

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizer Ingenieur und Architekt
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	99 (1981)
<b>Heft:</b>	37
<b>Artikel:</b>	Galaxien mit Düsenstrahlen: Computersimulation von Jets in astronomischen Radioquellen
<b>Autor:</b>	Breuer, Reinhard
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-74553">https://doi.org/10.5169/seals-74553</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 13.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

rodot erwähnten Goldgruben auszumachen. Die eigentliche Überraschung bildete jedoch die Entdeckung der *Silbergrube von Agios Sostis* im Nordosten der Insel Sifnos. Neben den Bergbauaktivitäten in archaischer Zeit, die aufgrund der Herodot-Texte zu erwarten waren, ergaben die Analysen der Proben hier noch wesentlich weiter zurückliegende Bergbauunternehmungen.

Auf der Sohle einer Galerie wurden unter einem stark von Kalkablagerungen überzogenen Versatz Holzkohlereste und zwei Fragmente von Keramikgefäßen entdeckt, die auf ein Alter zwischen etwa 2600 bis 3000 Jahre vor Christi Geburt datiert wurden, also fast 5000 Jahre alt sind. Die Keramikfragmente liessen sich auch archäologisch

datieren und mussten der frühen Bronzezeit zugeordnet werden, die im ägäischen Raum auf die erste Hälfte des 3. vorchristlichen Jahrtausends fällt. Bei anderen, in einer Abraumhalde gefundenen Scherben von Keramikgefäßen ist auf dem Boden der Abdruck eines Mattenflechtwerks zu erkennen, ein typisches Merkmal der sogenannten frühkykladischen Zeit.

Damit wurde der *bisher älteste Blei- und Silber-Bergbau überhaupt entdeckt* und nachgewiesen, und die Kykladenkultur, die weit vor der archaisch-griechischen Zeit liegt, erscheint in neuem Licht. Nicht länger lässt sich die Auffassung halten, die hier gefundenen Silbergegenstände jener Epoche seien lediglich aus Kleinasien importiert worden. Es mag sein, dass die Technik der

Edelmetallverhüttung – insbesondere die Technik der *Kuppelation*, bei der aus der Metallschmelze die unedlen Metalle wie Blei durch Aufblasen von Luft zur Oxidation und damit zur Abscheidung gebracht werden –, von aussen kam und nicht hier erfunden wurde. Doch jedenfalls gab es zu jener frühen Bronzezeit im bisher eher durch seine modern anmutenden *Marmorstatuetten berühmten Kulturkreis der Kykladen* bereits einen ausgedehnten Bergbau und dazugehörige Verhüttungsanlagen. Hier stehen wir vor den Anfängen der Blei- und Silber-Metallurgie schlechthin, zumindest in Europa. In unseren Breiten herrschte damals noch «finstere» Steinzeit.

Robert Gerwin, München

## Galaxien mit Düsenstrahlen

### Computersimulation von Jets in astronomischen Radioquellen

Ein besonderer Typ von «himmlischen» Radioquellen beschäftigt die Astrophysiker: Quellen, die aus zwei Komponenten bestehen und die ihre Entstehung einem Düsenstrom («Jet») verdanken, der von einer zentralen Galaxie aus in zwei entgegengesetzte Richtungen oft mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausgeschleudert wird, und zwar seit Jahrmillionen. Dem Verständnis des *Jetphänomens in Radiodoppelquellen*, aber auch in anderen astronomischen Systemen, ist man jetzt einen Schritt näher gekommen. Wissenschaftlern des *Max-Planck-Instituts für Astrophysik* in Garching bei München ist jetzt eine *Computersimulation* der Jets geglückt, die bis in Details die Beobachtungen der Radioastronomen wiedergibt. Darüber hinaus ist damit auch geklärt, wie es den Jets gelingt, ihre Düsenströmung über fast intergalaktische Entfernung hinweg aufrechtzuerhalten.

