schwarzen Löchern in Zentren von Galaxien entstehen Gammaquanten, die in der Erdatmosphäre eine Teilchenkaskade auslösen. Ultrarelativistische, geladene Sekundärteilchen senden Tscherenkow-Licht aus, das Rückschluss auf das primäre Gammaquant und damit auf die kosmische Quelle zulässt. Ziel der Gamma-Astronomie ist es, Fragen der Grundlagenphysik wie die nach Dunkler Materie zu beantworten und Effekte der Quantengravitation oder die extragalaktische Hintergrundstrahlung zu untersuchen.

Entscheidend für Tscherenkow-Teleskope sind die optischen Parameter des Hauptspiegels und die Empfindlichkeit der Lichtsensoren, welche die Signale aufzeichnen. Die 239 Quadratmeter großen, parabolischen Reflektoren der MAGIC-Teleskope setzen sich aus leichten Spiegelementen zusammen, die auf einer hochsteifen, leichten Gitterrohrstruktur aus Kohlefaser montiert sind. Verbunden mit einem leistungsfähigen Antriebssystem können sich die Teleskope schnell drehen und jeden beliebigen Punkt am Himmel in weniger als 20 Sekunden ansteuern. Um kleine Verformungen der Gitterrohrstruktur auszugleichen, ist jedes Spiegelement mit einem aktiven Kontrollsystem ausgerüstet, das mithilfe eines Lasers und Aktuatoren kleine Abweichungen von der nominalen

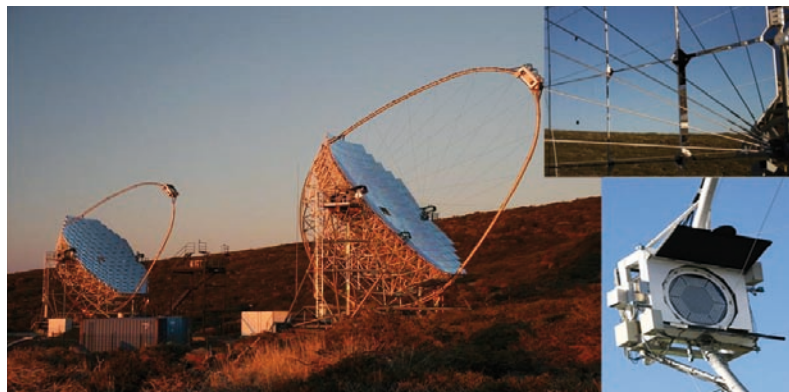


Abb. 1 Die Teleskope MAGIC I und II zeichnen Tscherenkow-Licht im sichtbaren und nahen UV-Bereich auf. Rechts

oben: Ausschnitt der Spiegelfacetten von MAGIC II, rechts unten: Kamera von MAGIC I.

Spiegelausrichtung korrigiert [3]. Eine Kamera aus einigen hundert dichtgepackten, lichtempfindlichen Photomultipliern zeichnet die nanosekundenkurzen Tscherenkow-Lichtblitze als Schauerbild auf. Die Geometrie dieser Lichtschauer gibt Aufschluss über den Ort der kosmischen Quelle. Die zeitliche und räumliche Struktur sowie die Lichtmenge der Schauerbilder beinhalten Informationen über die emittierende Quelle und die dort ablaufenden Vorgänge, bei denen die Gammastrahlung entsteht.

Bei diesen Analysen sind die Reflektivität und Fokussierungsqualität der Spiegelemente von großer Bedeutung. Die Punktspreizfunktion und die Brennweite bestimmen maßgeblich die zeitliche und räumliche Auflösung der Schauerbilder. Die fokussierte Reflektivität ist als das Verhältnis von reflektierter und emittierter Lichtintensität in einer $0,1^\circ$ größeren Fläche als die ideale geometrische Brennfläche definiert [4]:

$$R_{\text{Fokus}}(\lambda) = I_1(\lambda) / I_0(\lambda)$$

KOMPAKT

- Spezielle Teleskope ermöglichen es über die Detektion von Tscherenkow-Licht, die kosmischen Quellen hochenergetischer Gammastrahlung zu untersuchen.
- Zentrale Bauteile solcher Teleskope sind ein Reflektor und eine pixelierte Kamera.
- Dank zwei neuer Methoden zur Untersuchung der totalen Reflektivität im Spiegelbrennpunkt und des optischen Crosstalks neuartiger Halbleiter-Photodetektoren lassen sich diese beiden Teleskopelemente optimieren und die Energieschwelle des Teleskops senken.

