

---

# Lexikon

der



**Astrophysik**

von



**Andreas Müller**

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

<http://www.mpe.mpg.de/~amueller>

*April 2007*

---



## Abbildungsverzeichnis

11.1 Jahreszeiten auf der Erde. . . . .	2
11.2 HST-Foto von M87 mit Jet. . . . .	4
11.3 Jet: Entstehung aus zwei Komponenten. . . . .	7
11.4 Kollimation und Beschleunigung von Jets. . . . .	8
11.5 Strukturen eines sich ausbreitenden Jets. . . . .	8



# 11 Lexikon J

## 11.1 Jahreszeiten

Alljährlich kehren sie in mittleren Breiten wieder: die Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter. Dieser Jahreszyklus ist ein Hinweis darauf, dass Jahreszeiten etwas mit dem Lauf der Erde um die Sonne zu tun haben müssen - nach 365 Tagen oder einem Jahr hat die Erde die Sonne umrundet und der Zyklus beginnt von neuem. Aber warum wird es (in mittleren Breiten) in diesem zyklischen Wechsel mal kälter und mal wärmer? Das hat in der Tat kosmische Gründe, wie wir sehen werden.

### 11.1.1 Der Tagbogen

Einen weiteren Hinweis liefert uns der **scheinbare Lauf der Sonne** am Firmament. Der aufmerksame Beobachter wird über den Jahreszyklus zwei Dinge feststellen: Zum einen geht die Sonne jeden Tag an einer geringfügig verschobenen Position auf und unter - das fällt besonders nach einigen Wochen auf, wenn man sich z. B. einen speziellen Bezugspunkt in der Landschaft gemerkt hat. Zum anderen variiert die Höhe unseres Tagesgestirns über dem Horizont nicht nur innerhalb eines Tages, sondern auch von Tag zu Tag, Woche zu Woche, Monat zu Monat - das merkt man besonders, wenn man die Länge der Schatten an verschiedenen Tagen vergleicht.

Die scheinbare Bahn der Sonne am Himmel nennt man den **Tagbogen**. Der Tagbogen ist besonders lang im Sommer und kurz im Winter. Die Sonne erreicht einen größeren Abstand zum Horizont im Sommer und bewegt sich nahe am Horizont im Winter. Die unterschiedlichen Längen des Tagbogens sind auch der Grund dafür, weshalb es im Sommer länger hell ist, als im Winter.

### 11.1.2 Der Sonnenstand

Eine Konsequenz des variierenden Tagbogens ist, dass die Sonnenstrahlen im Sommer mehr Zeit haben, um die (Sommerhalbkugel der) Erde zu beleuchten, und die Strahlen treffen außerdem unter Winkeln auf die Erdoberfläche, die senkrecht oder nahezu senkrecht sind. Daher erwärmt sich die Erdoberfläche viel mehr im Sommer (auf der betreffenden Hemisphäre). Im Winter wird (auf der entsprechenden Winterhalbkugel) die Erdoberfläche kürzer beleuchtet und die Strahlen treffen auch flacher auf, so dass sie kaum von der Oberfläche absorbiert werden.

### 11.1.3 Ursache der scheinbaren Sonnenbahn

Als Erdenbewohner sehen wird die Sonne in Bewegung - jemand, der sich auf der Sonne befände, würde hingegen die Erde in Bewegung sehen: die Erde kreist um die Sonne - tatsächlich kreisen beide um den gemeinsamen *Schwerpunkt*, doch liegt dieser viel näher bei der Sonne, weil sie mehr als 300000mal schwerer ist als die Erde (eigentlich ist sogar

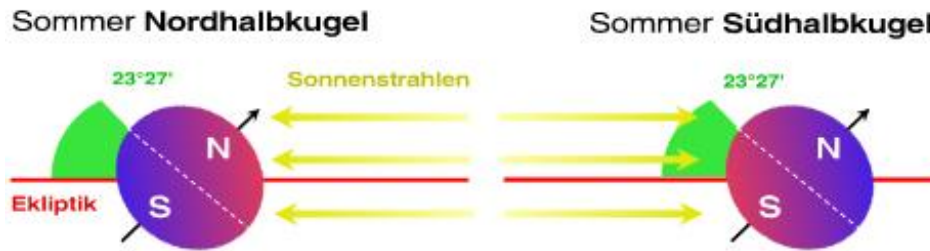


Abbildung 11.1: Jahreszeiten auf der Erde.

der Schwerpunkt des Sonnensystems entscheidend, doch liegt auch dieser noch innerhalb der Sonnenoberfläche, weil die Sonnenmasse im Sonnensystem dominiert).

