



Das energiereichste jemals beobachtete Neutrino

In den Tiefen des Mittelmeers haben Wissenschaftler, darunter auch Astronomen des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn, mit dem KM₃NeT-Neutrino-Teleskop ein kosmisches Neutrino mit einer rekordverdächtigen Energie von etwa 220 PeV entdeckt. Der ARCA-Detektor, Teil des KM₃NeT-Tiefseeobservatoriums, fing dieses außergewöhnliche Ereignis mit der Bezeichnung KM₃-230213A ein. Es ist das energiereichste Neutrino ist, das je beobachtet wurde. Diese Entdeckung ist der erste Beweis dafür, dass Neutrinos mit solch extremen Energien im Universum erzeugt werden.

Nach sorgfältiger Analyse und Interpretation der experimentellen Daten hat eine internationale wissenschaftliche Kollaboration, die mit dem kilometergroßen Neutrino-Teleskop KM₃NeT arbeitet und auch Astronomen des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn umfasst, am 13. Februar 2023 ein Signal mit einer Energie identifiziert, die 16.000 Mal größer ist als die stärksten Teilchenkollisionen, die der Large Hadron Collider des CERN erzeugen kann.

Der Detektor fing ein einzelnes Myon auf, das den gesamten Detektor durchquerte und Signale in mehr als einem Drittel der aktiven Sensoren auslöste. Die Richtung, in der es sich bewegte, und seine Stärke lassen vermuten, dass das Myon von einem kosmischen Neutrino in der Nähe des Detektors stammt. Neutrinos sind nach den Lichtteilchen oder Photonen die zweithäufigsten Teilchen im Universum. Da sie nur sehr schwach mit Materie wechselwirken, erfordert ihr Nachweis große und sehr empfindliche Instrumente.

Das KM₃NeT-Teleskop, das derzeit gebaut wird, ist ein riesiges Tiefsee-Observatorium, das aus zwei Teilen besteht, ARCA und ORCA. Wenn es fertig ist, wird KM₃NeT mehr als einen Kubikkilometer umfassen. KM₃NeT nutzt Meerwasser sowohl als Detektionsmedium als auch zur Abschirmung von Hintergrundgeräuschen. Seine optischen Hightech-Module detektieren das Cherenkov-Licht, ein bläuliches Leuchten, das bei der Bewegung der extrem schnellen Teilchen entsteht, die bei der Wechselwirkung von Neutrinos durch das Wasser entstehen.

"Durch die Kombination von Multi-Messenger-Beobachtungen versuchen wir, eine Verbindung zwischen der Beschleunigung der kosmischen Strahlung, der Produktion von Neutrinos und der Rolle supermassereicher Schwarzer Löcher bei der Entstehung dieser energetischen Phänomene herzustellen", sagt Yuri Kovalev, Leiter des vom ERC finanzierten MuSES-Projekts am MPIfR und Ko-autor der Veröffentlichung. "Mit dem ERC-MuSES-Projekt wollen wir die komplizierten Prozesse entschlüsseln, die aktive galaktische Kerne antreiben, die zu den extremsten Teilchenbeschleunigern im Universum gehören."

Das Hochenergieuniversum ist voller dramatischer Ereignisse wie supermasse-reiche Schwarze Löcher, Supernovaexplosionen und Gammastrahlenausbrüche, deren innerer Aufbau noch weitgehend unerforscht ist. Es sind leistungsstarke kosmische Beschleuniger, die Ströme kosmischer Strahlung erzeugen, von denen einige mit der umgebenden Materie oder mit Photonen wechselwirken und dabei Neutrinos und hochenergetische Photonen erzeugen. Andere können mit Photonen aus dem kosmischen Mikrowellenhintergrund kollidieren und dabei extrem energiereiche sogenannte kosmogene Neutrinos erzeugen.

