

Quasare und ihre Jets

Von Max Camenzind

Am 5. Februar 1963 enträtselte Maarten Schmidt am Caltech das bizarre Spektrum des Objektes 273 aus dem dritten Cambrider Radiokatalog. Er identifizierte vier Emissionslinien als Balmer-Linien des Wasserstoffs unter der Voraussetzung, dass sie um 15,8 Prozent nach rot verschoben sind. Dies entspricht einer Fluchtgeschwindigkeit von 47 000 Kilometern pro Sekunde und damit nach der Hubble-Interpretation des expandierenden Universums einer Distanz von rund drei Milliarden Lichtjahren.

Quasare sind Zentren von Galaxien

Mit 3C 273 war eine neue Kategorie von extragalaktischen Objekten gefunden worden, die wegen ihres sternartigen optischen Erscheinungsbildes den Namen *quasi-stellare Radioquellen* oder *Quasare* erhielten. In den letzten 22 Jahren haben wir uns an ihre grossen Distanzen gewöhnt und uns damit abgefunden, dass die meisten Quasare sogar eine Rotverschiebung um 2 aufweisen; einige wenige dieser Objekte weisen eine Rotverschiebung über 3 auf, das Maximum liegt heute bei 3,78 (entsprechend einer Distanz von 9,6 Milliarden Lichtjahren).

Schon bald nach ihrer Entdeckung kam die Vermutung auf, dass es sich bei Quasaren nur um die sehr hellen Kerne von ansonsten norma-

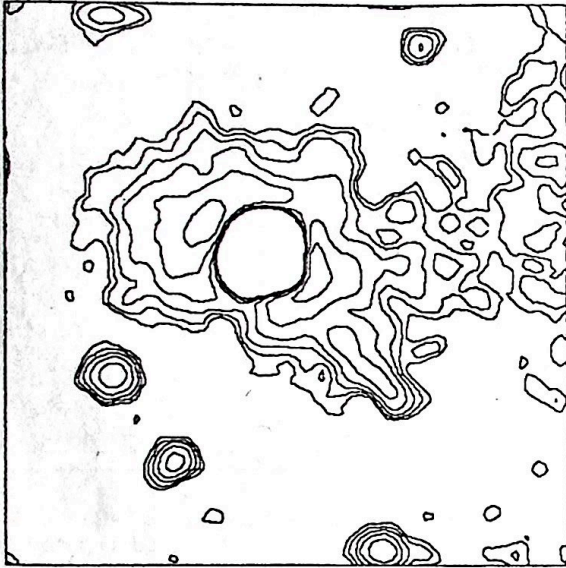


Abb. 1. CCD-Verarbeitung der optischen Emission um den Quasar 3C 273 (Lowell Observatorium). Der stellare Quasarkern wurde mit dem Computer subtrahiert (zentrale Scheibe von 6 Bogensekunden Durchmesser). Die einzelnen Konturen unterscheiden sich in 0,5 Grössenklassen. Das ganze Feld misst 57 Bogensekunden.

len Galaxien handelt. Die sternartigen Zentren würden dabei ihre Muttergalaxie mit ihrer viel geringeren Flächenhelligkeit hoffnungslos überstrahlen. Der Beweis für diese Vermutung ist nun tatsächlich in den letzten Jahren gelungen dank der Entwicklung von sehr empfindlichen CCD-Detektoren. Zunächst fand man bei vielen nahen Quasaren ausgedehnte Emissionsgebiete, deren Struktur auf eine Galaxie schliessen lässt. Dass es sich dabei tatsächlich um Sternenlicht von einer Galaxie handelt, konnte erst in den letzten drei Jahren schlüssig gezeigt werden. In diesen ausgedehnten Emissionsgebieten um die Quasare entdeckte man die typischen Absorptionslinien einer Galaxie. Entscheidend ist dabei, dass die Rotverschiebung dieser Absorptionslinien identisch mit der Rotverschiebung der Emissionslinien des Quasarkerns ist.

