



Blazare

Energieschleuder

Im Zentrum eines aktiven Galaxienkerns befindet sich ein extrem massereiches Schwarzes Loch mit der milliardenfachen Masse unserer Sonne, das Materie aus seiner Umgebung aufsammelt. Senkrecht zu dieser Akkretionsscheibe schießt ein scharf gebündelter Strahl aus energiereichen Teilchen ins All.

als Quellen kosmischer Strahlung identifiziert

Jahrhunderträtsel durch Multimessenger-Astronomie gelöst?

Was bisher nur vermutet wurde, scheint sich durch Fortschritte in der Neutrinophysik nun zu bestätigen: Galaxien mit einem massereichen Schwarzen Loch im Zentrum sind gigantische Teilchenbeschleuniger. Den Beleg lieferte ein Neutrino, dessen Reise vor vier Milliarden Jahren in einem solchen Blazar begann und im Eis des irdischen Südpols endete.

IN KÜRZE

- Seit Entdeckung der kosmischen Strahlung vor 100 Jahren rätseln die Wissenschaftler, aus welchen Quellen im Weltall diese Teilchen hoher Energie stammen.
- Neutrinos können uns als Botenteilchen Informationen über die kosmischen Quellen liefern, sind aber äußerst schwer zu messen.
- Nun scheint der Durchbruch gelungen: Erstmals wurde eine ferne aktive Galaxie als Ursprungsort eines Neutrinos identifiziert.

Unablässig prasselt eine hochenergetische Strahlung aus den fernen Weiten des Alls auf die Erdatmosphäre. Überwiegend besteht sie aus den positiv geladenen Kernen von Wasserstoff und Helium, also aus Protonen und Alphateilchen. Kerne schwererer Elemente haben einen deutlich geringeren Anteil, ebenso wie Gammaquanten, die eigentlich elektromagnetische Wellen sind, die sich aber wegen ihrer sehr kurzen Wellenlänge in praktisch allen Reaktionen wie Teilchen benehmen. Hoch oben in der Atmosphäre – in Höhen von rund 20 Kilometern – löst diese primäre kosmische Strahlung durch Kollisionen mit den Molekülen der Luft Schauer von sekundären Teilchen aus, die sich weiter nach unten in der Atmosphäre ausbreiten und zum Teil die Erdoberfläche erreichen.

Manche der eindringenden kosmischen Partikel haben unerklärlich hohe Energien, die vieltausendfach höher sind als diejenigen, die mit irdischen Teilchenbeschleunigern erzeugt werden können. Im Extremfall erreicht ein einziges sub-

atomares Teilchen eine Bewegungsenergie, die der Geschwindigkeit eines wuchtig geschlagenen Tennisballs entspricht.

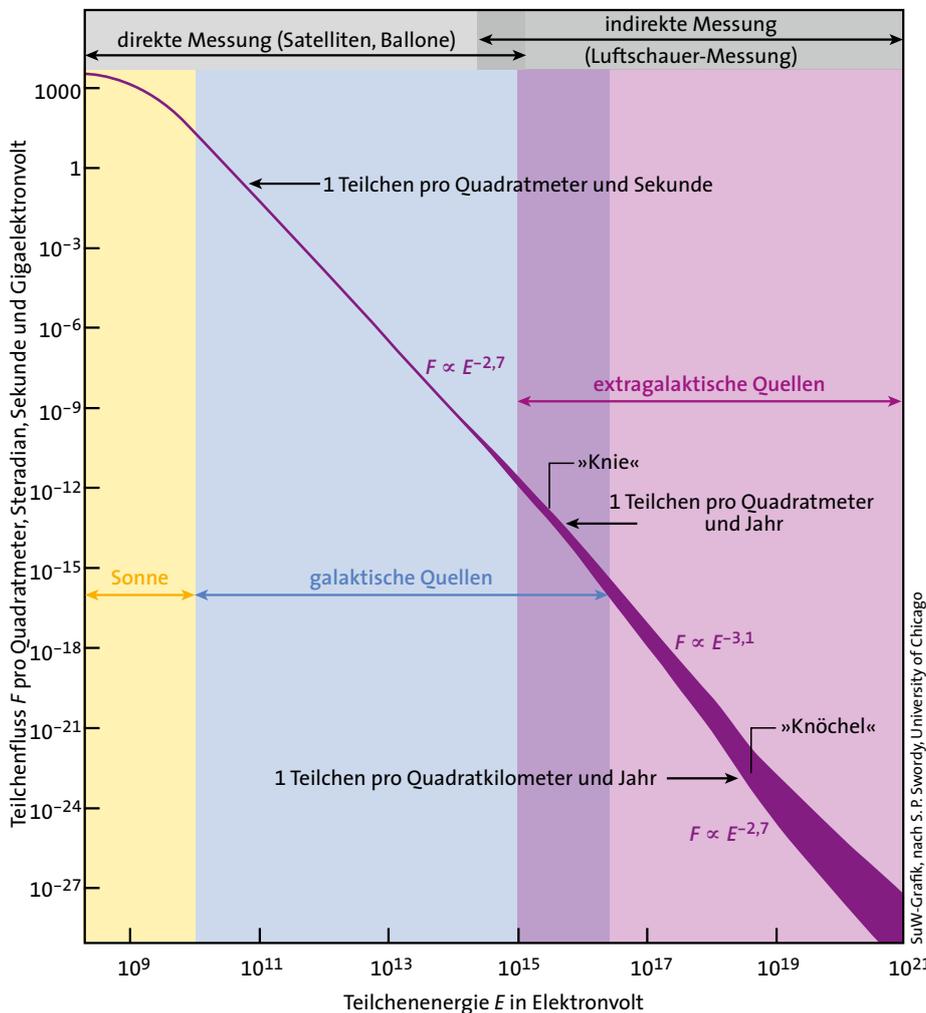
Wie gelingt es der Natur, Teilchen auf derart hohe Energien zu beschleunigen? Von welchen Quellen im Universum stammen diese Geschosse? Diese Fragen gehörten seit der Entdeckung der kosmischen Strahlung vor rund 100 Jahren zu den großen Rätseln der Astronomie (siehe SuW 3/2006, S. 24, und 10/2012, S. 46). Neue Beobachtungsbefunde bringen nun erste Antworten.

Natürliche Teilchenbeschleuniger

Die einzige Quelle, von der wir bisher mit Gewissheit sagen konnten, dass von ihr ein Teil der kosmischen Strahlung ausgeht, ist unsere Sonne. Der als Sonnenwind bei uns eintreffende Teilchenstrom dominiert den niederenergetischen Bereich der kosmischen Strahlung. Das heißt konkret: bis zu Energien von etwa 10^{10} Elektronvolt. Das klingt nach viel, und im mikroskopischen Maßstab ist es das auch. Denn verglichen mit sichtbarem Licht, dessen Energie im

Bereich von einem Elektronvolt liegt, hat ein Teilchen des Sonnenwinds die millionen- bis zehnmilliardenfache Energie. Im makroskopischen Vergleich ist das freilich winzig – nur etwa ein tausendstel der Energie, die dem Flügelschlag einer Fliege entspricht.

