

## ASTROPHYSIK

# Extrem beschleunigend

**Astrophysikalische Jets gelten als Quellen ultrahochenergetischer Strahlung und hochenergetischer Neutrinos.**

Elisa Pueschel und Gernot Maier

Relativistische Plasmaströme oder „Jets“ treten in unterschiedlichsten astrophysikalischen Umgebungen auf und besitzen stellare bis galaktische Dimensionen. Mit modernen Teleskopen lassen sie sich im gesamten elektromagnetischen Wellenlängenbereich bis zu

Energien von einigen TeV beobachten. Offen bleiben derzeit Fragen zu den grundlegenden Aspekten der Beschleunigungsmechanismen. Außerdem ist unklar, welche astronomischen Objekte mit Jets effiziente Teilchenbeschleuniger sind.





**Abb. 1** Diese künstlerische Darstellung zeigt einen relativistischen Jet mit mehreren Knoten, der aus der Akkretionsscheibe eines supermassiven Schwarzen Lochs herausragt. Ein Torus aus Staub und Gas umgibt die Scheibe.

stattfindet, ist bereits 40 Jahre alt. Heute erlauben es Beobachtungen sowie detaillierte theoretische Modelle, die verschiedenen physikalischen Prozesse in Jets zu verstehen.

Jets und die zugehörigen kompakten Objekte treten auf Längen- und Massenskalen auf, die mehrere Größenordnungen überstreichen. Sie reichen von kollimierten Plasmaströmen in jungen Sternen mit Ausdehnungen von mehreren Parsec ( $1 \text{ pc} \approx 3 \times 10^{16} \text{ m}$ ) bis zu Jets mit galaktischen Dimensionen von mehreren Megaparsec in der Umgebung supermassiver Schwarzer Löcher mit bis zu  $10^{10}$  Sonnenmassen. Dazwischen liegen Doppelsternsysteme, in denen ein Neutronenstern oder ein stellares Schwarzes Loch Materie des Begleitsterns akkretiert. Dadurch bildet sich, wie beim Röntgen-Doppelstern Cygnus X-1, in wohldefinierten Zyklen eine sehr heiße Akkretionsscheibe mit etwa  $10^9 \text{ K}$ , die Röntgenstrahlung aussendet. Der Jet zeigt sich dagegen im Radio- und sichtbaren Spektralbereich durch die Synchrotronstrahlung hochenergetischer Elektronen. Die freigesetzte Energie bzw. Luminosität von Objekten mit Jets skaliert etwa mit ihrer Masse. Dabei gehören Massenakkretion und Jetformation zu den effektivsten Mechanismen, um Gravitationsenergie freizusetzen.

Heber D. Curtis beobachtete 1918 zum ersten Mal Jets beim nahe gelegenen aktiven galaktischen Kern M87: „*a curious straight ray lies in a gap in the nebulosity [...], apparently connected with the nucleus by a thin line of matter.*“ Jets gehören zu den typischen Komponenten einer aktiven Galaxie (**Abb. 1**). In deren Zentrum befindet sich ein supermassives Schwarzes Loch, und die Leuchtkraft des zentralen Bereichs übersteigt diejenige der Galaxie um ein Vielfaches. Eine Akkretionsscheibe umgibt das Schwarze Loch, von dem aus sich ein dünner relativistischer Jet erstreckt. Die rasanten Entwicklungen der Radioastronomie in den 1950er-Jahren ermöglichten es, weitere Strukturen zu entdecken, beispielsweise ausgedehnte Emissionsgebiete von Radiostrahlung, sogenannte Radiolobes. Diese zeigen sich in der Umgebung der Radiogalaxie Centaurus A besonders deutlich (**Abb. 2**).

