

Kosmischen Kraftwerken auf der Spur

Effizienter als jede Kernfusion wandeln massive schwarze Löcher in den Zentren einiger Galaxien Materie in Energie um. Extrem hochenergetische Lichtquanten helfen, die Funktionsweise solcher aktiver galaktischer Kerne besser zu verstehen.

Das Leben auf der Erde wird maßgeblich durch ihre Atmosphäre ermöglicht. Sie absorbiert die gefährliche kurzwellige Strahlung jenseits des sichtbaren Lichts und hält sie so von uns fern. Hochenergetische Gammastrahlung besteht aus Lichtquanten, die bis zu 10^{14} mal mehr Energie haben als das sichtbare Licht. Diese Strahlung stellt einen wichtigen Botschafter dar. Sie berichtet uns von extrem hochenergetischen Prozessen im Universum, welche durch die üblichen Kernfusionsreaktionen in Sternen nicht erklärbar sind.

Obwohl Viktor Hess bereits 1912 in Ballonflugexperimenten hochenergetische, durchdringende, so genannte Kosmische Strahlung aus dem Universum nachweisen konnte, ist ihr Ursprung noch immer nicht abschließend geklärt. Was sind mögliche Quellen der Kosmischen Strahlung?

Seit 2004 ist auf La Palma das MAGIC-Teleskop zur Beobachtung der Gammastrahlung in Betrieb. Auf der Kanareninsel herrschen für astronomische Beobachtungen besonders günstige Bedingungen. Mit seinem Spiegel mit einem Durchmesser von 17 Metern ist MAGIC das größte

Instrument seiner Art. Allerdings kann die Gammastrahlung nicht direkt registriert werden. Vielmehr nutzt das Teleskop aus, dass die ankommenden Photonen in einer Höhe von 10 km mit Luftmolekülen reagieren. Dabei bildet sich entlang der Richtung des einfallenden Photons eine Kaskade relativistischer Sekundärteilchen aus. Dieser „Luftschauer“ bewegt sich weitestgehend schneller als mit der Lichtgeschwindigkeit in Luft (etwa 99,97% der Vakuumlichtgeschwindigkeit). Dies führt zu einem geringen Energieverlust und zur Aussendung eines schwachen bläulichen Lichts, das nach seinem Entdecker Pavel Alekseyevich Cherenkov benannt wurde. MAGIC benutzt die über ihm liegende Atmosphäre als Detektor, indem es Bilder der Luftschauer im Cherenkovlicht aufzeichnet. Eine entscheidende Eigenschaft der Atmosphäre ist, dass die Lichtintensität mit der Energie der ursprünglichen hochenergetischen Photonen ansteigt – somit kann nicht nur deren Ankunftsrichtung, sondern auch ihr Energiespektrum vermessen werden. Dabei werden dank der extrem großen Lichtsammelfläche von MAGIC auch sehr lichtschwache Luftschauer registriert. So wird ein Bereich des elektromagnetischen Spektrums vermessen, der bisherigen Instrumenten – bodengebunden wie satellitengestützt – unzugänglich war.

Die hohen Energien deuten darauf hin, dass die Strahlung in extremen astrophysikalischen Umgebungen in Wechselwirkungsprozessen mit anderen Teilchen, magnetischen und elektrischen Feldern entsteht. Grundvoraussetzung dafür ist die Beschleunigung von Elementarteilchen wie Protonen und Elektronen auf sehr hohe Energien. Wie geht aber eine derartige Beschleunigung von Elementarteilchen vor sich? Enrico Fermi hat bereits 1949 einen Mechanismus vorgeschlagen, bei dem Teilchen durch wiederholtes Überqueren von Schockfronten Energie ansammeln können. Ein mechanisches Analogon stellt ein Tennisball dar, der von zwei Tennisschlägern gespielt wird, die

sich aufeinander zu bewegen: Bei jedem Schlag gewinnt der Ball Energie. Eine astrophysikalische Schockfront kann man sich vorstellen wie einen schnell bewegten Schneepflug, der umliegende Materie mitreißt. Wo treten nun im Universum solche Schockfronten auf?

