

Komet

Ein **Komet** (von griechisch *kométes* Haarstern, abgeleitet von *kómē* Haupthaar) oder *Schweifstern* ist ein kleiner Himmelskörper, der zumindest in den sonnennahen Teilen seiner Bahn eine durch Ausgasen erzeugte Koma aufweist.

In Sonnennähe ist der meist nur wenige Kilometer große Kometenkern von einer diffusen, nebeligen, *Koma* genannten Hülle umgeben, die eine Ausdehnung von bis zu 2,7 Millionen km erreichen kann. *Kern* und Koma zusammen nennt man auch den *Kopf des Kometen*. Das auffälligste Kennzeichen der von der Erde aus sichtbaren Kometen ist jedoch der *Schweif*, der bei großen und sonnennahen Objekten eine Länge von mehreren 100 Millionen Kilometern erreichen kann. Meistens sind es aber maximal nur einige 10 Millionen Kilometer.



Hale-Bopp, aufgenommen von Geoff Chester am 11. März 1997

Charakterisierung

Kometen werden aufgrund ihres Erscheinungsintervalls in *aperiodische Kometen* und *periodische Kometen* unterschieden. Letztere werden nach ihren Umlaufzeiten in langperiodische und kurzperiodische Kometen eingeteilt.

Aperiodische Kometen

Kometen, die – aufgrund ihrer paraboloiden oder hyperboloiden Bahn – sicher nicht wiederkehren, oder Einzelbeobachtungen, über die wegen mangelnd genauer Bahnbestimmung – noch – keine Aussage getroffen werden kann.

Periodische Kometen

Kometen, deren Wiederkehr anhand ihrer Bahnelemente gesichert ist, die also auf einer – zumindest für einen gewissen Zeitraum – stabilen Umlaufbahn die Sonne umkreisen.

Kometenbahnen

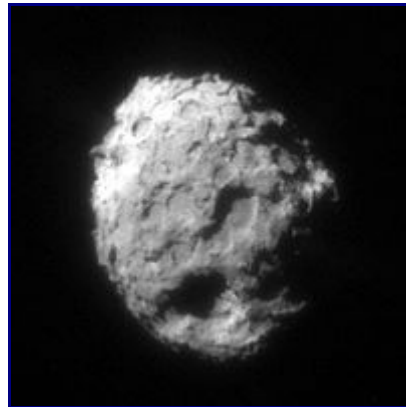
Da bei neu entdeckten Kometen nur kurze Bahnbögen beobachtet wurden, werden zuerst parabolische Bahnen berechnet. Da eine Parabel jedoch nur ein mathematischer Grenzfall ist und in der Natur nicht als solche vorkommen kann (jede noch so winzige Störung macht daraus eine Ellipse oder eine Hyperbel), laufen Kometen deren Bahnexzentrizität mit $e = 1,0$ (= Parabel) angegeben wird, in Wahrheit entweder auf Ellipsen ($e < 1,0$) oder

auf Hyperbeln ($e > 1.0$). Bei längerer Beobachtung und der Gewinnung von zusätzlichen astrometrischen Positionen kann dann entschieden werden, ob es sich um Ellipsen oder Hyperbeln handelt.

Von zirka 660 untersuchten Kometen zeigt sich folgende Verteilung: 43 % Parabeln, 25 % langperiodische Ellipsen (Umlaufzeit über 200 Jahre), 17 % kurzperiodische Ellipsen (Umlaufzeit bis zu 200 Jahre) und 15 % Hyperbeln. Der hohe Anteil an Parabeln ist jedoch auf den zu kurzen Beobachtungszeitraum vieler Kometenerscheinungen zurückzuführen, bei denen langgestreckte Ellipsen nicht von einer Parabel unterschieden werden können. Bei einer längeren Sichtbarkeit von 240–500 Tagen beschreiben nur mehr 3 % der Kometen scheinbar eine Parabelbahn. Somit dürften die Ellipsen vorherrschend sein.