Optische Untersuchungen der letzten Jahre zeigen zudem, dass sich Quasare meistens in einem Gebiet mit grosser Galaxiedichte befinden. Dies unterstützt die Hypothese, dass die Quasarakktivität wahrscheinlich durch eine Kollision zweier Galaxien angeregt wird. Als Folge einer solchen Kollision fliesst Gas zum Zentrum der massiveren Galaxie, wo sich nun entweder ein rasch rotierender *supermassiver Stern* bildet oder das Gas auf ein bereits existierendes *supermassives Schwarzes Loch* einströmt. Es ist nun Timothy Heckman von der Universität Maryland und seinen Mitarbeitern gelungen, in der Nähe von 15 Quasaren normale Galaxien auszumachen, die wiederum dieselbe Rotverschiebung wie die Quasare haben. Nahe bedeutet dabei, dass die Distanz zwischen Quasar und Galaxie nicht über 150 000 Lichtjahre betragen soll. Die relative Geschwindigkeit zwischen den beiden Objekten ist dabei kleiner als 1000 km pro Sekunde. Stehen die beiden Galaxien aber tatsächlich in Wechselwirkung, so darf ihre relative Geschwindigkeit die typische Rotationsgeschwindigkeit einer Galaxie von einigen hundert km pro Sekunde nicht übersteigen. Diese Limite liegt im Augenblick noch jenseits der Messgenauigkeit.

3C 273 und sein Jet

Auch die Einbettung des ersten Quasars 3C 273 in seine Muttergalaxie konnte nachge-

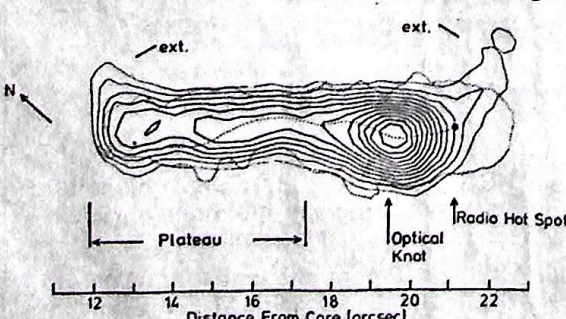


Abb. 2. Eine optimale Karte des Jets von 3C 273 bei 6100 Angström (Röser und Meisenheimer, MPI für Astronomie, Heidelberg). Die punktierte Umrandung begrenzt die Radio-Emission bei einer Wellenlänge von 6 cm (VLA). Der Punkt kennzeichnet das Maximum der Radiostrahlung.

wiesen werden. Abbildung 1 zeigt die Struktur der Isophoten der ausgedehnten Emission um den eigentlichen Quasarkern. In diesem CCD-Bild hat der Computer die Emission vom Quasarkern subtrahiert; die Verschmierung des Bildes am rechten Rand wird durch einen Stern verursacht. Der Quasar wird offensichtlich von einer *elliptischen Galaxie* umgeben, deren Leuchtkraft zwanzigmal stärker ist als die unserer Galaxie, aber immer noch zwanzigmal schwächer als die des Quasars. Damit gehört diese Galaxie zu den massivsten elliptischen Galaxien, wie sie nur als Zentren in Galaxienhaufen gefunden werden. Auch die Galaxie, die zu 3C 273 gehört, ist offenbar Mitglied eines kleinen Galaxienhaufens.

Bereits 1963 entdeckte Maarten Schmidt bei 3C 273 ein kleines «Anhängsel» in SW-Richtung mit einer Länge von 20 Bogensekunden. Dieser optische «Jet» ist zugleich als Radioquelle bekannt. In Abbildung 1 ist dieses Gebilde ebenfalls deutlich zu sehen sowie eine leichte Andeutung eines *Gegenjets* in NE-Richtung vom Kern. Die Heidelberger Astronomen Röser und Meisenheimer haben nun diesen optischen «Jet» von 3C 273 mit ihrer CCD-Kamera genauer analysiert (vgl. Abb. 2). Als Vergleich ist über die optische Karte eine Radiokarte bei 6 cm Wellenlänge gelegt (punktierte Linien). Der «Jet» besteht danach aus mindestens drei verschiedenen Gebieten, die sich wesentlich in den Eigenschaften der optischen Strahlung unterscheiden. Im Plateau bleibt die Strahlung längs dem Jet konstant und ist nur schwach polarisiert. Dann folgt der optische Knoten, dessen Strahlung stark polarisiert ist, während die Radiostrahlung erst später ihr Maximum im sogenannten *Hot spot* erreicht. Der optische Knoten hat eine Distanz von mindestens 200 000 Lichtjahren zum Kern.