#### 11.1.4 Ursache der Jahreszeiten

Das alles erklärt noch nicht die Ursache der Jahreszeiten. Die Erde bewegt sich in einer Bahnebene um die Sonne, die **Ekliptik** genannt wird. Auch die anderen Planeten kreisen mehr oder weniger in dieser Ebene (warum das so ist, wird ebenfalls unter dem Eintrag Ekliptik erklärt). Nun weist die Erde bei ihrer Bewegung eine Besonderheit auf: Sie rotiert an einem Tag um sich selbst, und diese Drehachse steht nicht senkrecht auf der Bahnebene, sondern ist geneigt. Der *Himmeläquator*, die Projektion des Erdäquators an die Himmelskugel, ist um **23 Grad und 27 Minuten** gegenüber der Ekliptik geneigt. Das nennt man in der Himmelmechanik die **Schiefe der Ekliptik**.

Die Neigung hat entscheidende Konsequenzen für die Beleuchtung der Erde bei ihrem Lauf um die Sonne. Wie die Illustration 11.1 zeigt, treffen die nahezu parallelen Sonnenstrahlen mal die Südhalbkugel und mal die Nordhalbkugel mehr oder weniger senkrecht. Dort, wo das geschieht ist Sommer, während auf der gegenüberliegenden Halbkugel (bei den *Antipoden*) Winter ist. Die Sonnenstrahlen treffen übrigens deshalb nahezu parallel ein, weil die Sonne so weit entfernt ist, nämlich eine Astronomische Einheit ( $\sim 150$  Mio. Kilometer).

## 11.2 Jansky

Jansky ist eine sehr gebräuchliche Einheit für den **Strahlungsfluss** in der Radioastronomie. Sie wurde nach dem Radioastronomen *Karl Guthe Jansky* (1905 - 1950) benannt, der sie einführte. Der Strahlungsfluss ist von der Dimension her Leistung pro Fläche und Frequenzband. Die Abkürzung lautet *Jy*. In SI-Einheiten gilt:

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \quad (11.1)$$

Diese äußerst kleinen Flüsse sind typisch bei weit entfernten Radioquellen, wie den Jets, die in radiolauten Quasaren und Radiogalaxien zu finden sind.

### 11.2.1 Nomenklatur in der Radioastronomie

Übrigens: In der Terminologie der Radioquellen ist für die hellste Radioquelle im Sternbild der Buchstabe **A** reserviert. *Sagittarius A* (Sgr A) ist demnach die hellste Radioquelle im

Sternbild *Schütze*, *Centaurus A* (Cen A) diejenige im Sternbild *Centaurus* (Südhimmel) und *Cygnus A* (Cyg A) diejenige im Sternbild *Schwan* (Nordhimmel).

## 11.3 Jeans-Masse

Die Jeans-Masse wurde benannt nach dem englischen Physiker und Mathematiker *Sir James Hopwood Jeans* (1877 - 1946). Die Jeans-Masse markiert eine charakteristische Grenzmasse, oberhalb derer das Ausgangsobjekt gravitativ instabil wird und kollabieren muss.

### 11.3.1 So wird's berechnet

Rechnerisch kann man die Gleichung für die Jeans-Masse aus einer Kräftebilanz ableiten. Man geht von einer sphärisch symmetrischen Massenschale aus, die eine homogene Dichteverteilung aufweisen möge. Die Bewegungsgleichung dieser Schale enthält gerade die Gewichtskraft und den Gasdruck. Rotiert die Schale gibt es noch einen Zentrifugalterm, der ihrem Gravitationskollaps entgegenwirkt. Ist die Massenschale magnetisiert gibt es noch einen Term vom magnetischen Druck. Dieses 'magnetische Korsett' hindert die Ionen in der Schale an einer weiteren Verdichtung. Nur neutrale Teilchen bleiben unbeeinflusst vom Magnetfeld (ambipolare Diffusion).

### 11.3.2 Diskussion der Abhängigkeiten

Ohne Rotation und Magnetisierung ergibt sich die klassische Formel

$$M_J = \pi^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left( \frac{\mathcal{R}T}{\mu G} \right)^{3/2}.$$

Man liest ab, dass die Jeans-Masse für

- ◇ kleinere Dichten,
- ◇ höhere Temperaturen,
- ◇ kleineres, mittleres atomares Gewicht in der Schale

ansteigt. Anschaulich ist das klar, weil eine heißere Ansammlung von Material einen höheren Gasdruck aufweist, der dem Kollaps entgegen gerichtet ist. Ebenso sind dünnere Materiewolken schwieriger zu kollabieren. Sind die Spezies in der Schale leichter (viel Wasserstoff und Helium, statt Kohlenstoff und Sauerstoff) gilt dasselbe.