Doch das Energiespektrum der kosmischen Strahlung reicht viele Größenordnungen weiter und bricht selbst bis zu Energien von 10^{20} Elektronvolt nicht ab (siehe Grafik unten). Die Höhe dieser Werte und auch die Form des Spektrums weisen darauf hin, dass die Quellen nicht-thermischer Natur sind. Wenn wir uns nach möglichen Kandidaten in unserem Milchstraßensystem umschaue, fällt unser Augenmerk auf Prozesse, die mit explodierenden Sternen, den Supernovae, mit Pulsaren oder mit Röntgendoppelsternen verknüpft sind. Wenn zum Beispiel die weggeschleuderte Hülle eines explodierenden Sterns auf interstellare Materie trifft, entstehen Stoßwellen. An solchen Stoßfronten, die mit Überschallgeschwindigkeit durch das interstellare Medium pflügen, können geladene Teilchen auf Energien bis etwa 10^{16} Elektronvolt beschleunigt werden. Ob aber der Krebsnebel oder andere Supernova-Überreste in unserem Milchstraßensystem tatsächlich Quellen der kosmischen Strahlung sind, ließ sich bisher nicht beweisen. Da geladene Teilchen durch das Magnetfeld unserer



Energiereiche Teilchen

Während die Energie sichtbaren Lichts im Bereich von einem Elektronvolt (eV) liegt, haben die Teilchen der kosmischen Strahlung um viele Größenordnungen höhere Energien. Um das Maximum des Teilchenflusses bei etwa 10^9 eV (= 1 GeV oder Gigaelektronvolt) dominieren die Partikel des Sonnenwinds. Zu höheren Energien E fällt der gemessene Teilchenfluss F stark ab. Dieser Verlauf des Energiespektrums wird durch ein Potenzgesetz bestimmt, das auf nicht-thermische Quellen hinweist. Vermutlich tragen bis zu etwa 10^{16} eV (= 10 PeV oder Petaelektronvolt) Quellen aus unserem Milchstraßensystem zum Teilchenfluss bei; oberhalb dieser Energie muss die Strahlung extragalaktischen Ursprungs sein. Die unterschiedlichen Beiträge führen zu den »Knie« und »Knöchel« genannten Übergangsstellen im Energiespektrum.

SuW-Grafik, nach S.P. Swordy, University of Chicago

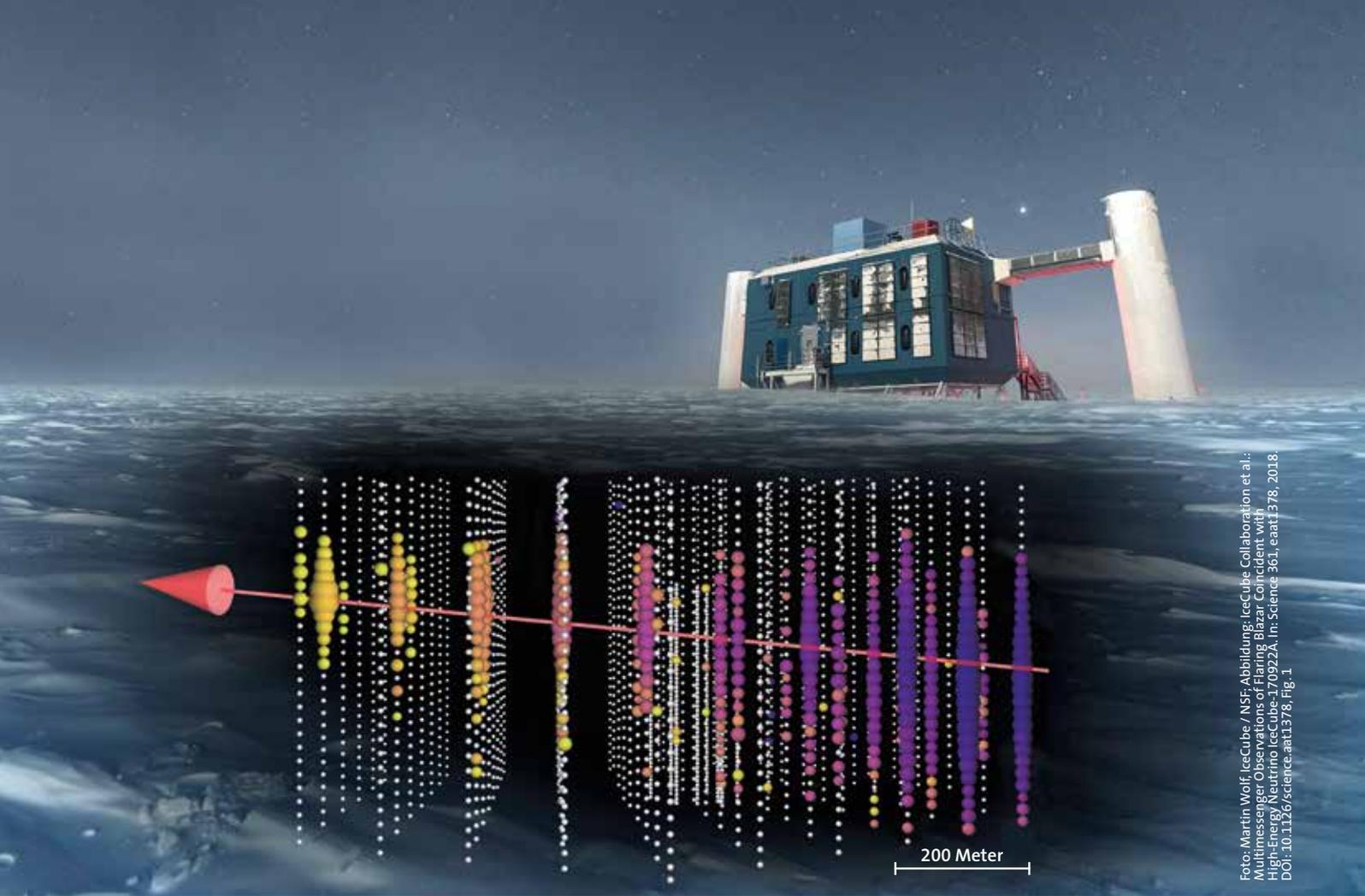


Foto: Martin Wolf, IceCube / NSF; Abbildung: IceCube Collaboration et al.: Multimessenger Observations of Haring Blazar Coincident with High-Energy Neutrino IceCube-170922A. In: Science 361, eaat1378, 2018. DOI: 10.1126/science.aat1378; Fig. 1

Galaxis abgelenkt werden, verlieren sie auf ihrem Weg jegliche Information über ihren Ursprung. Deswegen bleibt die Herkunftsrichtung der bei der Erde eintreffenden Partikel völlig unklar. Aus diesem Grund ließ sich bisher kein einziges galaktisches Objekt als Quelle der kosmischen Strahlung identifizieren.

Für die kosmische Teilchenstrahlung der höchsten Energien müssen wir sogar nach einem Ursprung suchen, der außerhalb unseres Milchstraßensystems liegt. Aber welche extragalaktischen Quellen kommen in Frage?