Die grösste bekannte Radiogalaxie dieser Art trägt den Namen *Cygnus A*, ein *Radiodoppelnebel* in 560 Lichtjahren Entfernung im Sternbild des Schwans. In Cygnus A haben die beiden Radiokomponenten einen Abstand, der den Durchmesser der Milchstrasse um das Zehnfache übertrifft.

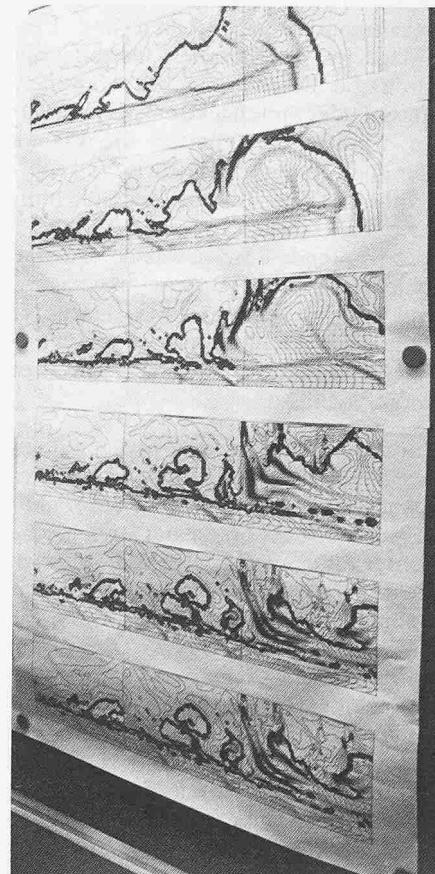
Jets treten aber nicht nur in Radiogalaxien auf. Man beobachtet sie in *Doppelsternen*, kennt sie aber vor allem als *Kondensstreifen aus den Düsen der Flugzeuge*; auch der Wasserstrahl aus einem Gartenschlauch ist ein simpler Düsenstrom. Deshalb sind die von Dr.

*Michael Norman* und Dr. *Karl-Heinz Winkler* in Zusammenarbeit mit Prof. *Larry Smarr* von der *Universität Illinois*, Urbana/USA, erzielten Ergebnisse über die Astrophysik hinaus für die Erforschung von Strömungen von allgemeiner Bedeutung.

Das Problem mit den Jets war bisher, dass man nicht wusste, warum sie in der im Weltraum vorgefundenen Grösse stabil sind oder nicht. Im Fall ihrer Instabilität sollten sie sich nämlich rasch wieder auflösen. Sobald das Zentrum einer galaktischen Sternansammlung einen Düsenstrom heissen Gases aussstoss, schiebt er sich zunächst ein Stück in das intergalaktische Gas hinein. Sehr rasch aber versucht dieses Gas den Jet durch seitliche Einbuchtungen abzuschüren: Wie mit «Elefantenrüsseln» sollte es in den geordneten Düsenstrom eindringen und ihn in kleine Blasen auflösen. Dieser Auffassung widersprachen im Jahre 1974 erstmals die britischen Astrophysiker *Roger Blandford* und *Martin Rees*: «Wenn die zentrale Energieversorgung (der Jets) aufrechterhalten wird, ist es wahrscheinlicher, dass ein kontinuierlicher (Jet-)Strom entsteht als nur eine Reihe von Blasen.»

### Stosswellen im Doppelauspuff

Was statt dessen geschehen solle, so *Blandford* und *Rees*, sei der gleiche Effekt wie in einer sogenannten *Laval-*



Darstellungen des «Computerexperimentes» eines galaktischen Düsenstrahls

*Düse*: Ein Gas, das durch eine sich zunächst verengende, dann wieder erweiterte Düse strömt, beschleunigt sich dabei von Unterschall- auf Überschallgeschwindigkeit. Von Überschallgeschwindigkeiten ist aber bekannt, dass sie stabilisierend auf Strömungen wirken. Das passiere nun auch im Herzen der zentralen Galaxie. Ein nicht näher bekanntes Kraftwerk im Kern der Galaxie stossen mit grosser Geschwindigkeit heißes Gas aus. Dieses bahne sich