## Von Radio- bis Gammastrahlung

Teleskope für alle Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums beobachten Jets – von der Radio- bis zur Gammastrahlung bei den höchsten Energien von einigen TeV. Objekte mit Jets gehören zu den leuchtkräftigsten am Himmel. Das erlaubt eine detaillierte Untersuchung einzelner, sehr naher Systeme und ermöglicht es gleichzeitig, viele Quellen über einen großen Himmelsausschnitt für Populationsstudien zu sammeln. Die außergewöhnliche Helligkeit mancher aktiver Galaxie beruht auf dem sogenannten Doppler-Boosting. Die emittierten Plasmaströme bewegen sich mit relativistischen Geschwindigkeiten in Richtung des

**A**strophysikalische Jets sind kollimierte, bipolare, relativistische Plasmaströme. Als universelles Phänomen der Astrophysik treten sie in Verbindung mit Akkretion von Materie auf kompakte Objekte auf. Damit sind Objekte hoher Dichte gemeint, z. B. Schwarze Löcher, Neutronensterne oder Weiße Zwerge. Physikalische Prozesse in Jets sowie deren Einfluss auf ihre Umgebung spielen in der Astrophysik eine wichtige Rolle, beispielsweise in der Entstehung von Galaxien [1]. In diesem Artikel konzentrieren wir uns auf Aspekte der Hochenergiephysik: die Emission hochenergetischer Photonen, Neutrinos und geladener Teilchen sowie den Ursprung hochenergetischer kosmischer Strahlung. Letztere besteht aus einzelnen Atomkernen mit Energien bis zu  $10^{20} \text{ eV}$ . Das entspricht der kinetischen Energie eines Tennisballs beim Aufschlag, komprimiert in einem um 40 Größenordnungen kleineren Volumen. Die Vorhersage, dass diese extreme Teilchenbeschleunigung in Jets aktiver galaktischer Kerne (AGN)



**Abb. 2** Beobachtungen der aktiven Galaxie Centaurus A im Röntgen-, Submillimeter- und optischen Bereich (links) zeigen einen deutlichen Jet mithilfe der Synchrotronstrahlung schneller Elektronen in Magnetfeldern. Senkrecht dazu ist die Scheibe der Wirtsgalaxie zu erkennen. Die Form und Orientierung einer ausgedehnten Emission von Gammastrahlung, beobachtet mit den H.E.S.S.-Teleskopen (rechts, blaue Linie), deutet auf den Jet als Quelle der hochenergetischen Strahlung hin.

Optischer Bereich: ESO / WFI; Submillimeter: MPIR / ESO / APEX / A. Weiss et al.; Röntgenstrahlung: NASA / Chandra / R. Kraft et al.; Gammastrahlung: H.E.S.S. Coll.

Beobachters. Gemäß der Speziellen Relativitätstheorie erscheint ihre Intensität verstärkt und in Bewegungsrichtung gebündelt. Im einfachsten Fall verstärkt ein Faktor

$$D^3 = \left( \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \Theta)} \right)^3$$

die Intensität, die als Photonenfluss pro Frequenzintervall und Raumwinkel definiert ist. Die Quelle wird unter dem Sichtwinkel  $\Theta$  beobachtet und verstärkt. Dabei gilt  $\beta = v/c$  und  $\Gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  mit der Geschwindigkeit  $v$  des Plasmas im Jet und der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Typische Doppler-Faktoren für Jets aktiver galaktischer Kerne betragen  $D \approx 5 - 10$ , was die Intensität des beobachtbaren Flusses um etwa das Tausendfache erhöht. Daher lassen sich aktive Galaxien mit Jets trotz niedriger intrinsischer Photonenflüsse bei sehr hohen Energien selbst in großen Entfernungen beobachten.

Die größten Objekte mit Jets sind die etwa  $10^9$  detektierten aktiven Galaxien, die vor allem als extragalaktische Radioquellen in Erscheinung treten. Solche Jets und die zugehörigen Objekte lassen sich inzwischen mithilfe von Multimessenger-Beobachtungen auf verschiedenen Dimensionen in allen Details vermessen (**Abb. 3**). Hierbei helfen die größten und empfindlichsten verfügbaren Teleskope, darunter das Event Horizon Telescope, ein weltweiter Verbund von Radioteleskopen, die großen optischen Anlagen der Europäischen Südsternwarte in Chile und weltraumgestützte Instrumente wie der Röntgensatellit Chandra. Diese moderne Teleskope können die Regionen in der Größe unseres Sonnensystems, in denen sich der Jet bildet, ebenso auflösen wie die Kollimationsregionen, die mehrere Parsec groß sind. Die hochauflösenden Beobachtungen zeigen helle Knoten im Jet sowie die Radiolobes der aktiven Galaxie. Dabei handelt es sich um zwei meist symmetrisch zum Zentrum angeordnete, auf mehrere Megaparsec ausgedehnte Emissionsgebiete. Bei den höchsten Energien reicht die