Zu den energiegewaltigsten Prozessen, die wir uns vorstellen können, gehören Vorgänge, die sich im unmittelbaren Umfeld von extrem massereichen Schwarzen Löchern abspielen. Dies führt zu Galaxien mit einem aktiven galaktischen Kern (AGN für englisch: active galactic nuclei) als mögliche Kandidaten. Gespeist von den starken Gravitations- und Magnetfeldern eines Schwarzen Lochs, mit dem Millionen- bis Milliardenfachen der Sonnenmasse, wird einfallende Materie zum Teil stark beschleunigt und in Form von relativistischen – fast lichtschnellen – Materiestrahlen ausgestoßen (siehe Bild S. 24). Solche Jets erreichen Längen von vielen

hunderttausend Lichtjahren und sind somit größer als der Durchmesser unseres Milchstraßensystems. Prallen diese Jets auf Gaswolken, bilden sich Stoßfronten aus, die geladene Teilchen auf allerhöchste Energie beschleunigen können.

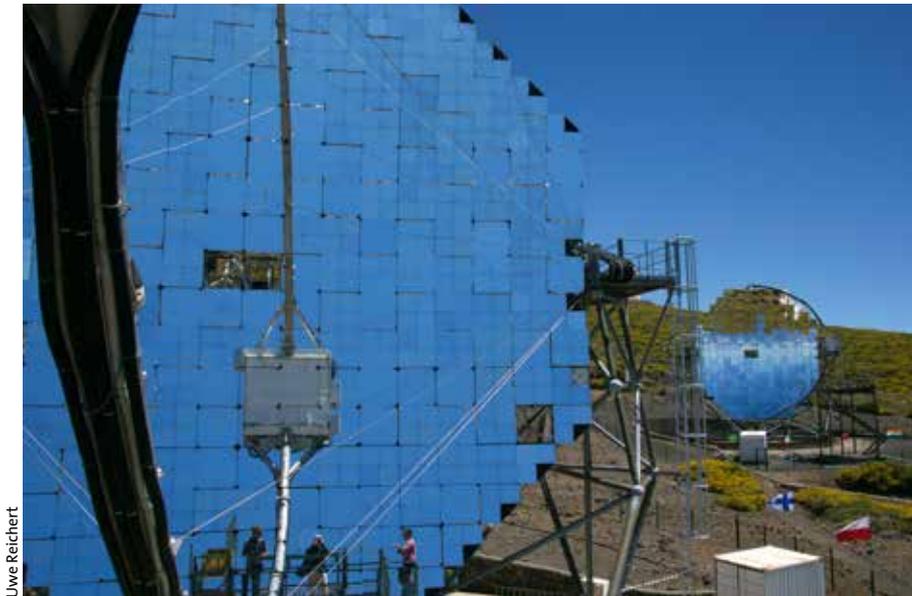
So weit zumindest die Theorie, denn aktive Galaxienkerne fielen den Astronomen zwar durch ihre intensive Leuchtkraft in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums auf (zum Beispiel im sichtbaren Licht, im Radiowellen- oder im Röntgenbereich) – kosmische Teilchenstrahlung konnte aber bis vor Kurzem noch nicht auf sie zurückgeführt werden.

Ein Neutrino als Bote

Einen ersten Beleg dafür, dass aktive Galaxienkerne tatsächlich Quellen kosmischer Strahlung sind, liefert nun ein hochenergetisches Neutrino, das im September 2017 ins Netz der Forscher gegangen ist. Das Netz war in diesem Fall der riesige Neutrinodetektor IceCube, der das Eis in der Antarktis als Messvolumen nutzt (siehe Bild oben). Gemeinsam mit den Beobachtungen anderer Observatorien in verschiedenen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums ließ sich die Herkunft des Neutrinos ermitteln:

Neutrinoteleskop IceCube

Im ewigen Eis der Antarktis fahndet IceCube nach Neutrinos aus dem Weltall, die uns etwas über die Quellen der kosmischen Strahlung verraten können. In den seltenen Fällen, in denen ein Neutrino mit einem Atomkern im Eis reagiert, entsteht ein Teilchenschauer, der einen Lichtblitz auslöst. Mehr als 5000 hochempfindliche Sensoren, die an 86 kilometerlangen Trossen hängen und über ein Volumen von einem Kubik-kilometer verteilt sind, registrieren diesen Blitz. Am 22. September 2017 erfassten die Sensoren das Signal eines Myons, das bei der Reaktion eines hochenergetischen Neutrinos entstanden war und dessen Flugrichtung fortsetzte. Aus der an den einzelnen Sensoren gemessenen Intensität (symbolisiert durch die Größe der Farbkugeln) zu verschiedenen Zeiten (von Violett über Rot nach Gelb zunehmend) ließ sich die Herkunftsrichtung des Myons (Pfeil) rekonstruieren.



Uwe Reichert

Die beiden MAGIC-Teleskope auf La Palma registrierten hochenergetische Gammastrahlung des Blazars TXS 0506+056.

eine vier Milliarden Lichtjahre entfernte Galaxie im Sternbild Orion mit einem aktiven Schwarzen Loch in ihrem Zentrum.

Damit ist es erstmals gelungen, ein nicht-stellares Objekt als Quelle von Neutrinos zu identifizieren. Bisher waren nur unsere Sonne und ein explodierender Stern – die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke – als Quellen von (niederenergetischen) Neutrinos bekannt (siehe Kasten »Marksteine der Neutrinophysik«). Der neue Befund, der nur durch

die gemeinsamen Anstrengungen verschiedener Forschungsgruppen möglich wurde, bringt nun etwas Licht in die Erzeugungsmechanismen der kosmischen Strahlung und in die hochdynamischen Vorgänge in der Umgebung von extrem massereichen Schwarzen Löchern.

Aber was haben Neutrinos mit kosmischer Strahlung zu tun? Und wie kommen die Forscher dazu, aus einem einzelnen dieser geisterhaften Teilchen, die praktisch keine Masse haben und im Wesent-

lichen unbeeinflusst von Materie und Magnetfeldern mit Lichtgeschwindigkeit durch das Universum rasen, auf die Quelle zu schließen?

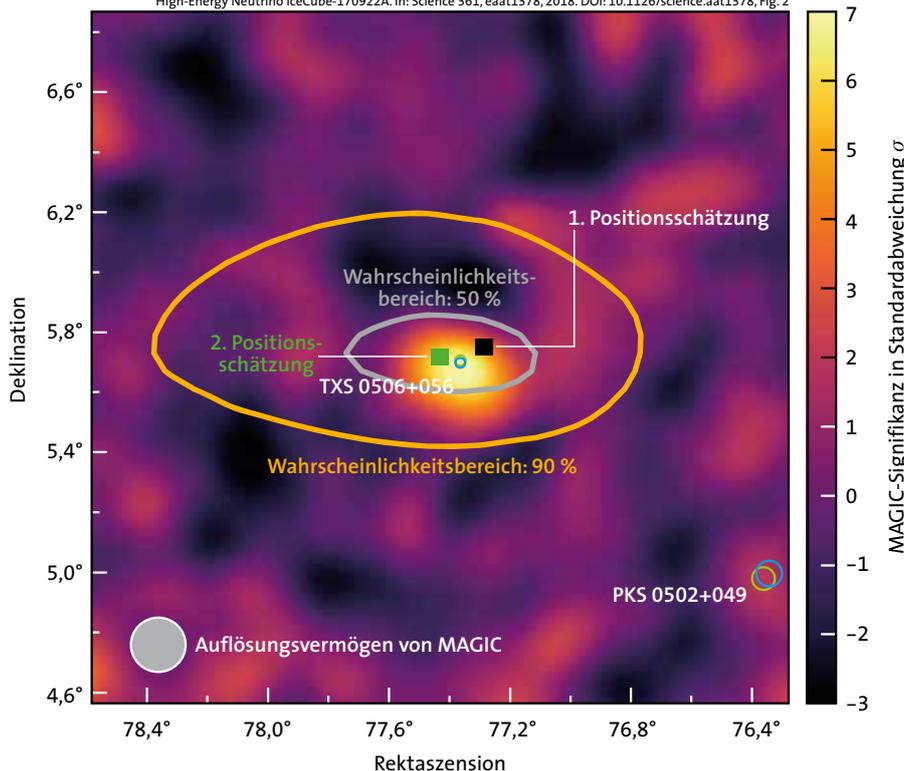
Neutrinos sind elektrisch neutrale Elementarteilchen, die in einer Vielzahl von Kernreaktionen entstehen:

- im Erdinnern durch den Zerfall radioaktiver Elemente,
- in Kernreaktoren durch den Zerfall der Spaltprodukte,
- in der Erdatmosphäre beim Aufprall kosmischer Strahlung auf die Luftmoleküle,
- in der Sonne und anderen Sternen bei der Fusion von Atomkernen und
- in fernen kosmischen Quellen, in denen Teilchenreaktionen ablaufen wie etwa Supernovae und Galaxien mit aktivem Kern.

Auf Grund ihrer äußerst geringen Masse bewegen sich Neutrinos praktisch mit Lichtgeschwindigkeit. Aber anders als Licht, das von Materie absorbiert oder gestreut werden kann, reagieren sie nur über Prozesse der schwachen Wechselwirkung mit Materie. Deswegen legen Neutrinos völlig ungehindert weite Strecken im Weltall zurück. Selbst in massivem Eisen würden Neutrinos im Mittel erst nach einem mehrere Lichtjahre langen Weg durch Reaktion mit einem Atomkern gestoppt werden.

Im Grunde machen die Eigenschaften der Neutrinos sie zu idealen Boten, die uns Informationen über die Herkunft der

SuW-Grafik nach: IceCube Collaboration et al.: Multimessenger Observations of Flaring Blazar Coincident with High-Energy Neutrino IceCube-170922A. In: Science 361, eaat1378, 2018. DOI: 10.1126/science.aat1378, Fig. 2



Blazar als Gammaquelle

Der Blazar TXS 0506+056, hier im Zentrum eines fünf Quadratgrad großen Ausschnitts des Himmels, entpuppte sich als wahrscheinlichste Quelle des von IceCube registrierten Neutrinos IceCube-170922A. Der unmittelbar nach der Messung automatisch abgeschätzte Herkunftsort (schwarzes Quadrat) und die vier Stunden später erfolgte verfeinerte Positionsschätzung (grünes Quadrat) sind markiert. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent sollte die gesuchte Quelle innerhalb des grauen Ovals liegen, mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 Prozent innerhalb der gelb umrandeten Fläche. Die beiden MAGIC-Teleskope untersuchten das Areal und fanden am Ort des Blazars mit hoher Signifikanz Gammastrahlung (gelb). Eine weitere in verschiedenen Katalogen verzeichnete Gammaquelle liegt am rechten Kartenrand.

Marksteine in der Neutrinophysik

1930: Der Physiker Wolfgang Pauli (1900–1958) postuliert die Existenz eines noch unbekanntes, elektrisch neutralen Teilchens, um die scheinbar verletzte Energieerhaltung beim Betazerfall radioaktiver Elemente zu retten.

1956: Mit ihrem Projekt »Poltergeist« gelingt es der Forschungsgruppe der US-Physiker Clyde Cowan (1919–1974) und Frederik Reines (1918–1998), die Existenz der Neutrinos nachzuweisen: Sie platzieren Tanks mit einer Messeinrichtung unmittelbar neben einem Kernreaktor und können so nach mehreren Monaten Messdauer zeigen, dass durch die Reaktion von Neutrinos (in diesem Fall: Elektron-Antineutrinos) mit Protonen jeweils ein Neutron und ein Positron entstehen. Reines erhält für diese Entdeckung 1995 den Nobelpreis für Physik.

1962: In Experimenten mit dem ersten an einem Beschleuniger erzeugten Neutrinostrahl entdecken Jack Steinberger, Melvin Schwartz (1932–2006) und Leon Lederman eine zweite Neutrino-Art, das Myon-Neutrino. Für ihre Entdeckung erhalten die drei Forscher 1988 den Physik-Nobelpreis.

1970: Mit einem Neutrinodetektor in der Homestake-Mine weist Raymond Davis jr. (1914–2006) ab dem Jahr 1970 Elektron-Neutrinos nach, die aus dem Innern der Sonne stammen.

1987: Neutrinos der 160 000 Lichtjahre entfernten Supernova 1987A werden unter anderem mit dem Neutrinodetektor Kamiokande-II nachgewiesen. Dessen Erbauer, Masatoshi Koshiba, erhält 2002 zusammen mit Davis den Physik-Nobelpreis.

1998/2001: Die Arbeiten des Japaners Takaaki Kajita am Detektor Super-Kamiokande und des Kanadiers Arthur McDonald am Sudbury Neutrino Observatory führen zur Entdeckung der Neutrinooszillationen: Die drei verschiedenen Neutrino-typen (Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino) können ineinander übergehen. Daraus folgt auch, dass Neutrinos eine kleine (bis heute unbekannte) Masse haben. Im Jahr 2015 werden Kajita und McDonald mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

2000: In Beschleunigerexperimenten gelingt der Nachweis des Tau-Neutrinos, einer dritten Neutrino-Art.

2013: Der Detektor IceCube in der Antarktis weist die ersten hochenergetischen Neutrinos kosmischer Herkunft nach.

2018: Zum ersten Mal gelingt es, die Quelle eines im Detektor IceCube registrierten Neutrinos zu identifizieren: TXS 0506+056, ein vier Milliarden Lichtjahre entfernter Blazar. Damit ist eine erste Quelle der kosmischen Strahlung entdeckt.

LA PALMA MEMO BOARD

ASTROURLAUB 2019 AUF DEN KANAREN!



ATHOS Star Campus:
Vier Studios mit je
Schlafzimmer (2 Pers.),
Badezimmer (Du/WC),
Terrasse, Zentralheiz.
herrlicher Meerblick

Kurze Anreise:
von Mitteleuropa
nach La Palma mit
Direktflügen in nur
knapp über 4 Stunden



Große Orangerie:
mit Wohnzimmer, TV,
Bibliothek, #-LAN,
Esstisch, Kaminofen
und moderner Küche



**Sechs große
Beobachtungsplätze:**
mit Stromanschluss,
Beobachtungstisch,
und Rotlicht. Direkt
neben den Astrohäusern.



Casa Copernicus:
für 2-3 Personen
Astrofinca mit Wohn-
und Schlafzimmer,
Bad, Küche, eigener
Garten, Terrasse
Beobachtungsplatz

Paradiesisches Umfeld:
Alle Astrohäuser in
einem großen
botanischen
Park.

