

# Kosmische Jets

## Vortragsskript

### 1. Einleitung [...]

### 2. Vorkommen

#### 2.1 Erfolge der Radioastronomie

Die Beobachtung des Kosmos im Radiospektrum ist ein relativ junges Feld, dem die Astronomen erst nach dem 2. Weltkrieg größere Beachtung schenkten. Wesentliches Problem war die durch die hohe Wellenlänge bedingte sehr geringe Auflösung der frühen Radioteleskope. Der Durchbruch kam mit dem Bau immer größerer Interferometer, Systemen von mehreren Radioteleskopen, deren Signale miteinander überlagert werden. Das Ergebnis ist eine Karte des beobachteten Bereiches, die idealerweise die gleiche Auflösung hat wie ein Radioteleskop mit einem Durchmesser, der dem Abstand der Einzelantennen des Interferometers entspricht. Prominentestes Beispiel dürfte des Very Large Array im US-Bundesstaat New Mexico sein, das ähnliche Auflösungen im Radio- wie das bekannte Hubble-Teleskop im optischen Bereich erreichen kann. Häufig schaltet man übrigens auch Teleskope rund um den Globus zusammen, und erzielt so Auflösungen, die dem eines Radioteleskops mit Erddurchmesser entsprechen.

Schon in den 50er Jahren stellte man fest, dass der Großteil der Emission von Radiogalaxien wie Cygnus A nicht von der Galaxie selber kam, sondern von zwei riesigen *Lobes*, die sich symmetrisch auf beiden Seiten der (meist elliptischen) Galaxien befanden, und meist deutlich größer erschienen als die Galaxien selber im optischen Bereich. Mit Hilfe der neueren Teleskope entdeckte man weitere Strukturen: Die Lobes der hellsten Radioquellen wiesen oft noch *Hot Spots* an ihrem äußeren Rand auf, kompakte Regionen, die besonders intensive Strahlung aussenden. Viele der helleren Quellen hatten auch schwach leuchtende *tails*, d.h. „Schwänze“ oder „Brücken“, die zum Zentrum, dem hellen Kern führten.

Die außergewöhnliche Symmetrie legte nahe, dass der AGN in irgendeiner Weise die Lobes konstant mit Energie versorgen müsste. Erst in den 70er Jahren meisterten Forscher jedoch die Schwierigkeiten einer Erklärung, wie diese Form der Energiezufuhr aussehen könnte: Die Lobes würden von zwei symmetrischen Strömen sehr schnellen Gases versorgt werden, das im Kern der Galaxie gebildet und in entgegengesetzte Richtungen ausgestoßen wird, so spekulierte man.

Die Idee der Jets war geboren, allerdings dauerte noch beinahe zehn Jahre, bis das neu gebaute VLA sie auch im Radiobereich tatsächlich sichtbar machte: Manchmal als sehr schwache haarfeine, schnurgerade Linien, während andere Jets breiter und heller erschienen, dafür keine Hot Spots bildeten, sondern in turbulenten Strömen endeten. (Viel verblüffender war noch die Entdeckung, dass viele Jets nur auf einer Seite erschienen, selbst wenn die Lobes und Hot Spots sehr symmetrisch waren – mehr dazu später.)

#### 2.2 Weitere Jetvorkommen

Erst in den letzten Jahren wurde schließlich klar, dass Jets in sehr unterschiedlichen Umgebungen entstehen können, eine Akkretionsscheibe vorausgesetzt. Ein Beispiel: Der größte Teil von Quasaren weist nur schwache Radiostrahlung auf (gilt daher als "radio-schwach"). Diese Quasare wurden daher lange Zeit nicht als Quellgebiete von Radiojets

betrachtet. Beobachtungen mit dem VLA haben aber gezeigt, dass selbst einige von ihnen bipolare, jet-ähnliche Radiostrukturen auf großen Skalen aufweisen. Ähnliche Beobachtungen mit dem VLA von Seyfertgalaxien, den leuchtschwächeren Geschwistern von Quasaren, haben ebenfalls Hinweise darauf geliefert, dass Jets dort vorhanden sind und einen wesentlichen dynamischen Einfluss auf das ionisierte Gas in diesen Galaxien haben. Nahe Galaxien mit noch schwächerer Aktivität scheinen kompakte Radiokerne zu haben, die in Radiospektrum und Kompaktheit vergleichbar mit denen in Quasaren sind und als Jets erklärt werden können.

