

LOPES – Hellstes Leuchten aus dunklen Quellen: Kosmische Radioblitze in der Atmosphäre

T. Huege, A. Haungs, IK; O. Krömer, IPE

Einleitung

Luftschauer hochenergetischer kosmischer Strahlung werden heute überwiegend mit zwei etablierten Beobachtungstechniken gemessen. Zum einen werden Teilchen, die als Fragmente des Schauers den Boden erreichen in Arrays von Partikeldetektoren registriert, z. B. im KASCADE-Grande-Experiment auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe. Zum anderen regt ein Teilchenschauer beim Durchtritt durch die Atmosphäre Stickstoffmoleküle zum Leuchten im Ultraviolettbereich an. Diese „Fluoreszenz“ kann unter guten Beobachtungsbedingungen mit optischen Teleskopen gemessen werden.

Die beiden Beobachtungstechniken liefern sehr unterschiedliche, geradezu komplementäre Informationen über die Teilchenschauer. Eine Kombination beider Techniken zu „hybriden“ Messungen einzelner Schauer, wie z. B. im Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien, stellt daher ein wesentlich mächtigeres Werkzeug dar als jede der Techniken für sich.

Schon vor über 40 Jahren war bekannt, dass Luftschauer auch mittels einer dritten Technik beobachtet werden können. Die Schauer emittieren Radiostrahlung im Frequenzbereich unter ~ 100 MHz, welche sich mit Radioantennen messen lässt. Die Signale sind stark, aber jeweils nur von wenigen Nanosekunden Dauer – eine zu große Herausforderung für die Analogtechnik der 1960er Jahre.

Mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Digitaltechnik rückte die Radiodetektion von Luftschauern

vor wenigen Jahren jedoch erneut ins Blickfeld aktueller Forschung. Die Radiosignale liefern, ähnlich dem Fluoreszenzlicht, komplementäre Informationen zu den am Boden befindlichen Teilchendetektoren. Die Tatsache, dass mit Radiomessungen im Gegensatz zu Fluoreszenzmessungen jedoch 24 Stunden am Tag beobachtet werden kann, und dies selbst in schwierigen Beobachtungsumgebungen, prädestiniert die Radiotechnik geradezu für „hybride“ Messungen.

Das Potenzial der Radiotechnik war seit jeher groß, doch musste ihre praktische Anwendbarkeit zunächst nachgewiesen werden. Zu diesem Zweck wurde auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe das LOPES-Experiment (LOFAR Prototype Station, basierend auf Hardware des „Low Frequency Array“, einem in den Niederlanden im Aufbau befindlichen Radioastronomie-Experiment) in-

itiert. Diese experimentellen Aktivitäten werden zudem von theoretischen Untersuchungen der Herkunft der Radioemissionen begleitet.

Eigenschaften der Radioemissionen

Die vom LOPES-Experiment nachgewiesene Radiostrahlung entsteht nach aktuellem Stand der Forschung durch Ablenkung der im Luftschauer vorhandenen Elektronen und Positronen im Erdmagnetfeld als so genannte „Geosynchrotron-Strahlung“ [1]. Die abgestrahlten Signale sind aufgrund der hochrelativistischen Energien der Teilchen stark in Richtung der Teilchenflugbahnen fokussiert und in Pulsen von nur wenigen Nanosekunden Dauer konzentriert.

Abb. 1 illustriert die Eigenschaften eines simulierten Luftschauer-Radiopulses im für LOPES zugänglichen Energiebereich. Berechnun-

