

Silizium macht den Unterschied

Halbleiter-Photosensoren ermöglichen eine technologische Revolution in der Astroteilchenphysik.

Thomas Bretz und Daniela Dorner

Silizium oder kein Silizium? Diese Frage stellte sich in der TeV-Gamma-Astronomie vor einigen Jahren. Im Rahmen des FACT-Projektes gelang es zu zeigen, dass siliziumbasierte Photosensoren verglichen mit herkömmlichen Photomultipliern stabiler sind und Beobachtungen sogar bei Vollmond ermöglichen. Auf diese Weise lassen sich astrophysikalische Objekte lückenlos überwachen.

Sowohl in unserer Galaxie als auch außerhalb gibt es Objekte, die hochenergetische Gammastrahlung emittieren. Eine besonders interessante Gruppe sind aktive Galaxienkerne, in deren Spektrum nicht-thermische Strahlung dominiert und die im Radiobereich sichtbar sind, Blazare. Im Zentrum eines aktiven Galaxienkerns befindet sich vermutlich ein supermassives Schwarzes Loch, das Materie aus der Umgebung akkretiert. Senkrecht zur Akkretionsscheibe wird Plasma mit relativistischen Geschwindigkeiten ausgestoßen. Diese bis zu einige Millionen Lichtjahre langen Jets sind hocheffiziente Teilchenbeschleuniger, die in allen Spektralbereichen von niederenergetischen Radiowellen über optisches Licht und Röntgenstrahlung bis hin zur TeV-Gammastrahlung emittieren können [1]. Blazare zeichnen sich durch extreme Helligkeitsschwankungen aus: In wenigen Minuten kann sich der Fluss um ein Vielfaches ändern. Variabilitäten auf solch kurzen Zeitskalen können aus Kausalitätsgründen nur in entsprechend kleinen Emissionsregionen ihre Ursache haben. Um die zugrundeliegenden Mechanismen der Emission sowie die physikalische Natur der Beschleuniger zu verstehen, ist es notwendig, diese Variabilität auf allen Zeitskalen zu untersuchen. Die Beobachtung der Gammastrahlung nimmt dabei eine Schlüsselrolle ein. Die Blazare Mrk 421 und Mrk 501 gehören mit ihrer Entfernung von rund 450 Millionen Lichtjahren zu den nächsten und damit hellsten bekannten extragalaktischen TeV-Emittern.

Da Photonen ungeladen sind, werden sie von Magnetfeldern nicht abgelenkt, sodass mit ihnen abbildende Astronomie möglich ist [2]. Aufgrund ihrer relativ kurzen mittleren freien Weglänge in der Atmosphäre ist eine direkte Beobachtung vom Boden aus nicht möglich. Eine direkte Messung von außerhalb der Atmosphäre ist aufgrund der niedrigen Flüsse und deswegen benötigten großen Detektorflächen bei diesen hohen Energien ebenfalls schwierig. Da-



Die Kamera des Gammateleskops FACT auf La Palma (rechts) verwendet Pixel (Inset), die aus Siliziumphotosensoren und einem speziellen Lichtleiter bestehen.

her bedient man sich einer indirekten Methode und nutzt aus, dass hochenergetische Photonen in der Atmosphäre absorbiert werden und eine Kaskade aus sekundären Teilchen auslösen, einen Luftschauer. Da diese Teilchen aufgrund ihrer hohen Energie schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium sind, wird Cherenkov-Strahlung emittiert. Eine abbildende Optik sammelt die Photonen. Eine Kamera aus mehreren Sensoren (Pixeln) und mit typischen Belichtungszeiten im Nanosekundenbereich zeichnet mithilfe einer schnellen Elektronik ein zweidimensionales Bild des Luftschauers auf. Aus Morphologie, zeitlicher Entwicklung und Helligkeit lässt sich auf Richtung und Energie des primären Photons schließen. Aus der Ana-