Eine deutlich größere Überraschung war jedoch die Entdeckung von kleinen Jets in unserer Milchstraße. Es mag paradox erscheinen, dass relativistische Jets zuerst in den aktiven Kernen von Galaxien und entfernten Quasaren entdeckt wurden, obwohl heutzutage über 200 solche Objekte in unserer eigenen Galaxie bekannt sind. Der Grund liegt darin, dass die Akkretionsscheiben um superschwere schwarze Löcher im Vergleich zu kleineren Exemplaren sehr stark im optischen und ultravioletten Bereich strahlen. Binärsysteme aus stellaren schwarzen Löchern oder Neutronensternen geben dagegen hauptsächlich Röntgenstrahlung ab. Wie früher die Entwicklung der Radioastronomie zur Entdeckung der ersten galaktischen Jets führte, musste sich zunächst die Röntgenastronomie weiter entwickeln, bis dann in den 80er und 90er Jahren mehr und mehr Jets in unserer Galaxie gefunden wurden, die größtenteils von stellaren schwarzen Löchern mit nur einigen Sonnenmassen und Mikroquasaren ausgehen. Diese Jets weisen kompakte Kerne und ausgedehnte Strukturen wie in aktiven Galaxien auf, wenn auch nur in der Größenordnung einiger Lichtjahre, anstelle von Millionen von Lichtjahren. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Massenskalen – im Inneren eines gewöhnlichen Quasars befindet sich ja ein supermassives Schwarzes Loch mit Millionen von Sonnenmassen – kann die zeitliche Variabilität dieser Jets anhand derer von Mikroquasaren gleichsam im Zeitraffer studiert werden: Veränderungen der Jets eines Mikroquasars innerhalb eines Tages entsprechen der Veränderung der Jets eines Quasars in Jahrhunderten. In der Tat scheint das Verhältnis von Länge/Größe der Jets direkt proportional zur Masse des erzeugenden Objekts zu sein.

Selbst in Sternentstehungsgebieten, in denen die Akkretion statt auf ein schwarzes Loch auf einen Protostern stattfindet, zeigten übrigens Mitte der 90er Jahre Beobachtungen des Hubble-Teleskops Strukturen, die sehr ähnlich zu Jets in Radiogalaxien sind. Dabei wurden auch Scheibenstrukturen sichtbar, die, wie erwartet, senkrecht zum Jet stehen. Dies alles lässt darauf schließen, dass die Erzeugung von Jets ein fundamentaler Mechanismus in der Akkretionsscheibenphysik ist und daher ein Verständnis von Akkretionssystemen ohne das Verständnis von Jets nicht möglich ist.

### **3. Entstehung und Aufbau von Jets**

#### **3.1 Beschleunigung und Kollimation in Akkretionsscheiben**

Der genaue Prozess, wodurch Jets beschleunigt und gebündelt werden, ist jedoch noch nicht völlig klar und kann mit dem Auflösungsvermögen heutiger Teleskope auch nicht beobachtet werden, sodass man sich bei den Erklärungsversuchen auf Beobachtungsergebnisse wie die relativistische Geschwindigkeit des Jetplasmas stützen musste: Es gibt nicht viele bekannte Mechanismen, mit denen Gas auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden kann. Das Unterdrucksetzen und anschließende Freisetzen des Gases scheidet aus, da dadurch niemals solche Geschwindigkeiten erreicht werden können. Eine andere Möglichkeit wäre gewesen, das Gas in den AGNs durch Strahlung wegzudrücken. Allerdings würde aber die relativistische Verzerrung, auf die ich später noch eingehe, die Beschleunigung hemmen, zudem könnte der Prozess nicht erklären, warum die Jets selber deutlich mehr Energie besitzen als die Strahlungsquelle im Zentrum. Die Symmetrie der Jets und eben besonders

ihre hohe Geschwindigkeit führten schließlich zu der Idee, dass die Rotation eines schwarzen Loches der Energielieferant für die Vorgänge in den AGN sein könnte. Im Prinzip ist es möglich, einem rotierenden schwarzen Loch Energie und Drehmoment zu entziehen, um elektrische und magnetische Felder zu erzeugen und dabei – möglicherweise – schnelle Jets. Der Grundgedanke ist, dass das Drehmoment einer magnetisierten Akkretionsscheibe um ein schwarzes Loch oder ein anderes sehr schweres, kompaktes Objekt für die Beschleunigung des Jet-Plasma verantwortlich ist. Dabei wird angenommen, dass die magnetischen Feldlinien in der Scheibe quasi festgefroren sind und das Plasma nahe der Scheibe ihnen folgt. Wahrscheinlich wird der Jet beschleunigt, indem Magnetfeldlinien in der Nähe des Schwarzen Lochs "aufgewickelt" werden und nach den Gesetzen der Magnetohydrodynamik ein sehr hoher magnetischer Druck entsteht, der das Material heraus drückt.