### 11.3.3 Hier braucht man's

Der wichtige Anwendungsbereich der Jeans-Masse findet sich in der Theorie der Sternentstehung, wenn untersucht wird, ab welchen Massen Gaswolken des interstellaren Mediums (ISM) zu Protosternen und YSOs kollabieren können.

## 11.4 Jet

Jets sind die größten **Teilchenbeschleuniger** des Universums! Es handelt sich dabei um **gebündelte Materieausflüsse** von kosmischen Objekten, die auf einer großen Längenskala vertreten sind.



Abbildung 11.2: HST-Foto von M87 mit Jet.

#### 11.4.1 Mikro-Jets

So beobachten Astronomen protostellare Jets oder **Jets junger Sterne** (siehe YSOs), beispielsweise in Herbig-Haro-Objekten oder T-Tauri-Sternen, die auf der stellaren Längenskala auftreten.

In **Röntgendoppelsternen** fließt Materie eines massereichen Sterns auf ein kompaktes Objekt. Dabei entstehen auch stellare Jets. Im Extremfall bilden sich sogar relativistische Jets auf der stellaren Längenskala, z. B. bei Mikroquasaren, Mikroblazaren und in den Gamma Ray Bursts (GRBs). Sämtliche Jets dieser kleineren Größenordnung subsumieren Astrophysiker bisweilen unter dem Begriff *Mikro-Jets*.

#### 11.4.2 Makro-Jets

Aber die Astronomen beobachten auch die viel größeren Jets - die *Makro-Jets* - von **Aktiven Galaktischen Kernen (AGN)**, also beispielsweise bei Radiogalaxien oder (radiolauten) Quasaren. Sie haben Längen auf der kpc- oder sogar Mpc-Skala!

*Baade* und *Minkowski* prägten den Begriff *Jet* 1954 an der Radiogalaxie M87. Diese elliptische Zentralgalaxie des Virgo-Haufens zeigt eine längliche Struktur, die etwa zwei Bogensekunden lang ist und die mit dem Begriff Jet gemeint ist. Deutlich sichtbar ist der Jet von M87 in der optischen Aufnahme 11.2, die mit dem Weltraumteleskop Hubble gemacht wurde (Credit: NASA and The Hubble Heritage Team 2000).



### 11.4.3 Entstehungsmechanismus: Vom Scheitern der Hydrodynamik

Ohne Materieeinfall, kein Materieausstoß: **Jet und Akkretionsfluss** sind immer untrennbar miteinander in der Astrophysik verbunden. Die Akkretionsscheibe füttert den Jet mit Materie, die aus äußeren Regionen einfällt. Der Antrieb für Materieeinfall ist die **Gravitation**: In Einsteins Sprache krümmt ein Zentralobjekt mit der Eigenschaft *Masse* die Raumzeit und zieht daher Materie aus der Umgebung an. Aber weshalb sammelt sich nicht alles 'auf einem Haufen im Zentrum' an? Die Schlüsselfrage ist, welche physikalischen Prozesse für ein Ausströmen der Materie sorgen.

Die sich bewegende Materie kann in der Theorie sehr gut als Flüssigkeit beschrieben werden, so dass einfache Akkretions- und Jetmodelle auf der reinen Hydrodynamik basieren. Viele beobachtete Sachverhalte können so reproduziert werden: das Einströmen auf das Zentralobjekt, die Turbulenz der Strömung, hydrodynamische Instabilitäten (z. B. *Kelvin-Helmholtz-* und *Rayleigh-Taylor-Instabilität*). Auch ein Ausfließen der Materie, das durch den rein hydrodynamischen Gasdruck und/oder Zentrifugaldruck angetrieben wird (falls die Konfiguration rotiert), tritt in Computersimulationen auf. Dennoch wurde bei diesen Forschungsarbeiten klar, dass es so noch nicht in der Natur funktioniert. Denn die beobachteten schnellen und gebündelten Jets konnten so nicht reproduziert werden.