KOMPAKT

- Der erste Einsatz von halbleiterbasierten Photosensoren im regulären Messbetrieb der TeV-Gamma-Astronomie bedeutet einen Durchbruch in der Astroteilchenphysik.
- Gegenüber Photomultipliern beweist die neue Technologie eine höhere Stabilität und Effizienz. Durch ihre Robustheit sind Beobachtungen bei Vollmond möglich.
- Ein ausgeklügeltes Softwarekonzept trägt durch Automatisierung und Fernbedienung signifikant zum stabilen Betrieb und einer prompten Datenanalyse bei.
- Die gewonnene Beobachtungszeit erlaubt einen Blick auf die Variabilität der Objekte frei von systematischen Fehlern.
- Der erfolgreiche Einsatz dieser Sensoren gibt auch zukunftsweisende Impulse für andere Experimente.

Prof. Dr. Thomas Bretz, III. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen, Otto-Blumenthal-Straße, 52074 Aachen;
Dr. Daniela Dorner, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg, Emil-Fischer-Str. 31, 97074 Würzburg – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Gustav-Hertz-Preises 2015 auf der DPG-Jahrestagung in Berlin.

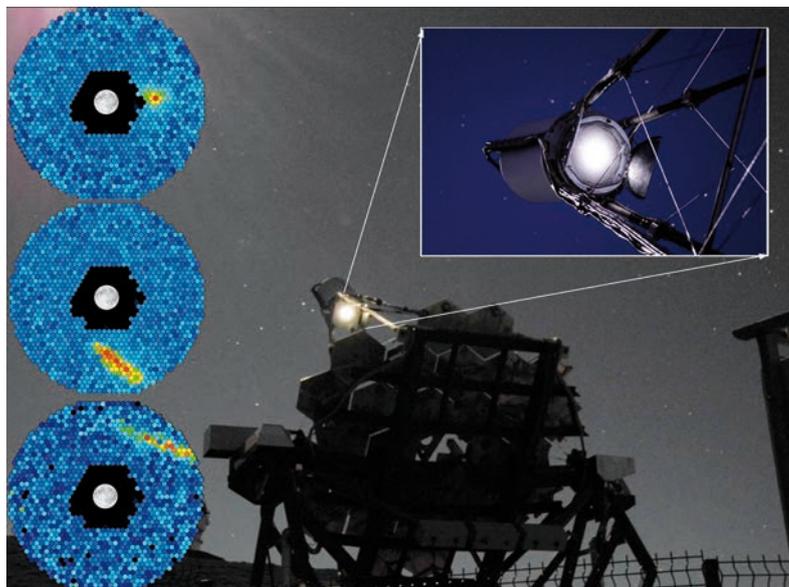


Abb. 1 Kameras mit Siliziumphotosensoren sind so robust, dass sich damit Bilder von Luftschauern (links) selbst dann aufzeichnen lassen, wenn das Teleskop auf den Vollmond ausgerichtet ist

(rechts). Die Farbskala zeigt die Helligkeitsverteilung in der Kamera. Die hellsten Pixel wurden aus der Triggerlogik genommen. Das Bild des Mondes dient dem Größenvergleich.

lyse vieler Ereignisse ergeben sich Fluss und spektrale Energieverteilung der beobachteten Quelle.

Im Vergleich zu anderen Bereichen der Astronomie ist die bodengebundene Gamma-Astronomie ein junges Gebiet. Erst in den letzten zehn Jahren stieg die Anzahl der bekannten Quellen hochenergetischer Gammastrahlung durch den Bau und Betrieb empfindlicherer Cherenkov-Teleskope auf über 150 an. Da diese Instrumente vorwiegend für Beobachtungen von schwachen Objekten genutzt werden, sind kleinere und somit kostengünstigere Teleskope für Dauerbeobachtungen der hellsten Objekte die logische Konsequenz.