Partnertauglich:
#wandern, Baden,
Mountainbiking,
#whale watching,
Paragliding, Relaxen

**Miet-
sternwarte:**
im Park
des ATHOS
Star Campus



MEHR INFOS PER E-MAIL: BOOKING@ATHOS.ORG ODER
TEL: +49 172 6966106 - DOWNLOADS: WWW.ATHOS.ORG

IceCube-170922A und der Blazar: Koordinierte Beobachtungen

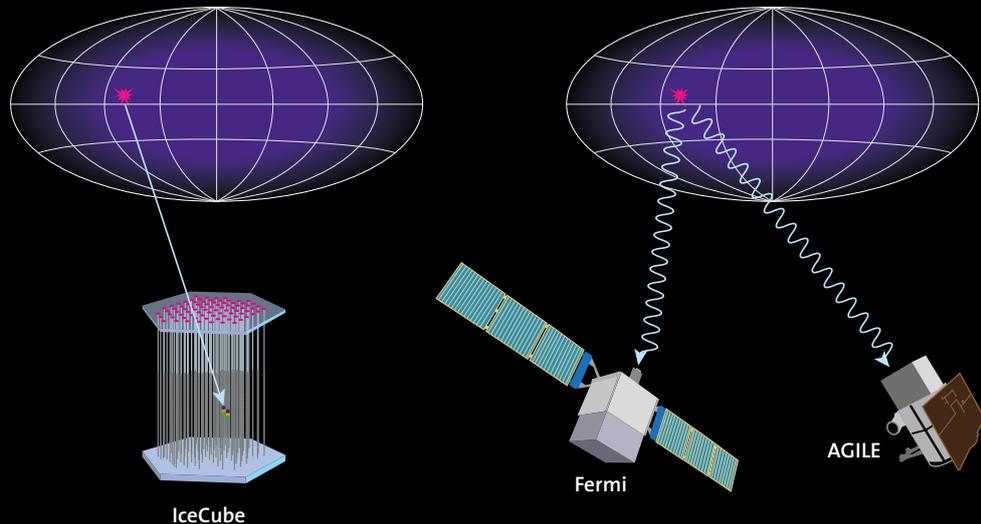
Ein im Detektor IceCube registriertes Neutrino geht unter der Bezeichnung IceCube-170922A in die Geschichte ein. Die Ziffern geben das Datum der Entdeckung an.

Die Energie des Neutrinos betrug etwa 290 Teraelektronvolt ($2,9 \cdot 10^{14}$ eV), und seine Herkunftsrichtung wies auf die als Blazar bekannte Gammastrahlenquelle TXS 0506+056 im Sternbild Orion hin. Von IceCube aus gesehen steht die Quelle sechs Grad unter dem Horizont, das heißt, das Neutrino drang schräg von unten in den Detektor ein.

Folgebeobachtungen des Blazars gelangen in allen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums, was aber zunächst nur die Variabilität des Blazars bestätigte. Erst der Nachweis der MAGIC-Teleskope, dass der Blazar im betreffenden Zeitraum auch Gammastrahlen hoher Energie emittierte, war ein starker Beleg dafür, dass IceCube-170922A von diesem Blazar stammt.

22.09.2017, 20:54:30 Uhr UTC: Der Detektor IceCube registriert ein hochenergetisches Neutrino (IceCube-170922A). Nach einer automatischen Auswertung geht bereits 43 Sekunden später eine Meldung über das Internet mit einer ersten Schätzung von Energie und Herkunftsrichtung. Vier Stunden später folgt eine verfeinerte Analyse.

28.09.2017: Daten des Large Area Telescope an Bord des Weltraumteleskops Fermi zeigen, dass der Ursprungsort von IceCube-170922A mit der bekannten Gammastrahlenquelle TXS 0506+056 konsistent ist, die gerade erhöhte Aktivität aufweist. Das Weltraumteleskop AGILE bestätigt die erhöhte Gammastrahlenintensität.



SuW-Grafik

kosmischen Strahlung und die Vorgänge in ihrer Quelle liefern können: Sie entstehen bei der Wechselwirkung von Protonen mit Materie und breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit geradlinig vom Ort ihrer Entstehung aus, völlig unbeeinflusst von Magnetfeldern und materiellen Körpern, die auf ihrem Weg liegen. Für ihren experimentellen Nachweis allerdings stellt ihre hohe Durchdringungsfähigkeit eine Herausforderung dar – wie soll man Teilchen aufspüren, die mit den Messgeräten der Forscher praktisch nicht reagieren?

Der IceCube-Detektor

Mit dem Bau des Detektors IceCube hatte eine Reihe von Wissenschaftlern diese Herausforderung angenommen. In internationaler Kooperation – 49 Forschungsinstitute sind beteiligt, darunter auch einige aus Deutschland – ist im antarktischen Eis der weltgrößte Neutrinodetektor entstanden. Seit 2011 ist er voll funktionsfähig. Hauptaufgabe von IceCube ist, kosmische Neutrinos in dem weiten Energiebereich von 10^{11} bis 10^{21} Elektronvolt zu registrieren. Optimiert ist die Anlage für den Nachweis von Myonen, die von hochenergetischen Neutrinos erzeugt werden, die ihrerseits aus kosmischen Punkt-

quellen stammen. Für diese wirkt IceCube praktisch wie ein Teleskop, denn ihre Herkunftsrichtung lässt sich sehr genau ermitteln. Von Anfang an war es die Hoffnung der IceCube-Konstrukteure, dass es gelingen würde, einzelne kosmische Quellen von hochenergetischen Neutrinos zu identifizieren.

IceCube befindet sich in direkter Nachbarschaft zur Amundsen-Scott-Südpolstation. Oberirdisch ist nur ein Gebäude zu sehen. Die Messeinrichtung liegt tief darunter: In einem würfelförmigen Volumen von einem Kubikkilometer sind im Eis 5160 Glaskugeln mit hochempfindlichen Lichtsensoren untergebracht – gleichmäßig verteilt auf 86 Kabelstränge in einer Tiefe zwischen 1450 und 2450 Meter. Bei dem dort herrschenden Druck ist das Eis blasenfrei und somit hochtransparent, was für das Messprinzip von großer Bedeutung ist. Denn die Sensoren sollen die schwachen Lichtblitze registrieren, die bei den äußerst seltenen Reaktionen von Neutrinos erzeugt werden.

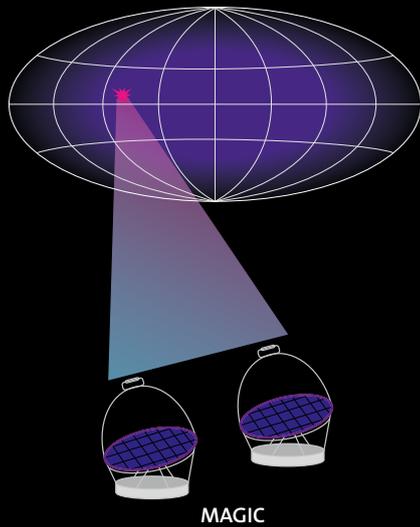
Reagiert ein hochenergetisches Neutrino in der Umgebung des Detektors mit einem Atomkern des Eises, dann entsteht unter anderem ein geladenes Teilchen (je nach Neutrino-Art ein Elektron, ein Myon

oder ein Tauon), das in der Richtung des ursprünglichen Neutrinos weiterfliegt und dabei eine bläuliche Lichterscheinung hervorruft, die Tscherenkow-Licht genannt wird. Dieses Phänomen ist das optische Analogon zum Überschallknall eines Flugzeugs – es tritt auf, wenn das Teilchen mit einer Geschwindigkeit durch das Eis rast, die höher ist als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium. Verläuft die Flugbahn des Teilchens durch das Detektorvolumen von IceCube, lassen sich aus dem räumlichen und zeitlichen Verlauf sowie dem Intensitätsmuster der registrierten Lichtsignale die Herkunftsrichtung und die Energie des Teilchens und auch des verursachenden Neutrinos bestimmen (siehe Bild S. 27).