Aufbau

Kern



Der 5 km große Kern von Wild 2 (Stardust, NASA)

In großer Entfernung von der Sonne bestehen Kometen nur aus dem *Kern*, der im Wesentlichen aus zu Glas erstarrtem Wasser, Trockeneis, CO-Eis, Methan und Ammoniak mit Beimengungen aus meteoritenähnlichen kleinen Staub- und Mineralienteilchen (zum Beispiel Silikate, Nickeleisen) besteht, man bezeichnet Kometen deshalb häufig als *schmutzige Schneebälle* oder *dirty snowballs*. Die Beobachtungen der Deep Impact Mission haben gezeigt, dass (zumindest in den Außenbereichen des Kerns des untersuchten Kometen Tempel 1) die festen Bestandteile gegenüber den flüchtigen Elementen überwiegen, so dass die Bezeichnung *snowy dirtball* (*eisiger Schmutzball*) zutreffender erscheint. Aus Beobachtungen der Raumsonde Giotto am Kometen Halley weiß man, dass Kometen von einer schwarzen Kruste umgeben sind, die nur zirka 4 % des Lichts reflektiert (Albedo) – obwohl Kometen als spektakuläre Leuchterscheinungen beobachtet werden, sind ihre Kerne somit ironischerweise die schwärzesten Objekte des Sonnensystems, wesentlich dunkler als zum Beispiel Asphalt, der ca. 7 % des Lichts reflektiert.

Da nur kleine Regionen des Kerns ausgasen, wie im Abschnitt Koma näher erläutert wird, geht man nach neueren Vorstellungen davon aus, dass die Oberfläche von einer Art Gesteinsschutt gebildet wird, der aus Gesteinsbrocken besteht, die zu schwer sind, um die gravitative Anziehung des Kerns zu überwinden. Giotto entdeckte auch winzige Partikel, die reich an den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) sind und deswegen auch CHON-Partikel genannt werden. Diese könnten aus einer dünnen Rußschicht stammen, die die Oberfläche des Kerns überzieht und damit die

niedrige Albedo erklären würde. Nähere Informationen soll die aktuelle Rosettamission liefern.

Einen besonderen Anteil an der Erklärung des Aufbaus der Kometen hatte Fred Whipple, der 1950 erstmals Kometenkerne als Konglomerat aus Eis und festen Bestandteilen beschrieb.

Koma

Sobald ein Komet bei der Annäherung an die Sonne in einem Abstand von etwa 5 AE die Jupiterbahn kreuzt, bildet die Wechselwirkung zwischen Sonnenwind und Komet eine schalenförmige *Koma*, die in Kernnähe auch strahlenartige Strukturen zeigt. Sie entsteht durch Sublimation leicht flüchtiger Substanzen auf der sonnenzugewandten Seite, die ins Eis eingebettete Staubteilchen mitreißen. Nach den Beobachtungen der Sonde Giotto findet diese Sublimation nur an etwa 10 bis 15 % der Kometenoberfläche statt, die flüchtigen Substanzen entweichen offenbar nur an brüchigen Stellen der schwarzen Kruste. Die an diesen Stellen entweichenden *Muttermoleküle* bilden die innere Koma. Durch weitere Aufheizung, Ionisation und Dissoziation vergrößert sich die Koma weiter und bildet die schließlich sichtbare Koma aus Ionen und Radikalen. Diese wird noch von einem im Ultravioletten strahlenden atomaren Wasserstoffhalo umgeben, der auch UV-Koma genannt wird und beim Kometen Hale-Bopp 1997 einen Durchmesser von 150 Millionen Kilometern erreichte. Da die atmosphärische Ozonschicht für die UV-Strahlung undurchlässig ist, kann die UV-Koma nur mit Satelliten untersucht werden.

Schweif

Die Bestandteile der Koma werden durch Strahlungsdruck und Sonnenwind „weggeblasen“, so dass sich etwa innerhalb der Marsbahn ein *Schweif* ausbildet, oder exakter zwei Schweife:

- Ein schmaler, lang gestreckter Schweif (*Typ-I-Schweif*), der im Wesentlichen aus Molekülonen besteht und auch *Plasmaschweif* genannt wird. Für diese Teilchen reicht der Strahlungsdruck als Erklärung nicht aus, sodass Ludwig Biermann 1951 eine von der Sonne ausgehende Partikelstrahlung, die heute Sonnenwind genannt wird, als Erklärung hierfür postulierte. Heute geht man davon aus, dass die kometaren Ionen durch eine Wechselwirkung mit dem solaren Magnetfeld angetrieben werden, das von den geladenen Teilchen des Sonnenwinds mitgeführt wird.
- Ein diffuser, gekrümmter Schweif (*Typ-II-Schweif*), der auch *Staubschweif* genannt wird. Die kleinen Staubteilchen, die diesen Schweif bilden, werden durch den Strahlungsdruck der Sonne beeinflusst, dessen Wirkung durch eine Aufspaltung in zwei Komponenten erklärt werden kann:
 - Eine radiale Komponente, die der Gravitationskraft entgegengerichtet ist und wie diese quadratisch mit der Entfernung zur Sonne abnimmt. Dies wirkt wie eine effektive Abnahme der solaren Gravitationskraft, die Staubteilchen bewegen sich deshalb auf „Pseudo-Keplerbahnen“, die sich für Staubteilchen verschiedener Größe unterscheiden, da der Strahlungsdruck von der Teilchengröße abhängig ist. Dies führt zu einer relativ starken Auffächerung des Staubschweifs im Vergleich zum Plasmaschweif.
 - Die andere wirksame Komponente des Strahlungsdruckes ist der

Bewegungsrichtung der Staubteilchen entgegengerichtet und führt zu einer Abbremsung der Teilchen, die größer als die Wellenlänge des Lichtes sind, das heißt, größer als etwa $0,5 \mu\text{m}$. Diese Teilchen bewegen sich langfristig genauso wie der sonstige interplanetare Staub auf Spiralbahnen Richtung Sonne (Poynting-Robertson-Effekt).

- Sehr selten, bei besonderen Bahnkonstellationen, ist ein Gegenschweif (*Typ-III Schweif*) sichtbar. Hierbei handelt es sich jedoch **nicht** um einen eigenständigen Schweif, sondern nur um einen geometrischen Projektionseffekt: Wenn sich die Erde zwischen Sonne und Komet hindurchbewegt, ragt ein Teil des Staubschweifs, bedingt durch seine Krümmung, scheinbar über den Kometenkopf hinaus.

Der Materialverlust eines Kometen wurde bei „neuen“ Kometen, die das erste Mal in Sonnennähe kommen, auf etwa 10 bis 50 Tonnen pro Sekunde geschätzt, nach mehrfacher Sonnenannäherung sinkt der Masseverlust auf weniger als $0,1 \text{ t/s}$. Diese geringen Materiemengen von maximal $0,03$ bis $0,2$ Prozent der Kometenmasse pro Sonnendurchgang bedeuten, dass die Schweife nur eine sehr geringe Dichte aufweisen. Die enorme Helligkeit der Schweife erklärt sich im Falle des Staubschweifs durch die große Oberfläche der mikroskopisch kleinen Staubteilchen, im Plasmaschweif trägt sogar jedes Atom bzw. Molekül zur Leuchtkraft bei. Dies führt im Vergleich zur Größe des Kometenkerns zu einer Erhöhung der Leuchtkraft um viele Größenordnungen.

Entstehung

Der hohe Anteil an leicht flüchtigen Substanzen wie zum Beispiel Wasser und Kohlenmonoxid bedeutet, dass die Kometenkerne im äußeren Bereich des Sonnensystems entstanden sein müssen. Die Planetesimale aus dem Bereich der äußeren Planeten, die nicht durch die Gasriesen aufgesammelt wurden, wurden dabei zu einem großen Teil so stark gestreut, dass sie das Sonnensystem verließen. Nur etwa 10 Prozent dieser gestreuten Körper bilden die Oortsche Wolke. Die Objekte jenseits der Neptunbahn unterlagen diesem Streuprozess nicht und bilden den Kuipergürtel.