### 11.4.4 vitale Zutat: Magnetfelder

In der einfallenden Materie gibt es elektrische Ladungsträger - das tritt umso gravierender auf, je heißer der Akkretionsstrom ist. Die Ionisierung führt zu einem Plasma, dessen Dynamik beschrieben werden muss. Die Elektrodynamik lehrt uns, dass mit den Ladungen Felder assoziiert sind, nämlich **elektrische Felder und Magnetfelder**. Wie sich herausstellte sind sie notwendig, um die Entstehung von Jets zu verstehen. Die Hydrodynamik muss also entsprechend zur **Magnetohydrodynamik** verallgemeinert werden.

#### Entstehungsmechanismus 1: Jets von magnetischen Winden

Der erste Prozess zur Bildung von Jets heißt **Blandford-Payne-Szenario**. Wie unter diesem Eintrag detaillierter beschrieben wird, treibt eine rotierende, magnetisierte Akkretionsscheibe einen **Scheibenwind**. Die Windgeschwindigkeiten sind vergleichbar mit der Rotationsgeschwindigkeit (Keplergeschwindigkeit) am jeweiligen Bahnorbit. Dieses von der Scheibe abströmende Material stellt einen breiten Ausfluss dar, der zu einem Jet werden kann. Zur weiteren Bündelung des breiten zu einem engen Ausfluss sind Magnetfelder erforderlich, die in einem der folgenden Abschnitte beschrieben werden.

Bei schwach magnetisierten Akkretionsscheiben ist für die Dynamik die so genannte **magnetische Rotationsinstabilität** (MRI) entscheidend. Sie sorgt effizient für eine Umverteilung des Drehimpulses: Drehimpulstransport nach außen ist gerade Voraussetzung für den Einfall. Denn sonst würde die einfallende Materie an der Drehimpulsbarriere reflektiert werden. Die MRI bewirkt Materieeinfall und letztlich das Wachstum des Zentralobjekts durch Akkretion.

#### Entstehungsmechanismus 2: Jets durch schnell rotierende Raumzeit

Der zweite Prozess erfordert ein **schnell rotierendes Schwarzes Loch**, das in Einsteins Theorie mit der Kerr-Lösung beschrieben wird. Ein solches Loch hat zwar nur zwei

Eigenschaften, nämlich Masse und Rotation, aber das birgt zwei gigantische Energieformen, nämlich Ruheenergie und Rotationsenergie. Die Rotationsenergie wird nun durch den einströmenden Akkretionsfluss angezapft - die Magnetfelder spielen dabei die Rolle 'eines langen Arms', mit dem die Rotationsenergie aus dem Loch gezogen wird. Das funktioniert jedoch nur, wenn die Magnetfelder sehr nahe an das Schwarze Loch herankommen, nämlich fast bis an den Ereignishorizont, in die so genannte **Ergosphäre** hinein. Denn hier ist die Rotation der Raumzeit besonders hoch (und nur hier funktioniert der Penrose-Prozess).

Das Szenario ist wie folgt: die vom Akkretionsstrom herangebrachten Magnetfelder wechselwirken mit dem rotierenden Loch. **Frame-Dragging** verdrillt die Magnetfelder und schnürt eine Art 'magnetischen Zopf'. Das geht allerdings nicht lange gut: Durch das Verdrillen stoßen irgendwann Magnetfeldlinien unterschiedlicher Polarität aufeinander. Dann setzt eine Art 'Kurzschluss' ein, der in der Fachsprache *Rekonnexion* (engl. *reconnection*) heißt. Dabei brechen die Magnetfelder lokal zusammen und übertragen die ehemals magnetische Feldenergie auf das Plasma in der Umgebung. Das Plasma hat nun so hohe kinetische Energie gewonnen, dass es sogar aus der unmittelbaren Umgebung eines Schwarzen Loches entkommen kann. Die MHD kommt auch auf die Weise ins Spiel, dass so genannte **Poynting-Flüsse** getrieben werden. Das sind elektromagnetische Energieflüsse, auf denen das Plasma 'reiten kann, wie ein Surfer auf der Welle'. Ein schnell rotierendes Loch ist ein guter Erzeuger für solche MHD-Wellen.

Auch bei diesem zweiten Mechanismus, dem **Blandford-Znajek-Prozess**, sind weitere Effekte zur Bündelung (*Kollimation*) zum Jet notwendig. Die Kollimation der Jets in AGN geschieht allerdings typischerweise deutlich weiter außen, ab etwa 100 Schwarzschildradien (zum Vergleich: die Ergosphäre schließt bei nur zwei Gravitationsradien ab!). Für einen Quasar mit einem 100-Millionen-Sonnenmassen-Loch entspricht die Distanz von 100 Schwarzschildradien nur etwa 200 Astronomischen Einheiten! Die Jetentstehung von aktiven Galaxien läuft offenbar nur im 'dunklen Herzen' der Galaxie ab.

