

■ Ein aufregendes Neutrino?

Der IceCube-Detektor hat ein kosmisches Neutrino registriert. Aus der gleichen Richtung wurde auch Gammastrahlung detektiert. Stammen beide aus der gleichen Quelle?

Am 22. September 2017 registrierte der IceCube-Detektor in der Antarktis ein Neutrino mit einer geschätzten Energie von 290 TeV, das die Bezeichnung IceCube-170922A erhielt. Aus etwa derselben Richtung wurde auch Gammastrahlung aufgefangen. Diese Übereinstimmung legt den Verdacht nahe, dass Neutrino und Gammastrahlung aus derselben Quelle stammen könnten. Dem ging das IceCube-Team nach, indem es in den Daten der Jahre 2008 bis 2017 nach erhöhter Neutrinoemission aus derselben Richtung suchte [1].

Auf den ersten Blick erstaunt es, welch weitreichende Schlussfolgerungen ein einzelnes Neutrino erlauben mag. Doch nicht allein die hohe Energie des Neutrinoereignisses löste die Aufregung aus, sondern auch die Tatsache, dass das LAT-Instrument an Bord des Fermi-Satelliten Gammaquanten detektierte, die mit einer Unsicherheit von etwa einem halben Grad aus derselben Richtung kamen wie IceCube-170922A (Abb. 1). Beobachtungen mit dem Magic-Teleskop bestätigten dies. In der fraglichen Richtung am Himmel stößt man auf eine Aktive Galaxie, den Blazar TXS 0506+056 [2, 3].

Solche Aktiven Galaxien sind erheblich leuchtkräftiger als gewöhnliche Galaxien und zeichnen sich



Bei Aktiven Galaxien fällt Materie in Richtung des supermassiven Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie. Ein Teil wird mit nahezu Lichtgeschwindigkeit

nach außen beschleunigt. Ist einer dieser Jets, wie hier gezeigt, in Richtung Erde gerichtet, erscheint die Galaxie besonders hell und wird als Blazar klassifiziert.

durch eine reiche Phänomenologie aus. Diese weist darauf hin, dass die Akkretion auf ein massereiches Schwarzes Loch im Zentrum die Aktivität dieser Galaxien antreibt. Wegen der Drehimpulserhaltung erfolgt die Akkretion in einer dünnen Scheibe. Durch die Umlaufbewegung des Scheibenmaterials wird das darin häufig „eingefrorene“ Magnetfeld aufgewickelt und so gebündelt, dass längs der Rotationsachse zwei Jets entstehen. Entlang dieser Jets fließen relativistische Teilchen nach außen und emittieren

im kollimierenden Magnetfeld stark polarisierte Synchrotronstrahlung.

Was wir von Aktiven Galaxien sehen, hängt nun davon ab, ob die Sichtlinie in der Scheibenebene oder schräg dazu verläuft oder, wie in selteneren Fällen, mit der Richtung eines Jets zusammenfällt. Blazare sind solche Aktiven Galaxien, die wir gewissermaßen von oben (oder unten) sehen, bei denen wir also in die Richtung des Stroms relativistischer Teilchen blicken.

Relativistische Teilchen mit hohen und höchsten Energien sind

KURZGEFASST

■ Gravitation extrem bestätigt

Einem internationalen Team, angeführt vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, gelang es, die Allgemeine Relativitätstheorie auf beeindruckende Weise zu bestätigen. Dazu diente ein Vergleich der theoretischen Vorhersagen mit den Beobachtungen des Sterns S2, als dieser das supermassive Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße in weniger als 20 Milliarden Kilometer Entfernung passierte. Position und Geschwindigkeit stimmten beim Vorbeiflug perfekt überein. R. Abuter et al. (GRAVITY Coll.), *Astron. Astrophys.* **615**, L15 (2018)

■ Mehr Schaden als angenommen

Experimente von Physikern des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg haben gezeigt, dass Schäden durch radioaktive Strahlung in hydratisierten Biomolekülen wie der DNA bisher wohl unterschätzt wurden. Ursache ist der intermolekulare Coulomb-Zerfall, bei dem in einem lawinenartigen Effekt langsame Elektronen frei werden, welche die Biomoleküle ionisieren. Die Forscher wiesen nach, dass der Prozess fünfmal wahrscheinlicher ist als bisher angenommen. X. Ren et al., *Nat. Phys.* (2018), DOI: 10.1038/s41567-018-0214-9

