

Signale aus der Ebene

Mit dem IceCube-Detektor ist es erstmals gelungen, Neutrinos aus der galaktischen Ebene nachzuweisen.

Anna Nelles



Martin Wolf, IceCube/NSF

Bei den bekannten Quellen von Neutrinos beginnt das Spektrum bei einer Energie von einigen Kilo-elektronenvolt (keV) mit den solaren Neutrinos. Ihre Entdeckung und die Bestätigung ihrer Oszillationen sind zweifelsohne Meilensteine der Neutrinoforschung. Bei einigen Mega-elektronenvolt (MeV) schließen sich Neutrinos aus menschengemachten Kernreaktoren und aus Supernova-Explosionen an. Die Erforschung der Sonnenneutrinos und die Entdeckung eines Neutrinosignals der Supernova 1987A wurden mit einem Physiknobelpreis ausgezeichnet.

Bei einigen Gigaelektronenvolt (GeV) folgen die atmosphärischen Neutrinos aus kosmischen Luftschauern. Sie entstehen in Teilchenreaktionen, wenn kosmische Strahlung (geladene Teilchenkerne) auf unsere Atmosphäre trifft. Sie sind so etwas wie die Geschwisterpartikel der kosmischen Myonen, die oft in Funkenkammern als knackendes kosmisches Anschauungsmaterial dienen.

Die Neutrinowelt jenseits dieser Energien war lange unbekannt, was auch daran liegt, dass atmosphärische Neutrinos der höchsten Energie pro Raumelement etwa 30 Größenordnungen seltener sind als Sonnenneutrinos. Entsprechend riesige Detektoren sind zu ihrem Nachweis nötig. Erst 2014 entdeckte die IceCube-Kollaboration einen astrophysikalischen Neutrinofluss bei mehreren 100 Teraelektronenvolt (TeV), also einer Energie, die nicht mit dem Spektrum der atmosphärischen Neutrinos verträglich ist [1]. Dies deutete erstmals darauf hin, dass Neutrinos auch aus Quellen außerhalb unseres Sonnensystems zu uns gelangen. Sie tragen Informationen in sich, die helfen können, die Teilchenbeschleunigung in unserer Galaxie und in extremen extragalaktischen Quellen zu verstehen.

Nach der Entdeckung blieb aber weiter die Frage, welche Quellen diesen diffusen Neutrinofluss hervorrufen. Der IceCube-Kollaboration

gelang es, einen Teil der Neutrinos aktiven Galaktischen Kernen und Blazaren zuzuordnen. Dies erfolgte mithilfe der Suche nach einer zeitlichen Korrelation von Blazarausbrüchen und hochenergetischen Neutrinos [2] sowie durch das Erstellen von Himmelskarten und der Suche nach Hotspots [3]. Die dabei gefundenen Objekte sind zwar die ersten bekannten Quellen astrophysikalischer Neutrinos, können aber nicht sämtliche Neutrinos erklären.

Nun hat die IceCube-Kollaboration diesem Puzzle ein weiteres Teil hinzugefügt, indem sie einen Neutrinofluss aus der Galaktischen Ebene identifizierte [4]. IceCube ist ein Neutrino-teleskop, das mit tausenden von optischen Detektoren im Eis am Südpol nach kurzen Cherenkov-Lichtblitzen sucht, die sich Neutrinos zuordnen lassen. IceCube ist weltweit das größte aktive Instrument. Dennoch war es für die jüngste Entdeckung notwendig, tief in die experimentelle Analysebox zu greifen.

IceCube misst Neutrinos mit verschiedenen Teilchensignaturen. Spuren von Myonen erlauben die beste Winkelrekonstruktion und sind daher die Signatur der Wahl, um nach Quellen zu suchen. Allerdings haben Quellen am südlichen Himmel, wo sich auch das Galaktische Zentrum befindet, beim Blick auf die Myonenspuren mit einem sehr hohen Untergrund an atmosphärischen Myonen und Neutrinos zu kämpfen. Dieser Untergrund verhindert es, ein klares galaktisches Signal sichtbar zu machen. Betrachtet man hingegen Wechselwirkungen von Neutrinos mit dem Eis genau im Detektor, erhält man eine viel reinere Neutrinoauswahl, die aber bisher einer sehr schlechten Winkelrekonstruktion unterlag. Erst durch die Kombination von maschinellem Lernen mit existierenden Rekonstruktionsmethoden gelang es, den Eventsatz so zu verbessern, dass eine Korrelationsstudie mit der Galaktischen Ebene signifikante Ergebnisse lieferte. Genauer gesagt kamen neuronale Netze in der Ereignisauswahl zur Anwendung, was die Anzahl an Neutrinosignalen nicht-atmosphärischen Ursprungs deutlich erhöht hat. Darüber hinaus verbesserten neuronale Netze in der Rekonstruktion die Winkelauflösung deutlich.

Mit diesem Ereignissatz ließ sich die Null-Hypothese, dass die gemessenen Neutrinos keinen Über-

schuss entlang der Galaktischen Ebene zeigen, mit einer Signifikanz von $4,5\sigma$ widerlegen. Somit tritt in der Himmelskarte für alle Neutrinoankunftsrichtungen ein Signal der Galaktischen Ebene auf (**Abb. 1**). Galaktische Quellen rücken also wieder ins Rampenlicht. Weitere Messungen – eventuell wieder mit IceCube – werden zeigen müssen, ob es sich tatsächlich um einen diffusen Fluss oder um (noch) nicht aufgelöste Punktquellen handelt.