instrumentelle Auflösung allein in der Regel nicht aus, um den Jet von der Wirtsgalaxie zu trennen. Dazu bedarf es zeitlich und energetisch aufgelöster Spektren. Um aktive galaktische Kerne aufzuspüren, ist das jedoch nicht nötig. So hat das Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT) fast 3000 dieser Objekte bei Energien oberhalb von 50 MeV beobachtet; oberhalb von 50 GeV haben die bodengebundenen Gammastrahlen-Observatorien H.E.S.S., MAGIC und VERITAS etwa hundert davon näher untersucht.

### Akkretion oder Rotation?

Wie sich Jets bilden und kollimieren, ist nicht in allen Einzelheiten verstanden. Die hellsten bekannten Jets gehören alle zu supermassiven Schwarzen Löchern; umgekehrt besitzt nur ein kleiner Bruchteil davon einen relativistischen Jet. Obwohl die Ausdehnung der Jets und die Masse der zugehörigen kompakten Objekte mehrere Größenordnungen umfassen, zeichnen sich alle Systeme durch ähnliche Komponenten aus: den Einfall von Materie in Richtung des kompakten Objekts, die Ausbildung einer Akkretionsscheibe mit Magnetfeld um das Objekt sowie den Drehimpuls des Objekts.

In aktiven Galaxien macht vor allem Kontinuumsstrahlung im ultravioletten und optischen Wellenlängenbereich die Akkretionsscheiben sichtbar. Hellere Akkretionsscheiben gehören zu stärkeren Jets, sodass die Akkretion eine Rolle beim Antrieb des Jets spielen sollte. Allerdings gibt es auch relativistische Jets, deren Energie deutlich größer ist als das durch Akkretion maximal verfügbare Budget. Als Energiequellen kommen daher der Materie-Einfall über die Akkretionsscheibe sowie das rotierende kompakte Objekt infrage. In beiden Fällen sollten starke poloidale Magnetfelder im inneren Bereich der Akkretionsscheibe auftreten.

1) Das Video unter [youtu.be/VdF4gknH9YM](https://youtu.be/VdF4gknH9YM) stellt diesen Vorgang eindrucksvoll dar.



ten, die Feldstärken bis zu  $10^5$  G erreichen können. Das Event Horizon Telescope hat vor kurzem die Polarisation der Radioemission im innersten Teil der Akkretionsscheibe von M87 [2, 3] gemessen und diese Modellvorhersagen bestätigt.