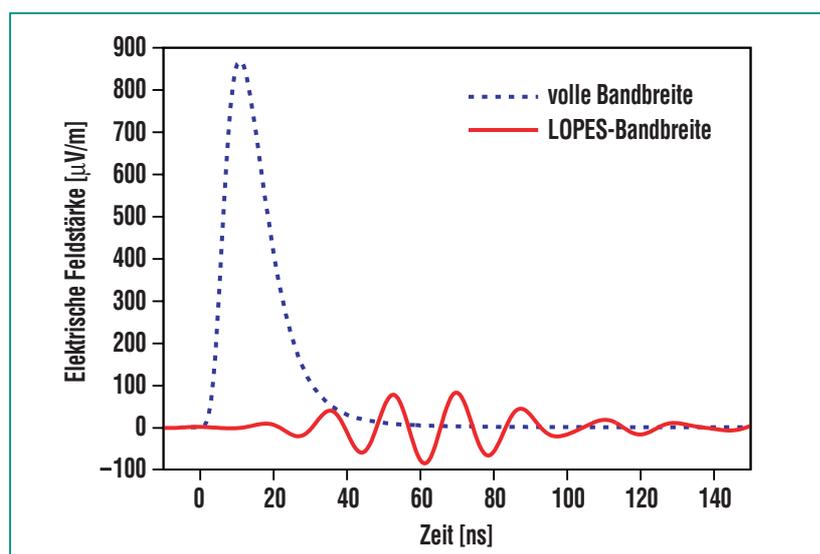


Abb. 1: Exemplarischer Radiopuls, simuliert im Modell der Geosynchrotron-Strahlung. Bei Beobachtung mit der Bandbreite von LOPES (40–80 MHz) werden die Pulse bipolar, verbreitert und gedämpft.

gen derartiger Pulse erfordern aufwändige Monte-Carlo-Simulationen, die insbesondere eine detaillierte Beschreibung der hochkomplexen Luftschauer benötigen [2, 3]. Bei Messung eines solchen Pulses mit der 40 bis 80 MHz Beobachtungsbandbreite des LOPES-Experiments wird der Puls in der Zeit verbreitert. Das Herausfiltern des Gleichstromanteils verwandelt den unipolaren Puls in ein bipolares Signal, das aufgrund der Unterdrückung eines großen Teils des Frequenzspektrums zudem deutlich gedämpft ist.

Diese Zusammenhänge illustrieren die in Abb. 2 gezeigten Frequenzspektren simulierter Radiopulse. Die extrem kurzen Pulse besitzen ein sehr breitbandiges Spektrum, das jedoch zu hohen Frequenzen steil abfällt. Beobachtungen sollten daher bevorzugt bei niedrigen Frequenzen stattfinden. Dort ist die Wellenlänge der Strahlung größer als die typische Ausdehnung des Luftschauers, und die Emissionen der einzelnen

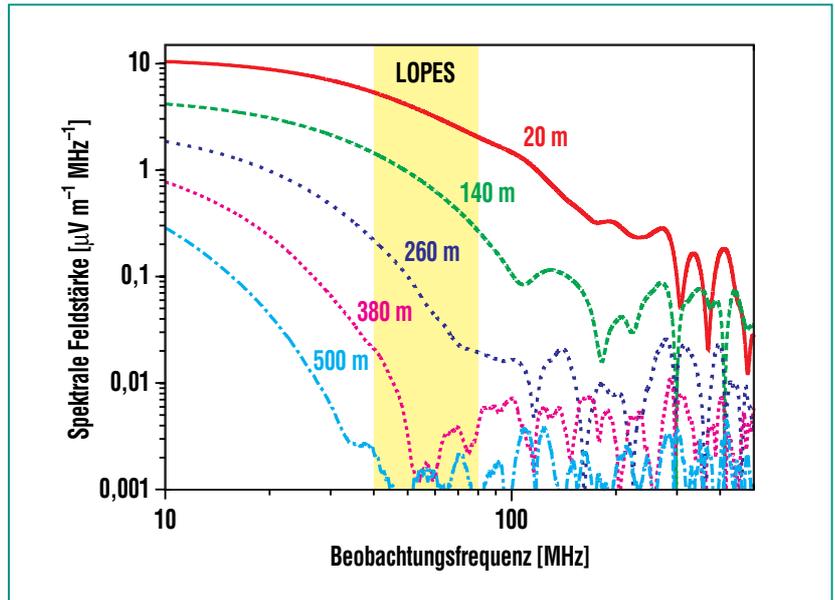


Abb. 2: Simulierte Frequenzspektren der Radiopulse aus einem vertikalen Luftschauer für Beobachter in verschiedenen Abständen von der Schauerachse. Aufgrund des steilen Verlaufs sollten Messungen bevorzugt bei niedrigen Frequenzen erfolgen.