Etwa ein Prozent aller uns bekannten Galaxien enthalten aktive Kerne. Das sind massive, etwa zehn Millionen bis zehn Milliarden Sonnenmassen schwere schwarze Löcher, welche von rotierenden Materiescheiben umgeben sind. Diese Materie wird vom schwarzen Loch kontinuierlich aufgesogen. Bei diesem Prozess, Akkretion genannt, können bis zu 40% der Materie in Energie umgewandelt werden. Er ist somit sehr effizient. Ein typischer aktiver Galaxienkern strahlt dabei etwa zehn Milliarden Mal heller als unsere Sonne. Diese hellsten über lange Zeit leuchtenden Galaxien erlauben uns Blicke so weit weg (und damit soweit zurück in die Vergangenheit) wie keine anderen Objekte im Universum.

Noch nicht vollständig erforscht ist die Ausbildung der „Jets“, stark gebündelter Materieauswürfe entlang der Drehachse des Systems. Man nimmt an, dass dafür Magnetfelder verantwortlich sind, die durch die rotierende Akkretionsscheibe entstehen. Ist ein Jet auf den Beobachter ausgerichtet, ist ein direkter Einblick in sein Inneres möglich: Nahe des schwarzen Lochs wird Materie injiziert, welche sich dann in Form von Schockfronten mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit entlang des Jets nach außen bewegt. Dabei entstehen nach dem oben beschriebenen Fermi-Mechanismus hochenergetische, geladene Teilchen – die Kosmische Strahlung. Die Details allerdings sind noch weitgehend ungeklärt. Wie geht die Teilchenbeschleunigung genau vonstatten? Entstehen die hochenergetischen Teilchen in der unmittelbaren Umgebung des schwarzen Lochs? Oder lebt die Teilchenbeschleunigung von Turbulenzen in den Jets selbst?

Die auf der Erde ankommenden hochenergetischen Teilchen selbst erlauben keine eindeutige Zuordnung zu ihren Quellen. Aufgrund ihrer elektrischen Ladung werden sie auf dem weiten Weg von ihren Entstehungsorten durch intergalaktische Magnetfelder stark abgelenkt. Dadurch ist es nicht mehr möglich, Rückschlüsse auf ihren Ursprung zu ziehen. Hier kommt die Gammastrahlung zur Hilfe. Sie entsteht bei Reaktionen der geladenen Materie in den Jets und kann aufgrund ihrer elektrischen Neutralität auf ihrem Weg zu uns nicht abgelenkt werden. Aus ihrer Beschaffenheit lässt sich auf die Energieverteilung der sie erzeugenden Elektronen und den Beschleunigungsmechanismus im Jet zurückschließen.

Die Dissertation versucht, mit Hilfe des MAGIC-Teleskops Eigenschaften solcher aktiver galaktischer Kerne zu bestimmen, in deren Jets wir direkt hineinsehen können. Neben zwei neu entdeckten aktiven galaktischen Kernen sind für zwei weitere, bereits seit 1996 bekannte Quellen zum ersten Mal herausragende Beobachtungen gelungen:

Aktive galaktische Kerne zeichnen sich im Gammalicht durch eine hohe und irreguläre Variabilität aus. Die kleinsten bisher gemessenen Zeitskalen für die oftmals impulsiven Strahlungsausbrüche lagen bei einigen Stunden bis 15 Minuten. Sie schienen in guter Näherung proportional zur Masse des jeweiligen zentralen schwarzen Lochs zu sein. Die Dauer der Intensitätsveränderungen begrenzt dabei die Entstehungsregion der Gammastrahlung, da sich die Information über die Flussveränderung nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. So kann die beobachtete Zeitskala Auskunft über die Kompaktheit der kosmischen Teilchenbeschleuniger geben.