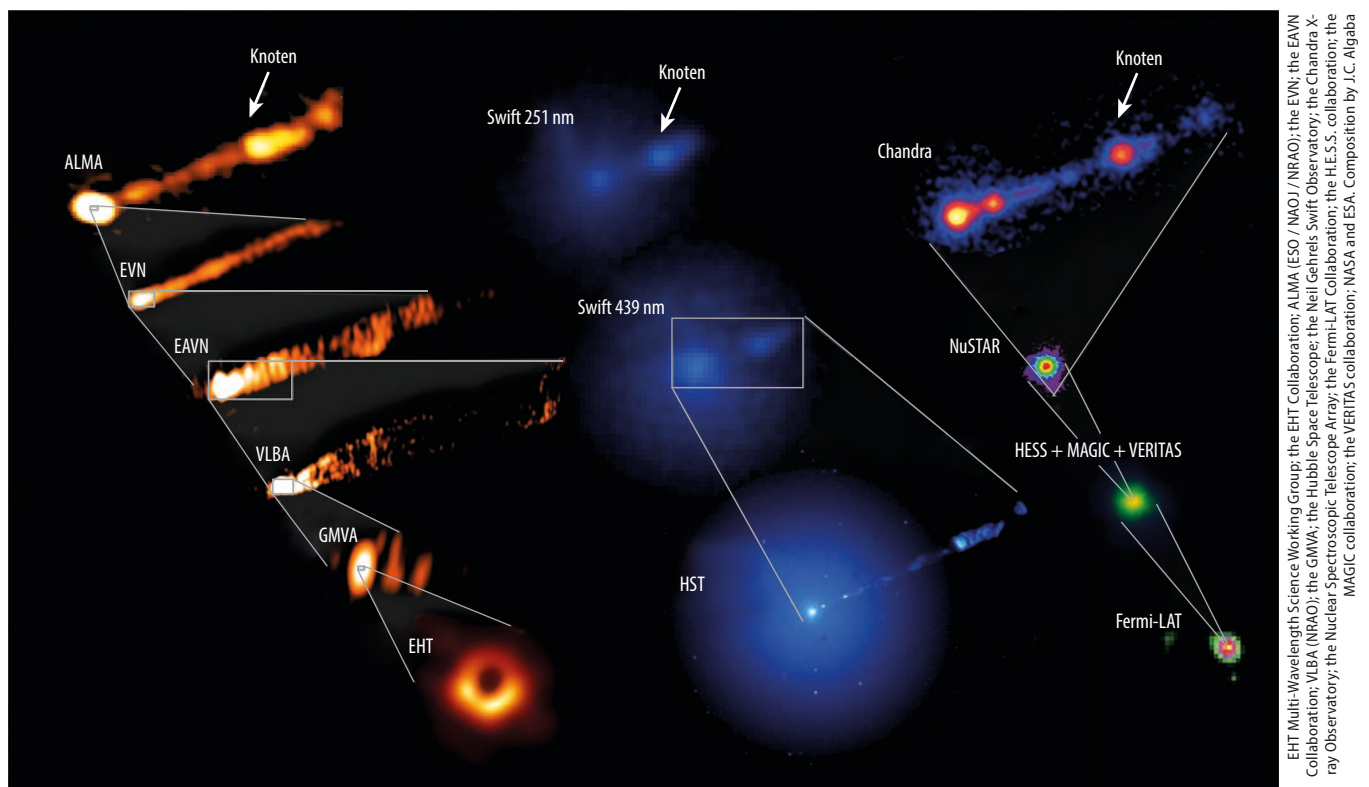
### Flüchtig, aber energiereich

Jets bilden sich nicht nur in der Umgebung Schwarzer Löcher. Sie treten unter anderem auch bei schnell rotierenden Neutronensternen mit starken Magnetfeldern auf oder zusammen mit transienten Objekten wie Gammastrahlenausbrüchen (engl.: Gamma-Ray Burst – GRB). Diese hellen, flüchtigen Ereignisse emittieren besonders Strahlung mit Röntgen- und Gamma-Energien. Die verschiedenen Typen der Ausbrüche gehören zu kollabierenden Sternen, der Kollision zweier Neutronensterne oder eines Schwarzen Lochs mit einem Neutronenstern. Während eines Gammastrahlenausbruchs bilden sich beim Kollaps eines massiven Sterns eine Akkretionsscheibe sowie kurzfristig ein Jet aus. Der Strahlungsausbruch tritt schlagartig auf, sobald der Jet die kollabierende Hülle des Sterns durchschlägt.<sup>1)</sup>