Dass die Vorgänge in den Akkretionsscheiben sich durchaus stark unterschieden können, zeigten Beobachtungen eines schwarzen Loches in unserer Galaxie von 1998. Die Röntgenstrahlung von dessen Akkretionsscheibe verschwand periodisch in halb-stunden-Abständen. Fünf Minuten später war sie dann wieder da. Kurz nachdem die Röntgenstrahlung aufhörte, erschienen im infraroten und Radio-bereich Jets. Man nimmt an, dass das Gas, das im Röntgenspektrum strahlt, regelmäßig in Jets herauskatapultiert wird und das schwarze Loch dann wieder neues von dem begleitenden Stern absaugt. Wie dies genau geschieht, ist jedoch noch unklar. Fest steht nur, dass der vorhin skizzierte Prozess zur Erzeugung kontinuierlicher Jets nicht zur Erklärung dieses Phänomens herangezogen werden kann.

In der Tat sind die Vorgänge in den AGN noch sehr wenig verstanden. Vor sieben Jahren konnte immerhin gezeigt werden, dass z.B. der Jet im Zentrum von der Galaxie M 87 in einem Bereich von nur einem Zehntel eines Lichtjahres um das zentrale Schwarze Loch entsteht. In diesem Bereich konnte man den Jet ungebündelt sehen mit einem Öffnungswinkel von rund 60 Grad. Später wird er dann gebündelt, so dass der Öffnungswinkel nur noch sechs Grad groß ist.

Man vermutet, dass die spiralförmig angeordneten Magnetfeldlinien auch für diese sogenannte Kollimation (Bündelung) des Strahls sorgen. Sind Magnetfeldlinien in einem geschlossenen Ring angeordnet, ziehen sie sich zusammen, und genau dieser Effekt wird zur Erklärung herangezogen. Allerdings kann man damit nicht zufrieden stellend beschreiben, warum die Jets auch über große Entfernungen nicht auseinander brechen, wie man es von einem solchen Strom erwarten würde. In der Tat wurde mehrmals beobachtet, dass schwache, zweiseitige Jets auseinander brechen, um ein Stückchen weiter draußen wieder neu gebündelt zu werden. Während dies auf ein abruptes Nachlassens des Druckes des umgebenden Mediums zurückzuführen sein könnte, scheint der Kollimationsprozess doch komplizierter zu sein, als er bisher erklärt wurde – auch der im Vergleich zum Jet sehr geringe Druck des umgebenden Mediums könnte paradoxerweise zur Bündelung beitragen.

Erste, natürlich von stark vereinfachten Modellen ausgehende Computersimulationen zeigten, dass zumindest relativistische Jets gar zwei verschiedene Schichten aufweisen könnten, innen schnelles Gas, außen eine Schicht langsamer fließenden Gases.

### **3.2 Entstehung der Lobes**

Um zu verstehen, wie nun die anfangs erwähnten Lobes und Hot Spots entstehen, muss man sich daran erinnern, dass keine Galaxie in absolutem Vakuum existiert. Nachdem die Aktivität im Zentrum der Galaxie beginnt, passieren die Jets zunächst durch das interstellare, dann durch das intergalaktische Gas. Die Dichte dieser umgebenden Materie nimmt dabei von etwa einem Wasserstoffatom pro  $\text{cm}^3$  auf etwa einem pro  $\text{m}^3$  ab. Dennoch tritt Reibung auf, das Ende des Jets bewegt sich also erheblich langsamer als das Gas innerhalb des Jets, generell nichtrelativistisch, und das wiederum führt zu einem Stau, einer Energieanhäufung am Ende des Jets – den Hot Spots, die in galaktischen Jets meist einige Tausend Parsec groß