Mit KM3NeT werden nun Neutrinos aus extremen astrophysikalischen Ereignissen nachgewiesen und dabei bisher unerforschte Energiebereiche untersucht. "Dieser erste Nachweis eines Neutrinos im Bereich von Hunderten von PeV eröffnet ein neues Kapitel in der Neutrinoastronomie", sagt Paschal Coyle, KM3NeT-Sprecher zum Zeitpunkt des Nachweises und Forscher am IN2P3/CNRS in Frankreich. Ein Petaelektronenvolt (PeV) entspricht dabei 10^{15} oder einer Billion Elektronenvolt. Neutrinos gehören zu geheimnisvollsten Elementarteilchen - sie haben keine elektrische Ladung, fast keine Masse und wechselwirken nur schwach mit Materie. "Sie sind besondere kosmische Boten, die die Geheimnisse der energiereichsten Phänomene im Universum lüften", fügt Rosa Coniglione, stellvertretende Sprecherin von KM3NeT zum Zeitpunkt der Entdeckung und Forscherin am INFN in Italien, hinzu.

Die Bestimmung der Richtung und Energie dieses Neutrinos erforderte eine präzise Kalibrierung des Teleskops und ausgefeilte Algorithmen zur Rekonstruktion der Neutrinospur. "Dieser bemerkenswerte Nachweis wurde mit nur einem Zehntel der endgültigen Detektorkonfiguration erzielt, was das große Potenzial unseres Experiments zeigt", kommentiert Aart Heijboer, KM3NeT-Physiker und Softwaremanager zum Zeitpunkt der Entdeckung und Forscher bei Nikhef in den Niederlanden.

Dieses hochenergetische Neutrino könnte direkt aus einem leistungsstarken kosmischen Beschleuniger stammen, oder es könnte der erste Nachweis eines kosmogenen Neutrinos sein. Da es sich jedoch nur um ein einziges Ereignis handelt, bleibt sein Ursprung ungewiss. Um mehr zu erfahren, müssen die Forscherinnen und Forscher mehr solcher Ereignisse nachweisen. Das KM3NeT-Projekt wird mit zusätzlichen Detektoreinheiten und Daten erweitert, um seine Fähigkeit zum Einfangen kosmischer Neutrinos zu verbessern und seine Rolle als Schlüsselinstrument in der Multimessenger-Astronomie zu festigen. Um die beteiligten Energien in eine makroskopische Perspektive zu rücken, entspricht die Energie des Ereignisses KM3-230213A etwa dem 30-fachen der Energie, die zum Drücken einer Taste auf einer Computertastatur erforderlich ist.

"Durch die Kombination von Daten aus Instrumenten wie KM3NeT, dem Global mm-VLBI Array und dem 100-m-Radioteleskop Effelsberg können wir die Quellen der hochenergetischen Neutrinos identifizieren", sagt Eduardo Ros, Astronom am MPIfR und ebenfalls Mitglied des Entdeckungsteams. "Die Multi-Messenger-Astronomie ist der Schlüssel zur Lösung des Rätsels dieser so schwer aufzufindenden Teilchen und hilft uns dabei, ihre Herkunft zu ermitteln und die extremsten Prozesse im Universum zu entdecken."

"Das KM3NeT-Projekt ist ein gewaltiges Unterfangen, das sich über ein Volumen von einem Kubikkilometer erstreckt und bei dem rund 200.000 Photomultiplier zum Einsatz kommen", sagt Miles Lindsey Clark, technischer Projektleiter von KM3NeT zum Zeitpunkt der Entdeckung und Forschungsingenieur am IN2P3/CNRS in Frankreich. "Diese Leistung spiegelt die enorme gemeinsame Anstrengung von Ingenieuren, Technikern und Wissenschaftlern wider, die in einer der schwierigsten Umgebungen für die Neutrino-forschung arbeiten."

Die Entdeckung von KM3-230213A stellt einen großen Fortschritt in der Multimessenger-Astronomie dar, einem Bereich, der Beobachtungen über das gesamte elektromagnetische Spektrum und darüber hinaus, einschließlich kosmischer Strahlung und Neutrinos, kombiniert, um die energiereichsten Ereignisse im Universum zu untersuchen.