Teilchen summieren sich kohärent auf. Die LOPES-Bandbreite von 40 bis 80 MHz stellt einen guten Kompromiss zwischen diesen prinzipiellen Signaleigenschaften und technischen Limitationen dar.

Das LOPES-Experiment

Das LOPES-Experiment bestand in seiner ersten Ausbaustufe, LOPES-10, aus zehn Radioantennen, ähnlich denen, die auch in gewöhnlichen Radioempfängern zum Einsatz kommen. Die Δ -förmigen Dipolantennen (sie befinden sich in zwei gegenüberliegenden Armen des pyramidenförmigen Aufbaus, s. Abb. 3) waren für alle Pyramiden in Ost-West Richtung ausgerichtet. Damit wurde nur die Ost-West-Polarisation des Radiosignals gemessen. Die Antennen sind im KASCADE-Grande-Detektorfeld installiert und nehmen in Koinzidenz mit den Teilchendetektorstationen Daten im Frequenzbereich von 40 bis 80 MHz auf. Sie speisen einen breitbandigen Empfänger, der eine Vielzahl unterschiedlicher Frequenzen gleichzeitig verarbeitet und die Signale in digitaler



Abb. 3: Drei LOPES-Radioantennen zwischen Teilchendetektoren von KASCADE-Grande auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe.

Form speichert. Bei jedem durch KASCADE-Grande registrierten hochenergetischen Ereignis werden 0,8 ms Radiodaten aufgezeichnet. Durch digitale Verarbeitung der Daten werden Störquellen herausgefiltert und das Antennenfeld mittels des sogenannten „Beamformings“ auf die mit KASCADE-Grande gemessene Ankunftsrichtung des Luftschauers fokussiert. Abb. 4 zeigt die in den einzelnen Antennen gemessenen Radiopulse eines Schauerereignisses, welche sich im Gegensatz zu Rauschteilen und Störsignalen nach dem „Beamforming“ kohärent überlagern.

Das Antennenfeld in Karlsruhe wurde mittlerweile von 10 auf 30 Antennen erweitert (Abb. 5), um zum einen mit größerer Statistik insbesondere bei höheren Energien das Radiosignal im Detail auch auf Einzelschauer- und Einzelantennenbasis zu studieren, und zum anderen auch die Möglichkeit zu haben, Polarisationsmessungen des Radiosignals durchzuführen. Diese sind durch einfaches Drehen einiger Antennen um 90° innerhalb der Pyramiden möglich. Bei LOPES-30 wird besonderer Wert auf eine absolute Kalibration der Antennen gelegt, um das gemessene Signal einer Feldstärke in der Atmosphäre zuordnen zu können, was unabdingbar ist für einen direkten Vergleich mit theoretischen Berechnungen des Emissionsmechanismus. Zusätzlich werden Umgebungsvariablen wie Temperatur, Druck, und elektrisches Feld der Atmosphäre aufgezeichnet, da diese einen Einfluss auf die Signalstärke haben können. Durch diese Maßnahmen wird LOPES-30 Schauerdaten im Radiofrequenzbereich mit sehr hoher Qualität liefern.