sind (Beobachtungen mehrerer Hot Spots pro Lobe lassen sich durch späte Aufspaltung des Jets erklären). Nach dem Abbremsen in den Hot Spots verteilt sich das Jetmaterial nach relativ kurzer Zeit – etwa 10k bis 1M Jahre – in Richtung Galaxie, bläht also die gigantischen Lobes auf, die in Radiowellen-Bildern auftauchen. Je stärker der Jet, desto ausgeprägter leuchten generell auch die Lobes. Dabei sind sie nur Teil einer weit größeren Blase, des eiförmigen Kokon, dessen Entwicklung einerseits vom Vordringen der Hot Spots, andererseits von Ausdehnung auf Grund des Druckunterschiedes zum intergalaktischen Medium geprägt ist. Diese Entwicklung konnte übrigens schon quasi in Echtzeit beobachtet werden. Astronomen haben den Lebenszyklus eines Röntgen-emittierenden Jets in unserer Galaxie über Jahre hinweg aufgezeichnet (XTE J1550-564). Der Jet bewegte sich jahrelang mit beinahe Lichtgeschwindigkeit, um dann durch den Widerstand des interstellaren Gases langsamer zu werden und zu verblasen.

### 3.3 Synchrotronstrahlung

Das abrupte, massive Abbremsen des Gases, das sich vorher innerhalb der Jets überschallschnell fortbewegt hat, führt zum Entstehen einer Schockwelle. Bewegt sich der Jet nun durch diese Schockwelle, wandelt sich die geordnete kinetische Energie des strömenden Plasma in zwei Formen: die Energie relativistischer Elektronen, und magnetische Feldenergie. Dies führt zur sogenannten Synchrotronstrahlung der Elektronen.

Als Synchrotronstrahlung bezeichnet man elektromagnetischen Wellen, die tangential zur Bewegungsrichtung von leichten, geladenen, relativistischen Teilchen (z.B. Elektronen oder Positronen) austreten, wenn sie durch ein Magnetfeld abgelenkt werden. Synchrotronstrahlung hat eine Reihe charakteristischer Eigenschaften, unter anderem ein sehr breites, kontinuierliches Spektrum vom Radio- bis tief in den Röntgenbereich. Zudem ist die Strahlung linear polarisiert und zudem zeitlich stark veränderlich. Diese lineare Polarisierung wie auch die typischerweise mit Synchrotronstrahlung verbundene Oszillation und hohe Intensität der Strahlung war bei der Emission von relativistischen Jets festgestellt worden, sodass man annimmt, dass Synchrotronstrahlung für einen Großteil der beobachteten Emission dieser Jets verantwortlich ist.

Auf dem Handzettel findet ihr eine Skizze, wie das Spektrum der Synchrotronstrahlung für einen Jet ungefähr aussieht [...].

Bei niedrigen Frequenzen strahlt der Jet kaum und ist nicht durchsichtig. Mit höheren Frequenzen steigt dann die Helligkeit an, bis sie einen Spitzenwert erreicht. Danach beginnt die Helligkeit wieder abzufallen, der Jet wird durchsichtig. Ab der sehr hohen, sogenannten „break frequency“, wird der Helligkeitsabfall stärker.

Aus den beobachteten Spektren kann man auf den Zustand der Elektronen im Jet schließen, die die Strahlung abgeben. Was man hier nämlich hat, ist eine sogenannte Potenzgesetzverteilung, im Gegensatz zu der Maxwell-Boltzmann-Verteilung, die man in normalen Gasen finden würde. Man erkennt aus dem Spektrum, dass Jets nicht einfach nur heißes Gas sind, sondern dass es einen anderen Beschleunigungsmechanismus geben muss. Das Vorhandensein der Synchrotronstrahlung liefert außerdem einen Beweis für die Existenz der starken Magnetfelder, die zur Erklärung der Entstehung der Jets angenommen werden. (Wer sich näher dafür interessiert, kann die entsprechenden Gleichungen im Skript „Astrophysics from Space“ von Jörn nachschlagen).

[...]

Nicht nur Synchrotronstrahlung kann übrigens die Emission vieler Jets erklären – es wurden auch andere Mechanismen vorgeschlagen. Wenn die Elektronen im Jet sich mit beinahe Lichtgeschwindigkeit vom Quasar entfernen, kommen sie in Kontakt mit der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung aus der frühen heißen Phase unseres Universums. Wenn ein relativistisches Elektron mit einem dieser Hintergrund-Photonen kollidiert, kann das die

Energie des Photons bis rauf in Röntgenbereich erhöhen. Die Leuchtkraft des Jets im Röntgenbereich hängt dabei von der Energie des Elektronenstrahls und der Intensität der Hintergrundstrahlung ab. Die Beobachtung eines äußerst weit entfernten, 12 Milliarden Jahre alten Jets scheint die These zu unterstützen.

