



© ESA-Hubble / NASA, R. Sankrit

Gammastrahlen, Supernovae und Dunkle Materie

Gammastrahlen eröffnen Astrophysikern eine gänzlich andere Sicht auf Himmelsobjekte als etwa optisches Licht, Infrarotstrahlung oder Radiowellen: Sie geben Auskunft über hochenergetische Vorgänge im Universum – wie zum Beispiel bei supermassiven schwarzen Löchern im Zentrum von Galaxien, Supernova-Überresten oder Pulsaren. Solveig Michelsen hat den Astroteilchenphysiker Dr. Thomas Schweizer zu seiner Forschungsarbeit darüber befragt.

Thomas, früher hat man als Astronom einfach in den Nachthimmel geschaut. Heute stehen dafür hochauflösende Teleskope zur Verfügung. Inwiefern hat das die Sichtweise und das Verständnis für das Universum erweitert?

Da hat sich in der Tat einiges verändert. Es gibt inzwischen Teleskope in allen Wellenlängenbereichen, von Radio über Infrarot, sichtbares Licht, Röntgenstrahlung bis Gammastrahlung. Würde man diese Wellenlängen mit

einem Klavier vergleichen und das sichtbare Licht eine Oktave messen, dann spielte die Natur auf einem Klavier mit 15 Metern Länge. Heutzutage können wir also viele Dinge in anderen Wellenlängenbereichen beobachten, die nie zuvor gesehen wurden.

Was siehst du dir vorrangig an?

In unserer Arbeitsgruppe haben wir uns auf Gammastrahlung spezialisiert. Gammastrahlung aus dem Weltall

löst beim Eintritt in die Atmosphäre Teilchenschauer aus, die kurze Lichtblitze erzeugen. Diese können wir mit so genannten Cherenkov-Teleskopen sehen. Die eingebaute Kamera ist nicht nur in der Lage, einzelne Licht-Photonen zu sehen, sondern kann auch kurze Bild-Sequenzen mit 2 Milliarden Bilder pro Sekunde aufzeichnen. So können wir die extrem kurzen Lichtblitze entdecken, die typischerweise nur 2-5 Nanosekunden dauern.

Wow, das ergibt dann riesige Datenmengen, oder?

Ja, die neuen Cherenkov-Teleskope – insgesamt sind vier Stück gebaut worden – können jeweils 5 Gigabyte pro Sekunde aufzeichnen. Im Schnitt nehmen wir pro Teleskop 10-20 Terrabyte pro Nacht auf. Wir haben vor Ort eine kleine Rechnerfarm mit 3.000 Cores und 5,6 Petabyte Plattenspeicher. (1 Petabyte entspricht 1015 Byte oder rund 80 Jahre HD-Video in Dauerschleife.)

Und wie geht es mit den „eingefangenen“ Lichtblitzen weiter?

Das eingefangene Licht wird in ein elektrisches Signal umgewandelt, das wiederum wissenschaftlich untersucht werden kann, um mehr über die kosmischen Quellen der Gammastrahlung herauszufinden. Damit ergänzen wir die optische Astronomie, die Infrarotastronomie sowie die Röntgenastronomie und bekommen ein viel vollständigeres Bild.

Wie kann man Gammastrahlung erklären?

Gammastrahlung ist eine besonders Materie durchdringende elektromagnetische Strahlung, die nur bei hochenergetischen Ereignissen vorkommt, etwa einer Supernova, einem Pulsar oder auch dem Zerfall eines Atomkerns. Von hochenergetischer Gammastrahlung spricht man bei Strahlung am oberen Ende des Spektrums. Der erste wirkliche Nachweis hochenergetischer Gammastrahlung oberhalb von 1 Terraelektronenvolt wurde vom Wipple-Teleskop im Jahr 1989 erbracht durch die Detektion des Krebsnebels, ein Pulsarwindnebel, welcher aus dem Wind des Pulsars gebildet wurde.

Ein Pulsar ist ein schnell rotierender Neutronenstern mit einer Masse von etwa zwei Sonnen, komprimiert auf einen Durchmesser von nur 12 Kilometern, mit einem gigantisch starken Magnetfeld von etwa 100 Millionen Tesla. (Als Vergleich: Die Erde hat rund 50 Mikrottesla.) Der Krebspulsar rotiert etwa 30 Mal pro Sekunde um die eigene Achse. Wie ein gigantischer Dynamo erzeugt er 30 Mal pro Sekunde Lichtblitze im ganzen Spektrum von Radiowellen.