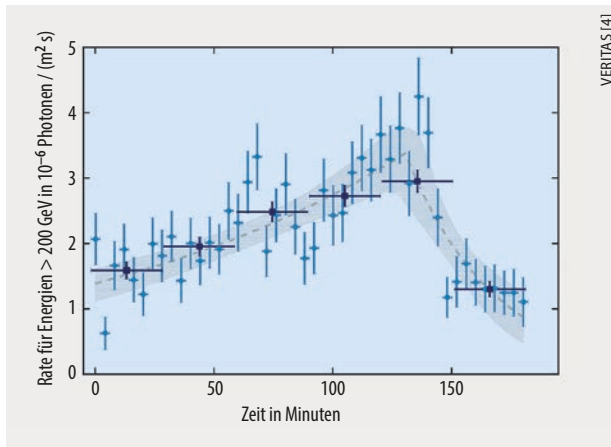
Ihre hohe Energie im Bereich von TeV und sogar PeV ( $10^{12} - 10^{15}$  eV) gewinnen die Teilchen durch wiederholte Streuung in Schockfronten. Diese Schockfronten zeigen sich bei Röntgenenergien in den deutlich sichtbaren hellen Knoten des Jets (**Abb. 3**, rechts oben) oder in den Zonen, in denen der Jet mit intergalaktischer Materie wechselwirkt. Photonspektren geben Einblick in die physikalischen

Bedingungen, die in den Beschleunigungsregionen herrschen, da unterschiedliche Teilchen zu verschiedenen Spektren führen. Geladene Teilchen emittieren ein kontinuierliches Spektrum von Synchrotronstrahlung, weil sie durch das Magnetfeld abgelenkt werden. Hochenergetische Gammastrahlung entsteht durch inverse Compton-Streuung niederenergetischer Photonen, beispielsweise aus dem kosmischen Mikrowellenhintergrund, an relativistischen Elektronen. Schnelle Protonen oder Atomkerne erzeugen durch Photo-Meson- bzw. Photo-Pion- oder Proton-Proton-Wechselwirkungen hauptsächlich Pionen und Myonen. Neutrale Pionen ( $\pi^0$ ) zerfallen in zwei hochenergetische Photonen, geladene Pionen ( $\pi^\pm$ ) in Myonen und Neutrinos. Daher sagen Modelle, die nur Elektronen und Positronen, nur Hadronen – hauptsächlich Protonen – bzw. eine Mischung aus beidem beinhalten, unterschiedliche Spektren für die hochenergetische Gammastrahlung voraus. Die Form der Spektren genau zu messen und die zeitlichen Veränderungen bei den höchsten Energien (GeV bis TeV) zu bestimmen, ermöglicht es, zwischen diesen Modellen zu unterscheiden.

Daneben unterscheidet sich die Variabilität der Gamma-Emission deutlich bezüglich ihrer Zeitskalen: Sie kann wenige Minuten oder mehrere Jahre andauern. Daraus lässt sich auf die Größe der Emissionsregion schließen. Das VERITAS-Observatorium in Arizona hat einen Gammastrahlenausbruch bei Photonenenergien von mehr als 200 GeV beobachtet (**Abb. 4**) [4]. Die gemessene Intensität in Vier-Minuten-Intervallen begrenzt die Größe der



**Abb. 3** Insgesamt 19 Instrumente haben während einer gemeinsamen Kampagne im April 2017 die aktive Galaxie M87 in verschiedenen Wellenlängen von Radio- bis Gammastrahlung mit unterschiedlicher Auflösung beobachtet. Zu den bekanntesten Abbildungen zählt das „Foto“ des Ereignishorizonts des Schwarzen Lochs (links unten) vom Event Horizon Telescope (EHT): In Radiowellenlängen (links) besitzt es die höchste Auflösung. Daten bei sichtbaren Wellenlängen (Mitte) liefern das Hubble Space Telescope (HST) und der Swift-Forschungssatellit; bei höheren Energien (rechts) gelang dem Chandra-Röntgenobservatorium die Abbildung mit der höchsten Auflösung.



**Abb. 4** Das VERITAS-Observatorium hat einen Gammastrahlenausbruch des aktiven galaktischen Kerns BL Lacertae bei Photonenenergien oberhalb von 200 GeV beobachtet. Für die ansteigenden und abfallenden Flanken des kurzen, 180-minütigen Ausbruchs liegen besonders gut aufgelöste Daten vor (blau). Die Rate der gemessenen hochenergetischen Photonen beträgt nur etwa 17 pro Minute – trotz des extrem starken Ausbruchs und eines Anstiegs der Leuchtkraft um einen Faktor zwei auf  $7,8 \times 10^{45}$  erg/s.