## 4. Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit u.a. Beobachtungen

### 4.1 Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit

Es stellte sich heraus, dass die im Radiobereich beobachtbare Feinstruktur von Jets sich oft systematisch von Jahr zu Jahr ändert. Von Zeit zu Zeit erscheinen helle Stellen in diesen Jets, engl. „knots“ oder „blobs“ genannt, die nahe des Kerns entstehen und sich dann nach außen bewegen. Misst man die Geschwindigkeit dieser „blobs“, stellt man fest, dass für einige Jets, auch kleine solche in unserer Galaxie, sie sich mit scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit bewegen. Diese Beobachtung sorgte verständlicherweise zunächst für einige Verwirrung unter Astronomen, sie lässt sich aber relativ einfach erklären als eine Art optische Illusion, die bei Jets auftritt, die sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit auf den Beobachter zubewegen. Das Licht des sich nähernden blobs braucht eine immer kürzere Zeit, um zu uns zu gelangen, während das Licht des Kerns immer gleich lang braucht. Dadurch sieht es für den Beobachter so aus, als bewege sich der Jet in transversaler Richtung überlichtschnell. Jets, die sich nicht im Winkelbereich von  $-90$  bis  $+90^\circ$  zum Beobachter bewegen, sich also vom Beobachter entfernen, erscheinen entsprechend langsamer, da das Licht in diesem Fall einen immer längeren statt kürzeren Weg zurücklegen muss. Das ganze lässt sich auch natürlich mathematisch beschreiben:

[...]

Während man sich bei vielen Jets sicher ist, dass sie sich mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegen, gibt es noch einige theoretische Probleme zu lösen bezüglich der nötigen Energieversorgung oder der Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium, das besonders die schwachen Jets stärker ausbremsen müsste.

### 4.2 Einseitige Jets

Bei der Beobachtung der AGN mit immer besseren Radioteleskopen stellte man fest, dass oft nur ein einzelner Jet vom Kern zu einem Lobe führt, wie im Fall der Galaxie Cygnus A. Woher bezieht nun der andere Lobe seine Energie? Man überlegte, ob es vielleicht doch einen anderen Jet gäbe, der dann allerdings um ein Vielfaches schwächer leuchten müsste, weshalb man ihn noch nicht entdeckt hatte, wofür es allerdings keine zufrieden stellende physikalische Erklärung gab. Man postulierte auch Jets, die periodisch die Richtung wechselten, was aber angesichts der Kontinuität im großen Maßstab ebenso unwahrscheinlich schien. Akzeptiert man, dass sich Jets mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegen, hat man jedoch sogleich die Lösung für dieses weitere Rätsel, einen Effekt, den man relativistisches Beaming nennt, und der sich im Wesentlichen durch zwei Vorgänge erklären lässt.

Zum einen die sogenannte *relativistic aberration*. Wenn sich ein Objekt mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegt, erscheint für den Beobachter die emittierte Strahlung durch relativistische Verzerrung in einem in Bewegungsrichtung gerichteten Kegel konzentriert. Genau dies passiert mit den Photonen, die von einem sich sehr schnell bewegenden *Blob* ausgestrahlt werden. Die Stärke der Richtungsabweichung ist dabei natürlich abhängig vom Geschwindigkeitsunterschied zwischen Objekt und Beobachter. Als nichtrelativistisches Beispiel stellt euch eine Person im Regen vor: Bei Windstille kommt der Regen direkt von oben, wenn sich die Person allerdings bewegt, scheint der Regen in einem spitzen Winkel auf sie zuzukommen.

Der zweite Effekt, der relativistisches Beaming ausmacht, ist die aus der speziellen Relativitätstheorie vielleicht bekannte Zeitdilatation, wie auf dem Handzettel dargestellt. [...] Während Einseitigkeit der Jets als Indiz für relativistische Bewegung dienen kann, ist dieses Kriterium nicht immer anwendbar, wie der Fall der bekannten Galaxie Cygnus A zeigt, die nur einen Jet hat, der sich aber nicht auf uns zubewegt, wie das Aussehen der Radiolobes und der optisch sichtbaren Galaxie selber nahe legen.

Nur der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass stellare Jets in unserer Galaxie beobachtet wurden, die ebenfalls abweichendes Verhalten zeigen: Der Jet, der sich von uns entfernt, ist gelegentlich heller, als der auf uns zukommende. Ob dies daran liegt, dass das schwarze Loch unterschiedliche Energiemengen in beide Richtungen abgibt, oder auf der einen Seite eine besonders dichte interstellare Gaswolke ist, die evtl. Strahlung verschluckt, ist noch nicht bekannt.