Während der zweimonatigen Beobachtung des aktiven galaktischen Kerns *Markarian 501* wurden in zwei

Nächten extrem hohe und variable Strahlungsflüsse registriert. Es gehört viel Glück dazu, das Teleskop genau zur richtigen Zeit dorthin auszurichten. Es wurden erstmals Verdopplungen der Strahlungsintensität innerhalb nur weniger Minuten gefunden. Damit ist die Größe der Region, in der die Strahlung erzeugt wurde, auf nur etwa ein Fünftel der Distanz Sonne-Jupiter eingeschränkt. Noch eindringlicher ist das Resultat, wenn man die Größe mit der des zentralen schwarzen Lochs vergleicht, das etwa einen zehnfachen Durchmesser hat. Damit sind Theorien, die die beobachtete Variabilität mit periodischen Effekten von umlaufender Materie um das schwarze Loch erklären, praktisch verworfen. Wahrscheinlicher ist, dass die Variabilität durch Unregelmäßigkeiten der Materie- und Magnetfeldverteilung in den Jets selbst zustande kommt.

Die meisten aktiven galaktischen Kerne konnten bisher nur während Strahlungsausbrüchen im Gammalicht beobachtet werden. Eine daher unbeantwortete Frage wendet sich dem „Ruhezustand“ der aktiven Kerne zu: Was ist zu Zeiten zu beobachten, die nicht von extremen Strahlungsausbrüchen geprägt sind? Langwierige Beobachtungen, oftmals über deutlich mehr als 50 Stunden, mussten bisher zusammengefasst werden, um überhaupt ein eindeutiges Gammalsignal festzustellen. Ganz im Gegensatz dazu wurde nun erstmals eine zeitaufgelöste Vermessung des Objekts *1ES2344+514* durchgeführt. Die sich ergebende so genannte Lichtkurve dokumentiert einen niedrigen Flusszustand dieses aktiven galaktischen Kerns über drei Monate hinweg. Von einem niedrigen Fluss kann man durch Vergleich mit einer Messung während eines Strahlungsausbruchs sprechen, der im Dezember 1995 beobachtet wurde.

Die gefundenen kurzfristigen Flussveränderungen einerseits und der lang anhaltende Grundzustand andererseits stellen wichtige neue Tatsachen dar, die entscheidend zur Interpreta-

tion der Vorgänge in aktiven Kernen beitragen werden.

Die Gammaastronomie ist eine sehr junge Disziplin. Nachdem 1992 der erste galaktische Kern entdeckt wurde, der im hochenergetischen Gammalicht leuchtet, kennt man mittlerweile immerhin 14 solcher Quellen. Es bietet sich an, nicht nur die individuellen Objekte zu studieren, sondern auch ihre gemeinsamen Eigenschaften zu erforschen. Entsprechende Untersuchungen wurden in der Dissertation erstmals für elf aktive Kerne durchgeführt. Einerseits konnte bisher nur von sehr schweren aktiven galaktischen Kernen Gammastrahlung beobachtet werden. Andererseits scheint sich die bereits für *Markarian 501* gewonnene Erkenntnis zu erhärten, dass die Eigenschaften der Gammastrahlung ansonsten weitgehend unabhängig von der Masse des jeweiligen zentralen schwarzen Lochs sind. Ein weiteres wichtiges Resultat legt nahe, dass in den beobachteten Galaxienkernen eher Elektronen als Protonen beschleunigt werden.

Damit zeigt die Dissertation einen möglichen Wendepunkt der Gammaastronomie in der Erforschung von aktiven galaktischen Kernen auf: Der Trend geht weg von der Untersuchung individueller aktiver galaktischer Kerne hin zum Verständnis gemeinsamer Objekteigenschaften.

Literaturhinweise:

- **Internetpräsenz der MAGIC-Kollaboration,**
<http://www.magic.mppmu.mpg.de/>
- **Komitee für Astroteilchenphysik (Hrsg.): Broschüre „Astroteilchenphysik in Deutschland – Ein Forschungsgebiet im Aufbruch“,**
<http://www.astroteilchenphysik.de/material/41152637817.pdf>
- **Webseite „Astroteilchenphysik in Deutschland“, insb. Gamma-Astronomie,**
<http://www.astroteilchenphysik.de/topics/gamma/gamma.htm>

R. M. Wagner, Max-Planck-Institut für Physik,
80805 München, rwagner@mppmu.mpg.de