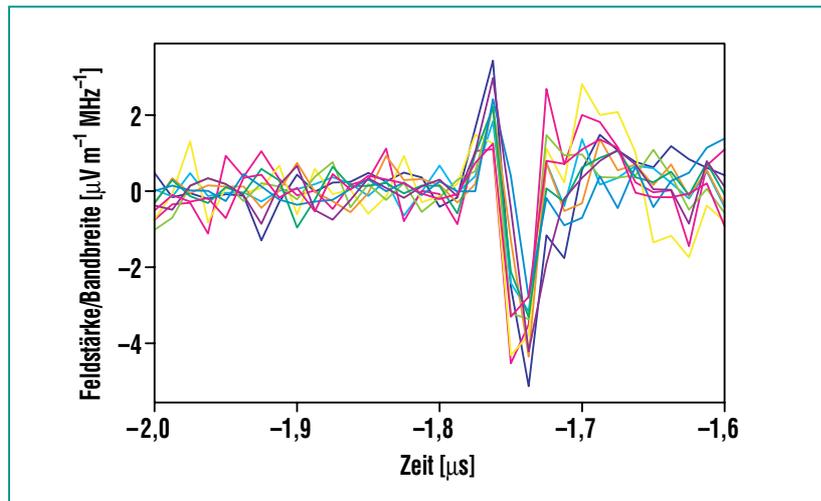


Abb. 4: Von 10 Antennen aufgenommenes Radiosignal eines einzelnen detektierten Luftschauers. Dargestellt ist die elektrische Feldstärke geteilt durch die Beobachtungsbandbreite von LOPES. Das kohärente Signal ist deutlich gegen den Untergrund abgegrenzt.

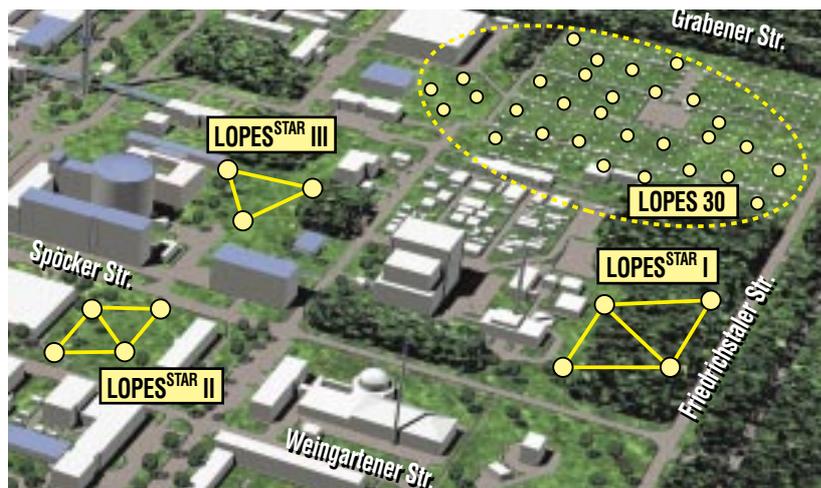


Abb. 5: Anordnung der LOPES-30-Antennen und LOPES^{STAR}-Empfängerstationen auf dem Gelände des Forschungszentrums.

Erste wissenschaftliche Erfolge

Mit LOPES wurden zum ersten Mal zweifelsfrei Radiosignale aus der Schauerentwicklung gemessen. Das große Interesse der Physikergemeinschaft an dieser wiederentdeckten Messtechnik hochenergetischer kosmischer Strahlung kommt darin zum Ausdruck, dass

das „Proof-of-Principle“ schon mit den ersten gemessenen Ereignissen 2005 in der Fachzeitschrift Nature veröffentlicht werden konnte [4]. Dass es sich bei den gemessenen Signalen tatsächlich um Emissionen aus der Schauerentwicklung in der Atmosphäre handelt, konnte durch ein unabhängiges Beamforming ohne Nutzung der KASCADE-Richtungsinforma-

tionen gezeigt werden, indem das Summensignal an jedem Punkt des Himmels gebildet und das Maximum gesucht wurde („Skymapping“, Abb. 6): Die gefundenen Radio-Hotspots am Himmel zeigen in dieselben Richtungen wie die von KASCADE-Grande rekonstruierten Schauerachsen.