### 4.3 Stabilität und Krümmung

Kosmische Jets zeichnen sich durch außerordentliche Stabilität aus. In Extremfällen erreichen sie Längen von Millionen Lichtjahren, wohingegen man erwarten würde, dass sich beim Kontakt mit dem interstellaren oder –galaktischen Medium Turbulenzen bilden müssten. Beim Entlanggleiten zweier Flüssigkeiten kommt es ja normalerweise zu einem Kelvin-Helmholtz-Instabilität genannten Prozess: Kleine Störungen in der Grenzschicht (Scherschicht) wachsen dabei an. In der Tat gibt es für das Verhalten von Jets noch keine befriedigendes Modell, erste Computersimulationen deuten aber an, dass die hohen Geschwindigkeiten und Dichten allein eventuell allein ausreichen könnten, die Integrität eines Jets zu wahren.

Viele Jets weisen Kurven auf, die in einigen Fällen tatsächlich auf „herkömmliche“ Turbulenzen zurückzuführen sein könnten. Allerdings führt oftmals auch die schnelle Bewegung der Jeterzeugenden Galaxie durch das intergalaktische Medium zu einer erheblichen Krümmung der Jets, sobald sie das interstellare Medium verlassen. Dieses Phänomen nennt man passenderweise *radio trails*, wegen der charakteristischen radioemittierenden „Schwänze“, die sich bei hoher Auflösung als gebogene Jets entpuppen. [...]

## 5. Ausblick auf zukünftige Forschung

Damit naht auch schon das Ende des Vortrags. Wir sehen also, dass wahrscheinlich die meisten AGN Jets produzieren, darüber hinaus auch Binärsysteme und gar junge Sterne. Das Phänomen der Jets ist daher beträchtlich universeller, als man noch vor einigen Jahren dachte – im Prinzip finden wir es im gesamten Bereich, in dem Akkretion auf ein kompaktes Objekt stattfindet.

Umso erstaunlicher, wie beschränkt unsere Erkenntnisse über die Jets noch sind. Allgemeine physikalische Eigenschaften, wie z.B. Dichte, der herrschende Druck, aber selbst auch die drei grundlegenden Parameter eines Jets, Massenausfluß ( $\dot{M}_{\text{jet}}$ ), Leistung und Geschwindigkeit, sind oft nur sehr ungenau bestimmt. Bestenfalls möglich sind grobe Schätzungen, die stark von den verwendeten Modellen abhängen. Allerdings besteht mittlerweile der Entdeckung von Jets in Seyfertgalaxien die Möglichkeit, wichtige Eigenschaften durch spektroskopische Beobachtungen ableiten zu können. Somit könnte zumindest ein Teil der Fragen in Zukunft mit größerer Genauigkeit beantwortet werden.

Rätsel, die dabei noch geklärt werden müssen, betreffen unter anderem die Unterschiede zwischen den Jets selber. Warum gibt es radio-laute und radio-schwache Jets? Warum sind Quasarjets relativistisch, während bislang noch kein eindeutiges Anzeichen für relativistische Bewegungen in den Jets von Seyfertgalaxien gefunden haben? Auch die Vorgänge in den

Akkretionsscheiben, die zur Ausbildung von Jets führen, sind noch weitgehend unklar. Von der immer besseren Auflösung in der Röntgenastronomie erhofft man sich jedoch in Zukunft konkrete Daten über die Vorgänge in den galaktischen Kernen. Verstünde man mehr über die Jets, ließen sich nämlich auch genauere Rückschlüsse über die Objekte treffen, die zu ihrer Entstehung führen, beispielsweise über stellare schwarzer Löcher und ihre Masse, aber auch über andere galaktische Phänomene, die mit Jets zusammenhängen könnten, wie beispielsweise Gammastrahlen-Ausbrüche.

Außerdem eröffnet die Entdeckung von nahen Mikroquasaren neue Perspektiven für weitergehende Forschung, da dort wie erwähnt die Vorgänge weitestgehend analog zu Jets aus AGN, nur quasi in Zeitraffer beobachtet werden können.

Fürs erste bleiben Jets jedoch ein zwar verbreitetes, aber dennoch recht mysteriöses Phänomen, das Astrophysikern viele Rätsel aufgibt.