Der Nachweis dieser hochenergetischen Gammastrahlung ist mir auf La Palma mit einer speziellen Triggerschaltung gelungen. Diese Schaltung aktiviert die Auslese der Kamera, wenn besonders kleine Schauer mit niedriger Energie (>25 Gigaelektronenvolt) auftauchen. Bis dahin hat unser Teleskop nur oberhalb von 60 Gigaelektronenvolt getriggert, und das gepulste Signal ist uns zunächst entgangen.

Gammastrahlung

Besonders durchdringende elektromagnetische Strahlung, die nur bei hochenergetischen Ereignissen vorkommt, etwa einem Supernova-Überrest, einem Pulsar, einem aktiven galaktischen Kern oder auch dem Zerfall eines Atomkerns.

Gammablitz

Große Ausbrüche an Gammastrahlung, die in zehn Sekunden mehr Energie freisetzen als unsere Sonne während ihrer gesamten Lebensdauer – eines der energiereichsten Phänomene des Weltalls. Erst vor wenigen Jahren konnte ein durch Gravitationswellen erzeugter Gammablitz nachgewiesen werden, nachdem ein Neutronenstern in ein schwarzes Loch gefallen war.

Supernova

Eine Supernova entsteht am Ende eines Sternenlebens, wenn ein Großteil des Sterns durch eine gewaltige Explosion vernichtet wird und dabei hell aufleuchtet. Dies ist über weite Strecken des Weltalls sichtbar, denn die Energieumwandlung sorgt für das Millionen- bis Milliardenfache an Leuchtkraft. Je nach Masse des explodierten Sterns entsteht daraus dann ein weißer Zwerg, ein schwarzes Loch oder ein Neutronenstern. Der Supernova-Überrest, die Explosionswolke, beginnt nach einigen hundert Jahren in Röntgen- und Gammastrahlung zu leuchten. Dieses Leuchten kann 10.000 bis 20.000 Jahre lang andauern.

Schwarzes Loch

Ein Schwarzes Loch ist ein Gebiet im Weltraum, in dem Materie in sich selbst zusammengefallen ist. Es besitzt eine so starke Gravitation, dass nicht einmal Licht daraus enttrinnen kann. Fällt Materie hinein, sammelt sie sich zunächst in einer heißen, rotierenden Scheibe – der Akkretionsscheibe – um das Schwarze Loch an. Dort heizt sie sich durch Reibung stark auf und beginnt zu leuchten. Ein Teil der Materie fällt anschließend in das Schwarze Loch hinein. Ein anderer Teil der Materie wird – vermutlich durch Magnetfelder – abgelenkt und zu Materiestrahlen gebündelt. Diese Jets können weit ins All hinausreichen.

Neutronenstern

Neutronensterne entstehen nach einer Explosion sehr massenreicher Sterne und gehören zu den dichtesten bekannten Objekten. Sie besitzen einen schnellen Drehimpuls und ein sehr starkes Magnetfeld. (Zum Vergleich: Während die Erde rund 50 Mikrottesla besitzt, kann ein Pulsar mit 100 Mio. bis 100 Mrd. Tesla aufwarten.) Details ihres dynamischen Verhaltens sind noch unerforscht.

Pulsar

Ein Neutronenstern, der durch den Kollaps – ähnlich einer Eiskunstläuferin, die ihre Arme anzieht – in seiner Rotation kräftig beschleunigt wurde und nun starke elektromagnetische Strahlung aussendet, die wir periodisch als „Pulse“ wahrnehmen. Einst dachte man übrigens, dass es sich um Außerirdische handeln würde, die mit uns kommunizieren wollen ...

Dunkle Materie

Dabei handelt es sich um eine Form von Materie, die unsichtbar ist, aber durch ihre Gravitation indirekt nachgewiesen werden kann. Dunkle Materie verstärkt die Schwerkraft und wirkt wie eine Art Klebstoff, der die Galaxien zusammenhält, sodass diese sich drehen können ohne auseinanderzufallen.