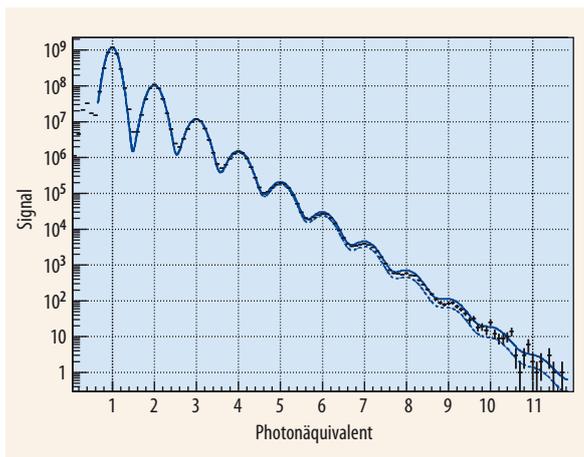


Abb. 2 Misst man das Dunkelrauschen bei unterschiedlichen Temperaturen (hier zwischen 4 und 19 °C) und addiert die normierten Verteilungen der gemessenen Signale aller 1440 Sensoren aus je 295 einzelnen Messungen auf, so sind deutlich die einzelnen Durchbrüche sowie die durch optisches Übersprechen entstandenen Multiplizitäten zu erkennen. Den Datenpunkten überlagert sind zwei eigens entwickelte Funktionen (blaue Linien) [5], welche das Spektrum über mehr als neun Größenordnungen hinreichend genau beschreiben.

Design und Bau

Um Langzeitstudien von Blazaren durchzuführen, beschlossen Astroteilchenphysiker der TU Dortmund und der Universität Würzburg im Jahr 2006, ein kleines Cherenkov-Teleskop mit neuer Technik zu instrumentieren. Etwa zeitgleich entwickelten Physiker der ETH Zürich den Plan, die klassischen Photomultiplier zur Detektion einzelner Photonen durch halbleiterbasierte Photosensoren (Infokasten) zu ersetzen. Daraus entstand 2008 das gemeinsame Projekt des First G-APD Cherenkov Telescope (FACT, Abb. auf S. 55) [4]. Das Projekt hat gezeigt, dass diese neuartigen Sensoren eine exzellente Alternative zu den bisher verwendeten Photomultipliern sind [5]. Neben dem Nachweis der Machbarkeit ist das Ziel von FACT, die hellsten bekannten TeV-Emitter kontinuierlich zu überwachen [6].

Bei FACT handelt es sich um ein abbildendes Luft-Cherenkov-Teleskop auf der kanarischen Insel La Palma mit einer Spiegelfläche von 9,51 m². Die Kamera hat einen Gesichtsfelddurchmesser von 4,5° und besteht aus 1440 Pixeln zu je 0,11°. Die Teleskopmontierung ist von einem Vorgängerexperiment übernommen, dem High Energy Gamma-Ray Array (HEGRA). Dessen runde Spiegel wurden durch neu beschichtete, sechseckige Spiegel eines anderen Teleskops ersetzt. Neu sind auch die Antriebsmotoren der Nachführung und deren Steuerung. Im Oktober 2011 wurde das Teleskop in Betrieb genommen.

Da zum damaligen Zeitpunkt nur Siliziumphotosensoren mit einer maximalen Größe von 3 × 3 mm² verfügbar waren und so eine komplette Instrumentierung der etwa 50 cm durchmessenden Fokalebene etwa 2,5 Millionen Euro gekostet hätte, musste die effektive Fläche der 1440 Sensoren durch spezielle Lichtleiter vergrößert werden (Inset in Abb. auf S. 55). Deren Aufbau aus transparentem Plexiglas erlaubt es, die Lichtsammel­fläche im Vergleich zu einem verspiegelten hohlen Lichtleiter zu verdoppeln. Zusätzlich wird schräg einfallendes Untergrundlicht abgeschirmt.