Besonders präzise funktioniert dieses Verfahren für Myonen. Ein Myon ist ein schwerer Verwandter des Elektrons. Beide haben die gleiche Ladung, das Myon hat aber die rund 200-fache Masse des Elektrons. Wegen dieses Massenunterschieds werden Myonen auf ihrem Weg durch den Detektor weit weniger durch Stöße abgelenkt als Elektronen, und der erzeugte Tscherenkow-Lichtkegel ist sehr schmal – ihre Flugrichtung gibt sehr präzise die Ankunftsrichtung des Neutrinos wieder.

ab 28.09.2017:

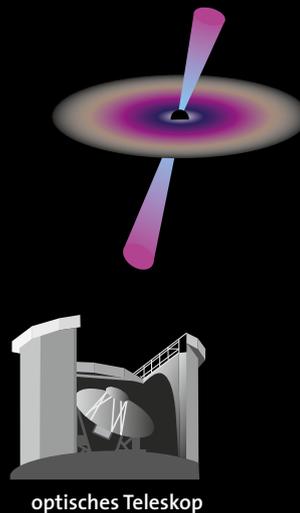
Beobachtungen mit den beiden Tscherenkow-Teleskopen MAGIC auf La Palma in mehreren Nächten zeigen, dass die Strahlung des Blazars TXS 0506+056 Energien von mindestens 400 Gigaelektronvolt erreicht. Als Quelle in diesem Energiebereich war das Objekt zuvor nicht bekannt.



MAGIC

ab 28.09.2017:

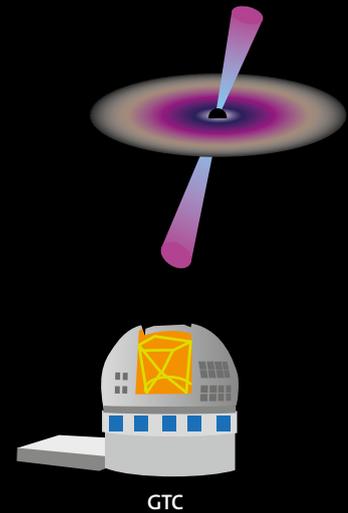
Aufnahmen von mehreren optischen Teleskopen zeigen, dass die visuelle Helligkeit des Blazars gegenüber dem langjährigen Mittel um etwa 0,5 mag gestiegen ist. Es gelingt noch nicht, die Rotverschiebung des Blazars zu bestimmen.



optisches Teleskop

20.02.2018:

Spektroskopische Untersuchungen mit dem 10-Meter-Teleskop Gran Telescopio Canarias ergeben für die Quelle TXS 0506+056 eine Rotverschiebung $z = 0,336$. Dies entspricht einer Entfernung von rund vier Milliarden Lichtjahren.



GTC

SuW-Grafik

Seit seiner Inbetriebnahme hat IceCube eine hohe Anzahl an Neutrinos gemessen. Die meisten sind allerdings atmosphärischen Ursprungs: Sie entstehen, wenn Partikel der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre sekundäre Teilchenschauer auslösen. Dieser Anteil der gemessenen Neutrinos bildet zwar ein eigenes Forschungsfeld, ist aber für die Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung eher störend. Denn in einer sorgfältigen Analyse müssen die IceCube-Forscher klären, ob ein bestimmtes Ereignis auf ein atmosphärisches oder ein kosmisches Neutrino zurückzuführen ist.

Erst nach und nach hatten sich im Lauf der Jahre Hinweise angesammelt, dass es in den Daten einen Überschuss an hochenergetischen Neutrinos gibt, die kosmischen Ursprungs sein müssten. Allerdings kamen sie von recht unterschiedlichen Stellen des Himmels – eine Vorzugsrichtung, die auf eine Punktquelle hätte hindeuten können, war nicht erkennbar. Immerhin veröffentlichte die IceCube-Kollaboration im November 2013 im Fachjournal »Science« eine Analyse, die 28 kosmische Neutrinos mit Energien zwischen etwa 30 Tera- und 1,14 Petaelektronvolt beschrieb (siehe SuW 2/2014, S. 22).

Der lang ersehnte Nachweis

Als IceCube am 22. September 2017 die Spur eines Myons registrierte, lief alles mit eingespielter Routine ab. Die Lichtsensoren sandten aus der Tiefe des Eises ihre digitalisierten Signale an die Basisstation; Computer errechneten die Energie und die Herkunftsrichtung des verursachenden Neutrinos sowie die Position der vermuteten Quelle am Himmel. Das Ereignis (nach dem Datum IceCube-170922A genannt) wurde automatisch als bedeutend eingestuft, und bereits 43 Sekunden nach dem Nachweis wurden die vorläufigen Daten in ein öffentlich einsehbares Alarmierungssystem eingestellt. Nach genauerer Analyse folgten vier Stunden später besser aufbereitete Daten (siehe Infografik oben).

Derartige Alarmierungssysteme haben den Zweck, bei unverhofft auftretenden Ereignissen (englisch: transients = flüchtige Erscheinungen) simultane Beobachtungen mit allen möglichen Messmethoden zu initiieren. Solche Systeme, welche die Observatorien weltweit in Echtzeit informieren, sind eine wesentliche Voraussetzung für die Multimessenger-Astronomie (siehe Kasten S. 32).

Die IceCube-Meldung nahmen die Kollegen des Neutrinodektors ANTARES

zum Anlass, ihre Daten aus dem entsprechenden Zeitraum einer Neuauswertung zu unterziehen. Die Empfindlichkeit von ANTARES, der vor der französischen Küste im Mittelmeer in 2500 Meter Tiefe betrieben wird, ist für Punktquellen in der in Frage kommenden Himmelsgegend um etwa einen Faktor zehn geringer als diejenige von IceCube. So erstaunt es nicht, dass sich in den Daten keine Hinweise auf kosmische Neutrinos finden ließen.

IceCube-170922A blieb also das einzige verdächtige Neutrino. Seine Energie errechnete sich zu 290 Teraelektronvolt. Dieser Wert allein reichte noch nicht aus, um sicher auf eine kosmische Herkunft zu schließen – auch manche der Neutrinos, die in der Atmosphäre entstehen, haben solche Energien. Eine sorgfältige Analyse ergab immerhin eine Wahrscheinlichkeit von 57 Prozent für einen kosmischen Ursprung. Nach wissenschaftlichen Maßstäben reicht ein solcher Wert noch nicht aus, um von einer Entdeckung zu sprechen. Zur weiteren Klärung der Herkunft mussten deshalb weitere Beobachtungen hinzugezogen werden.