Kosmische Strahlung

Kosmische Strahlung besteht aus hochenergetischen Teilchen aus dem Weltall, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit auf die Erdatmosphäre treffen und dort eine Kaskade von Sekundärteilchen auslösen (= Teilchenschauer). Sie erzeugen DNA-Mutationen und sind deshalb der wichtigste Motor der Evolution. (DNA-Schäden sind zwar potenziell bedrohlich, können aber durch Reparaturmechanismen der Zellen zu neuen, vorteilhaften Variationen umgewandelt werden, welche wiederum die Artenvielfalt fördern.)

Cherenkov-Licht

In Wechselwirkung mit der Atmosphäre erzeugen Gammastrahlen Teilchenschauer, Kaskaden von subatomaren Teilchen. Da sich Licht in einer Luftumgebung um 0,03 Prozent langsamer bewegt als im Vakuum des Alls, sind diese Teilchen schneller als Licht und erzeugen blaue Blitze, das vom sowjetischen Physiker Pawel Tscherenkow entdeckte Licht (im Englischen Cherenkov). Es dauert nur wenige Milliardstel Sekunden und kann deshalb nur von besonders sensiblen Teleskopen aufgezeichnet werden.

Supernovae sind ein heißes Thema. Kannst du noch mehr dazu erzählen?

Eine Supernova ist so hell, dass sie mit bloßem Auge am Himmel sichtbar ist. Im Sternbild Stier haben etwa chinesische Astronomen bereits am 11. April 1054 eine Supernova entdeckt und beschrieben, aus der sich später der Krebsnebel entwickelt hat. Typischerweise leuchtet die aktive Explosion ganz hell für ein paar Tage, bevor sie verglüht. Sie ist dann optisch nicht mehr sichtbar. Aber die Explosionswolke dehnt sich weiter aus, über viele Jahrtausende und mit einer Geschwindigkeit von 3.000 Kilometern pro Sekunde.

Bei einer Supernova-Explosion entstehen übrigens sämtliche Elemente des Periodensystems, also die Grundbedingung für die Entstehung neuen Lebens. Auch wir sind quasi aus Sternenstaub zusammengesetzt. Aus den neu gebildeten Elementen und dem Sternenstaub formen sich auch neue Planeten und Sterne.

Je nach Masse des explodierten Sterns entsteht danach dann ein weißer Zwerg, ein Schwarzes Loch oder ein Neutronenstern – die dichteste Form.

Um Schwarze Löcher ranken sich ja viele Mythen ...

Schwarze Löcher bilden das Zentrum einer jeden Galaxie und halten sie durch ihre Gravitation zusammen. Auch in unserer Galaxie gibt es ein Schwarzes Loch, im Sternbild Sagittarius. Man nimmt aber an, dass die riesigen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien nicht durch Sternexplosionen, sondern bereits beim Urknall entstanden sind, also schon immer da waren. Die Galaxien haben sich dann erst später drum rum gebildet.

Das Schwarze Loch in unserer Galaxie ist ein sehr kleines. Es hat „nur“ 4,3 Millionen Sonnenmassen – verglichen zum Beispiel mit dem Schwarzen Loch M87, das hat