Cornelia Schultz, Dipartimento di Fisica „G. Galilei“, Università degli Studi di Padova und Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Fisica Padova, Via Marzolo 8, 35131 Padova, Italien – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2011 auf der Jahrestagung der DPG in Dresden

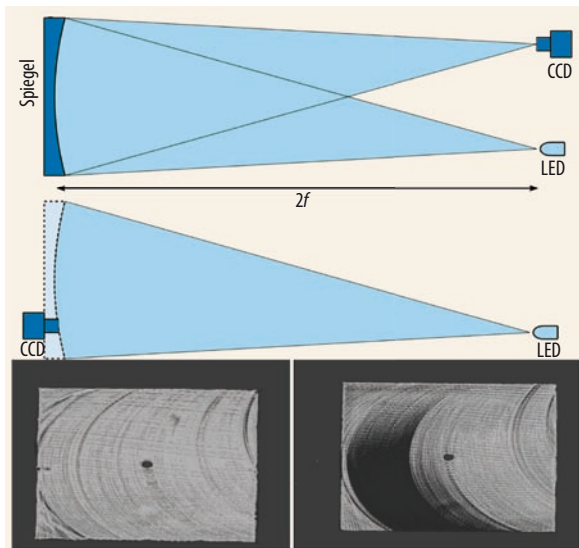


Abb. 2 Beim $2f$ -Aufbau (oben) misst die CCD-Kamera die reflektierte Lichtintensität im Fokus und die emittierte Lichtintensität an der Spiegeloberfläche. Die CCD-Bilder (unten) zeigen die Lichtverteilung zweier Aluminiumspiegel und die Frässpuren auf ihrer Oberfläche. In dunkleren Bereichen ist die Reflektivität im Fokus (durch Streuung, Beugung oder Fräsfehler) vermindert. Das Foto zeigt klar, dass der Krümmungsradius vom Sollwert abweicht, also ein Fräsfehler vorliegt.

Sie wird im Brennpunkt der zu testenden Spiegelemente gemessen und beeinflusst die Energieschwelle des Teleskops.

Die parabolischen Reflektoren der MAGIC-Teleskope werden durch sphärische Spiegelemente verschiedener Krümmungsradien approximiert. Im Reflektor von MAGIC I sind ausschließlich Aluminium- im MAGIC II-Reflektor darüber hinaus auch zu 40 Prozent Glasspiegel installiert (Abb. 1) [5]. Bei den Aluminiumspiegeln handelt es sich um eine Sandwichkonstruktion aus zwei Aluminiumplatten mit einem Verstärkungskern in Honigwabenstruktur. Eine

Quarzschrift schützt die reflektierende Oberfläche – eine diamantgefräste, dünne AlMgSi-Schicht – gegen Umwelteinflüsse [6]. Durch das Diamantfräsen erhält der Spiegel seinen Krümmungsradius, der über die Fräsparemeter an die Parabolkurve des Hauptspiegels angepasst wurde. Die Glasspiegel, ebenfalls eine Sandwichkonstruktion aus zwei Glasschichten und einer steifen Honigwabenstruktur aus Aluminium, erhalten ihren Krümmungsradius mittels „Cold slumping“. Dabei wird die vordere Glasschicht mit Unterdruck auf eine Negativform entsprechender konvexer Krümmung aufgebracht, elastisch verformt und verklebt. Anschließend wird als reflektierende Oberfläche eine quarzbeschichtete Aluminiumschicht aufgebracht [7].

Die optischen Parameter der Spiegel lassen sich mit einem sog. $2f$ -Aufbau bestimmen. Eine isotrop abstrahlende, emissionsstabile LED bekannter Wellenlänge leuchtet den Spiegel aus einer Entfernung der zweifachen Brennweite aus. Ebenfalls aus einem Abstand von $2f$ nimmt eine CCD-Kamera die Bilder des reflektierten Lichts im Brennpunkt auf (Abb. 2). Um die Punktspreizfunktion im Fokus zu untersuchen, wird das reflektierte Licht auf eine Platte aus gesintertem Teflonpulver mit einer nahezu idealen Lambertischen Abstrahlcharakteristik projiziert. Nach Ausrichtung des Messaufbaus ist es lediglich nötig, die Position der Kamera zu verändern, um die Lichtintensitäten an der Spiegeloberfläche bzw. im Fokus zu ermitteln.