Ein wichtiges Ergebnis der Analyse der mit LOPES-10 gemessenen, aus Luftschauern emittierten, Radioblitze ist die starke Korrelation der gemessenen Signalstärke mit der von KASCADE-Grande rekonstruierten Energie des kosmischen Teilchens (Abb. 7). Diese Korrelation lässt sich mit einem Potenzgesetz mit einem Index nahe 1 beschreiben, d. h. die emittierte Leistung wächst sogar quadratisch mit der primären Energie an [5, 6]. Diese Eigenschaft ist sehr vielversprechend für eine effiziente Anwendung der Messtechnik auf Schauer ultrahocher Energie. Weiterhin konnten mit den detektierten Ereignissen klare Korrelationen der Signalstärke mit

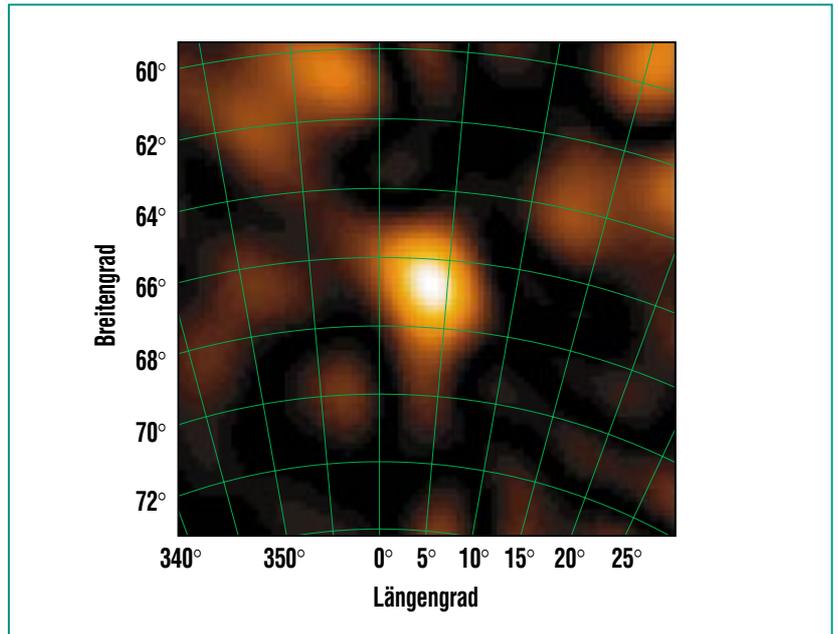


Abb. 6: Mit LOPES rekonstruierte Radiokarte für einen einzelnen Luftschauer. Die Position des Spots zeigt die Richtung des einfallenden Schauers, die Intensität korreliert mit der Energie des Primärteilchens.

dem Abstand der Antennen zur Schauerachse und mit der Einfallrichtung des Schauers gezeigt werden, wobei der Winkel zwischen

der Schauerachse und der Richtung des Erdmagnetfeldes die entscheidende Rolle spielt. Ein weiteres Resultat aus der Analyse der LOPES-10-Daten ist die Erkenntnis, dass während eines Gewitters verstärkte Radioemissionen gemessen werden. Dies kann auf das starke elektrische Feld in der Atmosphäre während solcher extremer Wetterbedingungen zurückgeführt werden [7].

Diese ersten experimentellen Resultate sind im guten Einklang mit dem theoretischen Bild des Geosynchrotron-Effektes. Mit den aus KASCADE-Grande bekannten Schauerobservablen ist es möglich, die Radioemission in Schauern zu kalibrieren und damit den Weg für eine großflächige Anwendung dieser neuen Messtechnik für höchstenergetische Teilchen vorzubereiten.