Emissionsregion auf etwa 90 Astronomische Einheiten; das entspricht ungefähr dem dreifachen Abstand von Neptun und Sonne. Dieser Ausbruch trat zeitgleich mit einem neu entstandenen, sich schnell bewegenden Knoten im Jet auf, den Radioteleskope detektiert haben. Solche zeitlichen Korrelationen erlauben es, Emissionsregionen zu identifizieren und diejenigen Bereiche im Jet zu bestimmen, die wesentlich zur Teilchenbeschleunigung beitragen.

Die instrumentelle Auflösung von Gammateleskopen beträgt etwa 0,1 Winkelgrad. Daher ist es meist nicht möglich, die Emissionsregion in diesem Wellenlängenbereich räumlich zu vermessen (Abb. 3). Neue Instrumente und optimierte Analysetechniken versprechen künftig eine deutlich verbesserte Auflösung. So hat das Teleskop-Array H.E.S.S. in Namibia kürzlich demonstriert, dass sich die räumliche Ausdehnung der nahen Radiogalaxie Centaurus A (Abb. 2) mit einer optimierten Analyse auch für Gamma-Energien bestimmen lässt [5]. Die Messung ergab eine elliptische Form, die sich entlang der Jet-Achse orientiert. Die Daten bestätigen direkt, dass Teilchenbeschleunigung und Gamma-Emission im Jet selbst stattfinden und nicht etwa nur in der Nähe des Schwarzen Lochs oder der Akkretionsscheibe.

### Gesuchte Beschleuniger

Die Teilchendetektoren des Pierre-Auger-Observatoriums in Argentinien haben geladene Teilchen mit Energien jenseits von  $10^{20}$  eV nachgewiesen; IceCube hat am Südpol astrophysikalische Neutrinos mit Energien von einigen PeV registriert. Woher diese ultrahochenergetischen kosmischen Teilchen stammen, gehört zu den wichtigsten Fragen in der Astroteilchenphysik. Aktive galaktische Kerne und Gammastrahlenausbrüche gehören mit ihren Jets zu den sehr guten Kandidaten, um die kosmische Strahlung auf solch extreme Energien zu beschleunigen.

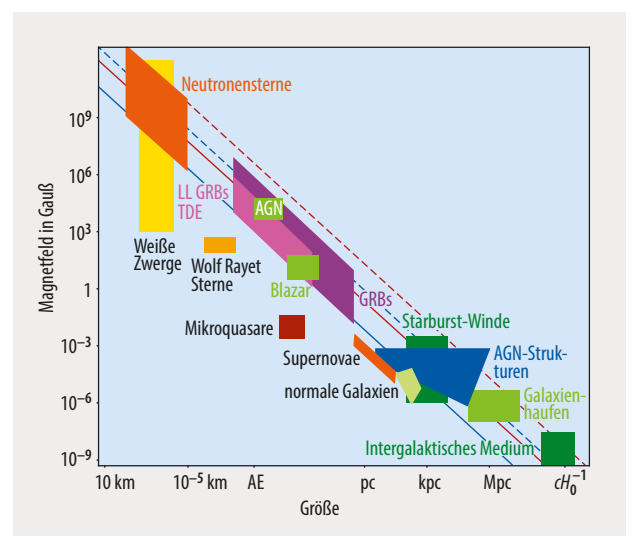
Welches Potenzial ein System hat, Teilchen zu beschleunigen, lässt sich mithilfe des Hillas-Kriteriums unter Vernachlässigung vieler Details darstellen [6]. Das Kriterium setzt die maximale Energie, auf die ein Teilchen beschleunigt werden kann, mit dem Magnetfeld und der Größe der Beschleunigungsregion in Beziehung:

$$B_{\mu\text{G}} \cdot L_{\text{pc}} > \frac{2 E_{15}}{Z\beta} .$$

Dabei sind  $B_{\mu\text{G}}$  das Magnetfeld in  $\mu\text{G}$ ,  $L_{\text{pc}}$  die Größe der Beschleunigungsregion in Parsec,  $E_{15}$  die Teilchenenergie in PeV,  $Z$  die Ladungszahl des Teilchens und  $\beta$  die Geschwindigkeit der Region. Der Larmor-Radius des Teilchens darf dabei nicht größer sein als die Beschleunigungsregion, weil es sonst aus ihr entkommt. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich der Hillas-Plot für verschiedene astronomische Objekte (Abb. 5). Darin geben Linien an, welches Magnetfeld bei welcher Größe der Beschleunigungsregion nötig ist, um zum Beispiel Protonen auf  $10^{20}$  eV zu beschleunigen. Systeme mit Jets, wie aktive galaktische Kerne und Gammastrahlenausbrüche, besitzen dafür offenbar die notwendigen Eigenschaften.

Das eröffnet die Frage, ob die Messungen der spektralen Energieverteilungen für Röntgen- und Gammastrahlung zu einer hadronischen Beschleunigung in aktiven galaktischen Kernen passen. Die meisten aktiven Kerne lassen sich sehr gut als Elektronenbeschleuniger mit leptonen Modellen beschreiben. Allerdings erlauben alle Messungen auch eine hadronische Komponente, die insbesondere aus hochenergetischen Protonen besteht.

Kürzlich gelang es mit dem IceCube-Detektor in der Antarktis, ein astrophysikalisches Neutrino in räumlicher Koinzidenz mit dem aktiven galaktischen Kern TXS 0506+056 zu detektieren [7], während dieser laut Daten des Fermi-LAT-Satelliten und des MAGIC-Observato-



**Abb. 5** Ein Hillas-Plot [6] stellt die räumliche Größe astronomischer Objekte der vorhandenen magnetischen Feldstärke gegenüber und deutet damit ihr Beschleunigungsvermögen an. Objekte rechts der diagonalen Linien können Protonen (rot) und Eisen (blau) auf Energien jenseits von  $10^{20}$  eV beschleunigen, falls  $\beta = c$  (durchgezogen) bzw.  $\beta = 0,01c$  (gestrichelt) gilt.



**Abb. 6** Das Foto zeigt das erste Large-Sized Telescope des Cherenkov Telescope Array auf La Palma, Spanien.

riums eine Periode hoher Gammastrahlungsaktivität durchlief. Die räumliche und zeitliche Koinzidenz deutet darauf hin, dass das Neutrino aus der Wechselwirkung eines kosmischen Teilchens stammt, das der Jet von TXS 0506+056 beschleunigt hat. Obwohl die Beobachtung noch nicht die übliche statistische Schwelle von  $5\sigma$  erreicht hat, um als Entdeckung zu gelten, weist sie darauf hin, dass Jets tatsächlich zu den gesuchten Beschleunigern der extragalaktischen kosmischen Strahlung gehören könnten [8, 9].

### Empfindlicher und höher aufgelöst

Die Beobachtungen und theoretischen Entwicklungen der letzten Jahre haben unser Verständnis astrophysikalischer Jets deutlich erweitert. Fundamentale Fragen, insbesondere zur Teilchenbeschleunigung, bleiben aber weiterhin unbeantwortet. Diese lassen sich erst mit neuen instrumentellen Ansätzen bearbeiten. So soll das Cherenkov Telescope Array in den nächsten Jahren unsere Sicht auf die Gammastrahlung verbessern. In Verbindung mit IceCube-Gen2, einem neuen Neutrino-Observatorium am Südpol, könnte das Gamma-Array die Jets eindeutig als Quellen der extragalaktischen Neutrinos und der kosmischen Strahlung identifizieren.

