

■ Kosmische Einblicke in Blitze

Die Radiodetektion von kosmischer Strahlung erlaubt es, die elektrische Feldkonfiguration in Gewitterwolken zu messen.

Blitze sind ein Alltagsphänomen, dessen physikalisches Verständnis noch immer sehr lückenhaft ist [1]. Insbesondere ist unklar, wie Blitze letztlich entstehen. Messungen der elektrischen Felder in Gewitterwolken zeigen nämlich, dass die dort vorliegenden Feldstärken zu klein sind für einen einfachen „Durchschlag“ der Atmosphäre. Auf Meeresebene sind dafür rund 3×10^6 V/m notwendig. Die maximal beobachteten (auf Meeresebene umgerechneten) Feldstärken betragen jedoch „nur“ $(1-2) \times 10^5$ V/m. Hier liegt aber auch ein großes Problem der Blitzforschung: Es ist ungemein schwierig, elektrische Felder in Gewitterwolken in situ zu vermessen. Zwar gibt es seit Jahrzehnten solche Messungen mit Flugzeugen, Raketen und Ballons, welche wagemutig in Gewitterwolken gesteuert oder geschossen werden. Neben der Tatsache, dass solche Messungen sehr aufwändig und teils gefährlich sind, haben diese Ansätze aber noch weitere Unzulänglichkeiten: So wird immer nur ein kleines Raumgebiet vermessen, d. h. bei den großen Volumina von Gewitterwolken ist es nur selten möglich, wirklich die kleinen Raumgebiete mit den höchsten Feldstärken zu kartieren. Zudem ändern sich die Feldstärken innerhalb von Sekunden, viel schneller, als man diese mit solchen „Sonden“ erkunden könnte. Nicht zuletzt beeinflussen die Messungen selbst die elektrischen Felder und können etwa zu frühzeitigen Entladungen führen, bevor sich auf natürliche Weise ein Blitz ausbildet.

Einen völlig anderen Zugang zur Messung elektrischer Felder in Gewitterwolken bietet die Detektion hochenergetischer kosmischer Strahlung, welche die Erde aus galaktischen oder gar extragalaktischen Quellen erreicht. Diese Atomkerne mit Energien bis über 10^{20} eV lösen in der Erdatmosphäre Partikelschauer aus, die sich am Erdboden mit Teilchen-



mm.gettyimages / Clint Spencer

Wie Blitze entstehen, ist immer noch schlecht verstanden – nicht zuletzt, weil

detektorarrays oder mit optischen Teleskopen über ihre Fluoreszenzlichtemissionen nachweisen lassen. Darüber hinaus emittieren diese „ausgedehnten Luftschauer“ allerdings auch starke Radiopulse im Frequenzbereich von mehreren zehn bis hundert MHz, die Rückschlüsse auf Energie, Masse und Ankunftsrichtung der kosmischen Teilchen erlauben [2] – und eben auch auf elektrische Felder in der Atmosphäre, durch welche die Luftschauer propagieren. Die Physik der Radioemissionen aus Luftschauern ist inzwischen gut verstanden. Das Erdmagnetfeld beschleunigt Elektronen und Positronen, welche in Wechselwirkungen

sich die elektrischen Felder in Gewitterwolken nur schwer messen lassen.

mit den Atomen der Atmosphäre wieder abgebremst werden. Analog zur Situation in einem metallischen Leiter mit angelegter elektrischer Spannung bilden sich Driftströme in Richtung der Lorentz-Kraft, senkrecht zur Luftschauerachse. Die zeitliche Veränderung dieser „transversalen Ströme“ führt zu einem Radiopuls, der durch die relativistischen Geschwindigkeiten der Teilchen in Vorwärtsrichtung „gebeamt“ und auf Zeitskalen von wenigen 10 bis 100 ns komprimiert wird. Die Radiopulse sind linear polarisiert entlang der durch die Lorentz-Kraft vorgegebenen Richtung. Als sekundärer Effekt trägt mit 10 bis 20 Prozent die zeit-

KURZGEFASST

■ Eine Bremse für Röntgenlicht

Sichtbares Licht lässt sich fast beliebig abbremsen, indem man einen Laserpuls z. B. in ein kaltes Atomgas einstrahlt. Nun ist Physikern des Heidelberger MPI für Kernphysik, vom DESY und der Uni Jena ein analoges Experiment mit Röntgenlicht gelungen. Sie haben dazu an der Quelle PETRA III die resonante Streuung von schmalbandigen Röntgenpulsen an einer Dünnschicht-Eisenprobe ausgenutzt und gezeigt, dass sich damit das Röntgenlicht um einen Faktor 10 000 verlangsamen lässt. K. P. Heeg et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 203601 (2015)