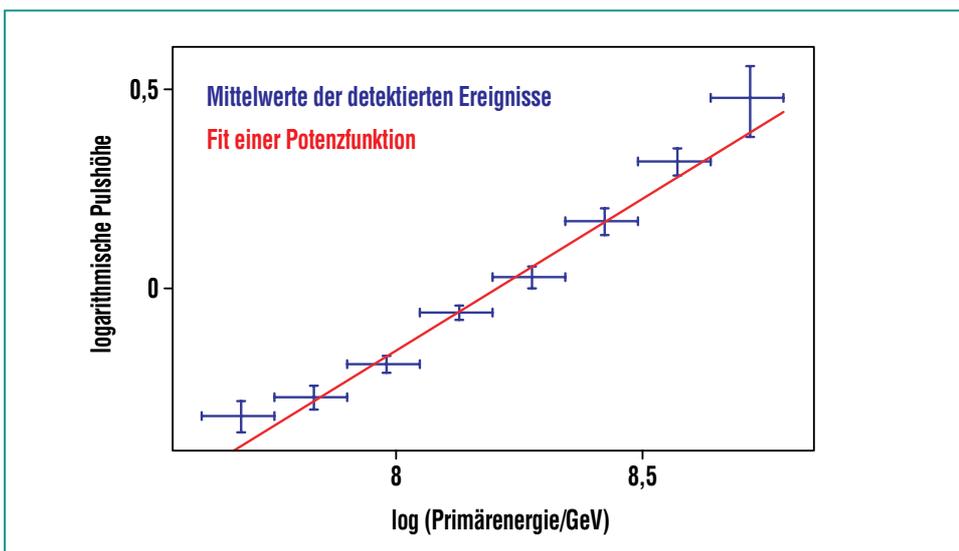


Abb. 7: Mittlere, mit LOPES gemessene Radio-Pulsstärke der detektierten Ereignisse, aufgetragen über der von KASCADE-Grande rekonstruierten Energie der kosmischen Strahlung. Deutlich ist die starke Korrelation zu erkennen.

LOPES^{STAR}

Eine solche großskalige Anwendung der Radiotechnik bei ultrahohen Energien, z. B. im Pierre-Auger-Observatorium, erfordert jedoch ein geändertes Detektor-konzept. Im Hinblick auf diese geänderten Anforderungen wird LOPES^{STAR} entwickelt [8]. LOPES^{STAR} arbeitet ebenfalls im Frequenzbereich von 40 MHz bis 80 MHz und entstand aus der konsequenten Weiterentwicklung der LOPES-Technik. Insbesondere verfügt es über einen Selbsttrigger, mit dem kosmische Schauer allein durch ihre Radioemission, d. h. ohne zusätzliche externe Triggersignale detektiert werden sollen (LOPES^{STAR} = Self Triggered Array of Radiodetectors).

Eine Schlüsselkomponente von LOPES^{STAR} ist die verwendete Antenne. Ihre Eigenschaften sollten möglichst unbeeinflusst durch Wechselwirkungen mit der Umgebung konstant bleiben, so dass die Antenne auch im Feld ihre im Labor vermessenen Eckdaten beibehält. Der Frequenzumfang des Empfängers von einer Oktave erfordert zusätzlich, dass die Antenne sehr gute Breitbandeigenschaften besitzt.

Logarithmisch-periodische Dipolantennen (LPDAs) erfüllen diese Anforderungen in idealer Weise. Sie können nahezu mit beliebiger Bandbreite realisiert werden und weisen innerhalb dieser weitgehend konstante elektrische Eigenschaften auf. Da LPDAs mit den für LOPES^{STAR} notwendigen Eckdaten kommerziell nicht verfügbar waren, wurden diese speziell im Rahmen von LOPES entwickelt. Die Richtcharakteristik der Antennen

zeigt eine breite Hauptkeule, die den vom Erdboden aus sichtbaren Halbraum fast vollständig belegt, so dass Radioemissionen kosmischer Schauer mit beliebiger Einfallsrichtung empfangen werden können. Die weitgehend nebenkeulenfreie Strahlungscharakteristik mit hoher Unterdrückung in horizontaler Richtung eliminiert einen Großteil der vom Menschen verursachten Störungen. Zur Untersuchung des Emissionsmechanismus mit Polarisationsmessungen wurden zwei identische LPDAs orthogonal zu einer kreuzpolarisierten Struktur zusammengefasst (Abb. 8).