#### 11.4.5 Entscheidungen aus der Beobachtung

Die Forschung in der theoretischen Astrophysik hat also diese zwei Modelle herausgearbeitet, die die Entstehung von Jets *magnetisch* erklären. Die Aufgabe des astronomischen Beobachters ist nun zu entscheiden, ob eines der Modelle, beide oder keines dafür verantwortlich sind, dass kosmische Jets entstehen. Weil Modell 2, der Blandford-Znajek-Prozess, ein Kerr-Loch erfordert, ist die Sachlage zumindest dort klar, wo kein Schwarzes Loch vermutet wird, nämlich bei den protostellaren Jets. Hier scheint das Blandford-Payne-Szenario am Werke zu sein. Die Physik der Protosterne ist allerdings kompliziert genug, dass es auch hier noch viele Forschungsfragen zu klären gibt. Eine davon ist die Kühlung der Wasserstoffmoleküle durch Abgabe von Strahlung.

Schwieriger wird es im Falle der AGN und GRBs, in denen nach allgemeiner Lehrmeinung ein Schwarzes Loch verborgen ist. Moderne, hochauflösende Beobachtungen mittels **VLBI** haben das Potenzial, um den Entstehungsprozess relativistischer Jets zu entlarven. Denn sie kommen so nahe an das Loch heran, dass die Gestalt von Akkretionsfluss und Jet studiert werden kann. Die Abbildung der Zentralregion verspricht die Lösung, weil eine breite Jetbasis für die Scheibe spricht (Blandford-Payne-Szenario, Modell 1), aber eine kleine Entstehungsregion eher für das Loch (Blandford-Znajek-Prozess, Modell 2). Es ist auch plausibel anzunehmen, dass eine Mischung aus beiden Prozessen einen Jet speist. Die Jetentstehung um rotierende Schwarze Löcher fasst die Illustration 11.3 schematisch

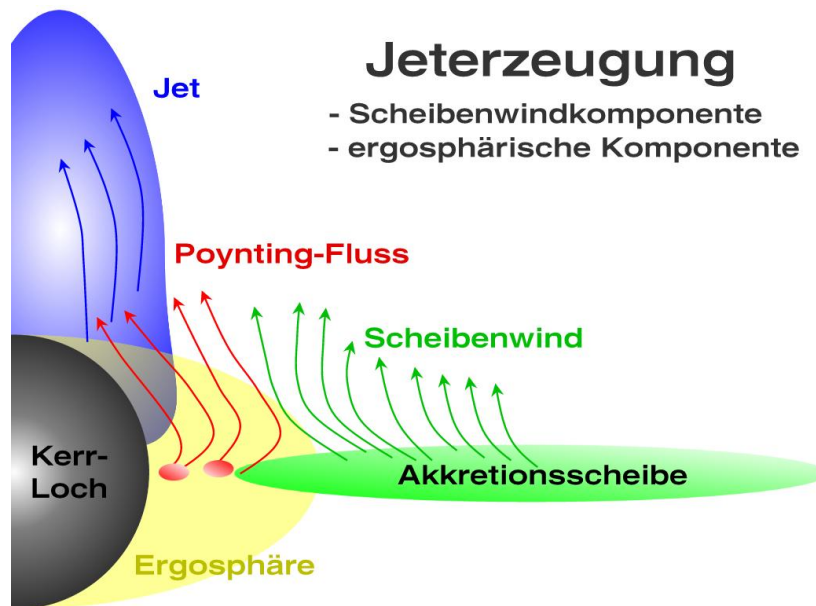


Abbildung 11.3: Jet: Entstehung aus zwei Komponenten.

zusammen.