■ Haftgleiten mit einzelnen Ionen

Physiker am Massachusetts Institute of Technology (MIT) haben einen elementaren Prozess der Reibung untersucht, bei dem Oberflächen abwechselnd aufeinander haften und gleiten (engl. „stick-slip“). Dafür zogen sie einen linearen Kristall aus wenigen Ytterbium-Ionen kontrolliert über ein optisches Gitter. Die Ergebnisse dieses Experiments bestätigen das Frenkel-Kontorova-Modell von 1938, wonach die Reibungskraft stark von der Orientierung der Oberflächen, hier des Kristalls zum Gitter, abhängt. A. Bylinskii et al., Science **348**, 1115 (2015)

liche Veränderung des negativen Netto-Ladungsüberschusses im Luftschauer bei, welcher durch das Mitschwimmen von Elektronen aus ionisierten Atomen der Atmosphäre zustande kommt.

Dass elektrische Felder in der Atmosphäre die Radioemissionen aus Luftschauern beeinflussen, ist seit den 1970er-Jahren bekannt [3]. Das wurde zunächst als großer Nachteil betrachtet – wie soll man verlässlich auf die Eigenschaften der kosmischen Teilchen zurückschließen, wenn unbekannte elektrische Felder die Emissionen verändern? 2007 zeigten erste quantitative Studien mit dem LOPES-Experiment am Karlsruher Institut für Technologie [4], dass solche elektrischen Felder während 90 bis 95 Prozent der Messzeit keine nennenswerte Rolle spielen. Während Gewittern wurden aber tatsächlich deutlich veränderte Radiopulse gemessen, mit teils zehnfach höheren Amplituden. Schon damals bestand die Hoffnung, mit solchen Messungen etwas über die elektrischen Felder in Gewitterwolken zu lernen. Mit der Berücksichtigung der Felder in den Simulationen wurde der Grundstein für detaillierte Modellierungen der Radiopulse in Anwesenheit atmosphärischer elektrischer Felder gelegt [5]. Die geringen Ausmaße des LOPES-Experiments und sein prototypartiger Charakter erlaubten jedoch keine detaillierten Ergebnisse.

Mit Messungen der kosmischen Strahlung durch das Radiointerferometer LOFAR, dessen Antennen sich hauptsächlich in den Niederlanden befinden, ist dies nun erstmals gelungen. Schellart et al. untersuchten Radiosignale von Luftschauern, welche sich durch Simulationen ohne elektrische Felder nicht reproduzieren ließen [6]. Insbesondere die Polarisation der Radiopulse, gemessen in mehreren hundert Einzelantennen, entsprach nicht der Erwartung aus dem dominierenden geomagnetischen Mechanismus (Abb. 1). Ein Großteil dieser Ereignisse wurde innerhalb eines Zwei-Stunden-Fensters von Blitzaktivität in einem 150 km-Umkreis von LOFAR gemessen.

Schellart und Kollegen simulierten die Radioemissionen aus Luftschauern in Anwesenheit von elektrischen Feldern verschiedener Konfigurationen und Stärken mit dem Simulationsprogramm CoREAS [7]. Demnach beeinflussen elektrische Felder senkrecht zur Luftschauerachse die Radioemissionen stark, während sich Feldanteile parallel zur Achse vergleichsweise gering auswirken. Daher untersuchten Schellart et al. gezielt elektrische Felder senkrecht zur Luftschauerachse, die so orientiert waren, dass sie die Polarisation der Radiopulse in Richtung der gemessenen Signalarisation (Abb. 1) drehen. Mit einer vereinfachten Feldkonfiguration aus zwei homogenen Schichten mit entgegengesetzt gerichteten elektrischen Feldern stimmten simulierte und gemessene räumliche Intensitätsverteilung sowie Polarisation sehr gut überein. Die Messungen sind demnach sensitiv sowohl auf die Stärken der atmosphärischen elektrischen Felder in den beiden Schichten als auch auf die Höhen, in denen diese Schichten liegen. Die beste Übereinstimmung ergab sich mit einem Feld von 5×10^4 V/m in einer Schicht von 2,9 bis 8 km Höhe und einem Feld von $2,7 \times 10^4$ V/m zwischen Erdboden und 2,9 km Höhe, wobei diese Werte nur die Feldstärkenanteile senkrecht zur Schauerachse bezeichnen. Mit detaillierten Messungen der Radiopulse aus Luftschauern während Gewittern lassen sich also konkrete Rückschlüsse auf die Konfiguration der elektrischen Felder in der Atmosphäre ziehen.