Positive Erfahrungen

Die verwendeten Sensoren haben viele offensichtliche Vorteile, einige Eigenschaften sind aber auch genauer zu betrachten. Diese sind die vergleichsweise hohe Dunkelzählrate, das optische Übersprechen und das Auftreten von Nachimpulsen. Bei heutigen Sensoren beträgt die typische Dunkelzählrate etwa 50 kHz/mm² bei Raumtemperatur, und optisches Übersprechen und Nachimpulse treten praktisch nicht mehr auf. Bereits für die hier beschriebene Anwendung ließ sich die deutlich höhere Dunkelzählrate damaliger Sensoren gegenüber der Rate an Photonen aus dem Nachthimmel vernachlässigen. Das optische Übersprechen spielt beim Nachweis einer hinreichend großen Zahl von Photonen keine Rolle, da es nur das gemessene Signal im Mittel um einen bekannten Betrag erhöht.

Da Nachimpulse erst wenige Nanosekunden nach dem Primärimpuls auftreten, beeinflussen sie das Integral der Ladung bei geeigneten Integrationsgrenzen nicht. Zudem nimmt ihre Wahrscheinlichkeit exponentiell mit einer Halbwertszeit von wenigen zehn Nanosekunden ab, sodass keine koinzidenten Signale imitiert werden.

Neben diesen Eigenschaften ist es am wichtigsten, die Temperaturabhängigkeit der Durchbruchspannung zu berücksichtigen. Da alle Sensoreigenschaften von dem Verhältnis der angelegten Spannung zur Durchbruchspannung abhängen, ist eine kontinuierliche Temperaturstabilisierung oder eine Spannungsanpassung unerlässlich. Für die hier beschriebene Kamera wurde die Spannungsanpassung gewählt, weil eine Temperaturstabilisierung außerhalb eines Labors und über eine große Fläche schwierig ist. 31 Temperaturfühler an den Sensoren ermöglichen es, die angelegte Spannung entsprechend nachzuregulieren. Dies ist eine besondere Herausforderung an die Genauigkeit, da bei der angelegten Spannung von etwa 70 V bereits eine Änderung um 0,1 % die Verstärkung um 1 % ändert. Zudem variiert mit der Untergrundhelligkeit auch der Strom, der im vorgeschalteten Widerstandsnetzwerk einen Spannungsabfall erzeugt. Um diesen auszugleichen, wird zusätzlich in jedem Kanal der Spannungsversorgung der Spannungsabfall mit Hilfe des gemessenen Stromes berechnet und kompensiert.

Dass diese Korrektur sehr gut funktioniert, hat die Messung der Amplitude einer gepulsten LED gezeigt. Die von der LED erzeugten Nanosekundenimpulse sind temperaturunabhängig und im Mittel gleich hell. Die Messung hat ergeben, dass der aufgezeichnete Impuls im Mittel nicht von der Hintergrundhelligkeit des Nachthimmels abhängt. Durch diese Stabilität und die Tatsache, dass sich die Eigenschaften der Sensoren selbst nach dem Betrieb bei Tageslicht nicht verschlechtern würden, eignen sie sich ohne Einschränkungen für den Betrieb bei Vollmond (Abb. 1).

Mit Hilfe des Spektrums des Dunkelrauschens wurde in zahlreichen Einzelmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen die Verstärkung bestimmt. Durch Überlagerung der einzelnen Spektren erhält man bereits ein Gesamtspektrum, welches mit der Genauigkeit der verwendeten Spannungsquelle kompatibel ist. Dabei zeigt sich die Eigenschaft der Sensoren, Photonen einzeln zählen zu können. Die deutliche Unterscheidbarkeit der Maxima unterstreicht die Konsistenz der Einzelmessungen und somit die Präzision der Sensoren und die erfolgreiche Anpassung der angelegten Spannung an die Sensortemperatur. Ohne Temperaturanpassung würde die Verstärkung um etwa 60 % vari-