#### 11.4.6 Verschwindet der Energielieferant?

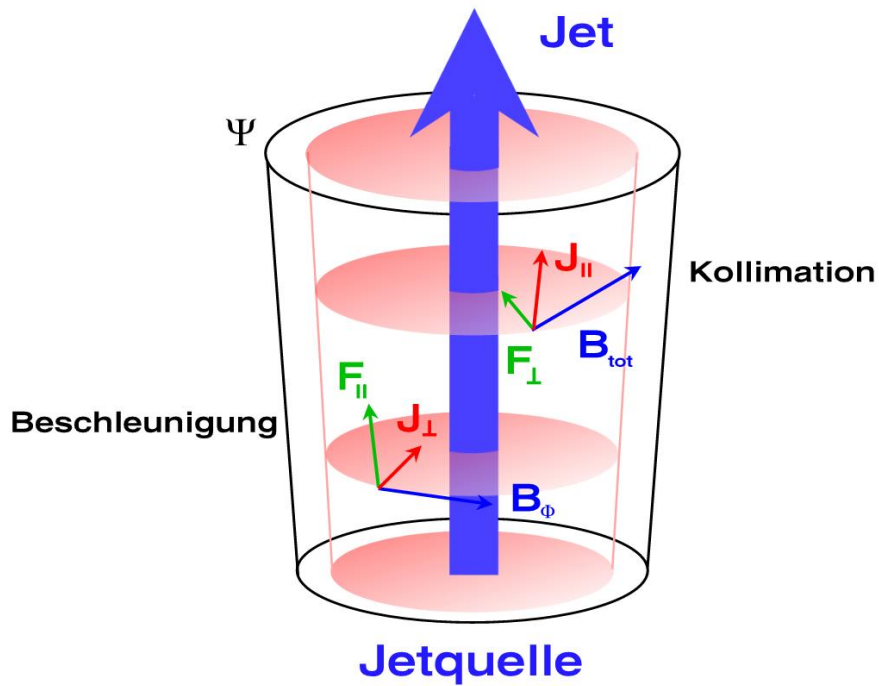
Die Energie für Entstehungsmechanismus 2 stammt zwar aus dem zentralen Schwarzen Loch, und es verliert Rotationsenergie. Dennoch kann man nun nicht zwingend davon ausgehen, dass rotierende Schwarze Löcher ihre Rotation in entwickelten Jet-Systemen aufgeben (und in die Schwarzschild-Lösung übergehen). Denn das Loch gewinnt durch Akkretion auch wieder an Drehimpuls/Rotation. Im Allgemeinen wird viel mehr Materie vom Loch aufgesammelt, als wieder im Jet weggeschleudert wird.

#### 11.4.7 magnetische Bündelung und Beschleunigung

Die Abbildung 11.4 geht illustrativ auf eine Idee von *Christian Fendt* (MPIA Heidelberg) zurück und zeigt, wie **Lorentz-Kräfte** den (lokal geladenen) Plasmafluss des Jets ablenken: einerseits gibt es **kollimierende Kräfte**, die auf die Jetachse gerichtet sind und so den Jet auch auf großen Längenskalen (kpc bis Mpc!) bündeln; andererseits existieren **beschleunigende Kräfte**, die den Jet vorantreiben. Die jeweilige Richtung der Lorentz-Kraft folgt gemäß der bekannten *Drei-Finger-Regel* (Ursache, Vermittlung, Wirkung) unter Beachtung der Richtung des lokalen Plasmastroms und der zugeordneten Magnetfeldrichtung. Nebenbei gibt es Beschleunigungs- und Abbremsungseffekte, durch **gasdruckgetriebene Kräfte** (reine Hydrodynamik) und MHD-Effekten, wie den **Alfvén-Wellen**.

#### 11.4.8 Strukturen im Jet

Die Abbildung 11.5 zeigt den Querschnitt eines klassischen, rein hydrodynamischen Jets (ohne Magnetfelder) entlang seiner Ausbreitungsrichtung von links nach rechts. In das



- J** Stromdichte
- Ψ** magnetische Flussoberfläche
- B** Magnetfeld
- F** Lorentz-Kraft

Abbildung 11.4: Kollimation und Beschleunigung von Jets.