Die Kometen verlieren mit jedem Umlauf um die Sonne einen kleinen Teil ihrer Masse. Bei diesen Masseverlusten handelt es sich vor allem um die flüchtigen Bestandteile der äußeren Schicht, sodass sie nach einigen hundert Sonnenumläufen kaum noch als Kometen zu erkennen sind. Diese Zeitspanne ist deutlich kürzer als das Alter des Sonnensystems. Die langperiodischen Kometen werden zudem bei ihrer Durchquerung des inneren Bereichs des Sonnensystems von den großen Planeten, vor allem durch Jupiter, so stark gestreut, dass sie nur für wenige Durchgänge als ehemalige Mitglieder der Oortschen Wolke identifiziert werden können. Es ist also ein Mechanismus notwendig, der die heute noch sichtbaren Kometen aus ihren sonnenfernen Bahnen in Sonnennähe bringt. Für die kurzperiodischen Kometen aus dem Kuipergürtel vermutet man hierfür Kollisionen originärer Kuipergürtelobjekte, wodurch Bruchstücke ins Innere des Sonnensystems gelangen. Der Streuprozess langperiodischer Kometen ist noch nicht bekannt, es wird allerdings häufig der Einfluss vorbeiziehender Sterne oder noch nicht entdeckte Planeten (Planet X) beziehungsweise ein noch unbekannter Begleitstern der Sonne (Nemesis) als Ursache genannt.

Abgrenzung zu anderen Himmelskörpern

Die Unterscheidung zwischen Asteroiden und Kometen ist nicht immer ganz eindeutig. Man vermutet, dass einige der als Asteroiden klassifizierten Objekte mit stark elliptischen

Bahnen, zum Beispiel die Centauren, „ausgebrannte“ Kometenkern sind, die von einer dicken Schicht nichtflüchtiger Substanzen bedeckt sind. Andererseits wird das ursprünglich als Asteroid (2060) Chiron eingestufte Objekt seit der Entdeckung einer Koma als Komet klassifiziert und gemäß der Kometennomenklatur *95P/Chiron* genannt.

Heute wird der Begriff Komet sowohl im populärwissenschaftlichen als auch im wissenschaftlichen Sprachgebrauch entgegen seiner ursprünglichen Definition oft für alle vermutlich eisigen Kleinplaneten verwendet. Beispiele hierfür sind die Objekte des Kuipergürtels und der Oortschen Wolke, die zwar leichtflüchtige Substanzen enthalten, aber aufgrund ihrer Entfernung von der Sonne niemals stark genug erwärmt werden, um eine Koma zu bilden. Von solchen Objekten wird aber angenommen, dass ihr Aufbau eher den Kometenkernen gleicht als den Asteroiden aus dem Asteroidengürtel, aber erst bei Periheldistanzen innerhalb der Jupiterbahn ist die Sonnenstrahlung stark genug, dass durch einen Sublimationsprozess eine Koma gebildet werden kann.

Besonders erwähnenswerte Kometen



Einschlag des Impaktors der Deep-Impact-Sonde auf dem Kometen Tempel 1

- Der Halleysche Komet war der erste Komet, der (1705 von Edmond Halley) als periodisch erkannt wurde und dessen Kern von Raumsonden fotografiert werden konnte (1986).
- Der Komet Ikeya-Seki gilt als einer der hellsten Kometen des letzten Jahrtausends. Er erreichte im Oktober 1965 die rund 60-fache Helligkeit des Vollmondes und war tagsüber deutlich neben der Sonne sichtbar.
- Der Komet Hale-Bopp war von 1996 bis 1997 mehr als 18 Monate mit bloßem Auge sichtbar und hält damit den Rekord unter allen bekannten Kometen.
- Der Komet Wild 2 ist der erste Komet, aus dessen Koma von einer Sonde Teilchen eingesammelt wurden. Die Proben wurden im Jahre 2006 zur Erde zurückgebracht.
- Der Komet Tempel 1 wurde das Ziel der Deep Impact Mission der NASA, bei der am 4. Juli 2005 ein 372 kg schweres, hauptsächlich aus Kupfer bestehendes Projektil mit einer relativen Geschwindigkeit von 10 km/s auf dem Kometen einschlug. Mit der Sonde selbst und mit zahlreichen erdgestützten Teleskopen, aber auch mit dem Weltraumteleskop Hubble und der ESA-Raumsonde Rosetta wurde die entstandene Partikelstaubwolke beobachtet.
- Auf dem Kometen Tschurjumow-Gerasimenko soll 2014 während der Rosetta-Mission erstmals eine Sonde landen.
- Der Komet 17P/Holmes steigerte Ende Oktober 2007 seine scheinbare Helligkeit von 17 auf 2,5^{mag} innerhalb von etwa 36 Stunden. Der Komet, der plötzlich 500.000-mal heller als gewöhnlich erschien, war als auffälliges Objekt mit bloßem Auge am Himmel sichtbar.