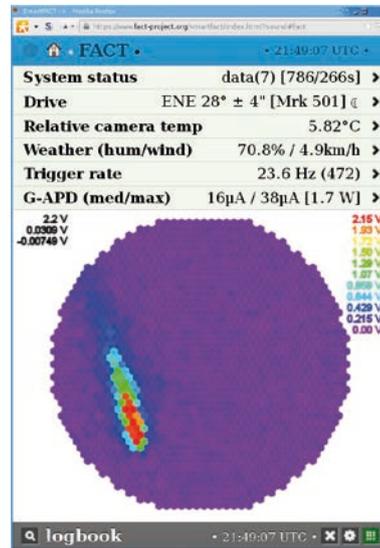


Abb. 3 Über das „Smartfact“ genannte Web-Interface lassen sich die Beobachtungen sowohl steuern als auch überwachen. Dabei werden live ausgewählte Ereignisse angezeigt wie dieses Bild eines typischen Luftschauers.

ieren und so das Gesamtspektrum deutlich verschmieren. Durch die Normierung jeder Einzelmessung auf die individuell bestimmte Verstärkung erhält man das gezeigte Summenspektrum (Abb. 2), das sich vom einfach aufsummierten nur unwesentlich unterscheidet. Dies zeigt eindrucksvoll die Präzision von Siliziumphotosensoren und deren Fähigkeit, einzelne Photonen nachzuweisen.

Beobachtungen und Analyse

Darüber hinaus war das Projekt von Anfang an auf robotischen Betrieb ausgerichtet. Seit Sommer 2012 wird das Teleskop komplett ferngesteuert betrieben. Die Beobachtungen lassen sich mit Hilfe eines Web-Interfaces¹⁾ (Abb. 3) von jedem Internetanschluss mit einer

Mindestbandbreite von ca. 10 kbit/s durchführen. Bei der automatisierten Datennahme muss der Beobachter nur zu Beginn der Nacht die Beobachtungen starten und am Ende der Nacht den sicheren Zustand des Teleskops überprüfen. Während der Nacht ist nur auf unvorhergesehene Ereignisse wie Wetteränderungen zu reagieren und der Fluss der beobachteten Objekte zu überwachen.

Um schnellstmöglich auf interessante Ereignisse reagieren zu können, werden die Daten nach dem Speichern sofort automatisch analysiert. Die Ergebnisse dieser „Quick Look Analysis“ sind öffentlich zugänglich.²⁾ Um möglichst zeitnahe Beobachtungen solcher Ereignisse mit anderen Teleskopen zu initiie-

1) www.fact-project.org/smartfact

2) www.fact-project.org/monitoring

SILIZIUMPHOTOSENSOREN

Bei den hier verwendeten halbleiterbasierten Photosensoren (SiPM) handelt es sich um eine Matrix aus Avalanche-Photodioden, die oberhalb der Durchbruchspannung betrieben werden, im Geiger-Modus (daher auch G-APD) [3]. In diesem können durch einzelne Photonen erzeugte Elektron-Loch-Paare aufgrund der Beschleunigung in der Multiplikationszone eine Lawine von mehreren Millionen Ladungsträgern auslösen. Um dem Selbsterhalt der Ladungsträgerlawine entgegenzuwirken, erzwingt ein Vorwiderstand einen Spannungsabfall, der die anliegende Spannung wieder unter die Durchbruchspannung senkt. Je nach Kapazität werden so Impulse von wenigen Nanosekunden erzeugt. Da dieser Vorgang die gesamte Diode entlädt, sind die Impulse klar definiert und reproduzierbar, was den Nachweis

einzelner Photonen mit Wahrscheinlichkeiten von typischerweise 70 % erlaubt. Um mehrere Photonen gleichzeitig nachweisen zu können, werden mehrere solcher Dioden bei Größen von einigen 10 µm in einer Matrix zu einem Sensor von mehreren Quadratmillimetern zusammengefasst. Dabei sind Füllfaktoren von bis zu 70 % und mehr möglich, sodass heutige Sensoren Nachweiswahrscheinlichkeiten von über 50 % erreichen. Die industrielle Herstellung ermöglicht eine große Präzision. Weitere Vorteile sind eine geringe Vorspannung von meist unter 100 V, Unempfindlichkeit gegen helles Licht und Magnetfelder. Aufgrund des daraus resultierenden kommerziellen Einsatzes in Computertomographen liegen die Preise für große Stückzahlen bereits heute unter 0,5 Euro pro Quadratmillimeter.