"Das große Rätsel bleibt, wie und wo in unserem Universum Neutrinos, diese fast masselosen, elektrisch neutralen Teilchen, so enorme Energien erreichen. Wir können es nur lösen, wenn Astroteilchenforscher, Theoretiker und Observatorien aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums eng und koordiniert zusammenarbeiten. Ich bin mir sicher, dass die Astronomie derzeit eine äußerst spannende Zeit erlebt", schließt Anton Zensus, Direktor am MPIfR und Leiter der Forschungsabteilung Radioastronomie/VLBI.

Weitere Informationen

Die KM₃NeT-Kollaboration vereint mehr als 360 Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker und Studenten von 68 Institutionen aus 22 Ländern auf der ganzen Welt.

KM₃NeT hat zwei Detektoren: ARCA bei Sizilien und ORCA bei Toulon in Frankreich. Der ARCA-Detektor hat 230 Einheiten, während der ORCA-Detektor 115 Einheiten hat. Die ARCA-Einheiten sind 700 m hoch und 100 m voneinander entfernt, während die ORCA-Einheiten 200 m hoch und 20 m voneinander entfernt sind. Jede Einheit enthält 18 optische Module mit 31 Photomultipliern. Die Daten werden über ein Unterseekabel an die Landstationen des INFN Laboratori Nazionali del Sud in Portopalo di Capo Passero und des Laboratoire Sous-marin Provence Méditerranée in La Seyne-sur-Mer gesendet.

An der veröffentlichten Studie waren folgende Institutionen in Deutschland beteiligt: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg mit den Wissenschaftlern M. Chadolias, Y. Darras, A. Domi, T. Eberl, T. Gal, N. Geißelbrecht, R. Gracia, K. Graf, C. Haack, L. Hennig, O. Kalekin, U.F. Katz, C. Kopper, R. Lahmann, J. Schnabel, J. Schumann, B. Setter, H. Warnofer, und S. Weissbrod; Max-Planck-Institut für Radioastronomie mit Y.Y. Kovalev, A. Plavin und E. Ros; sowie die Julius-Maximilian-Universität Würzburg mit S. Buson (auch Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY), M. Lincetto und L. Pfeiffer.

MuSES, eine Abkürzung für „Multi-messenger Studies of Energetic Sources“, ist eine bahnbrechende Initiative in der Astrophysik. Sie widmet sich der Untersuchung aktiver galaktischer Kerne (AGN), die zu den stärksten bekannten Teilchenbeschleunigern im Kosmos gehören. Das MuSES-Projekt wird vom Europäischen Forschungsrat (ERC) im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms "Horizont Europa" der Europäischen Union gefördert (Finanzhilfvereinbarung Nr. 101142396) und wird von der Europäischen Union finanziert. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind ausschließlich die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten und Meinungen der Europäischen Union oder des ERC wider. Weder die Europäische Union noch der ERC können für sie verantwortlich gemacht werden.

contact for scientific information:

Prof. Dr. Yuri Kovalev
Max-Planck-Institute für Radioastronomie, Bonn
Fon: +49 228 525-424
E-mail: ykovalev@mpifr-bonn.mpg.de