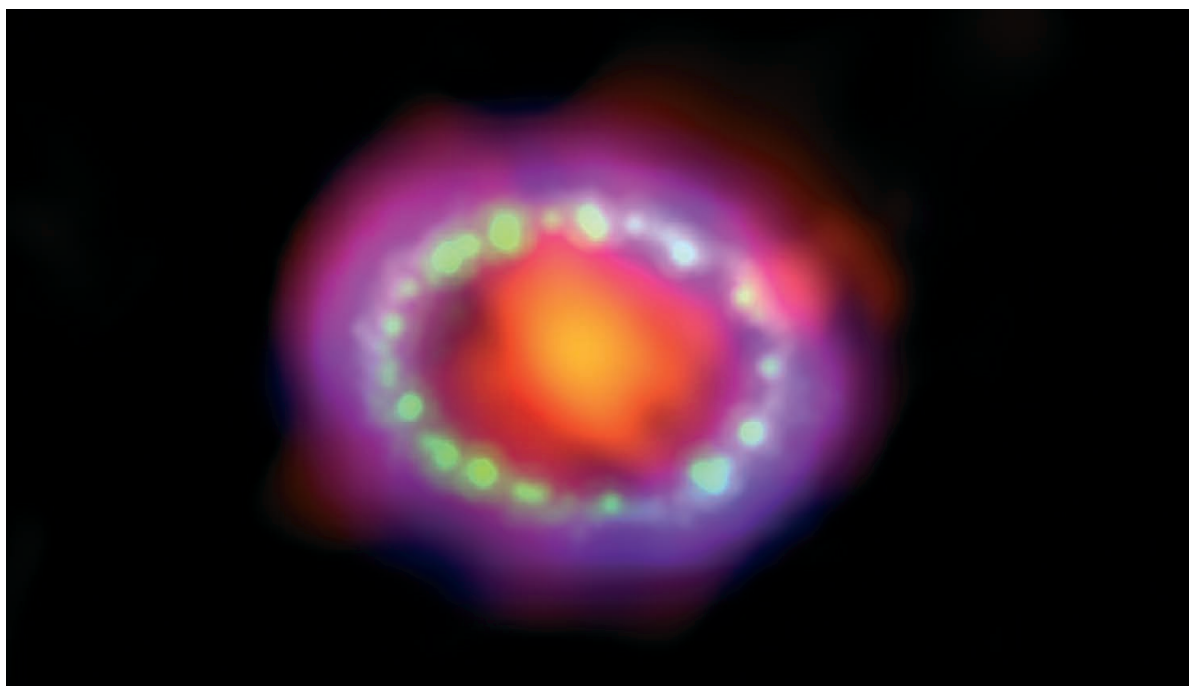
6,5 Milliarden Sonnenmassen! M87 ist das erste Schwarze Loch, das jemals scharf aufgelöst wurde. 2019 ist das eine richtige Sensation gewesen, gelungen durch einen Zusammenschluss aller Radioteleskope auf der Erde zu dem ganz großen Event Horizon Telescope.

Und was hat es mit dem Krebsnebel auf sich?

Der Krebsnebel ist ein Pulsarwindnebel. Das kann man so erklären: Vom Pulsar, also dem sehr schnell rotierenden Neutronenstern, wird eine Art Wind ausgestoßen, ein Strom hochenergetischer, geladener Teilchen. In einiger Entfernung vom Pulsar – beim Krebsnebel etwa ein halbes Lichtjahr weit weg – stößt der Pulsarwind gegen interstellare Materie und formt den Terminierungsschock des Pulsarwinds. Der Wind selbst hat schon sehr hohe Energie, typischerweise 1 Terraelektronenvolt, und im Schock werden die Teilchen dann zu noch höheren Energien beschleunigt. Der entstehende Nebel wächst sichtbar schnell und wird von Jahr zu Jahr größer. Der Krebsnebel ist das bekannteste Beispiel für so ein Phänomen.

Um zurückzukommen auf die Gammastrahlung: Warum ist diese für die Forschung so interessant?

Wir versuchen ja zu begreifen, wie das Weltall aufgebaut ist. Die Gammastrahlung, die wir von Objekten beobachten, hilft uns zu verstehen, was die Quellen kosmischer Strahlung sind, der wir auf der Erde ausgesetzt sind. Kosmische Strahlung besteht hauptsächlich aus extrem hochenergetischen geladenen Ionen von Wasserstoff bis Eisen, quer durch das Periodensystem. Kosmische Strahlung ist der Motor des Lebens, denn sie löst Mutationen aus, welche die Evolution überhaupt erst möglich machen. Wir wollen damit aber auch andere spannende Themen lösen. Ganz besonders interessant wäre eine Detektion



Überreste der Supernova 1987A
© NASA, ESA, CXC, PSU, ALMA, Robert Kirshner (CfA, Moore Foundation), Kari Frank (PSU), R. Indebetouw (NRAO, AUI, NSF)



Ansicht der Teleskop-Anlage in den Bergen von La Palma © CTAO – Cherenkov Telescope Array Observatory

Und dafür braucht man dann exzellente Cherenkov-Teleskope?