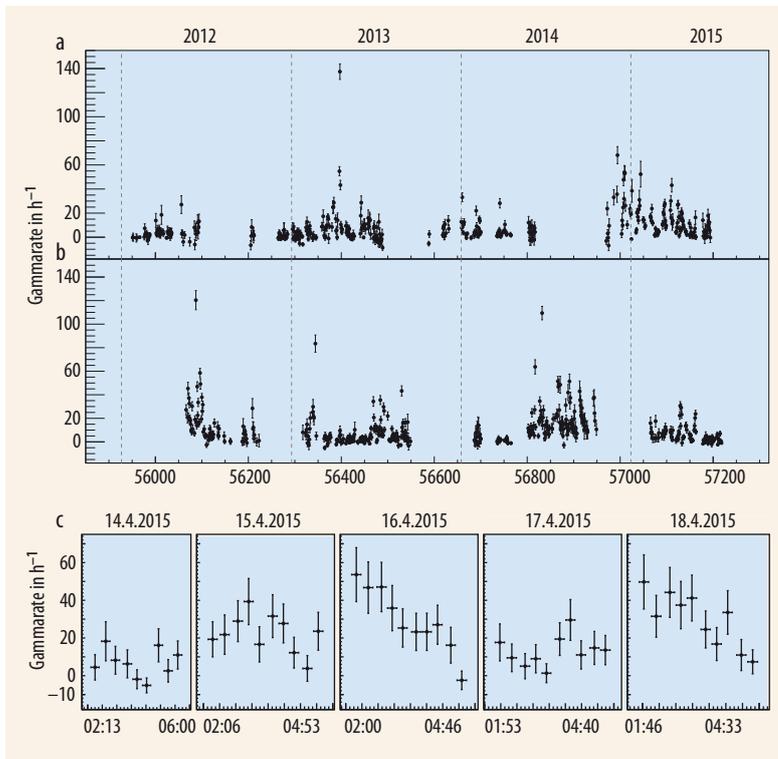


Abb. 4 Die Gammarate der Blazare Mrk 421 (a) und Mrk 501 (b, c), für den Zeitraum von Januar 2012 bis Juli 2015 aufgetragen gegen das in der Astronomie übliche modifizierte Julianische Datum (a, b) bzw. exemplarisch für fünf aufeinanderfolgende Nächte (c) in Zwanzigminuten-Intervallen gegen Koordinierte Weltzeit (UTC).

ren, werden deren Betreiber umgehend benachrichtigt. Messungen bei verschiedenen Wellenlängen sind notwendig, um die Natur der Vorgänge zu verstehen. Einen weiteren Beitrag dazu kann die Korrelation mit anderen Botenteilchen wie Neutrinos liefern. Bei Observatorien, die nur über ein Gastbeobachterprogramm zugänglich sind, sind Beobachtungszeiten im Voraus zu beantragen. Dies geschieht im Rahmen von „Target-of-Opportunity-Programmen“. Ein kombiniertes Programm mit den Satelliten XMM-Newton und Swift ist bereits abgeschlossen. Ein aktuelles läuft mit den Satelliten Swift und INTEGRAL. In Zukunft wird sich FACT auch an dem Multi-Messenger-Netzwerk AMON³⁾ beteiligen.