Die Messergebnisse zeigen, dass die fokussierte Reflektivität im Fokus signifikant geringer ist als die totale Reflektivität an der Spiegeloberfläche. Ursache hierfür sind Streuverluste an den Spiegeln. Die diamantgefrästen Aluminiumspiegel zeigen eine schwache periodische Struktur, wodurch ein Teil des Lichts wie bei einem optischen Gitter gebeugt und damit die fokussierte Reflektivität reduziert wird. Darüber hinaus sammelt sich bei der Oberflächenbearbeitung in

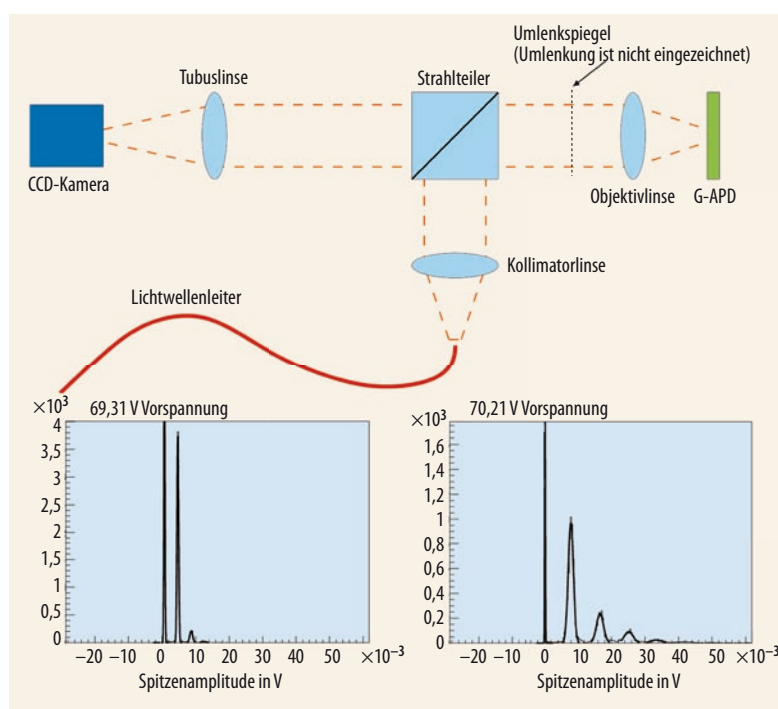


Abb. 3 Oben: Das System zur Untersuchung des optischen Crosstalks einzelner G-APD-Zellen besteht aus einem Mikroskop, einer CCD-Kamera, einem Strahlteiler, einer Objektivlinse (frei von sphärischer Aberration) und einem Halbleiterlaser (835 nm), der über einen Lichtleiter eingekoppelt wird. Eine Abdeckung schützt gegen externes Licht. Unten: Zwei mit unterschiedlicher Vorspannung aufgenommene Spektren: Das erste Maximum entspricht dem „Pedestal“, das zweite dem Signal einer einzelnen Zelle. Bei einer schwachen Illumination einer einzelnen Zelle sollte das Spektrum ausschließlich diese beiden Maxima enthalten. Weitere Maxima sind die Folge des optischen Crosstalks.

mikroskopisch kleinen Bereichen Material und kleine Bearbeitungsdefekte an, was zu einer diffusen Reflexion führt und die Reflektivität weiter mindert. Bei den Glasspiegeln verursachen lokale Abweichungen vom eingestellten Krümmungsradius auf der Spiegelfläche eine diffuse Reflexion.

Die Kameras der MAGIC-Teleskope bestehen aus einer dichtgepackten Matrix von Photomultipliern; in MAGIC I sind es 577, in MAGIC II 1039. Sie sind in den Brennpunkten der Reflektoren installiert. Konventionelle Photomultiplier haben den Nachteil, dass sie Hochspannung benötigen und starkes Licht (z. B. Tageslicht) sie beschädigt oder rasch altern lässt. Zudem ist ihre spektrale Empfindlichkeit, die Quanteneffizienz, oberhalb von ca. 500 nm moderat. Verbesserte Photosensoren können die Empfindlichkeit der Teleskope bei gleicher Spiegelfläche steigern. Lawinen-Photodioden im Geigerbetriebsmodus (G-APDs) kommen dafür durch ihre hohe und breitbandige Quanteneffizienz infrage [8]. Darüber hinaus ließe sich mit ihnen, bedingt durch ihre mikroskopische Dimension, die räumliche Auflösung der Schaubilder verbessern. G-APDs sind sehr kompakt und unempfindlich gegen Magnetfelder, benötigen nur eine Betriebsspannung von unter 100 V und überstehen selbst Tageslicht ohne Schaden. Daher kommen für zukünftige Tscherenkow-Teleskope G-APDs, derzeit noch in der Erprobung, in Betracht.