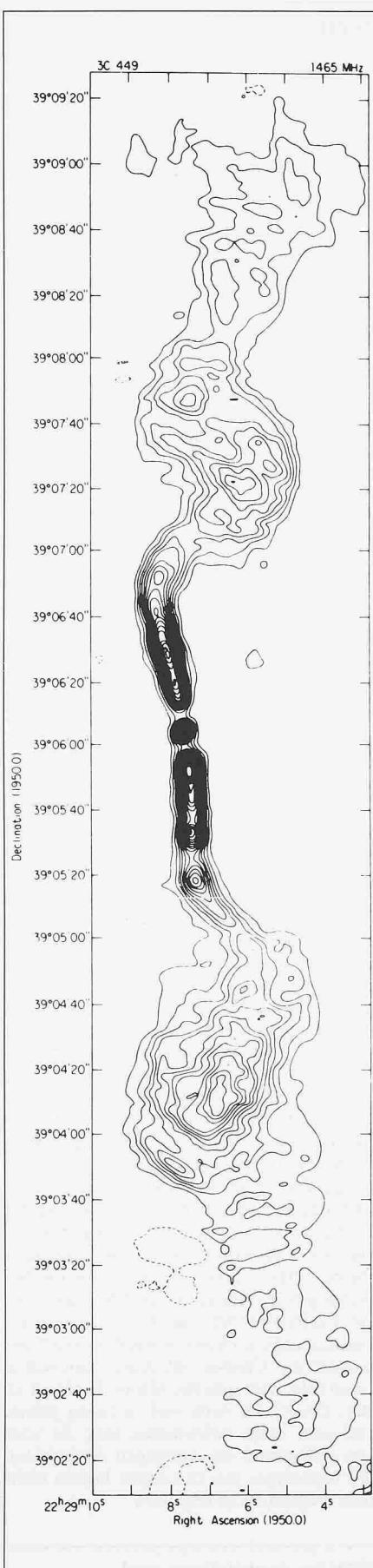
einen engen Kanal entlang der Drehachse der Galaxie – symmetrisch nach oben und unten. Deshalb nannten *Blandford* und *Rees* dies auch ihr «*Doppelauspuffmodell*». Dann komme der Laval-Düsen-Effekt. Der Kanal verenge sich zunächst und verbreitere sich danach. An dieser Stelle durchbreche der Gasstrom die Schallmauer. Es entstehe eine *Überschall-Jetströmung*, die sich stabil über lange Strecken durch intergalaktisches Gas dränge. An Kopf und Seiten des Jetkanals entstünden dabei *Stosswellen*, in denen die beobachtete Radiostrahlung erzeugt würde.

All diese Aussagen blieben jedoch sieben Jahre lang nur ungenaue Abschätzungen, bis sich vor kurzem ein Wissenschaftler-Team des Garchinger Instituts die Aufgabe stellte, die Ideen von *Blandford* und *Rees* auf dem Computer zu überprüfen. Sie stellten sich zwei Fragen:

- Wie entsteht ein galaktischer Jet?
- Wie breitet sich ein solcher Jet aus und behält dabei doch seine Form?

Um ganz sicher zu gehen, dass die *Blandford/Rees*-Ideen richtig seien, näherten sich die drei Astrophysiker dem Problem auf ganz irdische Weise. Sie versuchten erst einmal, einen ganz normalen Überschalldüsenstrom, wie er beim Austritt aus einem Düsentriebwerk entsteht, «auszurechnen». Die Laborexperimente dazu lagen längst vor. Schon 1889 hatte *Ernst Mach* in Wien Düsenphänomene erstmals photographiert. Trotzdem war auch dieses – einfacher – Problem für eine Computerbehandlung erst jetzt reif geworden. Zwei Umstände trafen im Juni 1981 zusammen. Einmal hatte die Max-Planck-Gesellschaft den schnellsten Computer der Welt in Garching installiert, eine sogenannte CRAY-1. Statt sonst notwendiger 50 Stunden Rechenzeit genügten auf der CRAY-1 zwei bis drei Stunden. Zum anderen brachte *Michael Norman*, der vorher im amerikanischen *Lawrence Livermore Laboratory* gearbeitet hatte, von dort die nötigen Tricks mit, mit denen sich für den Computer bislang unverdauliche Aspekte des Problems numerisch «kleinkriegen» liessen. Der Testfall erwies sich als Erfolg: Die Berechnungen lieferten Bilder von Düsenströmungen, die praktisch deckungsgleich mit den Photos der Überschallströmung im Labor waren.