Diese Karte vom «Jet» in 3C 273 erinnert sehr stark an Strukturen, die von den *Radiogalaxien* her bekannt sind. Viele dieser Objekte zeigen Radio-Jets, das heisst längliche Emissionsgebiete, die zwischen einem nichtauflösbaren Kern und dem diffusen Emissionsgebiet der Radio-Lobes liegen. Radio-Jets sind bis heute bei über 125 Radioquellen gefunden worden, insbesondere kürzlich auch bei vielen starken Quasaren. So zeigt etwa der Quasar 4C 41.21 genau diese drei Strukturen (vgl. Abb. 3). Bei vielen Quasaren konnten die Jets selber noch nicht nachgewiesen werden, jedoch Emission aus dem Quasarkern und von Radio-Lobes. Aus Erfahrung mit den Radiogalaxien ist zu erwarten, dass der Nachweis der Jets nur eine Frage der Empfindlichkeit des Instrumentes ist, wie das Beispiel *Cygnus A* zeigt. Letztere ist die hellste extragalaktische Radioquelle, ihre Radio-Lobes wurden vor 30 Jahren entdeckt und befinden sich in einer Entfernung von 200 000 Lichtjahren vom Radiokern. Auch dieser Radiokern liegt im Zentrum einer riesigen *elliptischen Galaxie*, die in einem Galaxienhaufen liegt. Die Suche nach den Jets blieb jedoch bis vor einigen Monaten erfolglos. Beobachter am VLA-Radioteleskop bei Socorro (US-Bundesstaat New Mexico) haben nun den westlichen Jet aufgespürt. Die genaue Analyse ergab, dass der Jet im innern Bereich sehr gut kollimiert ist und sich beim Eintreten in den Radio-Lobe leicht öffnet. Interessant ist auch die erstmalige Beobachtung, dass der Radio-Lobe in *einzelne Filamente* zerfällt, die bis zu 60 000 Lichtjahre lang sind.

Im allgemeinen ist die Radiostrahlung bei den beobachteten Quasaren deutlich intensiver als bei Radiogalaxien, obschon sie sich in der Länge der Jets nicht gross unterscheiden. Man darf aber nicht vergessen, dass der grösste Teil der quasi-stellaren Objekte im Vergleich zur optischen Strahlung nur sehr wenig Radioemission zeigt. Diese Objekte werden häufig als *radio-ruhig* bezeichnet. Beobachtungen mit dem VLA haben nun aber ergeben, dass auch sie Jets besitzen, die jedoch etwa um einen Faktor 10 kürzer sind als bei ihren radio-lauten Kollegen. Sie erinnern sehr stark an Strukturen, die man bei *Seyfert-Galaxien* gefunden hat, also Spiralgalaxien, mit ungewöhnlich hellen, aktiven Kernen.

Computer-Jets

Jets müssen eine Konsequenz aus der Aktivität des Quasarkerns sein. In ihnen fliesst jene Energie, die letzten Endes in den diffusen äusseren Gebieten der Radio-Lobes deponiert wird. Die meiste Energie geht offensichtlich in relativistische Elektronen und Magnetfelder und steht somit zur Erzeugung von *Synchrotronstrahlung* zur Verfügung. Jets können entweder im Labor untersucht werden oder, was billiger ist, auf dem Computer simuliert werden. Wir stellen uns dabei vor, die zentrale Maschine im Quasarkern habe die Fähigkeit, einen kollimierten Teilchenstrahl herzustellen, der aus *Protonen* und *Elektronen* bestehe. Wie Beobachtungen mit den grössten Radio-Interferometern zeigen, muss diese Kollimation bereits auf der Skala von einigen Lichtjahren erfolgen. Das Material dieser Strahlen stammt wahrscheinlich aus äusserst intensiven Winden, die durch die rasche Rotation des zentralen Objektes ange-