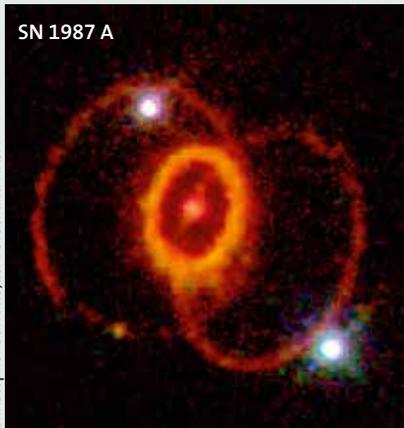
Am 28. September meldeten die Betreiber des Large Area Telescope (LAT) an Bord des Weltraumteleskops Fermi, dass die

Multimessenger-Astronomie

Himmelskörper, die auf Grund ihrer riesigen Entfernung zu uns nicht mit Raumsonden besucht werden können, lassen sich nur anhand der Wellen- und Teilchenstrahlung untersuchen, die wir von ihnen empfangen. Jahrhundertlang war das sichtbare Licht (als winziger Ausschnitt des elektromagnetischen Spektrums) der einzige Informationsträger, der ausgewertet werden konnte. In den letzten Jahrzehnten haben die Astronomen mit ihren Beobachtungstechniken nicht nur den gesamten elektromagnetischen Spektralbereich erschlossen (von den langwelligigen Radiowellen bis zur extrem kurzwelligigen Gammastrahlung), sondern es kamen auch neue Informationsträger hinzu: kosmische Strahlung, Neutrinos und Gravitationswellen.

Für die simultane Beobachtung und koordinierte Auswertung von unterschiedlichen physikalischen Signalen eines astronomischen Objekts hat sich der Begriff Multimessenger-Astronomie eingebürgert (lateinisch: multi = viele, englisch: messenger = Bote), deutsch etwa Mehrkanalbeobachtung. Diese vier Signalarten werden von einem Himmelsobjekt oder in dessen unmittelbarer Umgebung durch unterschiedliche astrophysikalische Prozesse erzeugt und liefern deshalb verschiedene, sich ergänzende Informationen über das Objekt. Auch das Ausbleiben einer dieser Signalarten ist aufschlussreich.

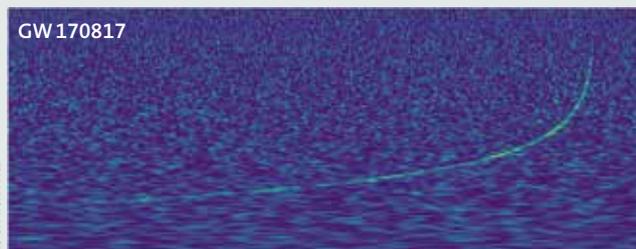
Bisher gab es erst drei Ereignisse, die sich mit den Methoden der Multimessenger-Astronomie beobachten ließen:



Christopher Burrows, ESA/STScI und NASA

war der erste Nachweis von Neutrinos, die eindeutig von einer Quelle außerhalb des Sonnensystems stammten.

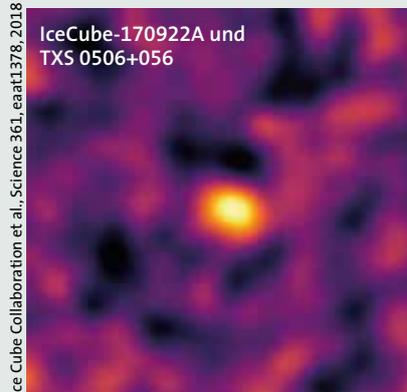
17.08.2017: Zwei Neutronensterne verschmelzen zu einem Schwarzen Loch. Entdeckt anhand des Gravitationswellensignals, ließ sich die Quelle durch Folgebeobachtungen in mehreren Bereichen des elektromagnetischen Spektrums identifizieren. Neutrinos wurden nicht registriert. Die Multimessenger-Beobachtungen erbrachten den Nachweis, dass kollidierende Neu-



LSC/Alex Nitz

23.02.1987: In der Großen Magellanschen Wolke leuchtet die Supernova 1987A auf. Zusätzlich zum elektromagnetischen Signal der Sternexplosion wurden in mehreren Detektoren 24 Neutrinos niedriger Energie registriert. Dies

tronensterne Gammastrahlenausbrüche (Gamma-Ray Bursts) hervorrufen und einen Großteil der schweren chemischen Elemente im Universum erzeugen.



Ice Cube Collaboration et al., Science 361, eaat1378, 2018

22.09.2017: Nach dem Nachweis eines hochenergetischen Neutrinos im IceCube-Detektor gelang es gemeinsam mit Gamma- und Röntgenteleskopen, die Quelle zu identifizieren: ein Blazar (BL-Lacertae-Objekt), also eine

ferne Galaxie mit aktivem Schwarzen Loch im Zentrum, bei der einer der Jets in Richtung Erde weist. Damit wurde erstmals eine kosmische Neutrinoquelle entdeckt.

Vier unterschiedliche Informationsträger

Neutrinos: Sie sind elektrisch neutral, stabil, fast masselos, bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und treten nur über die schwache Kraft mit Materie in Wechselwirkung. Sie durchdringen mühelos die dichtesten Materieansammlungen und werden durch Magnetfelder nicht abgelenkt. Ihre Herkunftsrichtung weist direkt zur Quelle zurück. Mit ihnen lässt sich ungehindert in das Innere astrophysikalischer Energiequellen schauen.

Elektromagnetische Strahlung: Photonen aller Wellenlängen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und weisen direkt auf die Quelle hin, geben aber nur Auskunft über deren Oberfläche. Abhängig von ihrer Wellenlänge werden sie durch Absorption in Materie geschwächt. Energiereiche Gammastrahlung ferner Objekte wird zudem durch Wechselwirkung mit den Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds absorbiert.

Kosmische Strahlung: Es sind geladene Partikel (vorwiegend Protonen), deren Bewegung durch Magnetfelder abgelenkt wird; ihre Ankunftsrichtung weist deshalb nicht auf ihren Ursprung zurück. Die höchstenergetischen Teilchen können nicht im Milchstraßensystem entstanden sein; andererseits können ihre Quellen nicht weiter als etwa 50 Millionen Lichtjahre entfernt sein, denn sonst müssten die Partikel durch Wechselwirkung mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund schon wieder stark abgebremst worden sein. Unter den relativistischen Bedingungen, die für diese exotischen kosmischen Partikel gelten, bringt sie bereits der Zusammenstoß mit einem einzelnen Photon der Hintergrundstrahlung um einen Großteil ihrer Energie.

Gravitationswellen: Diese Schwingungen der Raumzeit entstehen, wenn Massen beschleunigt werden. Sie breiten sich ungehindert mit Lichtgeschwindigkeit aus. Doch nur die energiereichsten Quellen im Universum erzeugen messbare Wellen, etwa Supernovae, enge Doppelsysteme aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern sowie Verschmelzungen solch kompakter und massereicher Himmelskörper.