Das Cherenkov Telescope Array (CTA) wird aus mehr als 60 abbildenden Cherenkov-Teleskopen bestehen, die in Chile und auf der Kanareninsel La Palma mit großer Beteiligung deutscher Institute entstehen. Die Konstruktionsphase des Observatoriums hat gerade begonnen und wird voraussichtlich bis 2025 dauern. Parallel dazu findet der Bau des Science Data Management Centers am DESY in Zeuthen statt. Das erste fertiggestellte Teleskop auf La Palma ist bereits in Betrieb (**Abb. 6**). Die Empfindlichkeit des Arrays wird diejenige bestehender Instrumente energieabhängig um einen Faktor 5 bis 20 übertreffen; auch die Winkel- und Energieauflösung verbessern sich etwa um einen Faktor 2. Damit lässt sich die hochenergetische

Emission astrophysikalischer Jets wesentlich detaillierter untersuchen als bisher – und damit ihre Rolle als Beschleuniger der kosmischen Strahlung zweifelsfrei belegen. Hinzu kommt das sehr viel größere Gesichtsfeld und damit die Möglichkeit, den Himmel sehr effizient nach neuen Quellen von Gammastrahlung zu durchmustern. Damit sollte systematisch eine größere Population von allen Objekten, die Jets beherbergen, zugänglich und charakterisierbar werden.

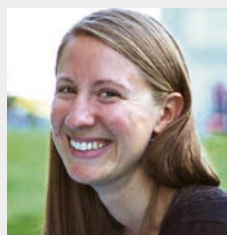
IceCube-Gen2 ist ein Upgrade des derzeit in Betrieb befindlichen Neutrino-Observatoriums IceCube in der Antarktis. Der Ausbau läuft bereits: IceCube-Gen2 soll 2032 fertiggestellt sein. Auch dieses Upgrade verspricht eine wesentlich bessere Empfindlichkeit als seine Vorgänger: Geplant ist ein Faktor fünf. Insbesondere ergänzen neue Radioinstrumente die Neutrinodetektion und verbessern die Empfindlichkeit bei den höchsten Energien.

Das Zusammenspiel beider Anlagen könnte unser Verständnis der Korrelation zwischen Neutrino- und Gammastrahlenproduktion in verschiedenen astrophysikalischen Umgebungen wesentlich schärfen. Sie bieten die Möglichkeit, in Zukunft die nötige Statistik zu sammeln, um astrophysikalische Jets endgültig als Beschleuniger der kosmischen Strahlung zu etablieren.

### Literatur

- [1] C. Pfrommer, Physik Journal, Dezember 2021, S. 42
- [2] K. Akiyama et al. (EHT Coll.), ApJL **910**, L13 (2021)
- [3] A. Eichhorn, Physik Journal, Juni 2019, S. 18
- [4] A. U. Abeysekara et al. (VERITAS Coll.), ApJ **856**, 95 (2018)
- [5] H. Abdalla et al. (H.E.S.S. Coll.), Nature **582**, 356 (2020)
- [6] A. M. Hillas, Ann. Rev. Astron. Astroph. **22**, 425 (1984)
- [7] M. Bartelmann, Physik Journal, August/September 2018, S. 24
- [8] M. G. Aartsen et al., Science **361**, eaat1378 (2018)
- [9] A. Aab et al. (Auger Coll.), ApJL **853**, L29 (2018)

### Die Autor:innen



**Elisa Poeschel** erhielt ihren PhD von der Carnegie Mellon University, USA. Nach Postdoc-Stationen in den USA und in Irland leitet sie seit 2017 eine Helmholtz-Nachwuchsforschergruppe am DESY in Zeuthen. Ihre Forschungsschwerpunkte sind die Gammastrahlenastronomie, insbesondere die

Gammastrahlenkosmologie und aktive galaktische Kerne.

**Gernot Maier** (FV Teilchenphysik) promovierte an der U Karlsruhe zur kosmischen Strahlung. Als Postdoktorand arbeitete er in Großbritannien und Kanada, bevor er 2010 als Helmholtz-Nachwuchsforschergruppenleiter an das DESY in Zeuthen ging. Dort erforscht er die Gamma-Emissionen galaktischer und transients Objekte und beschäftigt sich mit Monte-Carlo-Simulationen für zukünftige Messinstrumente.



**Dr. Elisa Poeschel** und **Dr. Gernot Maier**, DESY, Platanenallee 6, 15738 Zeuthen