Standbild-Kamera mit Floppy-Disc

G. Die ursprünglich für den Konsumbereich vorgesehenen elektronischen Standbildkameras des «Mavica»-Typs werden voraussichtlich gegen Ende dieses Jahres oder 1986 für *professionelle Anwendungen* zur Verfügung stehen. Entsprechende Entwicklungsarbeiten gibt es bei Sony, Canon, Hitachi, Matsushita und Copal (alle Japan). Die Kameras sind mit CCD-Arrays als Aufnahmeelemente bestückt und benutzen einheitlich eine Miniatur-Diskette von etwas weniger als 5 Zentimetern Durchmesser. Pro Diskette können 25 TV-Vollbilder oder (mit verminderter Auflösung) 50 Halbbilder gespeichert werden. Jedem Bild ist je eine Spur zugeordnet (360 Grad Drehung pro Bild). Der Träger entspricht einer Quasinorm, der sich bis jetzt rund 30 Firmen angeschlossen haben.

Die mit Prototypen bis jetzt erreichte Auflösung (mit der japanisch/amerikanischen TV-Norm NTSC) beträgt 350 Zeilen, also mehr als mit Videorecordern erzielt wird. Dieser Wert liefert im Vergleich zu *Photokameras* aber immer noch eine ungenügende Auflösung. Sony soll derzeit ein CCD-Array in der Entwicklung haben, mit dem 700 Zeilen erzielt werden können. Die dazu notwendige VLSI-Technik gestattet heute erst Sonderanwendungen in der industriellen Bildaufnahme. *Polaroid*, die ebenfalls Entwicklungsarbeiten im neuen Gebiet durchführt, soll angeblich CCD-Arrays in Galliumarsenid-IC-Technik favorisieren; auch hier ist das Ziel eine erhöhte Bildauflösung. Experimentiert wird darüber hinaus ebenfalls noch in der Bildwiedergabe ab Floppy-Träger. Sony und Canon hatten im letzten Jahr Feldversuche mit Proto-

typ-Kameras durchgeführt. Dabei wurden die ab Disketten-Laufwerk gewonnenen Signale über normale Telefonleitungen übertragen. Diese Versuche sollten die Brauchbarkeit für die aktuelle Bildberichterstattung nachweisen, und sie sind offenbar erfolgreich verlaufen.

Im Normalfall sollen die Bildsignale jedoch ab Mini-Disketten-Laufwerk auf einen TV-Monitor oder einen normalen TV-Empfänger übertragen werden. Auch dazu gab es bereits öffentliche Demonstrationen, mit teilweise noch unbefriedigender Qualität. Mehr Gewicht legen die an den Arbeiten beteiligten Firmen auf die Entwicklung von *Farbbilddruckern*, die Hardcopy-Bilder in ausreichender Qualität und bei tragbaren Kosten liefern können. Bis jetzt wurden bei Versuchen und Demonstrationen durchgehend *Thermodrucker*, überwiegend nur für Schwarzweiss, verwendet. Es handelt sich um Geräte, wie sie vereinzelt auch in Europa schon für TV-Empfänger-Einbau oder als Zusatzgeräte vorgeführt wurden. Sony verfügt mit dem «Mavigraph» über einen Thermofarbdruker, dessen Raster ungefähr an grobe Zeitungsbildqualität heranreicht. Polaroid arbeitet an der Entwicklung eines «Hybriddruckers». Bei diesen Geräten soll das bekannte (chemisch reagierende) Sofortbildmaterial benutzt werden. Zum Schreiben des Bildes sollen LED- oder GaAs-Laserdioden-Arrays benutzt werden. *Fuji* versucht den umgekehrten Weg zu gehen und untersucht die Möglichkeit, Photokameras bisheriger Art einzusetzen. Erst nach der üblichen chemischen Filmbearbeitung sollen die Bilder auf Disketten der neuen Art übertragen werden.