Die Realisierung des gewünschten Selbsttriggers für Radiosignale von Luftschauern ist nicht trivial, denn außer dem Nutzsignal gelangen auch äußere Rausch- und Störsignale über die Antenne in den Empfänger. Diese können sowohl Falschtrigger auslösen als auch das Nutzsignal maskieren, so dass die Radioemission eines Schauers nicht erkannt wird. Eine spezielle Signalverarbeitung des

LOPES^{STAR}-Selbsttriggers nutzt gezielt die unterschiedlichen Signaleigenschaften von Radiopulsen und Störungen, um diese zu unterscheiden und den Signal/Störabstand zu erhöhen. Erreicht wird dies durch eine Demodulation der Hochfrequenzsignale zur Bildung der Einhüllenden und anschließende Hochpassfilterung. Das Hochpassfilter unterdrückt langsame Änderungen der Hüllkurve und entfernt so viele industrielle Störungen sowie Rundfunksignale mit niederfrequenter Modulation. Radiopulse kosmischer Schauer haben eine schnelle, transiente Einhüllende und können daher das Hochpassfilter passieren. Eine weitere Steigerung der Triggereffizienz geschieht durch Auswertung der Koinkidenz von jeweils mehreren Antennen, die bei LOPES^{STAR} mit Abständen von ca. 60 Metern im Messfeld angeordnet sind. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind damit in ruhigen ländlichen Gebieten kosmische Schauer oberhalb einer Primärenergie von etwa $5 \cdot 10^{17}$ eV selbsttriggernd detektierbar.



Abb. 8: Kreuzpolarisierte logarithmisch-periodische Dipolantennen der LOPES^{STAR}-Empfängerstationen.

Innerhalb des KASCADE-Grande-Detektorfeldes wurden bisher drei LOPES^{STAR}-Stationen errichtet, die im Parallelbetrieb mit LOPES-30 arbeiten (Abb. 5). Die Stationen sind vollständig kalibriert, erfassen beide Polarisationsrichtungen der Radioemission und liefern damit die Grundlage für deren exakte quantitative Analyse. Mit diesem Aufbau konnten mittlerweile erste Radiosignale, die mit kosmischen Schauern koinzidieren, detektiert werden. Zur weiteren Optimierung der Technik wurde im Herbst 2006 eine weitere LOPES^{STAR}-Station in Argentinien auf dem Gelände des Pierre-Auger-Observatoriums aufgebaut.

Ausblick

Mit dem Nachweis der Machbarkeit von Radiomessungen kosmischer Strahlung hat LOPES einen wichtigen Beitrag zur Etablierung der Radiotechnik geleistet. In den kommenden Jahren wird LOPES mit präzisen Messungen und Simulationsrechnungen dazu beitragen, die Emissionsmechanismen in der Atmosphäre im Detail zu verstehen und damit den Weg für eine verbesserte Messung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung zu ebnen. Dies könnte helfen, eines der großen Rätsel unseres Universums zu entschlüsseln.

Danksagung

LOPES ist ein europäisches Projekt, das in Koinkidenz mit KASCADE-Grande betrieben wird und an dem 13 Institute aus Deutschland, den Niederlanden, Italien, Polen und Rumänien beteiligt sind. Die Autoren danken allen technisch und wissenschaftlich beteiligten Mitarbeitern in diesen Instituten für ihren motivierten Einsatz und die fruchtbare Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] T. Huege, H. Falcke
Astronomy & Astrophysics 412, 2003, 19-34
- [2] T. Huege, H. Falcke
Astropart. Physics 24, 2005, 116-136
- [3] T. Huege, R. Ulrich, R. Engel
Astropart. Physics in press, 2007, astro-ph/0611742
- [4] H. Falcke et al.
(LOPES collaboration)
Nature 435, 2005, 313-316
- [5] A. Horneffer et al.
(LOPES collaboration)
Int. J. Mod. Phys. A 21 S1, 2006, 168-181
- [6] W.D. Apel et al.
(LOPES collaboration)
Astropart. Physics 26, 2006, 332-340
- [7] S. Buitink et al.
(LOPES collaboration)
Astronomy & Astrophysics, 2007, in press, astro-ph/0702432
- [8] H. Gemmeke et al.
(LOPES collaboration)
Int. J. Mod. Phys. A 21 S1, 2006, 242-246