Seit Oktober 2011 war das Teleskop mehr als 6600 Stunden⁴⁾ in Betrieb. Die kontinuierlichen Messungen aus dieser Zeit dienen dazu, die Variabilität zu untersuchen, z. B. Wahrscheinlichkeiten und Amplituden der Ausbrüche. Insgesamt konnte der Blazar Mrk 501 bereits 1200 Stunden beobachtet werden. In diese Zeit fielen u. a. zwei starke Ausbrüche im Juni 2012 und Juni 2014 und mehrere Monate vermehrter Aktivität im Sommer 2014 (**Abb. 4b**). Auch der Blazar Mrk 421 war während insgesamt gut 850 beobachteten Stunden mehrmals verstärkt aktiv, und im April 2013 trat ein außergewöhnlich starker Ausbruch auf (**Abb. 4a**). Aufgrund der Erdrotation sind die meisten Objekte nur wenige Stunden pro Nacht sichtbar, wobei die typischen Anstiegs- und Abfallzeiten eines solchen Ausbruchs von mehreren Minuten bis zu mehreren Stunden (**Abb. 4c**) meist nicht in dieses Beobachtungs-

fenster fallen. Auch um Periodizitäten auf Zeitskalen von einigen Stunden untersuchen zu können, sind ununterbrochene Beobachtungen über viele Stunden notwendig.

Um die durch den Tag-Nacht-Rhythmus entstehenden Beobachtungslücken zu schließen, sind weitere Teleskope notwendig. Zwei Teleskopmontierungen des ehemaligen HEGRA-Experiments befinden sich in Mexiko, d. h. im Abstand von etwa sechs Stunden zu La Palma. Eine davon ist bereits am Standort des High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatories (HAWC) aufgebaut. Mit der Instrumentierung einer neuen Kamera mit Siliziumphotosensoren ist dies eine ideale und kostengünstige Ergänzung zu FACT. Dabei wird eine neue Kamera durch den Einsatz der neuesten Sensoren und neuester Elektronik nicht nur doppelt so empfindlich, sondern auch signifikant preiswerter. Auch bei Teleskopen des zukünftigen Cherenkov Telescope Array (CTA) werden Halbleiter-Photosensoren verwendet. Abgesehen von der abbildenden Luft-Cherenkov-Astronomie erobern die neuen Sensoren auch andere Bereiche der Astroteilchenphysik. So kommen sie z. B. bereits in einem Prototypen für ein zukünftiges Fluoreszenzteleskop des Pierre-Auger-Observatoriums zum Einsatz. Somit hat FACT die Siliziumphotosensoren nicht nur zu einem Fakt in der Cherenkov-Astronomie gemacht, sondern der gesamten Astroteilchenphysik einen zukunftsweisenden Impuls gegeben.

Literatur

- [1] M. Boettcher, D. Harris und H. Krawczynski (Hrsg.), *Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei*, Wiley-VCH, Weinheim (2012)
- [2] T. C. Weekes, *Very High Energy Gamma-Ray Astronomy*, IOP Publishing, Bristol (2003)
- [3] D. Renker und E. Lorenz, *JINST* **4**, P04004 (2009)
- [4] H. Anderhub et al., *JINST* **8**, P06008 (2013)
- [5] A. Biland et al., *JINST* **9**, P10012 (2014)
- [6] D. Dorner et al., *Proceedings Fermi Symposium 2014*

DIE AUTOREN

Thomas Bretz studierte an der TU München Physik und promovierte an der U Göttingen / U Würzburg. Nach Postdoc-Aufenthalten in Würzburg, an der EPFL in Lausanne sowie der ETH Zürich erhielt er 2014

einen Ruf als Juniorprofessor für Experimentelle Astroteilchenphysik an die RWTH Aachen.

Daniela Dorner studierte in Bayreuth und Würzburg, wo sie auch promovierte. Als Postdoc wechselte sie 2008 nach Genf an das ISDC – Datacenter for Astrophysics und kehrte nach fünf Jahren zurück nach Würzburg.

Vor ihrer Tätigkeit für FACT arbeiteten beide Preisträger bereits gemeinsam am Aufbau der MAGIC-Teleskope sowie der Datenanalyse.



Jan Röhl

3) <http://amon.gravity.psu.edu>

4) Stand: Juli 2015