trieben und anschliessend durch eine zentrale galaktische Scheibe kollimiert werden. Trifft nun ein solcher gebündelter Teilchenstrahl auf die Gasatmosphäre des Galaxienhaufens, in dem sich der Quasar mit seiner Muttergalaxie befindet, so treibt er einen gewaltigen Bugschock vor sich her und umgibt sich gleichzeitig mit einer Art *Kokon*, worin das Jet-Material wieder zurückfliesst. In den bisherigen Computersimulationen, die am *Max-Planck-Institut für Astrophysik* in München durchgeführt wurden, konnte man die Magnetfelder noch nicht berücksichtigen. Erst durch die Präsenz dieser Magnetfelder wird der Jet aber sichtbar. Man erwartet jedoch, dass Synchrotronstrahlung überall dort intensiv auftritt, wo die Druckma-

grösser als jede Gasatmosphäre, so dass der Jet über weite Strecken einfach ballistisch fliegt, ohne Materie zum Strahlen anzuregen. Erst wenn die Dichte in der Gasatmosphäre zur Strahldichte vergleichbar wird, kann sich ein starker Kokon ausbilden.

Warum sehen wir bei 3C 273 keinen Gegenjet? Dies hängt mit der endlichen Laufzeit des Lichtes zusammen. Wenn der Kopf des Jets auf uns zuast, so ergibt sich eine Zeitverzögerung zwischen der Strahlung des auf uns zulaufenden Kopfes und des von uns weglaufenden Kopfes. Falls diese Kopfgeschwindigkeit bei 3C 273 etwa ein Fünftel der Lichtgeschwindigkeit beträgt, so hat der Gegenkopf zum Zeitpunkt, wo wir ihn sehen, jenen äusseren Bereich der Galaxie noch nicht erreicht, der ihn erst zum Leuchten bringt. Dies würde darauf hindeuten, dass der Quasar 3C 273 noch ein *junges Objekt* ist mit einem Alter unter 4 Millionen Jahren. Gelingt es, den Gegenkopf tatsächlich aufzuspüren, so eröffnet dies eine einmalige Gelegenheit, die Kopfgeschwindigkeit zu bestimmen. Im Vergleich zu 3C 273 ist Cygnus A schon 6 Millionen Jahre alt und hat einen Quasarkern, der schon beträchtlich in die Jahre gekommen ist.

Das Geschwindigkeitsdilemma

Die grosse Geschwindigkeit des Kopfes in 3C 273 verlangt natürlich eine noch grössere Geschwindigkeit für den Jet, damit der Nachschub die Front einholen kann. Bis heute ist es jedoch nicht gelungen, Jetgeschwindigkeiten zu messen. Dazu müsste man Emissionslinien von Gaswolken erfassen, die im Jet-Kanal mit-schwimmen. Verschiedene indirekte Abschätzungen an den viel gemässigten, aber besser bekannten Radiogalaxien führen immer zu Jetgeschwindigkeiten von 100 bis 50 000 Kilometern pro Sekunde. Gegen eine solche subrelativistische Geschwindigkeit spricht jedoch das Phänomen der Ausdehnung mit *scheinbarer Überlichtgeschwindigkeit* von Emissionsknoten im innersten Bereich des Jets von 3C 273 (dass heisst auf den ersten tausend Lichtjahren). Dieses Phänomen ist bei über zehn weiteren starken Quasaren auch gefunden worden. Da der Jet von 3C 273 fast auf uns zuweist, können relativistische Effekte zu einer scheinbaren transversalen Überlichtexpansion führen, falls die beobachteten Emissionsknoten mit annähernd Lichtgeschwindigkeit im Jet-Kanal fliegen. Dieses Phänomen wird häufig als starkes Argument zugunsten einer hoch-relativistischen Jetgeschwindigkeit betrachtet. Man bedenke jedoch, dass die beobachtete Knotengeschwindigkeit nicht mit der Jetgeschwindigkeit identisch sein muss, falls es sich bei diesen Emissionsknoten nur um *Sekundäreffekte* handelt, die um Beispiel direkt von der zentralen Quelle ausgelöst werden.

Viel realistischer erscheint heute eine Kopplung der Jetgeschwindigkeit mit der *Stärke des Quasarkerns*. Da 3C 273 zu den stärksten Vertretern dieser Gattung gehört, ist es nicht verwunderlich, dass er auch den schnellsten Jet hat; 3C 273 kann also sicher nicht als Mass aller Dinge gelten. Wie die Beobachtungen zeigen, dürfte der Jet in den stärksten Quellen mit grosser Mach-Zahl fließen und zu intensiven Hot Spots führen, wann immer auf eine relativ dichte Gaswolke trifft. Bei schwächeren Quellen können diese Jets bereits durch Gaswolken in der Galaxie gestoppt werden. Dies dürfte fast immer bei *Spiralgalaxien* geschehen, die im Zentrum über genügendlichte Molekularwolken verfügen. Für den Beweis dieser Hypothese ist jedoch noch eine Menge Beobachtungsmaterial erforderlich.