## Ausbreitung eines Jets

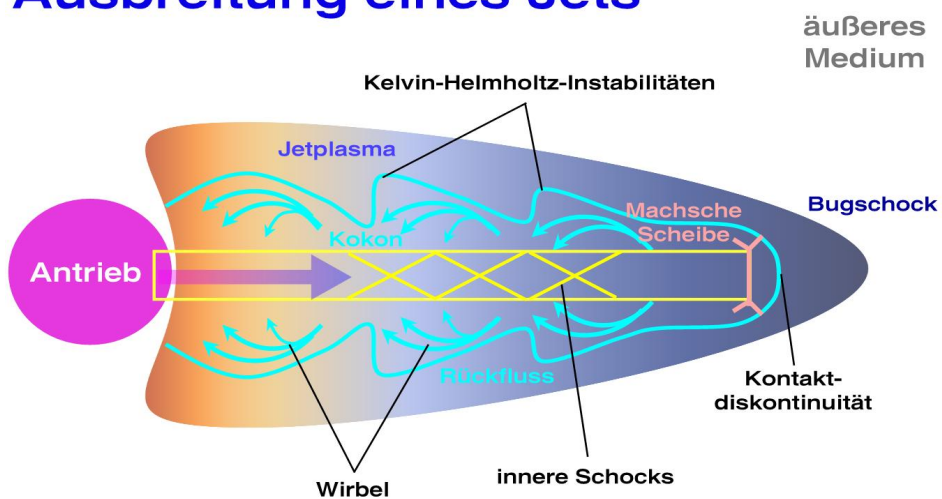


Abbildung 11.5: Strukturen eines sich ausbreitenden Jets.

Schema, das auf Computersimulationen basiert, sind die Bezeichnungen der Substrukturen eingetragen. Zunächst wird der Jet im Zentrum eines AGN oder YSOs erzeugt. Das geschieht hier links in der Region 'Antrieb'. Das Jetplasma propagiert dann im viel dünneren intergalaktischen (IGM; beim Makro-Jet) oder interstellaren Medium (ISM; beim Mikro-Jet) und bildet rechts einen **Bugschock** (engl. *bow shock*) aus. In diesem Bereich befindet sich die so genannte **Kontaktdiskontinuität** (engl. *contact discontinuity*), in der Dichte und Temperatur unstetig springen. Hier links von der Unstetigkeit befindet sich die **Machscheibe** (engl. *Mach disk*). Dort entsteht ein Rückfluss des Jetplasmas, der entlang der Jetachse einen so genannten **Kokon** (engl. *cocoon*) formt. Entlang der Jetachse kommt es ebenfalls zu **internen, schrägen Schockwellen** (engl. *internal shocks*), die vermutlich die *hellen Emissionsknoten* bekannter Quellen verursachen. Ein bekanntes Phänomen am Übergangsbereich unterschiedlich strömender Schichten sind die zahlreichen *Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten*, die charakteristische **Wirbel** (engl. *eddies, vortices*) zwischen auswärts propagierendem Jetplasma und inwärts propagierendem Plasma im Kokon ausbildet. Überlagert ist die ganze Jetströmung mit der für die Hydrodynamik typischen **Turbulenz**.

Zum Teil werden diese Strukturen direkt astronomisch beobachtet. In den extragalaktischen Jets von radiolauten Quasaren und Radiogalaxien gibt es eine Terminologie für die wesentlichen, beobachteten Strukturen im Jet:

- ◇ Die heißen Flecken (engl. *hot spots*) sind eine helle Region am äußeren Ende des Jets. Diese Flecken sind gerade mit dem oben beschriebenen Bugschock assoziiert. Die Dimension der Hot Spots liegt bei etwa 1 kpc. Die Strahlung ist stark polarisiert und auch optisch nachweisbar
- ◇ Die Bögen (engl. *lobes*) sind ausgedehnte, bogenförmige Strukturen, die mit dem 'verwirbelten Jet' in Zusammenhang stehen.
- ◇ Der Bugschock (engl. *bow shock*) ist in der Regel gut sichtbar. Es handelt sich dabei um eine ausgedehnte Region am Ende des Jets, wo das relativistisch bewegte Jetplasma auf das äußere Medium trifft und es daher 'schockt'.

### 11.4.9 Quelle hochenergetischer Teilchen

Auch **Schockwellen** beeinflussen die Propagation von Jets. Das Jetplasma kann durch den Mechanismus der Fermi-Beschleunigung auf äußerst hohe Geschwindigkeiten beschleunigen und so - vor allem in AGN- und GRB-Jets - die Quelle ultra-hochenergetischer Protonen und Neutrinos sein. Die Neutrinoforscher am Südpol jagen gerade diese UHE-Neutrinos mit den Experimenten AMANDA und ICECUBE.