■ Ungewöhnliches Molekül

Das radioaktive Isotop ^{26}Al wurde kürzlich mit den Radioteleskopen NOEMA und ALMA in Form des Moleküls ^{26}AlF beobachtet. Das Signal kam aus der Richtung von CK Vulpeculae, dem Überrest einer Kollision zweier Sterne. Das Isotop – bisher nur anhand der Emission von Gammastrahlung nachgewiesen – ist u. a. ein wichtiger Indikator für die Supernova-Rate in unserer Galaxie. Durch die neue Nachweismethode ließ es sich erstmals einem astronomischen Objekt zuordnen. T. Kamiński et al., *Nat. Astron.* (2018), DOI: 10.1038/s41550-018-0541-x

Gegenstand aktiver Forschung in der Astroteilchenphysik. Der Ursprung der höchstenergetischen Teilchen ist nach wie vor unklar. Spezielle Detektoren können Teilchen mit einer Energie von bis zu etwa 10^{20} eV auffangen. Welche Beschleunigungsprozesse in welchen astrophysikalischen Umgebungen dafür verantwortlich sein könnten, ist eine der wichtigsten Fragen.

Ein Nebenprodukt hadronischer Prozesse mit höchstenergetischen Teilchen sind neutrale oder geladene Pionen. Die neutralen Pionen zerfallen größtenteils direkt in Gammaquanten, während die geladenen Pionen in Myonen und Myon-Neutrinos zerfallen. Gammaemission ist demnach eine Folge hadronischer Prozesse mit relativistischen kosmischen Teilchen, die mit einer ähnlich intensiven Emission von Myon-Neutrinos einhergehen sollte. Die Detektion des hochenergetischen Neutrinos IceCube-170922A und der damit räumlich korrelierten Gammastrahlung könnte somit ein erster direkter Hinweis darauf sein, dass Aktive Galaxien beides emittieren, wie es aus dem Zerfall von Pionen zu erwarten wäre [4].

Das IceCube-Team überprüfte diese Hypothese. IceCube ist ein dreidimensionales Array aus 5160 Detektoren, die entlang von 86 vertikalen Reihen angeordnet sind. Diese Reihen spannen ein Volumen von einem Kubikkilometer auf, das sich in etwa 2450 Meter Tiefe im antarktischen Eis befindet. Die Detektoren zeichnen die Cherenkov-Strahlung auf, die relativistische Myonen emittieren. Diese entstehen durch einfallende hochenergetische Myon-Neutrinos [5].

Für die Analyse wurden Daten aus sechs IceCube-Beobachtungsperioden aus den Jahren 2008 bis 2017 verwendet. Sie umfassen insgesamt etwa 3500 Tage. Dabei wurde diejenige Beobachtungsperiode ausgeschlossen, in die das Ereignis IceCube-170922A fällt, um die Aussagekraft der Analyse zu steigern.

Das IceCube-Team wandte zwei verschiedene Analysemethoden an: Die eine sucht in dem über die Zeit

integrierten Signal eine erhöhte Anzahl von Neutrinos, die mit einer Punktquelle in Richtung des Blazars verträglich ist. Die andere bezieht darüber hinaus die zeitliche Abfolge der registrierten Neutrinos mit ein. In einer der sechs Beobachtungsperioden identifizierte die zeitabhängige Analyse einen Zeitraum von vier Monaten um Mitte bis Ende Dezember 2014 herum, in dem der Detektor 13 ± 5 kosmische Neutrinos mehr registriert hat als erwartet. Ist dieser Überschuss signifikant?