Adresse des Verfassers: Universität Zürich, Institut für Theoretische Physik, 8001 Zürich.

Verantwortlich für «Forschung und Technik»: Lucien Trueb, Herbert Cahn

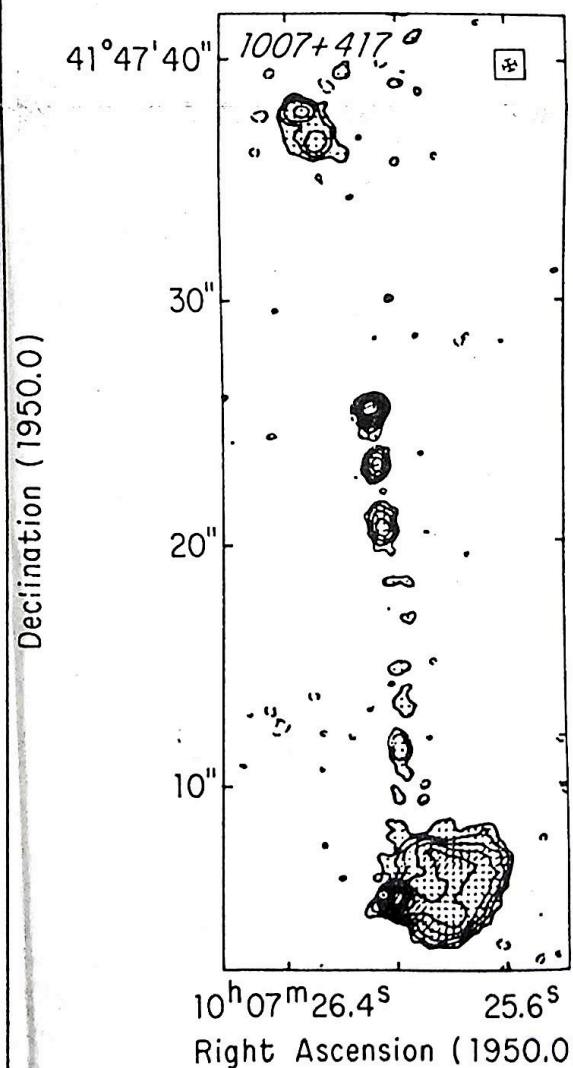


Abb. 3. Eine Radiokarte des Quasars 4C 41.21 (mit Rotverschiebung 0,613), beobachtet bei einer Wellenlänge von 6 cm und mit einer Auflösung von 0,5 Bogensekunden (VLA). Der zentrale Knoten fällt mit dem Quasarkern zusammen. Der südliche Jet hat dann eine Länge von 450 000 Lichtjahren.

xima liegen, dass heisst in den Knoten des Jets, im Kokon und im Bugschock.

Polarisationsmessungen der Radiostrahlung am Jet von 3C 273 ergeben ein Magnetfeld parallel zum Jet im Plateau, aber senkrecht zum Jet im Radio Hot Spot. Das Magnetfeld dreht seine Richtung im optischen Knoten. Dies deutet darauf hin, dass im optischen Knoten die kinetische Energie des Jets in Beschleunigung von relativistischen Teilchen umgesetzt wird und dass durch das Umlenken des Flusses das Magnetfeld ebenfalls umgebogen wird. Hier finden sich die schnellsten Elektronen und die stärksten Magnetfelder, was zu einer sehr intensiven optischen *Synchrotronstrahlung* führt. Das Plateau repräsentiert dann den Kokon. Die Ausbildung eines Kokons hängt vom Verhältnis der Dichte im Strahl zur Dichte in der Gasatmosphäre ab. Im innern Bereich der elliptischen Galaxie von 3C 273 und Cygnus A ist die Strahldichte viel