### 11.4.10 Schneller als das Licht!

Messungen von Jetgeschwindigkeiten (beispielsweise bei Blazaren) haben erstaunlicherweise auch Geschwindigkeiten *oberhalb* der Lichtgeschwindigkeit ergeben (engl. *superluminal motion*)! Dies sieht zunächst nach einem Widerspruch zur Speziellen Relativitätstheorie (SRT) aus, kann aber leicht erklärt werden: Dieses mysteriöse Phänomen kommt nämlich nur dann zustande, wenn der betrachtete Jet relativistisch ist und fast genau auf den Beobachter zeigt. Die Astronomen beschreiben das so, dass der Jet dann einen kleinen Neigungswinkel (*Inklination*) aufweist. Eine Inklination von  $0^\circ$  bedeutet üblicherweise, dass der Jet exakt auf

den Beobachter zeigt;  $90^\circ$  bedeutet, dass der Jet senkrecht zur Sichtlinie des Beobachters ('von links nach rechts' oder 'von rechts nach links') verläuft. Mit einer kleinen Rechnung, die nur auf der SRT und der Geometrie dieser Situation beruht kann man zeigen, dass typischerweise bei Inklinationen kleiner als etwa  $10^\circ$  ein (für den Beobachter!) **überlichtschneller Jet** resultieren kann.

Das geht so: Wir nehmen an, dass bei einem Quasar mit einer kosmologischen Rotverschiebung  $z$  der Jet sich mit einer Geschwindigkeit  $v_{jet}$  (im Quasarsystem) ausbreiten möge. Gemäß SRT gibt es zwischen Beobachter- und Quasarsystem eine Zeitdilatation, die einerseits kosmologisch und andererseits speziell relativistisch durch die schnelle Ausbreitung des Jets bedingt ist. Zwischen Beobachter- und Quasarsystem vermittelt daher ein Umrechnungsfaktor der unterschiedlichen Zeitmaße. Für kleine Winkel gilt näherungsweise, dass dieser Faktor

$$(1+z)/(2\gamma^2)$$

ist, wobei  $z$  die Entfernung des Quasars und  $\gamma$  der Lorentz-Faktor ist:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}.$$

Nehmen wir nun an, dass sich der Jet im Quasarsystem mit 99.5%iger Lichtgeschwindigkeit bewegen möge. Das nennen die Astrophysiker die *intrinsische* ('echte') Jetgeschwindigkeit. Für unser Beispiel resultiert ein Lorentz-Faktor von  $\gamma = 10$ . Nehmen wir weiterhin an, dass sich der Quasar bei  $z = 1$  befinden möge. Anschaulich besagt nun der Umrechnungsfaktor oben für dieses Zahlenbeispiel, dass sich in einem Jahr Beobachtungszeit eines leuchtenden Knotens im Jet, dieser sich für den Beobachter um 100 Lichtjahre weiterbewegt hat, und nicht nur um knapp ein Lichtjahr! Die Jetgeschwindigkeit senkrecht zur Sichtlinie  $v_{senkr}$  kann man auch angeben. Sie beträgt:

$$v_{senkr} = \frac{v_{jet} \sin i}{1 - v_{jet}/c \cos i}.$$

Für unser Beispiel mit  $v_{jet} = 0.995c$  und einer Inklination von  $1^\circ$  ergibt das eine **scheinbare Überlichtgeschwindigkeit** von etwa  $3.4c$ ! Diese Rechnung rettet Einstein.

#### 11.4.11 Radio-Jets und Kosmologie

Für die Radioastronomie sind die Jets besonders relevant, weil die Elektronen im ausströmenden Jetplasma Synchrotronstrahlung im Radiobereich erzeugen. Die Unterschiede in den Radiostrukturen werden zur Fanaroff-Riley-Klassifikation herangezogen. Für die Kosmologie sind die Jets als Radiostrahler wichtig, weil die Astronomen über den Effekt der Faraday-Rotation das heiße intra- und intergalaktische Clustergas zwischen den Galaxien untersuchen können.

#### 11.4.12 Weitere Informationen

- ◇ Vortrag: Magnetic Launching of AGN-Jets (Dezember 2006).
- ◇ Vortrag: Cosmic Jets as Sources for ultra-high energetic Neutrinos (Januar 2003).
- ◇ A. Müller, Dissertation (2004): mit vielen Einzelheiten zur Entstehung relativistischer Jets in der Umgebung rotierender Schwarzer Löcher; [DOWNLOAD pdf \(9.9 MB\)](#).

- ◇ Artikel bei *Einstein online* von A. Müller: Das Schwarze Loch als Materieschleuder: Kosmische Jets (2007)

# Kontakt

**Dr. Andreas Müller**

Technische Universität München (TUM)  
Exzellenzcluster Universe  
Boltzmannstraße 2  
D-85748 Garching  
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

[andreas.mueller@universe-cluster.de](mailto:andreas.mueller@universe-cluster.de)

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04