IceCube detektiert vor allem atmosphärische Neutrinos, die erst durch Wechselwirkung kosmischer Strahlen mit der Erdatmosphäre entstehen. Von den etwa 70 000 registrierten Neutrino-Ereignissen pro Jahr stammen mehr als 99 Prozent aus der Erdatmosphäre. In einem Zeitraum von vier Monaten waren also weniger als 200 kosmische Neutrinos zu erwarten. Die atmosphärischen Neutrinos haben ein wesentlich steileres Spektrum als die kosmischen Neutrinos. Das Spektrum beider Arten lässt sich durch ein Potenzgesetz $E^{-\gamma}$ beschreiben. Während der Spektralindex γ für kosmische Neutrinos bei etwa 2 liegt, beträgt er bei atmosphärischen Neutrinos etwa 3,7. Zudem liegt der Median der Energie atmosphärischer Neutrinos mit etwa 1 TeV relativ niedrig. Energien deutlich über 1 TeV sprechen daher umso mehr für Neutrinos kosmischen Ursprungs, je höher sie sind. Der Überschuss an Neutrinos, den IceCube Ende 2014 bis Anfang 2015 aufgezeichnet hat, besitzt einen Spektralindex von $\gamma = 2,1 \pm 0,2$ bei einer Energie um 100 TeV. Analysen mit simulierten, zufälligen Ereignissen legen nahe, dass die zusätzlichen 13 ± 5 Neutrinos einen Überschuss gegenüber der erwarteten Anzahl kosmischer Neutrinos bedeuten, dessen Signifikanz bei $3,5 \sigma$ liegt [1].

Eine erste Abschätzung der Neutrino-Leuchtkraft des Blazars deutet darauf hin, dass sie die im selben Zeitraum aufgetretene Gamma-Leuchtkraft um etwa das Vierfache übersteigt. Die hadronischen Prozesse, welche die Ursache für

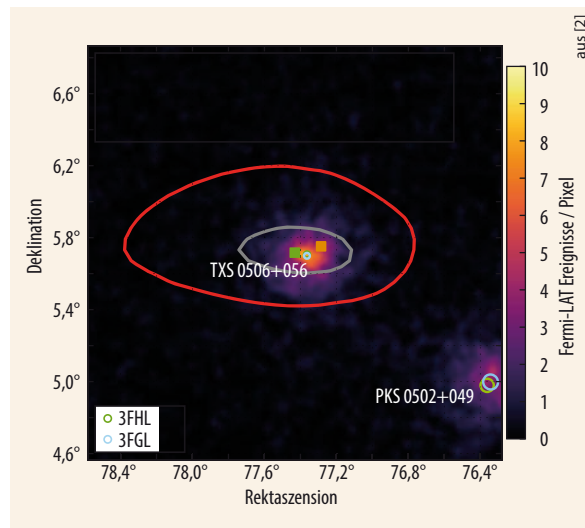


Abb. 1 Die Himmelsposition der von Fermi-LAT registrierten Gammaquanten mit mehr als 1 GeV Energie änderte sich im Vergleich zwischen erstem Alarm (braun) und Rekonstruktion (grün). Sie blieb aber in den Einschussbereichen des Neutrinoereignisses IceCube-170922A, mit 50 %- (rot) und 90 %-Wahrscheinlichkeit (grau) einschließlich statistischer und systematischer Fehler, und passt zum Blazar TXS 0506+056.

die Neutrino- sowie die Gammaemission sein könnten, würden etwa gleiche Leuchtkräfte verursachen. Wenn die Schätzung der Neutrino-Leuchtkraft Bestand behält, könnte sie demnach darauf hindeuten, dass ein Teil der Gammastrahlung im Blazar absorbiert wird oder mit Energien ankommt, für die der LAT-Detektor an Bord des Fermi-Satelliten nicht empfindlich ist.

Mit einer noch relativ niedrigen Signifikanz kann dieses Ergebnis bislang nicht als ein Nachweis dafür gelten, dass Aktive Galaxien Quellen hochenergetischer Neutrinos sind. Ein hochspannender Hinweis ist es aber dennoch, der den Beginn der Neutrino-Astrophysik markieren könnte [6].

Matthias Bartelmann

- [1] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Science* **361**, 147 (2018)
- [2] The IceCube Coll., *Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS* und *VLA/17B-403-Teams*, *Science* **361**, 146 (2018)
- [3] D. Clery, *Science* **361**, 115 (2018)
- [4] P. Mészáros, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **67**, 45 (2017)
- [5] M. Ahlers und F. Halzen, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **102**, 73 (2018)
- [6] P. Padovani et al., *MNRAS* **480**, 192 (2018)

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Universität Heidelberg, Zentrum für Astronomie, Institut für Theoretische Astrophysik, Philosophenweg 12, 69120 Heidelberg