Herkunftsrichtung von IceCube-170922A konsistent ist mit der Position der bereits bekannten Gammastrahlungsquelle TXS 0506+056. Das LAT hat stets ein Fünftel des gesamten Himmels im Blick und sucht nach Quellen, die Gammastrahlen im Energiebereich zwischen 20 Mega- und 300 Gigaelektronvolt ($2 \cdot 10^7$ bis $3 \cdot 10^{11}$ eV) aussenden. Alle drei Stunden erfasst das LAT den gesamten Himmel. Aus den Langzeitdaten ergab sich, dass sich die Quelle TXS 0506+056 seit April 2017 in einem Zustand erhöhter Aktivität befand und den stärksten Ausbruch seit Beginn der LAT-Messungen im Jahr 2008 durchlief. Das Gammateleskop AGILE bestätigte die verstärkte Gammaemission.

War damit die Frage nach der Zuordnung von IceCube-170922A zu einer astrophysikalischen Quelle gelöst? Nein. Denn die gute Übereinstimmung in den Positionen zwischen Herkunftsort und der be-

Die Identifizierung einer Quelle kosmischer Strahlung ist ein gigantischer Erfolg der Multimessenger-Astronomie.

reits bekannten Gammaquelle war – rein statistisch betrachtet – noch immer nicht überzeugend. TXS 0506+056 wurde bereits in drei Fermi-Katalogen als Gammaquelle gelistet und ist als Blazar des BL-Lacertae-Typs bekannt. Blazare sind Galaxien mit aktivem Kern (AGNs), bei denen einer der Jets recht genau zur Sichtlinie irdischer Beobachter gerichtet ist. Die beobachtete elektromagnetische Strahlung ist vermutlich durch relativistische Effekte verstärkt und kann auf Zeitskalen von Minuten bis Jahren variieren. Dem Flackern des Blazars hätten die Astronomen vermutlich überhaupt keine weitere Beachtung geschenkt, wenn da nicht die örtliche Koinzidenz mit dem Neutrino gewesen wäre.

Einen neuen Aspekt erbrachten die Beobachtungen der MAGIC-Teleskope auf der Kanareninsel La Palma. Sie erforschen den Himmel im hochenergetischen Gammastrahlenbereich. Hierzu nutzen sie – ähnlich wie IceCube – den Tscherenkow-Effekt: Kosmische Gammastrahlen erzeugen beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre Teilchenschauer, die kurze Lichtblitze auslösen. Wie Neutrinos weisen Gammaquanten direkt auf ihre Quelle zurück, und durch geschickte Auswertung der registrierten Lichtblitze lässt sich der Himmel im Gammalicht abbilden.

Nachdem eine erste Beobachtungskampagne erfolglos geblieben war, konnte

MAGIC in einem zweiten Beobachtungslauf ab dem 28. September 2017 hochenergetische Gammastrahlung – bis mindestens 400 Gigaelektronvolt – vom Objekt TXS 0506+056 nachweisen. Dies war ein Novum, denn als Quelle solch hochenergetischer Gammaquanten war der Blazar zuvor nicht bekannt.

Nun hatten die Wissenschaftler zwei Indizien: die übereinstimmenden Positionen von Neutrino- und Gammaquelle sowie die simultane Emission von hochenergetischen Neutrinos und Gammaquanten. Das stärkte die statistische Signifikanz wesentlich. Denn die theoretischen Modelle von Blazaren besagen, dass zumindest ein Teil der hochenergetischen Gammaquanten in denselben Prozessen entstehen sollte wie die hochenergetischen Neutrinos. Mit anderen Worten: Gammaquanten und Neutrinos sind Tochterprodukte derselben Vorgänge, die letztlich auf die immen-

se Beschleunigung von Protonen in den Jets von Blazaren zurückzuführen sind.

Die Astronomen haben also nun starke Argumente, in dem Blazar TXS 0506+056 die erste extragalaktische Quelle zu sehen, von der Neutrinos und kosmische Strahlung ausgehen.

Weitere Unterstützung kommt durch eine Neuauswertung archivierter IceCube-Daten, die durch die Entdeckung von IceCube-170922A angestoßen wurde. Dabei zeigte sich, dass in dem Zeitraum von September 2014 bis März 2015 – verglichen mit dem Hintergrund an atmosphärischen Neutrinos – ein bedeutender Überschuss von Neutrinos aufgezeichnet wurde, die aus der Richtung von TXS 0506+056 kamen. Diese Auswertung ist für sich allein statistisch signifikant und völlig unabhängig von der Analyse des Neutrinos IceCube-170922A und der Gammastrahlung des Blazars. Beide Analysen sind in der Ausgabe vom 13. Juli 2018 im Fachjournal »Science« erschienen.

Die Entdeckung eines Blazars als Ursprung kosmischer Strahlung ist ein gigantischer Erfolg der Neutrino- und Multimessenger-Astronomie. Aber ob diese Objektklasse insgesamt als dominante Quelle dieser Teilchenstrahlung anzusehen ist, wird sich erst zeigen, wenn weitere kosmische Neutrinoquellen gefunden wurden. ©



UWE REICHERT wurde 1986 an der Universität Heidelberg promoviert. Er ist seit 1989 als Wissenschaftsredakteur tätig und leitet seit 2006 die Redaktion von »Sterne und Weltraum«.

Literaturhinweise

Ahnen, M. L. et al.: The Blazar TXS 0506+056 Associated with a High-Energy Neutrino: Insights into Extragalactic Jets and Cosmic Ray Acceleration. In: The Astrophysical Journal Letters (im Druck). DOI: 10.3847/2041-8213/aa083

Becker, J. K.: High-Energy Neutrinos in the Context of Multimessenger Astrophysics. In: Physics Reports 458, S. 173–246, 2008

Feuerstein, B. und Bernlöhr, K.: 100 Jahre kosmische Strahlung. In: Sterne und Weltraum 10/2012, S. 46–56

Halzen, F.: Multi-Messenger-Astronomy: Cosmic Rays, Gamma-Rays and Neutrinos. University of Wisconsin-Madison, 2003. arXiv:astro-ph/0302489v1

IceCube Collaboration et al.: Multimessenger Observations of Flaring Blazar Coincident with High-Energy Neutrino IceCube-170922A. In: Science 361, eaat1378, 2018

IceCube Collaboration: Neutrino Emission from the Direction of the Blazar TXS 0506+056 Prior to the IceCube-170922A Alert. In: Science 361, S. 147–151, 2018

Padovani, P. et al.: Dissecting the Region Around IceCube-170922A: The Blazar TXS 0506+056 as the First Cosmic Neutrino Source. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, sty1852, 2018. DOI: 10.1093/mnras/sty1852

Paiano, S. et al.: The Redshift of the BL Lac Object TXS 0506+056. In: The Astrophysical Journal Letters 854:L32, 2018

Resconi, E. et al.: Connecting Blazars with Ultra-High Energy Cosmic Rays and Astrophysical Neutrinos. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 468, S. 597–606, 2017

Spiering, Ch.: IceCube – Ernie und Bert sind nicht allein. In: Sterne und Weltraum 2/2014, S. 22–23

Stegmann, Ch.: Kosmische Strahlung – Die Suche nach den Quellen. In: Sterne und Weltraum 3/2006, S. 24–34

Dieser Artikel und Weblinks unter:
www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1580058