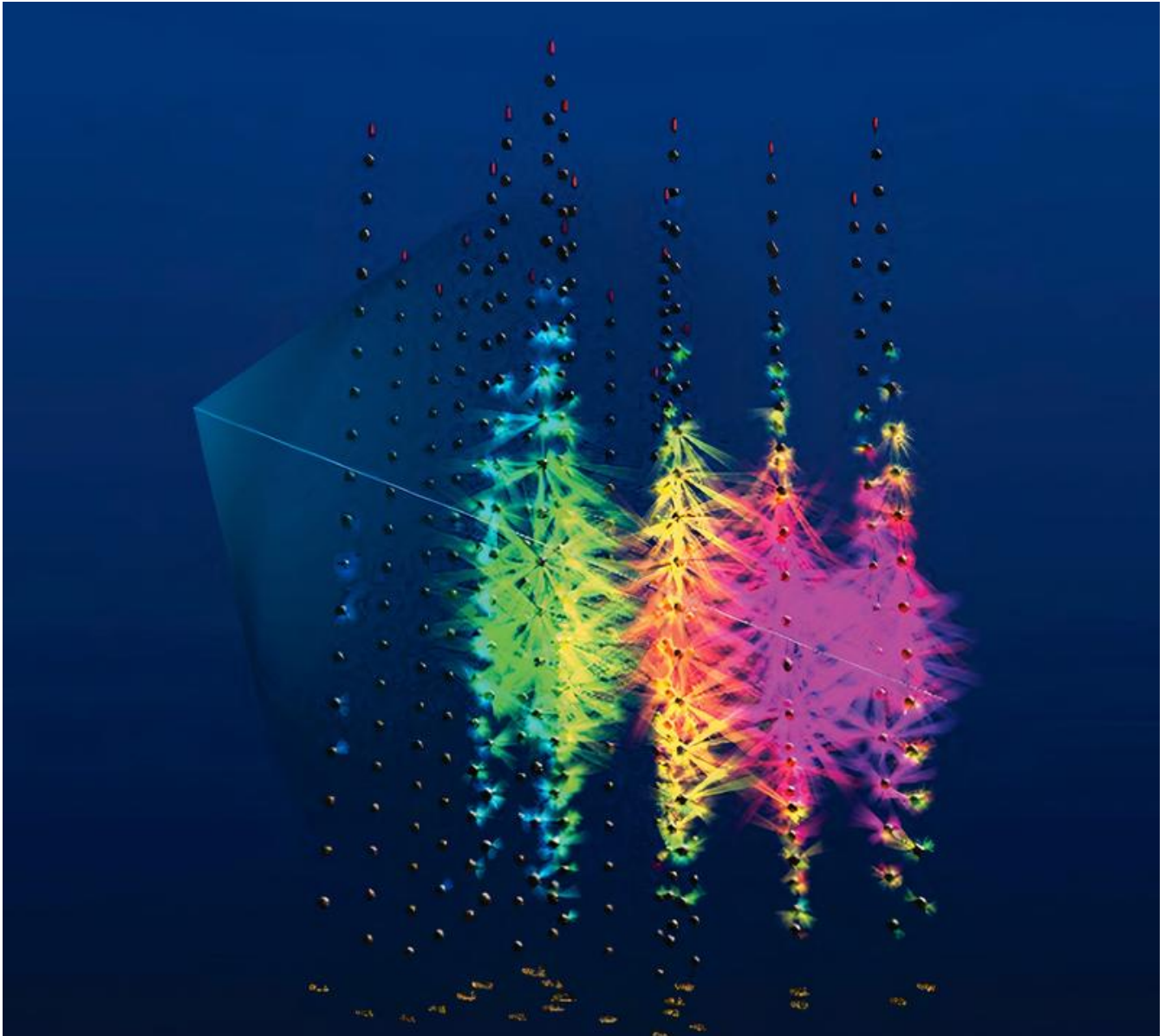
Prof. Dr. Eduardo Ros
Max-Planck-Institute für Radioastronomie, Bonn
Fon: +49 228 525-125
ros@mpifr-bonn.mpg.de

Original publication:

The KM₃Net Collaboration: Observation of an Ultra-High-Energy Cosmic Neutrino with KM₃NeT, Nature, 12. Februar 2025 (DOI 10.1038/s41586-024-08543-1)

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-08543-1>

URL for press release: <https://www.mpifr-bonn.mpg.de/pressemeldungen/2025/3>



Visuelle Darstellung des in KM3NeT/ARCA beobachteten ultrahochenergetischen Neutrino-Ereignisses. Die verschiedenen Farben stellen unterschiedliche Beobachtungszeiten dar. Die Spur des Teilchens ist als Linie von links nach rechts dargestellt.
KM3NeT-Kollaboration



Der Zusammenbau digitaler optischer Module, die später Teil des KM3Net-Neutrino-Teleskops im Mittelmeer werden.
KM3Net Kollaboration