Von da war der Sprung zur galaktischen Düse nicht mehr sehr gross. Als einziger Zusatz musste noch *Schwerkraft* und *Rotation* einer Galaxie mit berücksichtigt werden, in der die Jets entstehen sollten. In das galaktische Zentrum wurde nun – bei der Simulation dieser Vorgänge im Computer – Energie hin-



Galaxien mit Düsenströmungen wurden schon lange von Radioastronomen beobachtet. Das mit dem neuen «Very large Array» in Neumexiko – ein aus insgesamt 27 Einzelantennen von je 25 Meter Durchmesser bestehendes Radioteleskop – gemachte Bild zeigt den «Doppelauspuff» der Galaxie 3C 49 bei 1,4 Gigahertz Radiofrequenz (21 Zentimeter Wellenlänge)

eingepumpt. Die Doppeljets brachen programmgemäß entlang der Drehachse in das intergalaktische Gas aus und erreichten rasch Überschallgeschwindigkeit. Wie in einem Film, der allerdings Bild für Bild errechnet wurde, konnten die Wissenschaftler sogar verfolgen, was mit den «Elefantenrüsseln» geschah, die in der Tat den Jet bedrängten. Sie wurden einfach wieder nach aussen gedrückt. Die Präzision dieser Rechnungen ist bereits so gross, dass sie mit wirklichen Laborversuchen vergleichbar werden. «Wir machen hier Computer-Experimente wie andere Physiker ihre Versuche im Labor», betonen die Astrophysiker in Garching.

## Düsenstrom mit Appolloeffekt

Der zweite, noch zu klärende Punkt betraf die *Formstabilität* der Jets. Wie kam es, dass sie jahrmillionenlang ihre charakteristische Form beibehalten konnten, obwohl sie sich doch ständig einen Weg durch das intergalaktische Medium bahnen mussten? Am Vorderende des Jets jagt eine halbrunde Stossfront mit Mach 3 bis 6, also drei- bis sechsfacher Schallgeschwindigkeit, durch das intergalaktische Gas. Unmittelbar dahinter, bereits innerhalb des länglichen Jetkanals, bilden sich wirbelförmige Tiefdruckgebiete – «Hurrikane» –, die in einen gleichmässigen Mantel übergehen, der schliesslich den ganzen Jet einhüllt. In dieser coconartigen Schicht sinkt die Gasdichte rapide ab, er stellt beinahe eine Isolierschicht dar, die den Jet einhüllt wie das Isoliervakuum einer Thermosflasche. «Der Jet baut sich seine eigene Schutzhülle auf – den Cocon», resümieren die Forscher. «Dieser hält die Elefantenrüssel aus der Umgebung ab, die den Jet abwürgen wollen. Es ist der gleiche Effekt wie bei den Apollokapseln.» Beim Eintauchen der für die Fahrt zum Mond eingesetzten Apollokapseln in die Erdatmosphäre wurde nämlich deren Schutzschild von der Reibungshitze «ablatiert». Der verdampfende Schutzschild hüllte die Apollokapsel ebenfalls in einen Cocon und verschonte damit die Raumkapsel vor dem Verglühen.

Ohne es zu wissen, hatten die Techniker der amerikanischen Luft- und Raumfahrtbehörde NASA für die Apollokapseln ein Prinzip benutzt, das die Natur in den Düsenströmungen der Radiodoppelquellen schon seit Millionen Jahren verwendet. Die Düsenströme der Radiogalaxien sind so prägnant und dauerhaft, «weil sie ihr eigenes Selbstschutzsystem mit sich transportieren».

Reinhard Breuer, München