Genau. Diese können dann zum Beispiel einen Teilchenschauer besser erfassen, der beim Eintritt kosmischer Strahlung in unsere Atmosphäre entsteht: Kosmische Strahlung enthält alle möglichen geladenen Teilchen, unter anderem auch Gammastrahlung. Stoßen diese Teilchen gegen Luftmoleküle, zerplatzen sie in Millionen neuer Teilchen, die wiederum auf

von Dunkler Materie, die einen Großteil unseres Weltalls ausmacht und sich zum Beispiel in den Zentren der Galaxien anhäuft. Bisher ist nicht bekannt, woraus Dunkle Materie besteht, und Physiker haben viele Hypothesen dazu aufgestellt. Sie lässt sich bislang nur indirekt über die Wechselwirkung ihrer Schwerkraft mit anderen kosmischen Objekten ableiten.

Wie ist da die Herangehensweise?

Dunkle Materie selbst sendet keine Strahlung aus; bei einer Kollision mit anderen Teilchen setzt jedoch manche davon hochenergetische Gammastrahlung frei. Und diese ist messbar.

Eine heiß diskutierte Hypothese: Dunkle Materie könnte schwach wechselwirkende schwere Teilchen beinhalten, so genannte WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Wenn diese zusammenstoßen, löschen sie sich gegenseitig aus (Self-Annihilation) und wandeln sich in Gammaphotonen um. Diese Gammaphotonen können wir mit unseren Teleskopen messen.

Die Existenz von WIMPs wäre auch ein starkes Indiz für das Prinzip der Supersymmetrie. Supersymmetrie ist grob gesagt eine Symmetrie zwischen Strahlung und Materie, Raum-Translationen, Rotationen und Gravitation. Da würden wir jetzt ein neues Fass aufmachen, aber diese Symmetrie könnte die Existenz von Gravitation erklären. Das brächte uns mit Gewissheit den Nobelpreis ein.

Wie weit ist man damit?

Ach, die Teilchenphysiker denken sich alle möglichen theoretischen Teilchen aus, die zu der Theorie der Dunklen Materie passen. Und dann versuchen sie diese zu „finden“. Ganz heiße Kandidaten als mögliche Bausteine Dunkler Materie sind wie gesagt die WIMPs. Diese bislang hypothetischen Teilchen sind schwerer als Protonen und treten kaum in Wechselwirkung mit anderer Materie. Eine ganze Menge Wissenschaftler sind hinter ihnen her, aber das wird schon noch ein Weilchen dauern ...

Luftmoleküle treffen. Ein Nebenprodukt der Wechselwirkung der Gammastrahlen mit der Atmosphäre ist das so genannte Cherenkov-Licht, das wir mit Hilfe der Teleskope festhalten. Teleskope für die astronomische Forschung stehen rund um den Globus an möglichst dunklen Orten, die zudem möglichst selten bewölkt sind. Auf La Palma, wo wir gerade mit dem CTA-Projekt (Cherenkov Telescope Array) die mit Abstand weltweit sensibelsten Teleskope errichten, sind die Bedingungen geradezu ideal.

Wie weit ist dieses Projekt schon gediehen?

Vier neue Teleskope mit jeweils 23 Metern Spiegeldurchmesser werden im Oktober 2026 dort eingeweiht. Jedes Teleskop kostet etwa 15 Millionen Euro – nur die Materialkosten. 1.000 Astrophysiker und nochmal so viele Ingenieure sind an dem Projekt beteiligt, davon 400 in La Palma, der Rest in Chile, dem zweiten Standort des CTA-Projekts. Die neuen CTA-LST-Teleskope in La Palma haben eine wesentlich höhere Empfindlichkeit, eine höhere Winkelauflösung und eine niedrigere Energieschwelle und sind dann weltweit das empfindlichste Observatorium für Gammastrahlung oberhalb von 20 GeV. Durch die achtfach höhere Empfindlichkeit (verglichen mit den jetzigen Teleskopen MAGIC, H.E.S.S. in Namibia und VERITAS in den USA) werden wir tausende neue Quellen und Objekte beobachten können. Die Ära der Gammastrahlungs-Astrophysik hat also begonnen. Viele spannende und bahnbrechende Entdeckungen werden erwartet – eine davon, vielleicht mit Glück, die Identifizierung von Dunkler Materie.



Seit 2006 arbeitet der Astroteilchenphysiker Dr. Thomas Schweizer am Max-Planck-Institut für Physik. Außerdem ist er maßgeblich beteiligt am Design der 23 Meter großen Teleskope des CTA-Projekts (Cherenkov Telescope Array).

Mehr zu diesem Thema: www.augustinum.de/forum