Ein sehr kritischer Parameter dieser Halbleiter-Lichtdetektoren ist das optische Übersprechen (Crosstalk). Beim Lawinendurchbruch entsteht eine geringe Zahl von Sekundärphotonen, die in Nachbarzellen weitere Lawinenprozesse auslösen und damit das Signal verfälschen können. Um den optimalen Betriebsbereich der Photodetektoren bestimmen zu können, muss der Einfluss des optischen Crosstalks auf die Photondetektionseffizienz bekannt sein.

Mit der entwickelten Messmethode lässt sich der optische Crosstalk für jede einzelne Zelle der G-APD untersuchen (Abb. 3). Die Laserstrahlen lassen sich auf einzelne Zellen mikrometergenau fokussieren. Da also nur eine Zelle belichtet wird, sollte nur diese ein Signal liefern. Erzeugen dennoch mehrere Zellen gleichzeitig ein Signal, weist dies auf optischen Crosstalk hin. Hierbei berechnet sich die optische Crosstalkrate über das Verhältnis aus der Summe der Ereignisse, bei denen mehr als eine Zelle anspricht, und der Zahl der Ereignisse, bei denen mindestens eine Zelle Signale liefert:

$$r_{\text{Crosstalk}} = N_{\text{PE} \geq 2} / N_{\text{PE} \geq 1}$$

wobei PE die Anzahl der detektierten Photoelektronen bzw. die Zahl der angesprochenen Zellen angibt.

Erste Messungen an einer G-APD des Typs Hamamatsu MPPC 100U haben gezeigt, dass die optische Crosstalkrate mit der Photondetektionseffizienz in erster Näherung quadratisch mit der Überspannung zusammenhängt. Diese Korrelation deutet darauf hin, dass die Verstärkung der G-APD zu hoch und die Photondetektionseffizienz im Normalbetrieb erheblich niedriger als die Quanteneffizienz ist. Um die Verstärkung bei einer Überspannung von einigen Volt niedrig zu halten und gleichzeitig die Photondetektionseffizienz möglichst hoch einzustellen, müssen die Zellkapazität und damit die Verstärkung verringert werden. Solche modifizierten G-APDs bieten eine Alternative zu herkömmlichen Photodetektoren, die derzeit in Tscherenkow-Teleskopen zum Einsatz kommen [4].

*

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Stefan Sotier, der meine Diplomarbeit für den Georg-Simon-Ohm-Preis vorgeschlagen und mich während deren Anfertigung seitens der FH München betreut hat. Außerdem danke ich Dr. Florian Goebel, Prof. Dr. Masahiro Thesima, Dr. Razmik Mirzoyan, Dr. Eckart Lorenz und Dipl.-Ing. Hanna Kellermannn aus der MAGIC-Kollaboration in München für ihre Betreuung, Unterstützung und Zusammenarbeit während meiner Tätigkeit als Diplomandin am Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut) München.

Literatur

- [1] T. C. Weekes et al., *The Astrophysical Journal*, **342**, 379 (1989)
- [2] P. Colin et al., arXiv:0907.0960v1 (2009)
- [3] J. Cortina et al., arXiv:0907.1211v1 (2009)
- [4] C. Schultz, Novel All-Aluminum Mirrors of the MAGIC Telescope Project and Low Light Level Silicon Photo-Multiplier Sensors for Future Telescopes, Diplomarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften FH München, Oktober 2008
- [5] M. Doro et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **595**, 200 (2008)
- [6] D. Bastieri et al., 29th International Cosmic Ray Conference Pune **00**, 101 (2005)
- [7] G. Pareschi et al., *Proc. SPIE* **7018** (2008)
- [8] A. N. Otte et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science* (2006), S. 636

DIE AUTORIN

Cornelia Schultz studierte an der Hochschule für angewandte Wissenschaften (FH München) und fertigte ihre Diplomarbeit am MPI für Physik (Werner Heisenberg Institut) in München in der internationalen MAGIC-Kollaboration an. Derzeit promoviert sie im Rahmen des MAGIC-Projekts an der Universität Padua. In ihrer Freizeit spielt Cornelia Schultz Klavier und widmet sich dem lyrischen Gesang und dem Tango Argentino.



Fotoatelier Konvex