In den nächsten Jahren wird IceCube um eine dicht-instrumentierte Detektorkomponente erweitert. Sie wird auch dazu dienen, bereits aufgenommene Daten neu zu kalibrieren, und damit weiteren Studien der Galaktischen Neutrinos zugutekommen. Darüber hinaus steht mit dem sich im Aufbau befindlichen KM3NeT ein weiterer Detektor von ähnlicher Größe auf der Nordhalbkugel in den Startlöchern. Er kann einen Teil der Galaktischen Ebene beobachten, der aus dem Süden nicht sichtbar ist. Weitere Teleskope werden folgen, und auch IceCube hat mit dem Projekt IceCube-Gen2 Pläne für Neutrinoastronomie in der nächsten Dekade.

Vielleicht profitiert die Astroteilchenphysik weiter vom Multimessenger-Ansatz: Denn auch in Messungen der Gammastrahlung sticht die Galaktische Ebene durch einen deutlichen Überschuss heraus (**Abb. 1b**). Dieser stammt sowohl

von bekannten astrophysikalischen Quellen als auch von noch unbekannten Objekten in der Galaktischen Ebene. Viele Szenarien zur Teilchenbeschleunigung sagen eine Korrelation von Gammastrahlung und Neutrinos voraus. Auch die neuen Resultate von LHAASO [5], die mehr als 20 Gamma-Strahlungsquellen mit Energien im PeV-Bereich in der Milchstraße enthalten, haben die Aufmerksamkeit wieder auf unsere eigene Galaxie gelenkt. LHAASO berichtet neben den Quellen auch von einer erhöhten diffusen Emission aus der Galaktischen Ebene. Hier bieten sich spannende Perspektiven, um unsere Milchstraße mittels Photonen und Neutrinos zu erforschen.

- [1] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **113**, 101101 (2014)
- [2] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Science* **361**, 147 (2018)
- [3] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Science* **378**, 538 (2022)
- [4] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Science* **380**, 1338 (2023)
- [5] Z. Cao et al. (LHAASO Coll.), *arXiv:2305.17030v1*

Die Autorin

Prof. Dr. Anna Nelles, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nikolaus-Fiebiger-Str. 2, 91058 Erlangen und DESY, Zeuthen

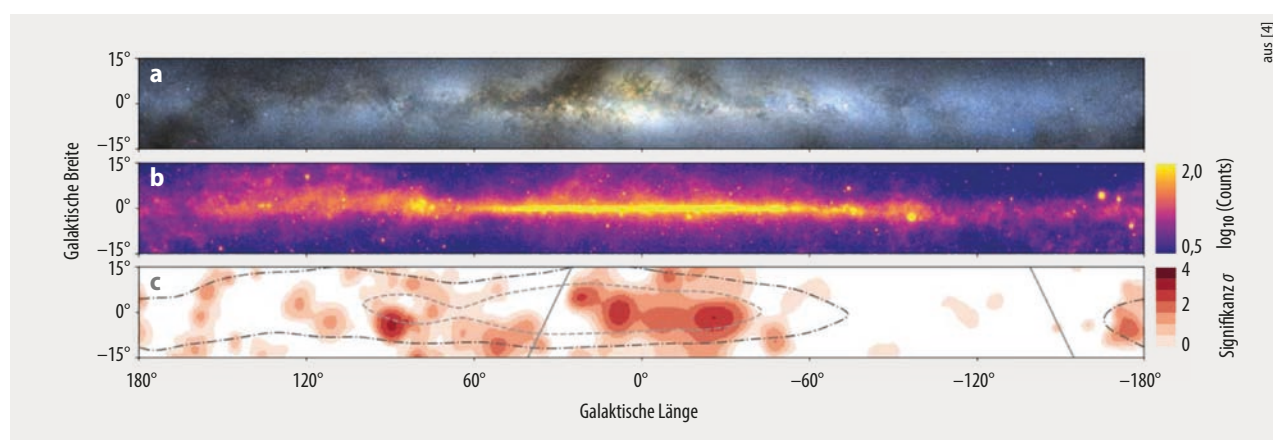


Abb. 1 Gas- und Staubwolken, die Photonen mit sichtbaren Wellenlängen absorbieren, verdecken teilweise den Blick auf die Galaktische Ebene (a). Gammastrahlung mit deutlich höherer Energie findet dagegen ihren Weg (b), wie die zwölfjährige Durchmusterung des Fermi Large Area Telescope (Fermi-LAT) bei Energien größer als 1 GeV zeigt. Die Neutrinos, die IceCube beobachtet hat (c), ergeben ein diffuses Bild. Es passt zu den vorhergesagten Konturen für 20 bzw. 50 % des Neutrino-Emissionssignals; die grauen Linien zeigen den nördlich-südlichen Himmelshorizont am IceCube-Detektor. Die schlechtere Auflösung wird sich mit neuen Detektoren und Optimierung der Rekonstruktion noch weiter verbessern.