Natürlich bleiben noch viele Fragen offen, insbesondere diejenige, wie detailliert – und wie eindeutig – sich die E-Feldkonfiguration in Gewitterwolken auf diese Weise tatsächlich vermessen lässt. Diese und andere Fragen wird die Community nun sicher mit Hochdruck verfolgen. So werden im Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien mit starker deutscher Beteiligung ebenfalls Radioemissionen aus Luftschauern unter dem Einfluss atmosphärischer elektrischer Felder untersucht. Noch detailliertere Messungen als bei LOFAR könnten

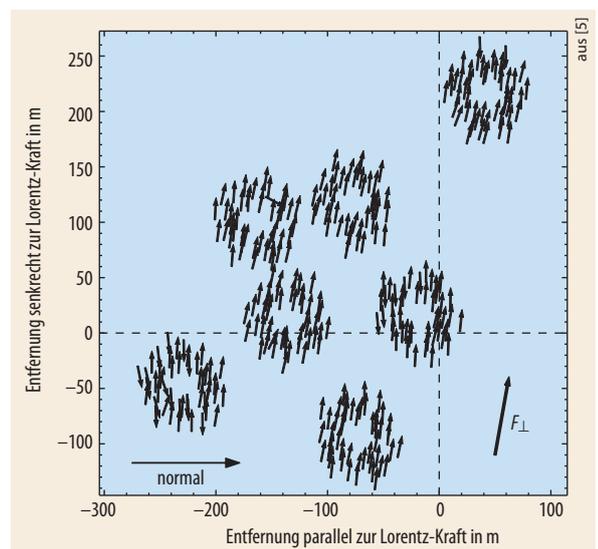


Abb. 1 Mit LOFAR gelang es, bei Gewittern Radiopulse von Luftschauern kosmischer Strahlung mit ungewöhnlicher Signalpolarisation zu messen. Die gezeigte Ebene liegt senkrecht zur Achse des Luftschauers, die x-Achse entlang der Richtung der Lorentz-Kraft im Erdmagnetfeld. Der Koordinatenursprung markiert den rekonstruierten Auftreffpunkt des Luftschauers. Jeder Pfeil zeigt die gemessene lineare Polarisation in einer einzelnen LOFAR-Antenne, bei den Kreisen handelt es sich um Antennenstationen. Erwarten würde man eine durchgehende Signalpolarisation entlang der durch die Lorentz-Kraft vorgegebene Richtung („normal“) mit nur leichten und charakteristischen Abweichungen aufgrund der Beiträge durch den Ladungsüberschuss. Simulationen mit elektrischen Feldern, die zu einer zusätzlichen Kraft auf die Ladungsträger in Richtung F_{\perp} führen, reproduzieren die Messungen hingegen sehr gut.

zudem in Zukunft mit dem Square Kilometre Array erfolgen [8].

Lange steht auch schon die These im Raum, dass die Ionisation der Atmosphäre durch Luftschauer gar an der Blitzentstehung beteiligt sein könnte [1]. Es bieten sich also vielfältige Anknüpfungspunkte zwischen Gewitterphysik und Radiodetektion kosmischer Strahlung, welche noch einige spannende Erkenntnisse versprechen.

Tim Huege

- [1] J. R. Dwyer und M. A. Uman, Phys. Rep. **534**, 147 (2014)
- [2] T. Huege, Braz. J. Phys. **44**, 520 (2014)
- [3] N. Mandolesi, G. Morigi und G.G.C. Palumbo, J. Atmosph. Terrest. Phys. **36**, 1431 (1974)
- [4] S. Buitink et al. (LOPES Collaboration), A&A **467**, 385 (2007)
- [5] S. Buitink, T. Huege, H. Falcke und J. Kuijpers, Astrop. Phys. **33**, 296 (2010)
- [6] P. Schellart et al. (LOFAR Collaboration), PRL **114**, 165001 (2015)
- [7] T. Huege, M. Ludwig und C.W. James, AIP Conf. Proc. **1535**, 128 (2013)
- [8] T. Huege et al., PoS (AASKA14) 148

Dr. Tim Huege,
Institut für Kernphysik,
Karlsruher Institut für Technologie
(KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen